

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 778 458**

51 Int. Cl.:

H03K 17/0416 (2006.01)

H03K 17/687 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **27.02.2017 PCT/IB2017/051136**

87 Fecha y número de publicación internacional: **21.09.2017 WO17158458**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.02.2017 E 17713440 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **18.12.2019 EP 3430721**

54 Título: **Circuito y procedimiento para controlar cargas eléctricas**

30 Prioridad:

18.03.2016 IT UA20161824

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

10.08.2020

73 Titular/es:

**EGGTRONIC ENGINEERING S.R.L. (100.0%)
8 Via Giorgio Campagna
41126 Modena, IT**

72 Inventor/es:

SPINELLA, IGOR

74 Agente/Representante:

CURELL SUÑOL, S.L.P.

ES 2 778 458 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 y procedimiento para controlar cargas eléctricas

5 Campo de la invención

La presente invención se refiere en general a un circuito y a un procedimiento para controlar una o más cargas eléctricas resistivas, capacitivas, inductivas o mixtas con una forma de onda de corriente eléctrica que es variable a lo largo del tiempo.

10

Técnica anterior

El control de cargas eléctricas con formas de onda de corriente que son variables a lo largo del tiempo se lleva a cabo normalmente utilizando circuitos amplificadores en tensión y/o en corriente, que están configurados para transformar una frecuencia de baja potencia en una señal lo suficientemente potente como para alimentar la carga correctamente.

15

Según el tipo de carga que va a alimentarse, estos circuitos pueden implementar diagramas de cableado de tipo lineal (tales como los utilizados, por ejemplo, para amplificar señales de audio), caracterizados por una fidelidad excelente, pero una eficiencia energética baja, diagramas no lineales (por ejemplo, los basados en pasos de SMOS o que utilizan pares BJT que pueden amplificar señales digitales), diagramas basados en amplificadores de clase D o diagramas de resonancia, basados normalmente en transformadores, resonadores LC u otros circuitos resonantes (por ejemplo, amplificadores de clase E o clase F).

20

Un sector en el que el control es particularmente importante es cuando la carga está constituida por una compuerta de un conmutador activo, por ejemplo, un transistor MOSFET, IGBT, HEMT u otro dispositivo que presenta una capacidad de compuerta considerable, a la que normalmente se añade una resistencia parásita de compuerta y una inductancia parásita de compuerta.

25

En particular, el control es particularmente problemático cuando los conmutadores activos se utilizan en el campo de circuitos de conmutación de alta frecuencia, en los que los propios conmutadores se utilizan normalmente en regiones de corte o saturación.

30

De hecho, mientras que a bajas frecuencias las corrientes en juego son sustancialmente desdeñables, ya que los conmutadores activos normalmente presentan una capacidad parásita insignificante (por ejemplo, menor que unos pocos nF o unos pocos centenares de pF), a altas frecuencias las corrientes pueden alcanzar normalmente hasta decenas de amperios, con las consiguientes dificultades de control.

35

Además de las altas corrientes necesarias, el control de los conmutadores activos mencionados anteriormente conduce a menudo a una disipación de energía considerable que es sustancialmente inevitable.

40

De hecho, para cada ciclo de activación/desactivación del conmutador, la capacidad de compuerta del mismo se carga/descarga de manera apropiada, con una pérdida de energía de:

45

$$Ed = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2$$

donde Ed indica la energía disipada, C indica la capacidad parásita del conmutador, normalmente no lineal y que disminuye en función de la corriente de control, y V indica la corriente de control máxima del dispositivo.

50

A estas pérdidas se les añaden las pérdidas de resistencia de compuerta, proporcionales a la resistencia de compuerta y al cuadrado del valor de RMS efectivo de la corriente necesaria para cargar/descargar la compuerta y, por tanto, proporcionales al cuadrado de la capacidad de compuerta. Pueden realizarse consideraciones similares considerando la carga de compuerta total de las capacidades.

