

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 729 856**

51 Int. Cl.:

H02M 7/48 (2007.01)
G21B 1/00 (2006.01)
G21D 7/00 (2006.01)
H02M 5/45 (2006.01)
H02M 5/458 (2006.01)
H02J 3/38 (2006.01)
H05H 15/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **29.06.2009 PCT/US2009/049108**
87 Fecha y número de publicación internacional: **30.12.2009 WO09158720**
96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.06.2009 E 09771251 (7)**
97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.03.2019 EP 2297841**

54 Título: **Circuito para la extracción de energía directa de un haz de partículas cargadas**

30 Prioridad:

27.06.2008 US 76535 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
06.11.2019

73 Titular/es:

**THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA (100.0%)
1111 Franklin Street, 12th Floor
Oakland, CA 94607, US**

72 Inventor/es:

**SMEDLEY, KEYUE;
WESSEL, FRANK;
GU, MINGYING y
JEONG, IN, WHA**

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 729 856 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

Circuito para la extracción de energía directa de un haz de partículas cargadas

5 Campo de la invención

La invención se refiere en general a circuitos eléctricos y, más en particular, a un circuito eléctrico que facilita la extracción de energía de las partículas cargadas como resultado de una reacción de fusión controlada y envía la energía a la red eléctrica con un factor de potencia de unidad, factor de potencia principal, o factor de potencia rezagado a pedido.

Información de antecedentes

La generación de potencia de fusión controlada abrirá la puerta a fuentes de energía abundantes y limpias. Este tema ha atraído importantes esfuerzos de investigación en los Estados Unidos y el mundo. Los enfoques informados se basan normalmente en la conversión de energía de fusión en energía térmica y luego en energía eléctrica.

En un enfoque alternativo descrito en la Patente de Estados Unidos n.º 6.611.106 (la patente '106) así como en su miembro de la familia WO/02082873, titulado "Fusión controlada en un campo de configuración invertida y conversión de energía directa", energía de fusión controlada, transportada por haces de partículas cargadas en forma de impulso, se puede convertir directamente en electricidad al desacelerar las partículas cargadas utilizando un convertidor de ciclotrón inverso cuadrópolo (ICC). Por lo tanto, se espera una mayor conversión de energía. Se necesita una tecnología clave que extraiga la energía del ICC y la inyecte a la red de servicio público.

Por consiguiente, sería deseable proporcionar un circuito electrónico de potencia utilizado para desacelerar las partículas de plasma, extraer la energía de la acción de desaceleración, convierta la energía del plasma directamente a energía eléctrica y envíe la electricidad a la red eléctrica.

Por consiguiente, en un primer aspecto de la presente invención se proporciona un circuito de extracción de energía para extraer energía de un haz de partículas cargadas de acuerdo con la reivindicación 1, y en un segundo aspecto de la presente invención se proporciona un método para extraer energía de partículas cargadas de haces de partículas cargadas según la reivindicación 11.

Las realizaciones preferentes de la invención se definen en las respectivas reivindicaciones dependientes.

Sumario

Las realizaciones a modo de ejemplo de un dispositivo de circuito de extracción de energía de fusión (FEEC) descritas aquí representan solo unos pocos ejemplos de las muchas implementaciones posibles del dispositivo FEEC y no tienen la intención de limitar el tema de la presente descripción.

El dispositivo de la invención comprende un componente convertidor bidireccional conectado a la red y un componente convertidor resonante. El componente convertidor bidireccional puede implementar la fase principal, fase retrasada, o convertidores de factor de potencia de unidad conectados a la red para diferentes propósitos.

El convertidor resonante comprende un convertidor de ciclotrón inverso (ICC), un inductor y una pluralidad de conmutadores de circuito que forman un puente que corta la tensión de CC a una forma de onda de pulso. El ICC está configurado con dos o más placas o placas cuadrupolares que funcionan como un condensador junto con un inductor para actuar como un tanque resonante. Las placas se alargan con una sección transversal arqueada que forma una cámara cilíndrica anular alargada con huecos alargados que se extienden axialmente entre las placas.

Durante la puesta en marcha del dispositivo FEEC, la energía fluye desde la red de servicio público a través del componente del convertidor bidireccional vinculado a la red al convertidor resonante. Esto establece la resonancia y excita el campo eléctrico del cuadrupolo formado a través de los huecos entre las placas. Durante la generación de energía o extracción de energía, partículas cargadas de partículas de carga desde, por ejemplo, un proceso de fusión es desacelerado por el campo eléctrico cuadrupolo a medida que los haces de partículas viajan a través del ICC. También durante la generación de energía, la energía perdida será recogida por las placas cuadrupolares del ICC en forma de una corriente de imagen. La corriente de imagen fluirá luego a través del convertidor resonante y el componente del convertidor bidireccional vinculado a la red de servicio público.

El convertidor conectado a la red funciona como un rectificador de CA/CC durante el tiempo de inicio y como un inversor conectado a la red de CC/CA durante la generación de energía. En ambos casos, el convertidor conectado a la red operará con un factor de potencia unitario, factor de potencia principal, o factor de potencia retardado para proporcionar potencia activa y potencia reactiva (VAR) a pedido.

Para realizar la excitación del campo eléctrico y la extracción de energía, la frecuencia de resonancia y la tensión del

convertidor de resonancia son preferiblemente controladas con precisión. La frecuencia en este caso se fija ligeramente por encima de la frecuencia de resonancia del tanque de resonancia, mientras que el control de tensión se puede lograr cambiando la modulación del patrón y la regulación de retroalimentación. Dos métodos de modulación, modulación de cambio de fase (PSM) y modulación de ancho de pulso (PWM), son capaces de proporcionar control de tensión. La regulación de la retroalimentación se logra comparando la tensión resonante detectada con una referencia, mientras que su error se usa para modular la fase o el ancho de pulso de los conmutadores en el convertidor resonante. Con esta modulación, se garantiza el flujo automático de energía bidireccional según el modo de operación.

En una realización alternativa del dispositivo FEEC, el conductor resonante puede implementar múltiples inductores de ferrita conectados en serie para optimizar el funcionamiento del dispositivo FEEC. Los inductores resonantes conectados en serie tienen varias ventajas sobre un único inductor resonante.

La regulación de la retroalimentación se logra comparando la tensión resonante detectada con una referencia, mientras que su error se usa para modular la fase o el ancho de pulso de la pluralidad de conmutadores en el convertidor resonante.

En otra realización a modo de ejemplo, se puede utilizar un circuito de control de retroalimentación del convertidor resonante para facilitar el flujo de potencia bidireccional automático. El circuito de control de retroalimentación está compuesto por un circuito de detección de tensión resonante, un compensador de errores y un generador de pulsos PWM o PSM.

Otros sistemas, métodos, características y ventajas de la divulgación se harán o devendrán evidentes para una persona normalmente experta en la materia tras el examen de las siguientes figuras y la descripción detallada.

25 Breve descripción de las figuras

Los detalles de la invención, incluida la fabricación, estructura y funcionamiento, pueden ser recogidos en parte por el estudio de las figuras que se acompañan, en el que los números de referencia similares se refieren a partes similares. Los componentes en las figuras no están necesariamente a escala, por el contrario, el énfasis se pone en la ilustración de los principios de la invención. Más aún, todas las ilustraciones están destinadas a transmitir conceptos, donde los tamaños relativos, las formas y otros atributos detallados pueden ilustrarse de forma esquemática en lugar de literal o precisamente.

La figura 1 es un esquema de un circuito de extracción de energía de fusión (FEEC).

La figura 2 es un esquema de un circuito convertidor resonante con una fuente de corriente de imagen equivalente.

La figura 3 es una gráfica que muestra una gráfica de Bode del tanque resonante paralelo.

