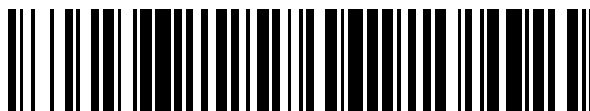


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 727 438**

51 Int. Cl.:

H02J 50/10 (2006.01)

H05B 6/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.05.2016** E 16171731 (9)

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **15.05.2019** EP 3101779

54 Título: **Controlador de fuente de tensión para un generador de campo magnético resonante en paralelo**

30 Prioridad:

01.06.2015 US 201514726903

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

16.10.2019

73 Titular/es:

**RESONANT CIRCUITS LTD (100.0%)
21 Albemarle Street
London W1S 4BS, GB**

72 Inventor/es:

**SOUTHERN, PAUL y
HATTERSLEY, SIMON RICHARD**

74 Agente/Representante:

SÁEZ MAESO, Ana

ES 2 727 438 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

Controlador de fuente de tensión para un generador de campo magnético resonante en paralelo

Campo de la invención

5 La invención se refiere en general a generadores de campo magnético para uso en calentamiento por inducción magnética o tratamiento de hipertermia y más específicamente a controladores para dichos generadores.

Antecedentes de la invención

10 Los generadores de campo magnético se utilizan para generar campos magnéticos alternos para usos domésticos o industriales de calentamiento por inducción o tratamientos de hipertermia. Un campo magnético alterno se produce al pasar una corriente alterna a través de una bobina. Los generadores de grandes campos magnéticos alternos emplean el principio de resonancia, en el que la energía pasa de un lado a otro a la frecuencia de resonancia característica entre el campo magnético asociado con la corriente en una bobina y el campo eléctrico asociado con la tensión a través de un condensador. La ventaja de esta técnica es que la fuente de alimentación solo necesita compensar las pérdidas, en lugar de suministrar toda la energía del campo magnético en cada ciclo. Hay dos configuraciones estándar de circuito utilizadas en esta técnica: resonante en serie y resonante en paralelo.

15 En un sistema de resonancia en serie, se hace operar a la bobina a la frecuencia deseada mediante un condensador colocado en serie con ella. En esta configuración, toda la corriente a través de la bobina también fluye por la fuente de alimentación, lo que se convierte en un factor limitante. Para obtener un campo grande (en volumen y/o intensidad) usando un flujo de corriente moderado se requiere una bobina de muchas vueltas, que tiene una alta inductancia. El efecto de la resonancia en serie es crear entonces una tensión extremadamente alta a través de la bobina, posiblemente alcanzando decenas de kilovoltios, lo que es un problema para el aislamiento y la capacidad del condensador, e incluso puede provocar una descarga de corona en el aire. La configuración de resonancia en serie se excita fácilmente mediante una fuente de tensión sencilla. Sin embargo, debido a las consideraciones de ingeniería y seguridad relacionadas con la alta tensión y la impracticabilidad del funcionamiento a altas frecuencias (por ejemplo, por encima de 100 kHz), la resonancia en serie no se prefiere para generar grandes campos magnéticos de alta frecuencia.

20 En un sistema de resonancia en paralelo, se hace operar a la bobina a la frecuencia deseada mediante un condensador colocado en paralelo con ella. En esta configuración, la resonancia amplifica la corriente que fluye en la bobina a niveles mucho más altos que la capacidad de la fuente de alimentación. Se puede crear un campo grande con una bobina de pocas vueltas y una inductancia relativamente baja, de modo que la tensión sea mucho menor que para la resonancia en serie, y se hace posible una operación a mayor frecuencia. Esta es la configuración preferida para generar grandes campos magnéticos de alta frecuencia, pero tiene el inconveniente de que convencionalmente se usan componentes inductivos (inductores correspondientes o transformadores de alta frecuencia) para proporcionar una fuente de corriente efectiva para excitarlo. Estos componentes añaden complejidad y pérdida de potencia, y también pueden provocar picos de tensión dañinos si la fuente de alimentación se desajusta de la resonancia.

35 El documento GB 2505278 describe un sistema de potencia inductivo en el que se utiliza una topología de clase E semi-resonante para controlar un circuito resonante de transmisor. El documento US 2002/0125244 analiza un dispositivo de rodillo de calentamiento por inducción.

Lo que se requiere es un controlador eficiente y de escala variable que sea capaz de producir un elevado campo magnético a alta frecuencia en una bobina de baja inductancia.

40 La presente invención aborda esta necesidad.

Resumen de la invención

45 La invención se refiere a un generador de campo magnético. En particular, la invención proporciona un generador de campo magnético y un método para generar un campo magnético como se establece en las reivindicaciones adjuntas. En una realización, el generador de campo magnético incluye un circuito de excitación que incluye un controlador de puerta MOSFET que tiene un terminal de salida, un condensador de excitación que tiene un primer terminal y un segundo terminal, un circuito de resonancia que incluye un condensador del circuito de resonancia que tiene un primer terminal y un segundo terminal y una bobina generadora de campo que tiene un primer terminal y un segundo terminal, en donde el primer terminal del condensador del circuito de resonancia y el primer terminal de la bobina generadora de campo comprenden el primer terminal del circuito de resonancia y en donde el segundo terminal del condensador del circuito de resonancia y el segundo terminal de la bobina generadora de campo comprenden el segundo terminal del circuito de resonancia, en donde el primer terminal del condensador de excitación está en comunicación eléctrica con el terminal de salida del controlador de la puerta MOSFET, de manera que la salida del controlador de la puerta MOSFET excita el condensador de excitación, y en donde el segundo terminal del condensador de excitación está en comunicación eléctrica con el primer terminal del circuito de resonancia. En una realización, el segundo terminal del circuito de resonancia está conectado a la tierra de la fuente de alimentación.