55

Normalmente, cuando la frecuencia de control excede 1 Mhz las pérdidas en el circuito de control (conocido asimismo como controladores) de los dispositivos de alimentación pasan a ser significativas, del orden de vatios, hasta alcanzar las decenas o centenares de vatios para frecuencias mayores o si se utilizan conmutadores (por ejemplo, MOSFET) afectados particularmente por fenómenos parásitos, haciendo que resulte sustancialmente imposible un aumento adicional de la frecuencia de trabajo y existiendo un riesgo de destrucción del dispositivo.

60

Este problema puede resolverse en parte utilizando conmutadores activos con respecto al campo de RF basados en semiconductores de silicio o heterogéneos (por ejemplo, SiC) o HEMD basados en semiconductores III-V (por ejemplo, GaN) que permiten reducir la capacidad de compuerta.

65

Sin embargo, estos semiconductores presentan normalmente el inconveniente de un alto coste y otros

inconvenientes que hacen que su control resulte difícil. Por ejemplo, los conmutadores activos basados en SiC de alta tensión requieren altas tensiones de compuerta para controlarse, con la consiguiente renuncia parcial al beneficio obtenido a partir de la reducción de la capacidad de compuerta. Por otra parte, los dispositivos HEMT basados en heterouniones de tipo III-V (por ejemplo, GaN) presentan el problema de que requieren tensiones negativas para controlarse, lo que hace que sean escasamente compatibles con las presentes arquitecturas de equipos de potencia, en particular en diagramas de cableado de conmutación, recurriendo si no a arquitecturas del tipo de cascodo o de varios pasos.

Una posible solución adoptada en el campo de la radiofrecuencia (RF) para resolver los problemas de control de los conmutadores activos que presentan una alta capacidad de compuerta consiste en la utilización de diagramas de cableado inductivos o resonantes, en los que el control de compuerta se lleva a cabo sustancialmente con un transformador o un circuito resonante (por ejemplo, de clase E o F, o un simple resonador LC. Este tipo de circuito, si se dimensiona de manera apropiada, presenta la ventaja de no disipar la energía acumulada en la capacidad parásita de compuerta, sino de poder reutilizarla en cada ciclo, excepto por pérdidas debidas a fenómenos parásitos.

Por otra parte, los diagramas de resonancia de este tipo controlan la carga con una onda sustancialmente sinusoidal, lo que puede ser útil en algunos equipos, por ejemplo para circuitos en los que la eficiencia no es crítica, pero que normalmente es perjudicial para controlar conmutadores activos en el campo de los circuitos de conmutación, en los que los tiempos de subida y bajada de los frentes deben ser tan marcados como sea posible con el fin de limitar las pérdidas dinámicas en los conmutadores durante las etapas de transición de activación/desactivación y desactivación/activación.

Por tanto, utilizar las ondas senoidales para activar y desactivar los conmutadores activos puede conducir a una reducción de las pérdidas en compuerta, pero aumenta enormemente las pérdidas dinámicas en el circuito de alimentación, ya que la pendiente de las transiciones de activación/desactivación y desactivación/activación no es normalmente lo suficientemente inclinada como para impedir y/o minimizar el cruce de tensión y corriente en la etapa de suministro de alimentación.

Pueden encontrarse estos problemas en el control de cualquier carga de tipo capacitivo con ondas de corriente y, en particular, en los sistemas en los que se utilizan dos niveles de corriente para activar y desactivar el dispositivo (sistemas de conmutación), en particular para altas frecuencias de funcionamiento.

Asimismo existen problemas similares en circuitos lógicos (compuertas lógicas de los tipos AND (Y), OR (O), NOT (NO), NAND (NY), NOR (NI), XOR (O exclusivo), etc., memorias, memorias intermedias, circuitos integrados más o menos complejos, microcontroladores, microprocesadores, sensores de CMOS, etc.), dado que aunque la capacidad parásita de cada compuerta es particularmente pequeña, el presente grado de integración muy alto conduce en cualquier caso a presentar una capacidad de compuerta total que limita sustancialmente la frecuencia de funcionamiento máxima (hoy en día limitada sustancialmente a unos pocos GHz), y aumenta enormemente el consumo de los microprocesadores, memorias, microcontroladores, sensores, lógicas cableadas, FPGA y cualquier otro dispositivo digital. El reloj de sincronización, las memorias intermedias para regenerar el reloj para tener en cuenta el número máximo de compuertas que pueden controlarse, los sistemas de tipo PLL y todos los sistemas de control de las compuertas lógicas constituyen normalmente por sí solos aproximadamente el 50% de las pérdidas en sistemas digitales modernos.