La figura 4 es un gráfico que muestra la ilustración del método de modulación de ancho de pulso.

La figura 5 es un gráfico que muestra un mecanismo de generación de modulación de ancho de pulso.

La figura 6 es un gráfico que proporciona una ilustración de modulación de cambio de fase.

La figura 7 es un esquema de un circuito de generación de modulación de cambio de fase.

La figura 8 es un esquema de un circuito de retroalimentación del circuito de extracción de energía de fusión.

La figura 9 es un esquema de un circuito de detección de tensión resonante.

La figura 10 es un gráfico que muestra un resultado de simulación para la forma de onda dinámica del flujo de potencia que responde a la inyección de la partícula.

La figura 11 es un gráfico que muestra los resultados experimentales de la tensión resonante en el condensador (emulando las placas cuádruples).

Descripción detallada

Los sistemas y métodos descritos aquí se dirigen a una extracción de energía de fusión directa.

La figura 1 es un diagrama de bloques que representa una realización preferida del dispositivo 100 del circuito de extracción de energía de fusión (FEEC). El dispositivo FEEC 100 está compuesto por un componente de convertidor bidireccional conectado a la red 110 y un convertidor de resonancia 120. En una realización preferida del dispositivo FEEC 100 en la figura 1, el componente del convertidor bidireccional 110 implementa un convertidor trifásico conectado a la red 112. Sin embargo, se aprecia que el componente del convertidor bidireccional 110 puede implementar diferentes conversores de factor de fase vinculados a la red para diferentes propósitos. Por ejemplo, se puede implementar un convertidor de red monofásico (no mostrado) para aplicaciones de menor potencia.

En una realización preferida del dispositivo FEEC 100, el convertidor resonante 120 comprende un convertidor de ciclotrón inverso (ICC) 122 y una pluralidad de conmutadores S1-S4. El ICC 122, que se describe con mayor detalle en la patente '106, se configura con una pluralidad de placas 124 mostradas en esta instancia no limitativa en una configuración cuádrupolar. Las placas de cuádrupolo 124 del ICC 122 funcionan como un condensador y, junto con un inductor L, forman un tanque resonante 130, como se describirá con mayor detalle más adelante. Las placas 124 están alargadas con una sección transversal arqueada que forma una cámara cilíndrica anular alargada con huecos alargados que se extienden axialmente entre las placas. Cuando se aplica corriente a la placa, se forma un campo

eléctrico multipolar a través de los espacios entre las placas.

Durante el arranque del dispositivo, la energía fluye desde la red de servicio público 114 a través del componente del convertidor bidireccional conectado a la red 110 al convertidor resonante 120 para establecer la resonancia y excitar el campo eléctrico cuadrupolo del convertidor resonante 120. Durante la generación de energía/extracción de energía, haces de partículas cargadas de, tales como, por ejemplo, un proceso de fusión, viajan a través del ICC 122 y son desacelerados por el campo eléctrico cuadrupolo formado a través de los huecos entre las placas 124 del ICC 122. También durante la generación/extracción, la energía perdida será recogida por las placas cuadrupolo 122 en forma de corriente de imagen i_s . La corriente de imagen i_s entonces fluirá a través del convertidor resonante 120 y el componente del convertidor bidireccional vinculado a la red 110 a la red 114. El convertidor conectado a la red 110 funciona como un rectificador de CA/CC durante el tiempo de inicio y como un inversor conectado a la red de CC/CA durante el tiempo de generación. En ambos casos, el convertidor conectado a la red 110 operará con un factor de potencia unitario, factor de potencia principal, o factor de potencia retardado para proporcionar potencia activa y potencia reactiva (VAR) a pedido.

Para que el convertidor resonante 120 realice la excitación del campo eléctrico y la extracción de energía, es preferible que la frecuencia de resonancia y la tensión se controlen con precisión. La frecuencia en este caso se fija ligeramente por encima de la frecuencia de resonancia del tanque resonante 130 para asegurar una conmutación suave de tensión cero, mientras que el control de tensión se puede lograr cambiando la modulación del patrón y la regulación de retroalimentación. Dos métodos de modulación, la modulación de cambio de fase (PSM) y la modulación de ancho de pulso (PWM) se examinan a continuación. Ambos son capaces de la tarea de control de tensión; no obstante, el método PSM produce un rango de operación más amplio para la maniobra dinámica. La regulación de la retroalimentación se logra comparando la tensión resonante detectada con una referencia, mientras que su error se usa para modular la fase o el ancho de pulso de los conmutadores S1-S4 en el convertidor resonante 120. Con esta modulación, se garantiza el flujo automático de energía bidireccional según el modo de operación.

La figura 2 es un diagrama esquemático que representa una realización a modo de ejemplo del convertidor resonante 120, donde la tensión CC v_{cc} se proporciona mediante el convertidor bidireccional conectado a la red 110 (v_{cc} también se ilustra en la figura 1). En el presente documento, el convertidor resonante 120 incluye una pluralidad de conmutadores S1, S2, S3 y S4. Los conmutadores S1, S2, S3 y S4 forman un puente que corta la tensión CC v_{cc} a una forma de onda de impulso v_{AB} a través de AB a una frecuencia de conmutación f_s , que es mucho más alta que la frecuencia de la red de servicio público 114. Un condensador C representa las placas de cuadrupolo 124 del ICC 122. Como se indicó antes, el condensador C y el inductor L forman el tanque resonante 130. Solo lo fundamental de v_{AB} pasará el tanque resonante 130, donde gana $H(s)$, y aparecerá a través de las placas del cuadrupolo 124 como una forma de onda sinusoidal v_s . La fuente de corriente i_s representa la corriente de imagen corregida cuando las partículas cargadas se desaceleran, y la resistencia R_C representa las pérdidas de calor y radiación de las partículas cargadas.

La ganancia $H(s)$ del tanque resonante es:

$$H(s) = \frac{\frac{1}{sC} // R_C}{sL + \frac{1}{sC} // R_C} = \frac{1}{s^2 LC + s \frac{L}{R_C} + 1} \quad (1)$$

Por lo tanto, la magnitud (ganancia de tensión) es:

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(1-\omega^2 LC)^2 + (\frac{\omega L}{R_C})^2}} \quad (2)$$

La frecuencia de amplitud máxima es ω_m , a cuya frecuencia la tensión de salida tiene el valor máximo:

$$\omega_m = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{CR_C}\right)^2} \quad (3)$$

Para el dispositivo FEEC 100, R_C es normalmente muy grande, por lo tanto:

$$\omega_m = \omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4)$$

La figura 3 ilustra una gráfica de bode del tanque resonante paralelo 130. La ganancia máxima aparece

aproximadamente en la frecuencia de resonancia ω_r . Otro parámetro importante para el circuito resonante es el factor de calidad Q:

$$Q = \frac{R_C}{R_0} \quad (5)$$

5 donde R0 es la impedancia característica del tanque resonante 130:

$$R_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (6)$$

10 Por lo tanto:

$$Q = \frac{R_C}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \quad (7)$$

15 A partir de la ecuación (7), se observa que una R_C más grande da como resultado una Q más alta y una pendiente más pronunciada del cambio en la ganancia de tensión de la resonancia.

Como se ha mencionado antes, El control de tensión de salida del convertidor resonante 120 se puede lograr cambiando la modulación del patrón y la regulación de retroalimentación. Tanto la modulación de cambio de fase (PSM) como la modulación de ancho de pulso (PWM) son capaces de la tarea de control de tensión.

20 Modulador de ancho de pulsos (PWM): Con PWM, se ajustan los anchos de pulso de los conmutadores S1, S2, S3, y S4 en las dos patas. La diferencia de tensión resultante está en una forma de escalera cuyo componente fundamental es ajustable por el ancho del pulso.