En otra realización, el circuito de excitación incluye una pluralidad de controladores de puerta MOSFET y una pluralidad de condensadores de excitación, en donde cada controlador de puerta MOSFET respectivo está en comunicación eléctrica con el primer terminal de un condensador de excitación respectivo, y en donde el segundo terminal de cada condensador de excitación respectivo está en comunicación eléctrica con el primer terminal del circuito de resonancia.

5 En otra realización, el circuito de excitación incluye además una bobina de detección posicionada para detectar la velocidad de cambio de la corriente en la bobina del campo magnético; un circuito integrador de bobina que tiene un terminal de entrada conectado a la bobina de detección y que tiene un terminal de salida; un circuito de compensación de retardo que tiene un terminal de entrada conectado al terminal de salida del circuito integrador de bobina y que tiene un terminal de salida; y un comparador que tiene un terminal de entrada conectado al terminal de salida del
 10 circuito de compensación de retardo y que tiene un terminal de salida, en donde el controlador de puerta MOSFET tiene un terminal de entrada conectado al terminal de salida del comparador. En una realización, la bobina de detección es una bobina de Rogowski y el integrador de bobina es un integrador de bobina de Rogowski.

En una realización, el condensador de excitación comprende una matriz de condensadores, en donde la matriz de condensadores incluye una o más cadenas de condensadores, en donde cada cadena de condensadores incluye uno
 15 o más condensadores conectados en serie, y en donde cada cadena de condensadores está conectada en paralelo a las otras cadenas de condensadores de la matriz. En otra realización, la matriz de condensadores es un único condensador. En otra realización, el segundo terminal del circuito de resonancia está conectado a una tierra común de la fuente de alimentación a través de una segunda matriz de condensadores de control. En otra realización más, la bobina generadora de campo incluye cable Litz que discurre a lo largo de una superficie exterior de un tubo de cobre.

20 Breve descripción de los dibujos

La estructura y la función de la invención pueden entenderse mejor a partir de la descripción en el presente documento junto con las figuras adjuntas. Las figuras no están necesariamente a escala, sino que en su lugar el énfasis generalmente se coloca en principios ilustrativos. Las figuras deben considerarse ilustrativas en todos los aspectos y no pretenden limitar la invención, cuyo alcance está definido solo por las reivindicaciones.

25 La Fig. 1 es un diagrama esquemático idealizado de una realización de un generador de campo magnético construido según la invención;

La Fig. 2A es un diagrama esquemático de la realización de un generador de campo magnético de la Fig. 1 que incluye pérdidas resistivas;

La Fig. 2B es el circuito equivalente de la Fig. 2A;

30 La Fig. 3 es un diagrama esquemático de una realización del generador de campo magnético de la invención;

La Fig. 4 es un diagrama en sección transversal de una realización de la bobina generadora de campo del circuito de resonancia de la invención, construida con cable Litz enrollado a lo largo de un tubo; y

La Fig. 5 es un diagrama en sección transversal de una realización de la bobina generadora de campo del circuito de resonancia de la invención, construida con un cable Litz colocado internamente en un tubo.

35 Descripción de una realización preferida

En una breve descripción general y con referencia a la Fig. 1, un generador 10 magnético construido según la invención genera un campo magnético sinusoidal al excitar un circuito 14 de resonancia utilizando una fuente 18 de tensión de onda cuadrada a través de una capacitancia 20 de excitación. El circuito 14 de resonancia incluye una bobina 22 generadora de campo y una capacitancia 26 de almacenamiento en paralelo. La fuente 18 de tensión de onda cuadrada está construida para excitar el circuito 14 de resonancia a su resonancia natural.
 40

Los comentaristas anteriores han declarado que la configuración de la Fig. 1 no es funcional debido a los grandes picos de corriente que se producen en los dispositivos de conmutación causados por el condensador 20 en serie con el circuito 14 de resonancia. Por ejemplo, el artículo "Study on a New Way of Load-matched for Voltage-Source Induction Heating Inverters", L. Jingang et al., ICIEA 2006, afirma: "La fuente de tensión de alimentación para el calentamiento por inducción generalmente requería la condición de que $R > r$. La topología de tipo LCL de la Fig. 2(c) no puede satisfacer esta demanda. Obviamente, corresponde al inversor que en la topología LCC de la Fig. 2(b) [Fig. 1 de esta solicitud de patente.] se de una carga de dos capacitancias en serie, lo que generará un impulso de corriente en los dispositivos de conmutación. Especialmente el cortocircuito instantáneo existente, no está permitido en el inversor de tensión". Los autores luego describen otra configuración LCL como una configuración preferida. La presente invención utiliza dispositivos MOSFET que están diseñados para controlar una carga capacitiva, operando a
 45 50 velocidades de conmutación reducidas para evitar grandes picos, evitando así daños a los dispositivos.