Pueden encontrarse problemas de tipo análogo en la fuente de alimentación de alta frecuencia de cargas inductivas o resistivas.

La publicación de patente US 6 570 777 B1 es un circuito de control relevante que da a conocer las características del preámbulo de la reivindicación 1.

La publicación de patente US 5 939 941 A da a conocer un amplificador de potencia que comprende varios FET con diferentes filtros pasivos conectados en sus terminales de compuerta respectivos.

La publicación de patente US 2015/098252 A1 da a conocer diferentes estructuras resonantes utilizadas en circuitos para transferir potencia a través de un acoplamiento capacitivo.

Las publicaciones de patente US 2013/293189 A1 y WO 2013/014521 A1 dan a conocer diferentes estructuras resonantes utilizadas en circuitos para transferir potencia a través de bobinas de inducción.

El artículo titulado "High-Efficiency RF and Microwave Power Amplifiers" del Dr. Andrei Grebennikov (XP055106604; presentado en el simposio sobre amplificadores de potencia del IEEE de 2009) da a conocer, como amplificador de potencia de clase F de microondas y de RF de alta eficiencia práctico, un amplificador de potencia LDMOSFET de clase F inverso con línea de cuarto de onda que comprende características en común con la divulgación actual.

Por tanto, un objetivo de la presente invención consiste en realizar un circuito que sea útil para controlar una carga eléctrica que presenta un comportamiento capacitivo y/o resistivo y/o inductivo con una forma de onda de corriente eléctrica adecuada para el funcionamiento correcto de la carga, por tanto, reduciendo sustancialmente las pérdidas y aumentando al mismo tiempo la máxima frecuencia de control posible con respecto a circuitos conocidos.

5

Sumario de la invención

La invención se refiere al circuito eléctrico definido por las reivindicaciones adjuntas.

10 Divulgación adicional

La divulgación se refiere a un circuito para controlar una o más cargas eléctricas, que comprende por lo menos:

- 15 - un generador de una forma de onda de corriente eléctrica (por ejemplo, una forma de onda de corriente en la que la frecuencia del armónico principal es igual a o mayor de un Mhz, aproximadamente diez o aproximadamente cien Mhz, en algunas ocasiones incluso mayor de 1 Ghz o decenas o centenares de Ghz), y
- 20 - un filtro pasivo conectado en la entrada al generador y en la salida a cada carga eléctrica que va a controlarse, en el que el filtro pasivo se sintoniza para generar una forma de onda de corriente eléctrica resultante de un acondicionamiento de uno o más armónicos de la forma de onda de corriente eléctrica en la entrada.

25 Por acondicionamiento de un armónico de la forma de onda de corriente quiere decirse la posibilidad de aumentar (amplificar) o reducir (amortiguar) de manera selectiva la componente armónica específica (armónico) de la forma de onda de corriente.

30 De esta manera, efectivamente es posible "conformar" la forma de onda de corriente que controla la(s) carga(s) eléctrica(s), de modo que puede dársele la conformación más adecuada (en el dominio del tiempo) para minimizar pérdidas y/o para aumentar la eficiencia y la eficacia de control basándose en las necesidades específicas de la(s) carga(s) que va(n) a controlarse.

35 En la presente divulgación, la(s) carga(s) eléctrica(s) puede(n) ser sustancialmente de cualquier tipo, por ejemplo, cargas resistivas, capacitivas, inductivas o una combinación de las cargas resistivas, capacitivas e inductivas. Sin embargo, la presente divulgación es particularmente útil para controlar cargas caracterizadas por una componente capacitiva predominante, a la que pueden añadirse otros efectos relacionados con resistencias e inductancias parásitas.

40 Entre las cargas que pueden controlarse con eficacia, en la presente divulgación se encuentran los terminales de controlador (por ejemplo, compuertas) de los conmutadores activos tales como, por ejemplo, transistores de los siguientes tipos: BJT, MOSFET, IGBT, HBT, HEMT, MEMS, accionadores y sensores piezoeléctricos, compuertas lógicas y aparatos, por ejemplo, aunque no exclusivamente, de los tipos de CMOS, memoria intermedia y reloj.