25 La figura 4 muestra la forma de onda del pulso de disparo para todos los conmutadores S1, S2, S3 y S4 ilustrados en la figura 2. El tiempo de encendido de los conmutadores S₁ y S₂ se ajusta entre 0-50 %. Los conmutadores S₄ y S₃ son complementarios a los conmutadores S₁ y S₂ respectivamente. La figura 4 también ilustra la forma de onda del pulso de tensión en los nodos A (v_A) y B (v_B) de la realización del circuito ilustrado en la figura 2.

30 El fundamental de la tensión de puente v_{AB} (como se ilustra en la figura 4) se expresa de la siguiente manera:

$$v_{AB1} = \frac{600}{\pi} \text{sen}(\pi D) \cos\left(\frac{2\pi}{T_s} t - \pi D\right) \quad D < 0,5$$

35 Las señales de disparo apropiadas para todos los conmutadores pueden realizarse mediante un circuito simple y de uso frecuente.

Cómo se describe en la figura 5, dos ondas de diente de sierra 151 y 152, cuyo desplazamiento de fase es igual a T_s/2, se comparan con la misma señal de control V_C. La relación de trabajo D es igual a la porción de tiempo cuando V_C es mayor que la magnitud del diente de sierra. Los dos pulsos resultantes se utilizan para activar los conmutadores MOSFET S₁ y S₂, respectivamente. Como se ha mencionado antes, los conmutadores S₄ y S₃ son activados por las señales complementarias de los conmutadores S₁ y S₂, respectivamente. Se observa que la relación de trabajo D solo se puede variar entre 0-50 %. En un ejemplo preferente, el convertidor resonante 120 está configurado con los conmutadores MOSFET S1-S4. Se aprecia que el convertidor resonante 120 se puede configurar con varios conmutadores de circuito que obtendrían el mismo resultado.

45 Modulación de cambio de fase (PSM): En el método PSM, la tensión de salida del convertidor resonante 120 se regula ajustando la diferencia de fase entre los pulsos de disparo y los conmutadores de las dos patas. La figura 6 ilustra las formas de onda PSM típicas de la red de conmutación, donde α es el cambio de fase entre las patas A y B. Tenga en cuenta que el ancho de pulso de los conmutadores no cambia. A medida que cambia α, el ancho de pulso de la tensión del puente v_{AB} cambia. En consecuencia, el componente fundamental cambia y la tensión de resonancia v_S está regulada. El fundamental de la tensión de puente v_{AB} es una función de:

$$v_{AB} = \frac{600}{\pi} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \text{sen}\left(\frac{2\pi}{T_s} t\right) \quad 0 \leq \alpha \leq \pi$$

55 Está claro que el cambio de fase α puede controlar la amplitud de v_{AB}.

La figura 7 ilustra una realización a modo de ejemplo de un circuito capaz de implementar un cambio de fase ajustable entre v_A y v_B. Se aprecia que muchas otras realizaciones de circuitos pueden lograr el mismo objetivo. Por ejemplo, Se pueden usar varios circuitos digitales para implementar una conmutación de fase ajustable. Tal como se ilustra en

la figura 7, una onda de diente de sierra 170 se utiliza como un portador para comparar con dos tensiones de CC de control de señal v_C y la señal CC fija v_{fix} . Cuando la onda de diente de sierra 170 se compara con la señal de control v_C , la comparación resulta en un valor de cambio de fase. Cuando la onda de diente de sierra 170 se compara con la señal de CC fija v_{fix} , La comparación da como resultado una señal de reloj para todos los componentes digitales en el circuito de control. La frecuencia del diente de sierra es el doble de la frecuencia de conmutación que se divide por 2 después de pasar el biestable D.

Implementación del inductor resonante: En una realización alternativa del dispositivo 100, el conductor resonante puede implementar múltiples inductores de ferrita conectados en serie para optimizar el funcionamiento del dispositivo FEEC 100. Los inductores resonantes conectados en serie tienen varias ventajas sobre un único inductor resonante. En primer lugar, la pérdida de potencia puede reducirse porque cada inductor conectado en serie puede realizarse mediante un tamaño pequeño, núcleo de ferrita de alta frecuencia con baja pérdida de núcleo y oscilación de flujo pequeño. En segundo lugar, es posible hacer cada inductor resonante con una estructura de una única capa, eliminando la necesidad de aislamiento de alta tensión entre capas. Asimismo, la capacitancia parásita y la inductancia de acoplamiento entre capas también se eliminan. Estas capacitancias parásitas e inductancias de acoplamiento pueden tener un efecto grave en el circuito resonante del dispositivo FEEC 100. En tercer lugar, la estructura de una única capa puede proporcionar una solución de enfriamiento eficaz para los inductores resonantes sin sobrecalentar las capas internas. Finalmente, los inductores resonantes conectados en serie se pueden implementar mediante núcleos de ferrita de pequeño tamaño, que están disponibles comercialmente para aplicaciones de potencia de alta frecuencia.

Control de retroalimentación de circuito: Como se ha mencionado antes, El control de tensión de salida del convertidor resonante 120 se puede lograr cambiando la modulación del patrón y la regulación de retroalimentación. Los dos métodos de modulación se describieron en detalle anteriormente. La regulación de la retroalimentación se logra comparando la tensión resonante detectada con una referencia, mientras que su error se usa para modular la fase o el ancho de pulso de los conmutadores S1-S4 en el convertidor resonante 120.

La figura 8 ilustra una realización a modo de ejemplo de un circuito de control de retroalimentación 180 del convertidor resonante 120. El circuito de control de retroalimentación 180 del convertidor resonante 120 es un elemento crucial del dispositivo FEEC 100 porque facilita el flujo de energía bidireccional automático. El circuito de control de retroalimentación 180 está compuesto por un circuito de detección de tensión resonante 182, un compensador de errores 184 y un generador de pulsos PWM o PSM 186. Durante el modo de puesta en marcha, la tensión resonante v_s es inicialmente cero. Este valor cero de la tensión resonante v_s da como resultado un gran error y una alta salida del compensador 184 y el generador de pulsos PWM o PSM 186 producirá una alta relación de trabajo o un pequeño cambio de fase, respectivamente, para aumentar la tensión resonante v_s .

Durante el modo de generación o extracción, los haces de partículas cargadas viajarán a través del ICC 122 y se desacelerarán a medida que giren a través del campo eléctrico del cuadrupolo formado a través de los huecos entre las placas del cuadrupolo 124. La energía perdida recolectada en las placas de cuadrupolo 124 será forzada a fluir hacia el convertidor resonante 120 por el circuito de retroalimentación 180. De manera similar, el circuito de retroalimentación 180 del convertidor bidireccional conectado a la red 110 forzará la energía recolectada en el bus de CC 181 para que regrese a la red eléctrica.

La figura 9 ilustra una realización a modo de ejemplo del circuito de detección de tensión resonante 182. La entrada v_0 de la corriente de detección de tensión resonante está acoplada al terminal de salida resonante v_s , cuya tensión de resonancia modula la corriente del fotodiodo. La salida de la corriente de detección de tensión resonante ("retroalimentación v_0 ") está acoplada al compensador de errores del controlador PWM o PSM con aislamiento óptico de alto tensión. Por lo tanto, las variaciones en la tensión resonante pueden transferirse ópticamente como la señal de retroalimentación para el circuito de control 180.

Los beneficios de este método incluyen bajo coste, aislamiento de alta tensión, e implementación sencilla. Específicamente, el fotoacoplador de entrada de CA con resistencias divisorias de alta tensión (HV) impone poco efecto en la operación resonante, ya que las resistencias divisorias HV tienen una resistencia muy alta.