Para comprender el funcionamiento del circuito, considérese el circuito idealizado de la Fig. 1 cuando se incluyen las pérdidas del circuito. En el circuito idealizado de la Fig. 1, cuando se dejan de lado las pérdidas, la corriente alterna en el circuito 14 de resonancia aumentará indefinidamente mientras se inyecte energía al circuito de resonancia

mediante la fuente 18 de tensión de onda cuadrada. Si se tienen en cuenta las pérdidas relacionadas con la corriente en cada rama del circuito, se tiene como resultado el circuito que se muestra en la Fig. 2A, donde R_X 30, R_C 34 y R_L 38 son las pérdidas resistivas asociadas a la capacitancia C_X 20 de excitación, la capacitancia C_T 26 de almacenamiento del circuito de resonancia y la bobina L_T 22 del circuito de resonancia, respectivamente.

- 5 Para calcular la pérdida total de potencia y la frecuencia de resonancia de este circuito, el circuito de la Fig. 2A se simplifica a un circuito equivalente que se muestra en la Fig. 2B. Esto se logra incorporando cualquier resistencia de la tensión de excitación en la resistencia R_X en serie, y tratando la fuente de tensión $\pm V_X$ como de resistencia cero. La inductancia L_T es la misma que L en el circuito equivalente, C es la combinación en paralelo de C_X y C_T (vista desde la bobina) en el circuito equivalente y R es una combinación de R_X , R_C y R_L . Utilizando la terminología de la Fig. 2B, y suponiendo una amortiguación baja (factor Q alto), se demuestra fácilmente que:

$$L = L_T$$

$$C = C_T + C_X$$

$$R = R_L + \frac{R_X}{\left(1 + \frac{C_T}{C_X}\right)^2} + \frac{R_C}{\left(1 + \frac{C_X}{C_T}\right)^2}$$

La frecuencia de funcionamiento es cercana a la frecuencia natural para la capacitancia e inductancia equivalentes:

15
$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ donde } \omega \text{ es la frecuencia angular, } \omega = 2\pi f$$

- Una condición de estado estacionario de CA ocurre cuando el sistema ha funcionado durante un tiempo suficiente para que la amplitud pico de las formas de onda (I_p y V_p) de corriente y tensión en la bobina 22 de campo sean constantes. En este punto, la conservación de la energía requiere que la energía eléctrica suministrada desde el circuito 18 de excitación sea igual a la energía térmica perdida al ambiente. Todas las corrientes son casi sinusoidales, a pesar del hecho de que el circuito de excitación es una excitación de tensión de onda cuadrada, debido a la alta Q del sistema resonante.

La relación entre la tensión V_p de pico y la corriente I_p en la bobina 22' de campo es:

$$I_p = V_p \omega C = \frac{V_p}{\omega L}$$

La pérdida de potencia se determina a partir de la corriente de pico y de la resistencia equivalente:

25
$$P_{loss} = \frac{I_p^2 R}{2}$$

La potencia suministrada al circuito 14 de resonancia 14 se determina al integrar el producto de la tensión de excitación (onda cuadrada) y la corriente de excitación (onda sinusoidal que resulta de la gran tensión de resonancia aplicada a través de la capacitancia de excitación) durante medio ciclo:

$$I_X = V_p \omega C_X = I_p \frac{C_X}{C} \quad \text{pico de corriente de excitación}$$

30
$$P_{in} = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} V_X I_X \sin \omega t dt = \frac{\omega}{\pi} V_X I_X \left[\frac{-\cos \omega t}{\omega} \right]_0^{\frac{\pi}{\omega}} = \frac{2}{\pi} V_X I_X$$

$$\Rightarrow P_{in} = \frac{2}{\pi} V_X I_p \frac{C_X}{C}$$

En la práctica, en lugar de utilizar una tensión que conmuta simétricamente entre una tensión negativa y una positiva, es más conveniente usar una única fuente de alimentación V_S y conmutar entre 0 y V_S . El desfase de CC no importa por el acoplamiento capacitivo.