45 Otras cargas que pueden controlarse con eficacia por medio de la presente divulgación son motores eléctricos, solenoides, antenas, transformadores y otras cargas que presentan un comportamiento predominantemente inductivo.

En la presente divulgación, el generador de forma de onda de corriente comprende:

- 50 - un generador de corriente eléctrica continua,
- un circuito de conmutación que puede convertir la corriente eléctrica continua en una forma de onda de corriente eléctrica.

55 Con esta solución efectivamente es posible generar una forma de onda de corriente que presenta un gran contenido de armónicos, que pueden filtrarse por tanto para obtener una amplia gama de formas de onda de corriente adecuadas para diversos requisitos de las cargas que van a controlarse.

En la presente divulgación, el circuito de conmutación comprende por lo menos:

60

- un conmutador activo, y
- un controlador para generar una señal de controlador eléctrica que puede activar y desactivar el conmutador activo.

65

El conmutador activo puede ser un transistor, por ejemplo, un transistor BJT, MOT o IGBT, un relé de estado sólido,

un conmutador MEMS, y un conmutador HEMT, un conmutador HBT u otro conmutador.

En la presente divulgación, el circuito de conmutación puede comprender, por ejemplo, dos conmutadores activos en una configuración de medio puente o cuatro conmutadores activos en una configuración de puente en H completo.

En la presente divulgación, el circuito de conmutación comprende una inductancia conectada en serie entre el generador de corriente eléctrica continua y el conmutador activo, presentando el filtro pasivo un terminal de entrada conectado con un nodo eléctrico interpuesto entre la inductancia y el conmutador activo.

De esta manera, la inductancia se comporta sustancialmente como un generador de corriente continua aproximadamente que se carga durante el tiempo en el que el conmutador activo está activado, mientras que se descarga y alimenta la carga aguas abajo, durante el tiempo en el que el conmutador activo está desactivado.

En la divulgación, el circuito de conmutación asimismo puede comprender una capacidad conectada en serie con la inductancia y en paralelo con el conmutador activo.

La capacidad permite maximizar la eficiencia energética del circuito de conmutación, garantizando que durante la activación y/o desactivación del conmutador activo no haya altas tensiones y corrientes presentes en el nodo que conecta la inductancia y el conmutador activo.

En la divulgación, el filtro pasivo es un filtro reactivo resonante que comprende inductores y condensadores, que puede realizarse tanto en forma de elementos diferenciados como en forma de elementos distribuidos, por ejemplo, líneas de transmisión.

Esto proporciona una solución relativamente sencilla para realizar filtros pasivos que, si se configuran y sintonizan de manera apropiada, pueden amplificar y/o amortiguar de manera selectiva uno o más armónicos de la forma de onda de corriente eléctrica recibida en la entrada.

A este respecto, en la divulgación, el filtro pasivo se sintoniza para proporcionar en la salida una forma de onda de corriente que presenta una conformación cuadrada/rectangular o suficientemente parecida a una conformación cuadrada/rectangular.

Por ejemplo, el filtro pasivo puede sintonizarse para amortiguar por completo o casi por completo por lo menos el segundo armónico de la forma de onda de corriente eléctrica en la entrada, más preferentemente el mayor número posible de armónicos pares, y para amplificar el tercer armónico con un factor de amplificación igual a un tercio del factor de multiplicación del primer armónico, más preferentemente para amplificar el mayor número de armónicos impares de orden superior que el primero con factores de amplificación respectivos cuya relación con el factor de amplificación del armónico de primer orden es igual a la inversa del orden del armónico correspondiente. Esta solución, proporcionada a título de ejemplo, en la práctica permite alimentar la(s) carga(s) con una forma de onda de corriente eléctrica que es sustancialmente cuadrada, anulando o en cualquier caso minimizando las pérdidas.

Esta solución es particularmente ventajosa para controlar conmutadores activos en circuitos de conmutación, con el objetivo de limitar con eficacia las pérdidas dinámicas en los conmutadores durante las etapas de activación/desactivación y desactivación/activación.