Simulación y Experimentos: La figura 10 ilustra los resultados de la simulación para varias intensidades de partículas. Con el dispositivo convertidor FEEC 100, ilustrado en la figura 1, la extracción de energía de fusión directa se demuestra mediante el resultado de la simulación que se muestra en la figura 10. Los valores I_{CC} de corriente de enlace CC promedio durante el tiempo de puesta en marcha y el tiempo de generación se ilustran correspondiente a la intensidad de la inyección de haz de partículas, el cual es modelado por la fuente de la corriente de imagen I_s . En la figura 10, las partículas cargadas se inyectaron en el ICC 122 a 300 μ s. Cuando las partículas cargadas son desaceleradas por el ICC 122, la energía de fusión es aproximadamente proporcional a la corriente de imagen. En esta simulación, las pérdidas de calor y radiación son modeladas por la resistencia R_C que es 1 M ω . Durante el tiempo de arranque, el valor I_{CC} de corriente de enlace CC promedio es 117,5 mA que representa las pérdidas del circuito. Después de inyectar la corriente de imagen, el valor de I_{CC} disminuye debido a la entrada de energía de fusión. Por ejemplo, El valor I_{CC} de corriente de enlace CC promedio se reduce a 87,5 mA cuando se inyecta una corriente de imagen 3 mA en el convertidor resonante 120, que es un estuche de inyección de 5 W. A partir de la figura 10, se

espera que cuando la energía de fusión esté entre 15 W y 20 W, la corriente I_{CC} de enlace CC promedio alcanza cero (punto de equilibrio) y luego se reduce al valor negativo (generación de energía).

5 El dispositivo FEED 100 presentado es capaz de proporcionar energía a las placas de cuadrupolo 124 del ICC 122 para iniciar el proceso de desaceleración. Cuando la corriente de imagen se recolecta en las placas de cuadrupolo 124, la energía se enviará de vuelta a la red eléctrica a través del convertidor bidireccional conectado a la red 110.

10 La figura 11 ilustra una forma de onda experimental medida a través del condensador resonante C (ilustrado en la figura 2). En este experimento, el valor del inductor resonante L es de aproximadamente 370 μ H y el valor del condensador emulado C de las placas de cuadrupolo es 70 pF. La resistencia estimada R_C de las pérdidas de calor y radiación es de 2 M Ω y la frecuencia de la imagen es de 1 MHz, que es la misma que la frecuencia de conmutación del convertidor resonante. Con el control de circuito cerrado 180, la tensión de enlace V_{CC} de 126 V del convertidor resonante puede generar 3 kV, tensión de resonancia de 1 MHz durante el tiempo de inicio mostrado en la figura 11.

15 Los sistemas y métodos proporcionados en este documento se describen con fines a modo de ejemplo únicamente con respecto a la extracción de energía de fusión directa. Sin embargo, un experto en la materia apreciaría fácilmente que los sistemas y métodos proporcionados en el presente documento para extraer la energía cinética de las partículas cargadas podrían usarse para la recuperación de energía en aceleradores de iones de alta corriente. Como sabrá un experto habitual en la técnica, los haces de iones de alta potencia de los aceleradores de iones de alta corriente se
20 utilizan en diversos entornos de investigación académica y comercial en ciencia e ingeniería. Todas estas aplicaciones son intensivas en energía. Hoy en día la mayor parte de la energía simplemente se desperdicia. El proceso de extracción de energía descrito aquí proporciona un medio para recuperar dicha energía y reducir el consumo de energía de dichas instalaciones. Para lograrlo, el diseño de extracción simplemente se agregaría al final de la línea de haz más allá del área objetivo.

25 Un experto en la técnica también apreciaría fácilmente que los sistemas y métodos proporcionados en el presente documento podrían usarse en combinación con otros sistemas para la recuperación y extracción de energía. Solicitud PCT n.º PCT/US2006/008251, titulado "Sistema de generación eléctrica de plasma", se refiere a un sistema generador de energía utilizado para proporcionar propulsión de plasma al espacio directo. Un experto en la materia reconocería
30 fácilmente que el proceso de extracción de energía descrito en este documento podría facilitar la recuperación de energía y la extracción de la corriente de energía de fusión cuando no se desea la propulsión.

35 Un experto en la técnica también apreciaría fácilmente que el proceso para extraer la energía cinética de las partículas cargadas podría usarse para mejorar la eficiencia en aceleradores de haz neutro. Los haces de átomos neutros de alta potencia de fuentes de iones positivos y/o negativos se usan para diagnósticos o como fuentes de átomos energéticos en diferentes entornos comerciales y académicos. En todas estas aplicaciones, las fuentes de haz se caracterizan por limitaciones de eficiencia que surgen de las secciones transversales de intercambio de carga bastante pequeñas. Para lograr haces de átomos neutros puros, todos los iones residuales que pasan por la celda
40 neutralizadora se desvían y se vierten. Esta energía residual suele ser la mitad de la potencia del enchufe. Los sistemas de extracción del tipo descrito aquí pueden ayudar a recuperar la mayor parte de la energía de estos iones "filtrados".

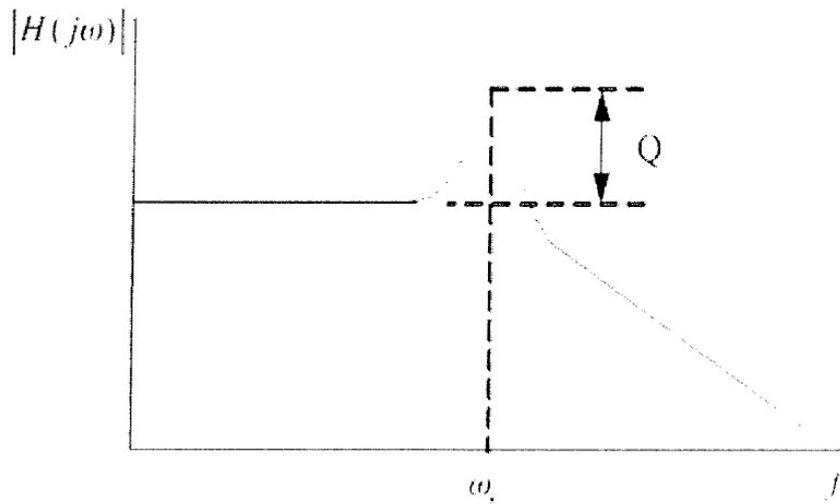
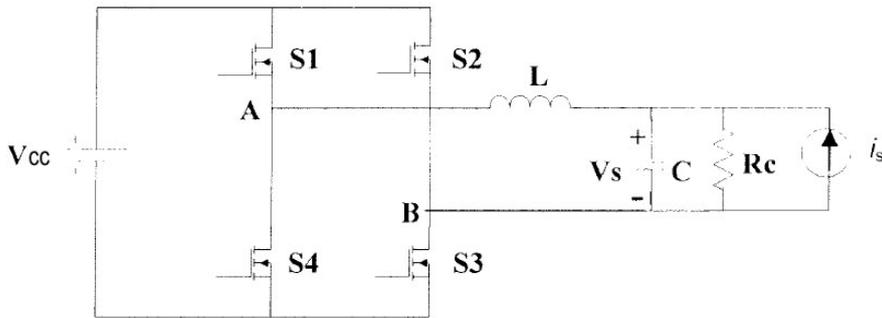
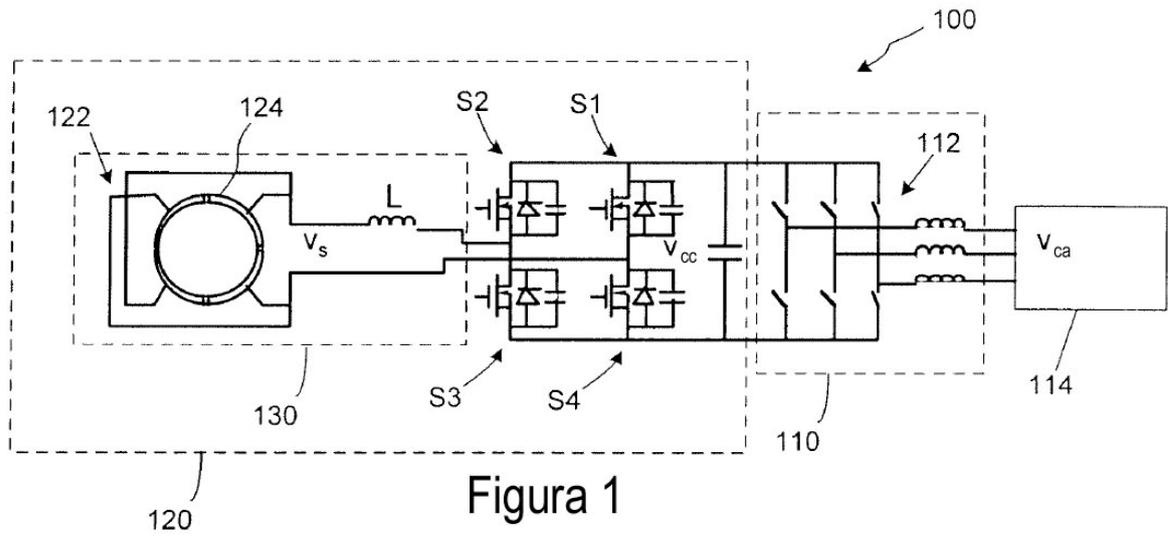
En la descripción anterior, la invención se haya descrito con referencia a realizaciones específicas de la misma. Será, no obstante, evidente que pueden realizarse varias modificaciones y cambios a la misma sin apartarse del alcance de la invención, dicho alcance estando definido y limitado por las reivindicaciones adjuntas.