- 35 Sustituir $V_S = 2V_X$

$$\Rightarrow P_{in} = \frac{1}{\pi} V_S I_p \frac{C_X}{C}$$

Requiere $P_{loss} = P_{in}$

$$\Rightarrow \frac{I_p^2 R}{2} = \frac{1}{\pi} V_S I_p \frac{C_X}{C}$$

$$\Rightarrow I_p = \frac{2}{\pi} V_S \frac{C_X}{CR}$$

El pico de corriente en la bobina del campo es independiente de la inductancia, pero un cambio de inductancia alterará la frecuencia del circuito 14 de resonancia. En una realización, el condensador 26 de resonancia es mucho mayor que la capacitancia 20 de excitación para permitir que se desarrollen corrientes muy altas en una bobina 22 de baja inductancia. Un circuito construido según la invención puede operar con cualquier relación entre la capacitancia 20 de excitación y la capacitancia 26 de resonancia, moviéndose progresivamente desde la resonancia en paralelo hacia la resonancia en serie a medida que la capacidad 20 de excitación aumenta con relación a la capacitancia 26 de resonancia. Un mayor valor de la capacitancia 20 de excitación puede ser útil para aumentar la corriente en la bobina 22 sin usar una mayor tensión de alimentación, especialmente cuando se usan múltiples canales de excitación para repartir la corriente de excitación. En una realización, la bobina está construida con cable Litz, que se describe a continuación, lo que ayuda a mantener un alto factor Q al reducir las pérdidas por resistencia. En la realización examinada en el presente documento, el circuito utiliza controladores de puerta MOSFET que están acoplados capacitivamente al circuito 14 de resonancia en una topología de configuración híbrida.

Con referencia a la Fig. 3, una realización del circuito incluye un circuito 18' de tensión, una matriz 20' de condensadores de excitación y un circuito 14' de resonancia. Teniendo en cuenta cada componente por separado, la matriz 20' de condensadores de excitación, en una realización, incluye dos pares de condensadores 50, 50' y 54, 54' conectados en serie, cada par conectado en paralelo con el otro. Un terminal del conjunto de condensadores de excitación está conectado al circuito 18' de excitación y el otro terminal de la matriz 20' de condensadores de excitación está conectado a un terminal del circuito 14' de resonancia, como se explica a continuación. La razón de esto es duplicar tanto el nivel de tensión como el nivel de corriente en comparación con el uso de un solo condensador del mismo valor. Además, en una realización, una segunda matriz 60 de condensadores de excitación que incluye dos pares de condensadores 64, 64" y 66, 66' conectados en serie, cada par conectado en paralelo con el otro, está conectada a un segundo terminal del circuito 14' de resonancia (en AA' en el diagrama) para proporcionar un camino de retorno simétrico. En otras realizaciones, los canales de excitación adicionales están conectados en paralelo para suministrar los requisitos de potencia del generador.

El circuito 14' de resonancia incluye un condensador 26' conectado en paralelo con una bobina 22" generadora de campo magnético. En una realización, la bobina 22" generadora de campo magnético está construida de cable 23 Litz enrollado a lo largo de un tubo 24 de cobre (Fig. 4), para formar una bobina. Un fluido refrigerante pasa por el tubo. El beneficio de usar el cable Litz, donde el conductor se divide en muchos hilos finos y aislados urdidos en un patrón especial, es que minimiza tanto el efecto pelicular como el de proximidad. En los conductores en grueso convencionales, estos efectos constriñen a la corriente de alta frecuencia a circular en regiones limitadas de la sección transversal de los conductores, lo que aumenta drásticamente la resistencia. La Fig. 5 es otra realización más de una bobina generadora de campo magnético construida de cable 23 Litz que discurre dentro de un tubo 25 no conductor, tal como plástico, que forma una bobina y a través de la cual pasa un fluido 27 refrigerante no conductor, tal como agua destilada o aceite.

En una realización, el circuito 18' de excitación incluye una bobina 68 de detección, un circuito 70 integrador de bobina, un circuito 80 opcional de compensación de retardo, un circuito 90 comparador y un circuito 100 de controlador de puerta MOSFET. Considerando cada uno por separado, la bobina de detección está posicionada para monitorear el flujo de corriente a través de la bobina 22' de campo. En una realización, la bobina de detección es una bobina de Rogowski. En una realización, la bobina 68 de detección está enrollada alrededor de un terminal de la bobina 22" de campo o de los cables que van a ese terminal. En una realización, la tensión inducida en la bobina 68 de detección, que es proporcional a la velocidad de cambio de la corriente en el conductor monitoreado, es una señal de entrada para el circuito 70 integrador de la bobina.

La salida del integrador 70 de la bobina de detección que representa la corriente en la bobina 22' de campo se conecta a la entrada positiva de un amplificador 82 operacional de alta velocidad ADA4899 (Analog Devices Incorporated, Norwood, MA, EE. UU. 02062) que se utiliza como circuito 80 de compensación de retardo. El terminal de salida del amplificador 82 operacional de alta velocidad está conectado a la entrada negativa de un segundo amplificador 92 operacional ADA4899 a través de una red 84 de condensadores de resistencia que incluye una resistencia 86 variable. La resistencia 86 variable se utiliza para establecer un avance de fase dependiente de la frecuencia que es equivalente a un retardo negativo. Esto compensa el tiempo de conmutación del controlador 100 de puerta MOSFET, mejorando el rendimiento. La señal de salida del circuito 80 de compensación de retardo es una señal de entrada al circuito 90 comparador lineal de alta velocidad. En otra realización, el circuito 80 de compensación de retardo no se utiliza, y la salida del integrador 70 es la entrada del circuito 90 de comparador.