Con mayor detalle, el filtro pasivo comprende una pluralidad de módulos eléctricos (es decir, por lo menos dos o más de dos), cada de uno de los cuales comprende por lo menos:

- una primera rama eléctrica que comprende un terminal de entrada y un terminal de salida, y
- una segunda rama eléctrica que comprende una inductancia y una capacidad, conectándose la segunda rama eléctrica entre el terminal de salida de la primera rama eléctrica del módulo respectivo y un potencial de referencia (por ejemplo, tierra),

en el que el terminal de entrada de la primera rama eléctrica del primer módulo eléctrico se conecta a la entrada del filtro pasivo y el terminal de entrada de la primera rama eléctrica del segundo módulo eléctrico se conecta al terminal de salida de la primera rama eléctrica del primer módulo eléctrico.

Este permite realizar un filtro pasivo muy sencillo que es económico y fácil de sintonizar, por ejemplo, para realizar en la salida una forma de onda de corriente eléctrica que presenta una forma de onda sustancialmente cuadrada.

Partiendo de este esquema básico, puede dotarse luego cada módulo de componentes reactivas adicionales, con el objetivo de introducir más grados de libertad en el filtrado que, aunque presenta una sintonización de circuito más compleja durante la etapa de diseño, permiten proporcionar en la salida una forma de onda de corriente que responde de manera más fiel a la forma solicitada.

5 En este sentido, cada módulo eléctrico puede comprender una capacidad adicional situada en la primera rama eléctrica aguas arriba de la segunda rama eléctrica. Cada módulo puede comprender una primera inductancia situada en la primera rama eléctrica aguas arriba de la segunda rama eléctrica y una segunda inductancia dispuesta en serie con la capacidad a lo largo de la segunda rama eléctrica. Además, cada módulo puede comprender una capacidad conectada en paralelo a cada inductancia.

10 En la divulgación, la carga eléctrica que va a controlarse puede conectarse a un nodo eléctrico situado entre los módulos primero y segundo del filtro pasivo.

De esta manera, en la forma de onda de corriente eléctrica que llega a la carga, las fases de los armónicos impares tras el primero están automáticamente en fase con la fase del primer armónico, lo que es particularmente útil especialmente para controlar la carga con formas de onda cuadradas/rectangulares.

15 En la divulgación, el circuito de control puede comprender además una carga reactiva regulable conectada en serie a la salida del filtro pasivo.

20 Esto confiere una doble ventaja: permite adaptar el comportamiento del filtro pasivo si es necesario variar la conformación de la forma de onda de corriente eléctrica y además permite enfrentarse a cualquier variación eventual de la carga que va a controlarse, en caso de que la carga no sea constante, de modo que el circuito de conmutación aguas arriba alimenta una carga global (la carga que va a controlarse más la carga reactiva adicional) que presenta una impedancia suficientemente estable y constante.

25 En general, esto permite regular el circuito de control en función de la carga, para garantizar la máxima eficiencia en todas las condiciones de funcionamiento.

30 Con mayor detalle, la carga reactiva regulable puede comprender una pluralidad de ramas eléctricas (es decir, por lo menos dos ramas eléctricas o más de dos) conectadas en paralelo entre sí, cada una de las cuales conecta la salida del filtro pasivo con un potencial de referencia (por ejemplo, tierra) y cada una de las cuales comprende además por lo menos una reactancia y por lo menos un conmutador conectado en serie con la reactancia.

De esta manera, al abrir o cerrar de manera selectiva los conmutadores, puede regularse la entidad de la carga reactiva basándose en las necesidades.

35 En la divulgación, el circuito de control puede comprender además:

- un condensador de aislamiento conectado en serie entre la salida del filtro pasivo y una carga que va a controlarse, y
- 40 - un segundo generador de corriente eléctrica continua conectado a un nodo comprendido entre el condensador de aislamiento y la carga que va a controlarse.