45

REIVINDICACIONES

1. Un circuito de extracción de energía (100) para extraer energía eléctrica de un haz de partículas cargadas, que comprende:
 - un convertidor bidireccional conectado a la red (110) acoplable a una red de servicio público (114), dicho convertidor bidireccional conectado a la red (110) configurado para suministrar una tensión de corriente continua y proporcionar energía eléctrica; y
 - un convertidor resonante (120) que comprende un convertidor ciclotrón inverso multipolar (122), un inductor (L) y una pluralidad de conmutadores de circuito (S1, S2, S3, S4), en donde el convertidor de ciclotrón inverso multipolar (122) incluye dos o más placas alargadas (124) con secciones transversales arqueadas que forman una cámara cilíndrica anular alargada con espacios alargados que se extienden axialmente entre las dos o más placas alargadas (124), en donde las dos o más placas alargadas (124) están dispuestas para funcionar como un condensador que, combinado con el inductor (L), está configurado para formar un tanque resonante (130), en donde la pluralidad de conmutadores de circuito (S1, S2, S3, S4) están configurados para formar un puente configurado para cortar la tensión de corriente continua recibida del convertidor bidireccional conectado a la red (110) en una forma de onda de pulso, en donde el convertidor de ciclotrón inverso multipolar (122), cuando se aplica corriente a las dos o más placas alargadas, (124), está configurado para formar un campo eléctrico multipolar a través de los espacios alargados entre las placas alargadas (124) que desacelera las partículas cargadas de haces de partículas cargadas que pasan a través de la cámara cilíndrica para extraer energía eléctrica de la energía cinética de las partículas cargadas, en donde el convertidor bidireccional conectado a la red (110) está configurado para establecer la resonancia del convertidor de ciclotrón inverso multipolar (122) proporcionando la energía eléctrica a dicho convertidor de ciclotrón inverso multipolar (122).
2. El circuito según la reivindicación 1, en el que el convertidor bidireccional conectado a la red (110) está configurado para interconectar una tensión de CA de red.
3. El circuito según la reivindicación 2, en el que el convertidor bidireccional conectado a la red (110) es controlable para lograr una potencia bidireccional y un flujo de potencia reactiva.
4. El circuito según la reivindicación 3, en el que el convertidor resonante (120) está configurado por un convertidor resonante de puente H o de medio puente.
5. El circuito según la reivindicación 3, que comprende además un circuito de control de retroalimentación (180) que tiene un circuito de detección de tensión resonante (182), un compensador, un generador de modulación y una interfaz para el convertidor resonante (120), en donde dicho circuito de retroalimentación está configurado para regular el convertidor resonante (120).
6. El circuito según la reivindicación 5, en el que el generador de modulación es un generador de modulación de ancho de pulso.
7. El circuito según la reivindicación 5, en el que el generador de modulación es un generador de modulación de desplazamiento de fase.
8. El circuito según la reivindicación 5 en el que el generador de modulación está configurado para ajustar la tensión resonante del convertidor resonante (120).
9. El circuito según la reivindicación 1, en el que el convertidor bidireccional conectado a la red (110) está configurado para funcionar como un rectificador de CA/CC durante el modo de inicio de operación y como un inversor conectado a la red de CC/CA durante el modo de generación de operación.
10. El circuito según la reivindicación 1, en el que el convertidor bidireccional conectado a la red (110) está configurado para funcionar con al menos uno de factor de potencia unitario, fase inicial o fase de retraso.
11. Un método para extraer energía eléctrica de partículas cargadas de haces de partículas cargadas que pasan a través de un convertidor resonante (120) en un sistema que comprende dicho convertidor resonante (120) y un convertidor bidireccional conectado a la red (110), comprendiendo las etapas de:
 - recibir energía eléctrica de una red de servicio público (114) y proporcionar dicha energía eléctrica a dicho sistema, en donde el convertidor resonante (120) comprende un convertidor ciclotrón inverso multipolar (122), un inductor (L) y una pluralidad de conmutadores de circuito (S1, S2, S3, S4), en donde el convertidor de ciclotrón inverso multipolar (122) incluye dos o más placas alargadas (124) con secciones transversales arqueadas que forman una cámara anular alargada con huecos alargados que se extienden axialmente formados entre las dos o más placas alargadas (124),
 - en donde las dos o más placas alargadas (124) funcionan como un condensador que, combinado con el inductor (L), forma un tanque resonante (130), en donde la pluralidad de conmutadores de circuito (S1, S2, S3, S4) están

- 5 configurados para formar un puente que corta la tensión de la corriente directa en una forma de onda de pulso, en donde el convertidor de ciclotrón inverso multipolar (122), cuando se aplica corriente a las dos o más placas alargadas (124), forma un campo eléctrico multipolar a través de los espacios alargados entre las placas alargadas que desacelera las partículas cargadas de haces de partículas cargadas que pasan a través de la cámara cilíndrica para extraer energía eléctrica de la energía cinética de las partículas cargadas; estableciendo la resonancia del convertidor de ciclotrón inverso multipolar con la energía eléctrica recibida del convertidor bidireccional y la pluralidad de conmutadores, y activando un campo eléctrico polipolar a través de los huecos de las dos o más placas.
- 10 12. El método según la reivindicación 11 que comprende, además, las etapas de:
- recibir haces de partículas cargadas en el convertidor resonante (120); y
recoger la energía perdida por la desaceleración de las partículas cargadas en forma de corriente de imagen mediante las dos o más placas alargadas (124).
- 15 13. El método según la reivindicación 12 que comprende, además, las etapas de:
- hacer circular la corriente de imagen a través del convertidor resonante (120); y
20 hacer circular la corriente de imagen de vuelta a la red de servicio público (114) a través del convertidor bidireccional.
14. El método de la reivindicación 12, que comprende además las etapas de enviar la energía eléctrica extraída de nuevo a la red de servicio público (114).
- 25