En una realización, el circuito 90 comparador lineal de alta velocidad incluye un comparador 92 de alta velocidad LT1719 (Linear Technology Corporation, Milpitas, CA, EE. UU., 95035-7417). La señal de salida del circuito 80 de compensación de retardo está conectada al terminal de entrada negativa del comparador 92 de alta velocidad. La entrada 93 positiva del comparador está normalmente al potencial de tierra, pero puede pulsarse a un potencial más alto mediante un botón para iniciar la resonancia de la bobina. La comparación que resulta del valor de la señal del circuito de compensación 80 de retardo y del potencial de tierra de cero voltios es la señal de salida del comparador 90 que genera la onda cuadrada.

La salida del comparador 90, en una realización, es la señal de entrada a un controlador 100 de puerta MOSFET IXD630 (IXYS Integrated Circuits Division, Beverly, MA EE. UU. 01915-1048). Este dispositivo funciona con una

tensión de alimentación V_s en el intervalo de 12,5 V a 35 V. Las altas tensiones solo se producen en el lado opuesto del condensador 20' de excitación que está conectado al circuito 14' de resonancia. La alimentación se suministra al controlador 100 de puerta MOSFET a través de un banco de condensadores situado cerca del dispositivo para minimizar las perturbaciones del riel de alimentación cuando el dispositivo conmuta. Los diodos Zener entre el terminal de salida y los rieles de alimentación protegen el controlador 100 si se retira la fuente de alimentación del circuito mientras el circuito resonante aún está oscilando.

En funcionamiento, la corriente medida por la bobina 68 de detección y por su integrador 70 de bobina asociado se avanza una cantidad establecida por el circuito 80 de compensación de retardo. La salida del circuito 80 de compensación de retardo se compara entonces con cero voltios con un comparador 90 de alta velocidad. Por lo tanto, siempre que la corriente medida por el subsistema de bobina de detección vuelva a cruzar el cero, la salida del comparador 90 conmutará, generando una onda cuadrada. La salida del comparador 90 es la entrada a un controlador 100 de puerta MOSFET. La salida del controlador 100 de puerta MOSFET excita el conjunto 20' de condensadores. Un segundo terminal del conjunto 20' de condensadores está conectado al circuito 14' de resonancia.

Aunque el circuito se muestra y se describe como que tiene un controlador de puerta MOSFET, en otra realización, el circuito de excitación incluye una pluralidad de controladores de puerta MOSFET y una pluralidad de condensadores de excitación. En esta realización, cada controlador 100 de puerta MOSFET está en comunicación eléctrica con el primer terminal de un condensador 20' de excitación respectivo. El segundo terminal de cada condensador de excitación respectivo está en comunicación eléctrica con el primer terminal del circuito de resonancia. La capacidad de agregar más canales de excitación en paralelo permite que el circuito se amplíe a niveles de campo más altos según sea necesario.

Esta configuración del generador de campo magnético permite que el controlador 100 de puerta tolere cualquier pico de corriente o de tensión resultante causado por la conmutación del circuito 14' de resonancia.

A menos que se indique lo contrario, todos los números que expresan longitudes, anchuras, profundidades u otras dimensiones, y en adelante utilizados en la especificación y en las reivindicaciones deben entenderse en todos los casos como indicadores tanto de los valores exactos según se muestran como de los modificados por los términos "aproximadamente" o "sustancialmente". Por consiguiente, a menos que se indique lo contrario, los parámetros numéricos expuestos en la especificación y en las reivindicaciones adjuntas son aproximaciones que pueden variar dependiendo de las propiedades deseadas que se busca obtener. Se contemplan variaciones de diversos parámetros de $\pm 10\%$.

Cuando se proporciona un intervalo o lista de valores, cada valor intermedio entre los límites superior e inferior de ese intervalo o lista de valores se contempla individualmente y se incluye dentro de la invención como si cada valor se enumerara específicamente en el presente documento. Además, dentro de la invención se contemplan e incluyen intervalos más pequeños entre, e incluidos, los límites superior e inferior de un intervalo dado. La lista de valores o intervalos de ejemplo no es una renuncia de reivindicación de otros valores o intervalos entre, e incluidos, los límites superior e inferior de un intervalo determinado.

Debe entenderse que el orden de los pasos u orden para realizar ciertas acciones es irrelevante siempre que las enseñanzas actuales sigan siendo operables. Además, dos o más pasos o acciones pueden llevarse a cabo simultáneamente.

Se debe interpretar que los términos "un", "uno", "una", "unos", "unas", "el", "la", "los", "las" y referentes similares utilizados en el contexto de la descripción de la invención (especialmente en el contexto de las siguientes reivindicaciones) cubren tanto el singular como el plural, a menos que se indique lo contrario en el presente documento o sea claramente contradicho por el contexto. Todos los métodos descritos en el presente documento pueden realizarse en cualquier orden adecuado a menos que se indique lo contrario en el presente documento o de otro modo el contexto lo contradiga claramente. El uso de todos y cada uno de los ejemplos, o el lenguaje ejemplar (por ejemplo, "tal como") proporcionado en el presente documento pretende meramente ilustrar mejor la invención y no plantea una limitación en el alcance de ninguna reivindicación. Ningún lenguaje en la especificación debe interpretarse como un indicador de ningún elemento no reivindicado esencial para la práctica de la invención.