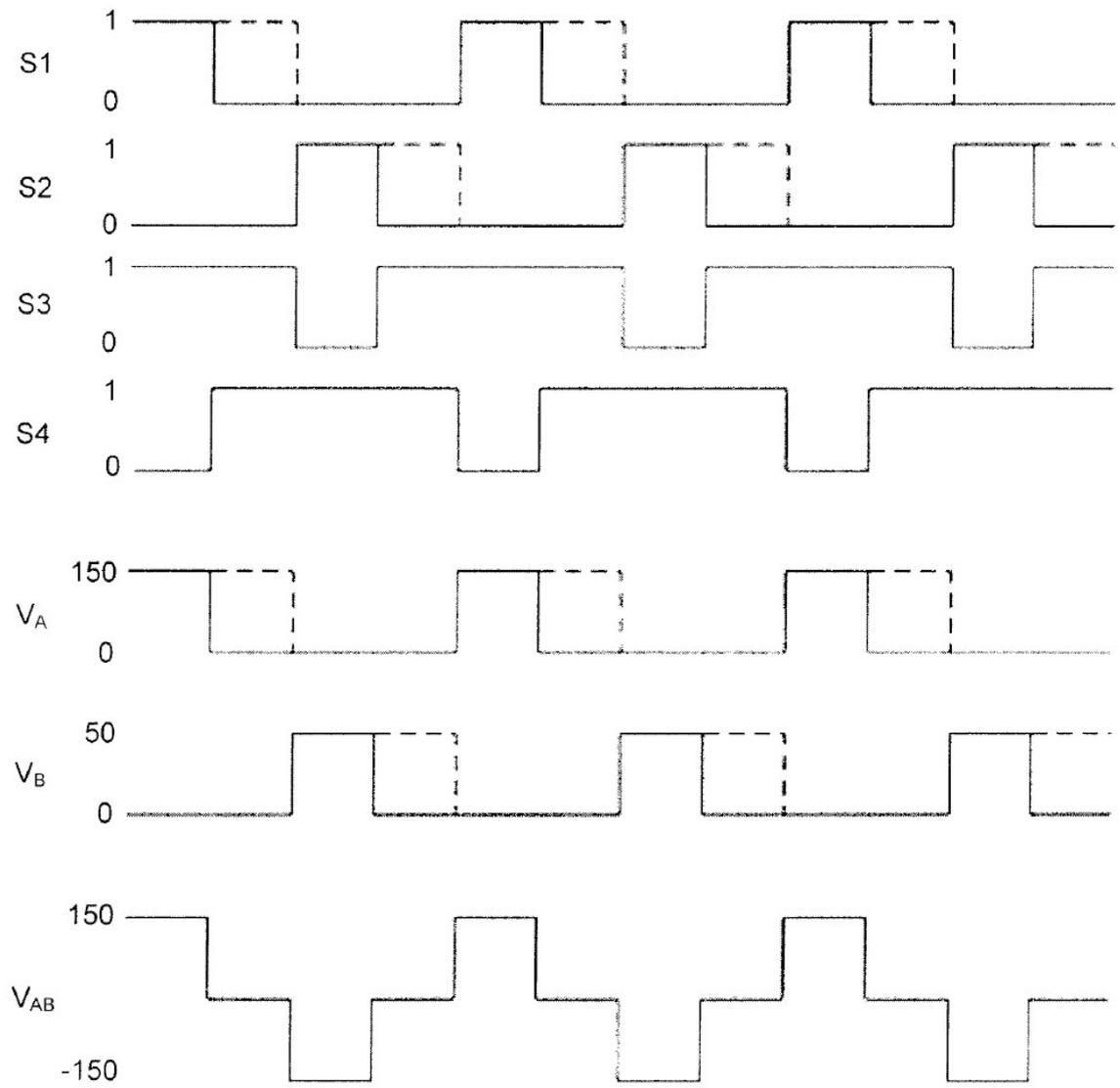


Figura 4

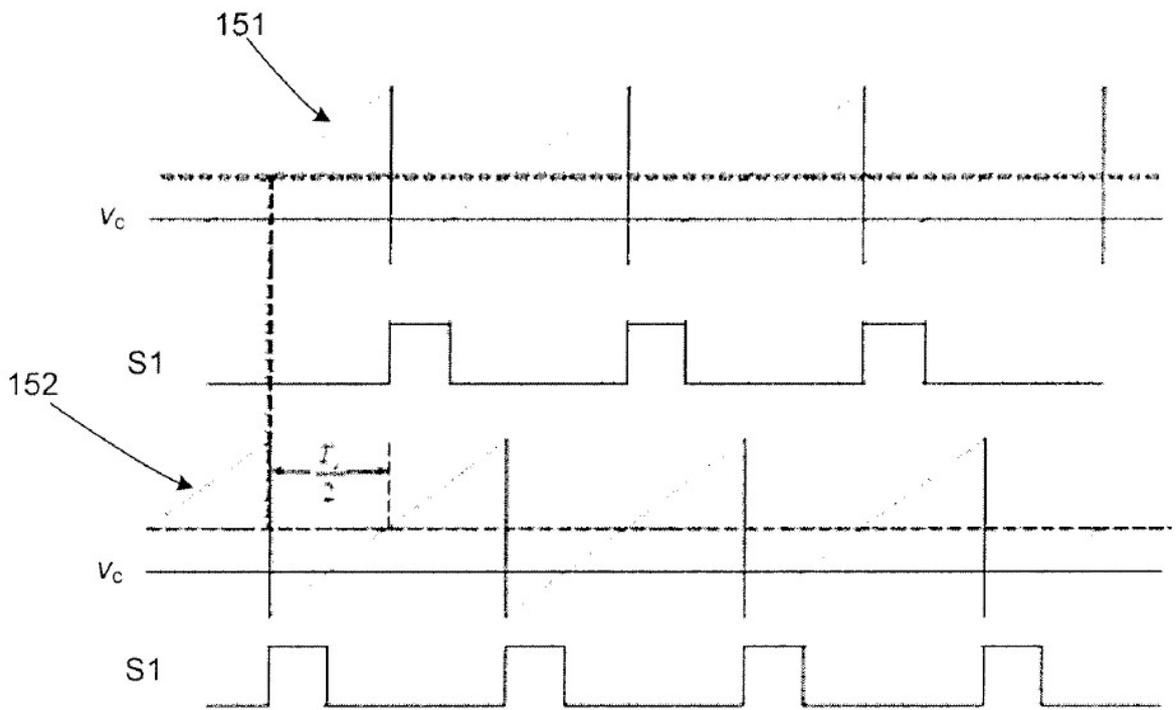


Figura 5

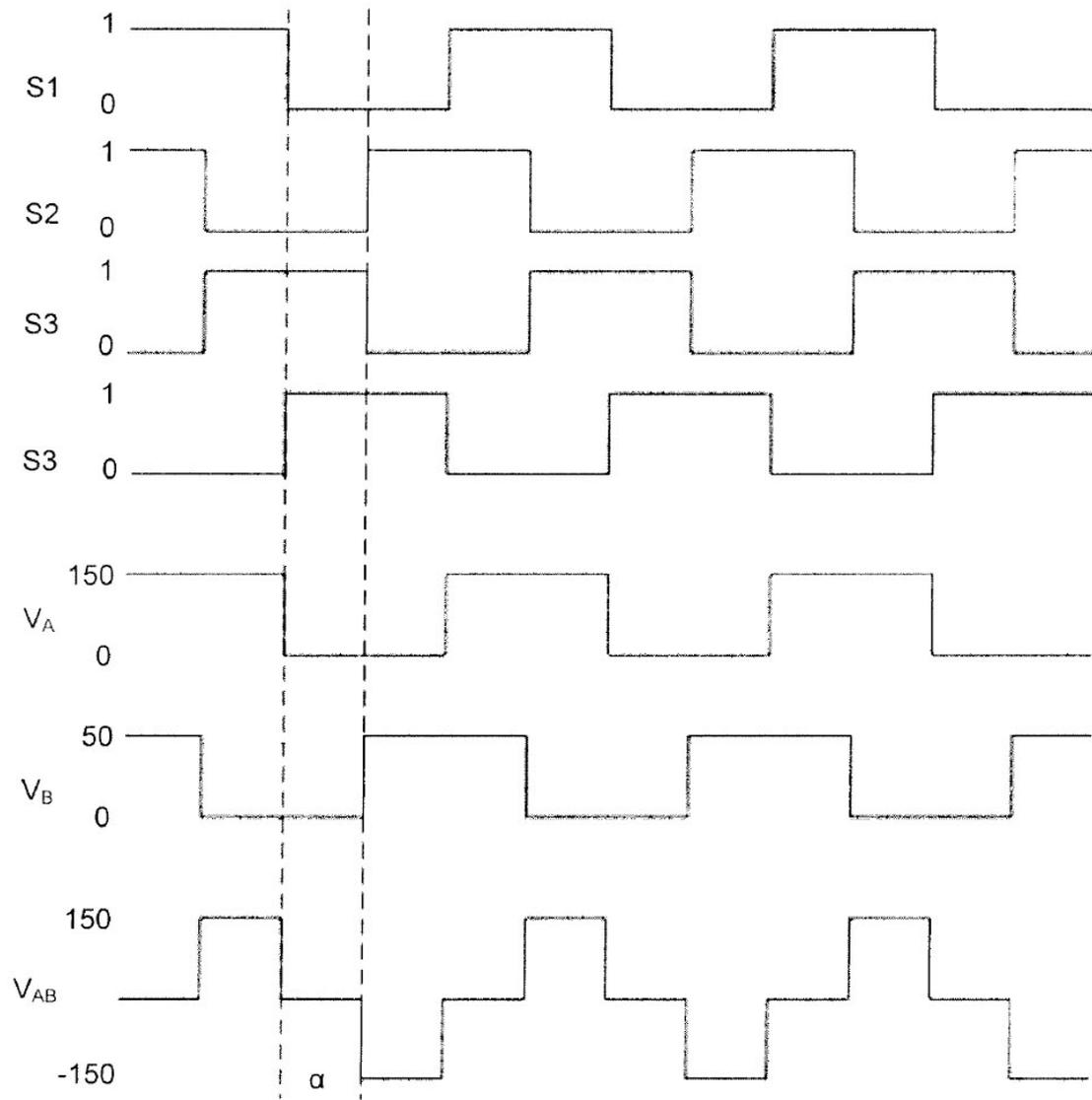


Figura 6

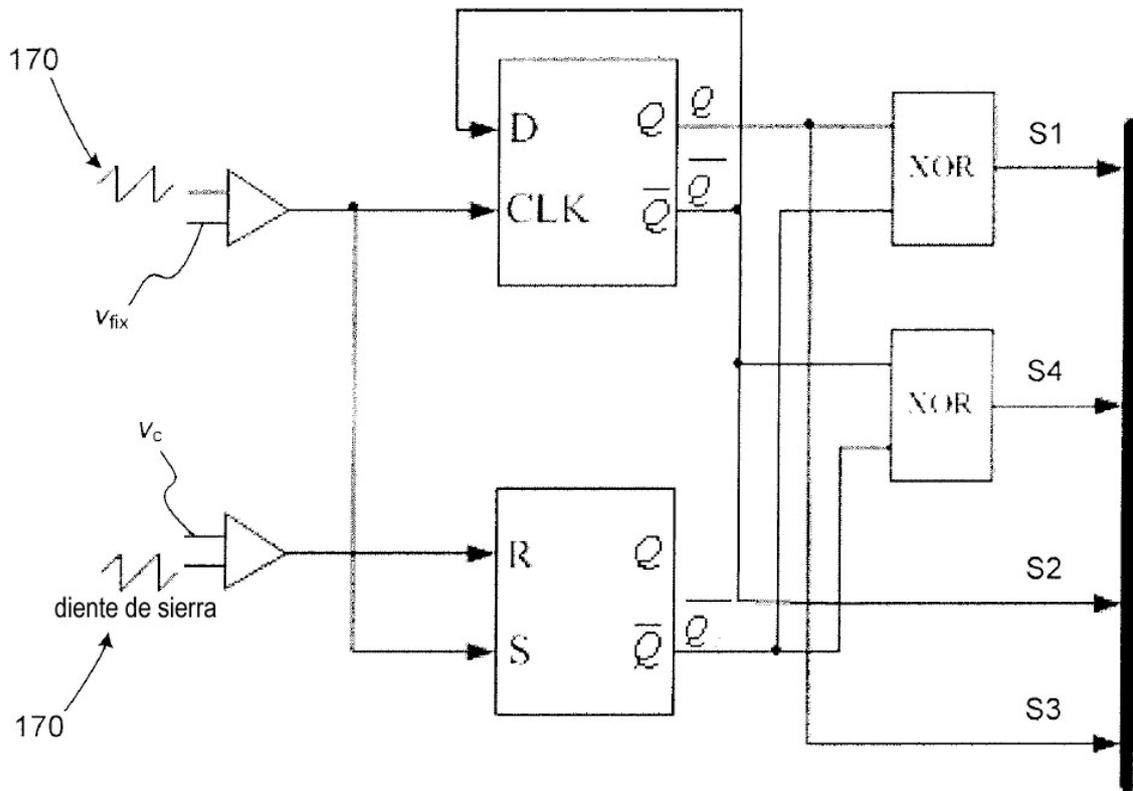
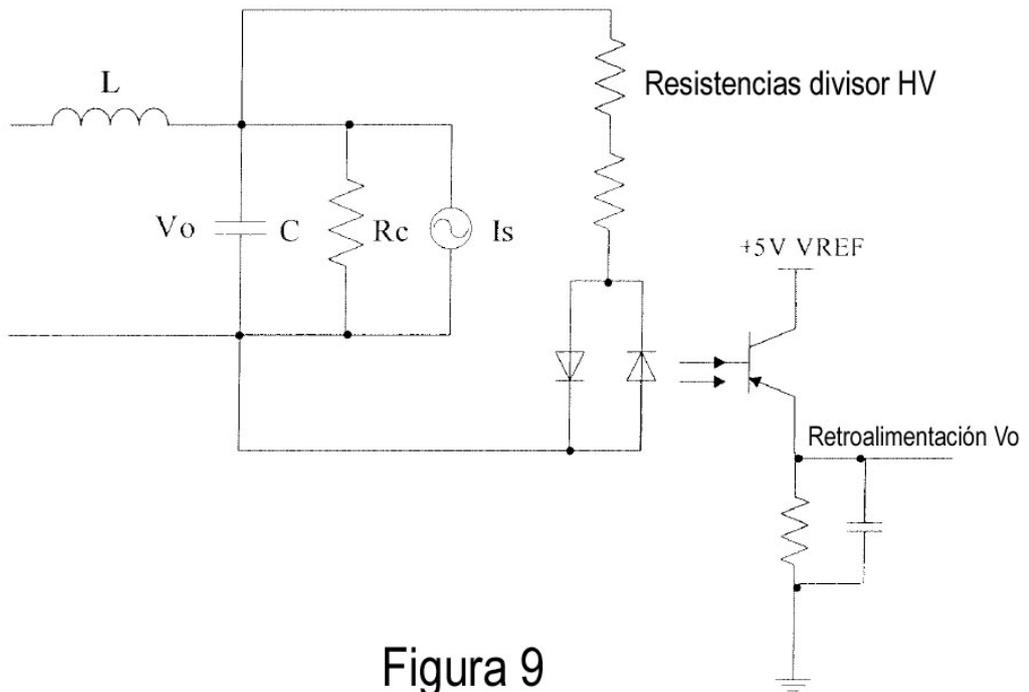
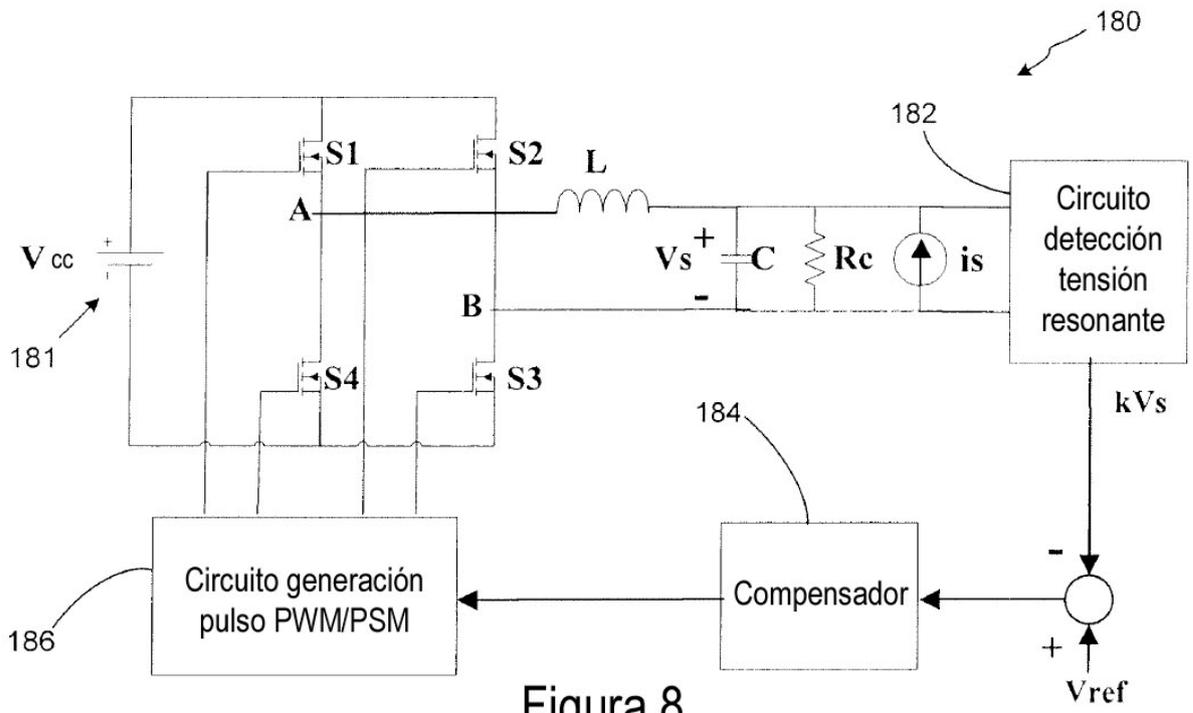