Las variaciones en las realizaciones descritas serán evidentes para los expertos en la técnica al leer la descripción anterior. Los inventores esperan que los expertos en la técnica empleen dichas variaciones según sea apropiado, y los inventores pretenden que la invención se ponga en práctica de manera diferente a la descrita específicamente anteriormente. Además, se contempla cualquier combinación de los elementos descritos anteriormente en todas las variaciones posibles de los mismos, a menos que se indique lo contrario en el presente documento o que el contexto lo contradiga claramente.

A lo largo de la solicitud, cuando se describe que las composiciones tienen, incluyen o comprenden componentes específicos, o cuando se describe que los procesos tienen, incluyen o comprenden etapas de proceso específicas, se contempla que las composiciones de las presentes enseñanzas también consisten esencialmente en, o consisten en, los componentes enumerados, y que los procesos de las presentes enseñanzas también consisten esencialmente en, o consisten en, los pasos del proceso enumerados.

Para concluir, debe entenderse que las realizaciones descritas en el presente documento son ilustrativas de los principios de las reivindicaciones. Así, a modo de ejemplo, pero no de limitación, pueden utilizarse realizaciones alternativas según las enseñanzas del presente documento. Por consiguiente, las reivindicaciones no se limitan a realizaciones precisamente como se muestran y describen.

REIVINDICACIONES

1. Un generador de campo magnético que comprende:
un circuito (18') de excitación que comprende un controlador (100) de puerta MOSFET que tiene un terminal de salida;
un circuito (14') de resonancia que comprende:
 - 5 una primera terminal y una segunda terminal;
un condensador (26') de circuito de resonancia que tiene un primer terminal y un segundo terminal;
una bobina (22'') generadora de campo magnético que tiene un primer terminal y un segundo terminal,
en donde el primer terminal del condensador del circuito de resonancia y el primer terminal de la bobina generadora de campo magnético comprenden el primer terminal del circuito de resonancia,
 - 10 en donde el segundo terminal del condensador del circuito de resonancia y el segundo terminal de la bobina comprenden el segundo terminal del circuito de resonancia; y
un condensador (20') de excitación que tiene un primer terminal y un segundo terminal en donde el segundo terminal del condensador de excitación está en comunicación eléctrica con el primer terminal del circuito de resonancia,
 - 15 caracterizado por que el primer terminal del condensador de excitación está en comunicación eléctrica con el terminal de salida del controlador (100) de la puerta MOSFET, de tal manera que la salida del controlador de la puerta MOSFET excita el condensador de excitación.
2. El generador de campo magnético de la reivindicación 1, en donde el circuito de excitación comprende además:
una bobina (68) de detección posicionada para detectar la velocidad de cambio de la corriente en la bobina generadora de campo magnético;
 - 20 un circuito (70) integrador de bobina que tiene un terminal de entrada conectado a la bobina de detección y que tiene un terminal de salida;
y
un comparador (90) que tiene un terminal de entrada conectado al terminal de salida del circuito integrador de bobina y que tiene un terminal de salida,
 - 25 en donde el controlador (100) de puerta MOSFET tiene un terminal de entrada en comunicación eléctrica con el terminal de salida del comparador.
3. El generador de campo magnético de la reivindicación 2, en donde la bobina (68) de detección es una bobina de Rogowski.
4. El generador de campo magnético de la reivindicación 2 o de la 3, que comprende además un circuito (80) de compensación de retardo conectado entre el circuito integrador de bobina y el circuito comparador, teniendo el circuito de compensación de retardo un terminal de entrada conectado al terminal de salida del circuito integrador de bobina y teniendo un terminal de salida conectado al terminal de entrada del circuito comparador.
 - 30 5. El generador de campo magnético de la reivindicación 4, en donde el compensador de retardo incluye una resistencia (86) variable para ajustar el tiempo de conmutación del controlador (100) de puerta MOSFET.
6. El generador de campo magnético de cualquier reivindicación precedente, en donde el circuito de excitación incluye una pluralidad de controladores (100) de puerta MOSFET, cada uno de los cuales está en comunicación eléctrica con el primer terminal del respectivo de una pluralidad de condensadores de excitación, en donde el segundo terminal de cada condensador de excitación está en comunicación eléctrica con el primer terminal del circuito de resonancia.
 - 35 7. El generador de campo magnético de cualquier reivindicación precedente, en donde el segundo terminal del circuito de resonancia está conectado a la tierra de una fuente de alimentación.
 - 40 8. El generador de campo magnético de cualquier reivindicación precedente,
en donde el condensador de excitación comprende una matriz (20') de condensadores,
en donde la matriz de condensadores comprende una o más cadenas de condensadores,
en donde cada cadena de condensadores comprende uno o más condensadores (50, 50', 54, 54') conectados en serie, y
 - 45

en donde cada cadena de condensadores está conectada en paralelo a las otras cadenas de condensadores de la matriz de condensadores.

5 9. El generador de campo magnético de cualquier reivindicación precedente, en donde el segundo terminal del circuito de resonancia está conectado a una fuente de alimentación a través de una segunda matriz (60) de condensadores de excitación.