Figura 7



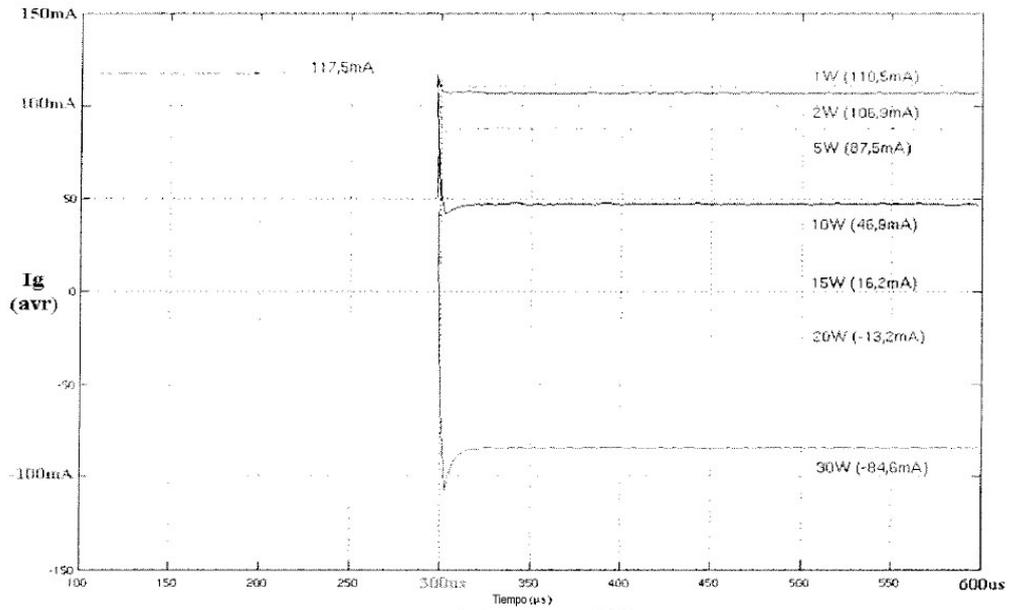


Figura 10

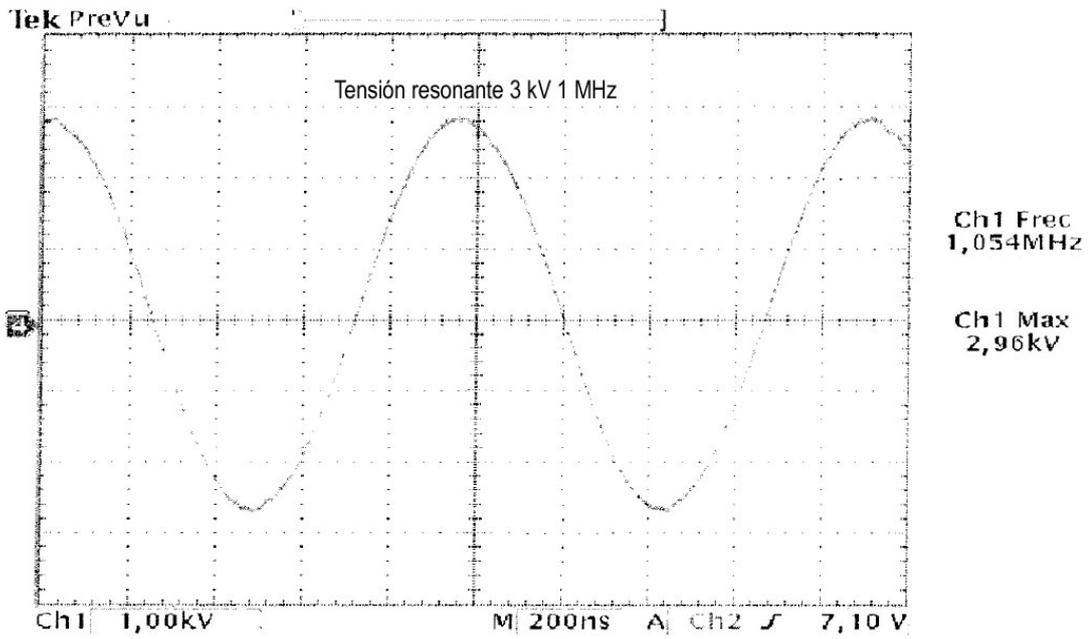


Figura 11