10. El generador de campo magnético de cualquier reivindicación precedente, en donde la bobina (22'') generadora de campo comprende cable Litz (23) enrollado a lo largo de un tubo (24) de cobre configurado para permitir que un fluido refrigerante pase a través del tubo de cobre.

10 11. El generador de campo magnético de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, en donde la bobina generadora de campo comprende un cable Litz dentro de un tubo (25) no conductor para formar una bobina y configurado para permitir que un fluido de refrigeración no conductor pase a través del tubo no conductor.

15 12. Un método para generar un campo magnético en un circuito que comprende: un circuito (14') de resonancia que comprende una bobina (22'') generadora de campo, el circuito de resonancia conectado en serie a un primer terminal de una matriz (20') de condensadores de excitación, estando el segundo terminal de la matriz de condensadores de excitación conectado a un terminal de salida de un controlador (100) MOSFET, comprendiendo el método los pasos de:

utilizar la salida del controlador de puerta MOSFET para excitar el condensador de excitación al

proporcionar una tensión de onda cuadrada al conjunto de condensadores de excitación utilizando el controlador MOSFET; y

20 proporcionar la salida del condensador de excitación como una tensión de entrada al circuito de resonancia desde la matriz de condensadores de excitación para excitar la resonancia del circuito de resonancia y, por lo tanto, hacer que la bobina generadora de campo genere un campo magnético.

25 13. El método de la reivindicación 12, que comprende además la etapa de conmutar el controlador MOSFET en respuesta a una comparación de una señal que responde al campo magnético generado con una tensión que es substancialmente cero voltios.

14. El método de la reivindicación 13, en donde la tensión de referencia se pulsa alejándola de cero voltios para iniciar la oscilación.

15. El método de la reivindicación 13 o de la 14, que comprende además la etapa de generar una señal compensada por retardo al aplicar un avance de fase ajustable a una señal integrada desde una bobina de detección.

30

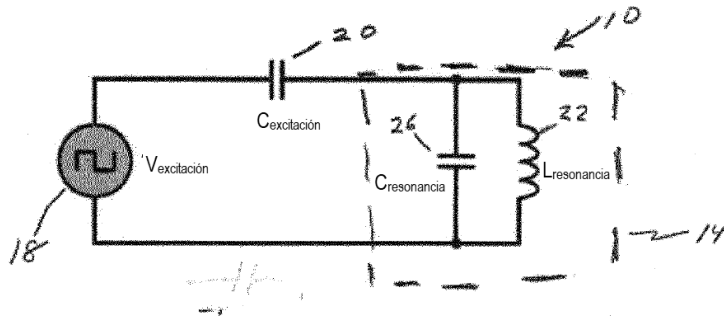


Fig. 1

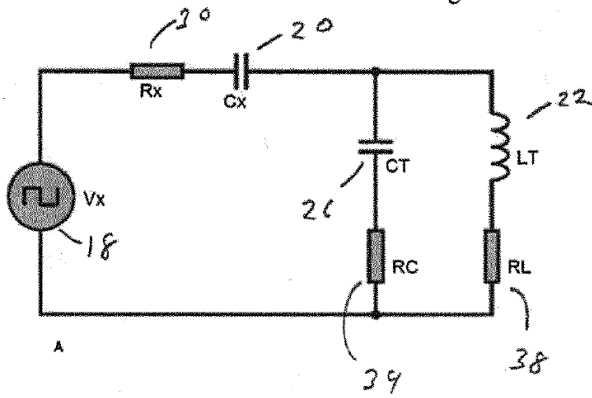


Fig. 2A

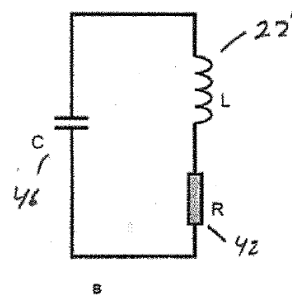


Fig. 2B

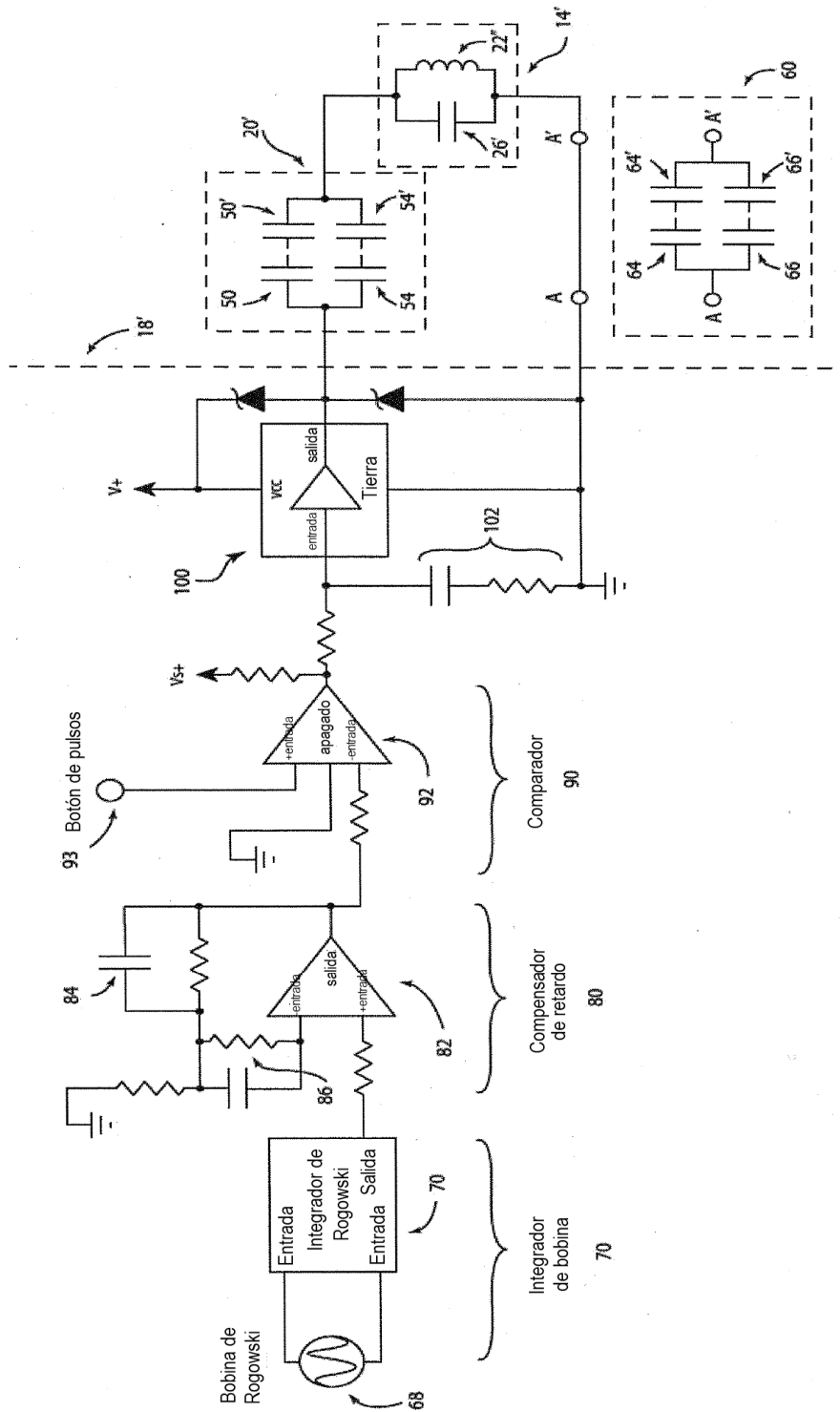


Fig. 3

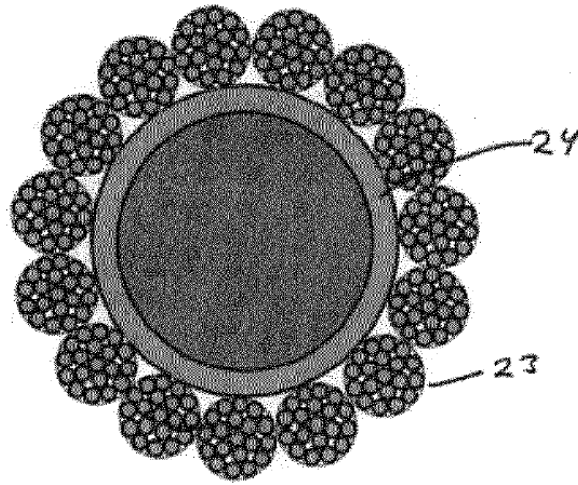


Fig. 4

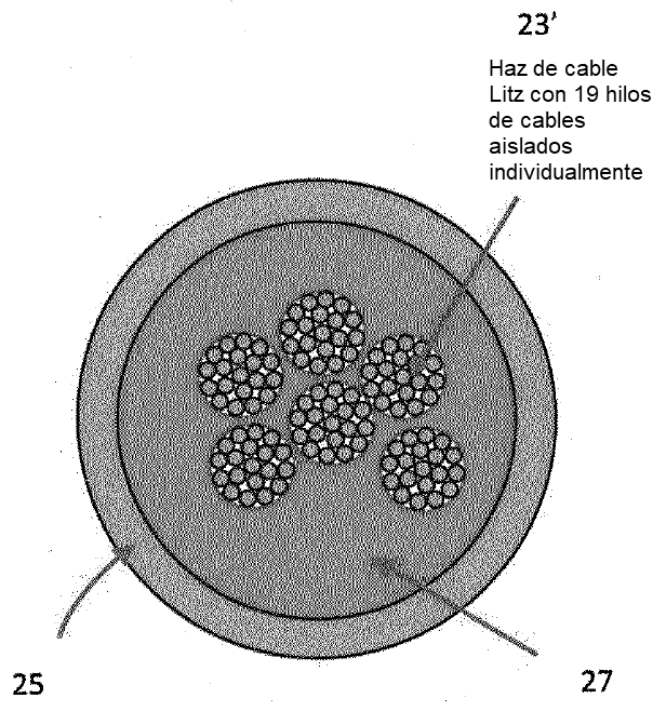


Fig. 5