45 De esta manera efectivamente es posible añadir a o restar de la forma de onda de corriente eléctrica en la salida del filtro pasivo una corriente continua apropiada, que puede utilizarse para aumentar la potencia aplicada a la carga que va a controlarse, o asimismo para controlar de manera muy sencilla cargas que requieren una corriente negativa, por ejemplo dispositivos HEMT basados en heterouniones de tipo III-V (por ejemplo, GaN), ya que basta con sumar una corriente eléctrica negativa apropiada a la onda en la salida del filtro.

50 En general, esta solución permite un desacoplamiento eficaz entre los niveles de tensión y corriente de la forma de onda de corriente generada en la entrada al filtro pasivo de los de la forma de onda de corriente utilizada con eficacia para controlar la carga eléctrica.

55 En la divulgación, puede conectarse en serie una inductancia entre el segundo generador de corriente eléctrica continua y la carga que va a controlarse.

De esta manera puede impedirse con eficacia que la onda (normalmente de alta frecuencia) generada por el circuito de control en la salida del filtro pasivo interaccione negativamente con el generador de corriente eléctrica continua.

60 En la divulgación, el circuito puede comprender además un segundo condensador de aislamiento conectado en serie entre un potencial de referencia del generador de la forma de onda de corriente eléctrica (en la entrada al filtro pasivo) y un potencial de referencia de la carga.

65 De esta manera existe un desacoplamiento galvánico entre el filtro pasivo y la carga controlada, con la consiguiente posibilidad de presentar referencias de masa y fuentes de alimentación independientes para el filtro pasivo y la carga controlada.

La divulgación asimismo se refiere a un procedimiento para controlar una o más cargas eléctricas, que comprende por lo menos las siguientes etapas de:

- generar una forma de onda de corriente eléctrica,
- filtrar la forma de onda de corriente eléctrica para acondicionar uno o más de los armónicos de la misma,
- aplicar la forma de onda de corriente eléctrica filtrada a la carga eléctrica.

Esto logra sustancialmente las mismas ventajas que el circuito descrito anteriormente, en particular, la ventaja de poder “conformar” adecuadamente la forma de onda de corriente que controla la(s) carga(s) eléctrica(s), de modo que puede dársele la conformación más adecuada (en el dominio del tiempo) para minimizar pérdidas y/o para aumentar la eficiencia y la eficacia de control basándose en las necesidades específicas de la(s) carga(s) que va(n) a controlarse.

Por ejemplo, en el procedimiento, la etapa de filtrado puede proporcionar en la salida una forma de onda de corriente que presenta una conformación cuadrada/rectangular o por lo menos suficientemente cercana a una conformación cuadrada/rectangular.

Debe apreciarse que todas las características anteriores descritas anteriormente en relación con el circuito de control asimismo son válidas para el procedimiento.

En particular, el procedimiento puede incluir la generación de la forma de onda de corriente eléctrica, que comprende la etapa de convertir una corriente eléctrica continua en la forma de onda de corriente, por ejemplo, activando o desactivando un conmutador activo conectado a un generador de corriente eléctrica continua.

El procedimiento puede incluir además conectar una carga reactiva regulable en serie con el filtro pasivo y en paralelo con la carga que va a controlarse, para poder garantizar la máxima eficiencia en todas las condiciones de funcionamiento incluyendo en un caso de variación de la carga.

El procedimiento puede incluir además la etapa de añadir, a la forma de onda de corriente filtrada, una corriente constante antes de aplicarla a la carga que va a controlarse, para poder desacoplar los niveles de tensión y corriente de la forma de onda de corriente generada en la entrada al filtro pasivo de los de la forma de onda de corriente utilizada con eficacia para controlar la carga eléctrica.

El procedimiento asimismo puede incluir la etapa de separar galvánicamente el filtro pasivo de la carga que va a controlarse, para poder separar las referencias de masa y la fuente de alimentación del filtro pasivo y la carga controlada.

Breve descripción de los dibujos

Resultarán evidentes las características y ventajas adicionales de la divulgación a partir de una lectura de la siguiente descripción, proporcionada a título de ejemplo no limitativo haciendo referencia a las figuras ilustradas en las tablas adjuntas de dibujos.

Las figuras 1 y 2 son un diagrama general de un circuito de control según la presente divulgación.

La figura 3 es el diagrama de la figura 1 en el que se ilustra una posible carga eléctrica que va a controlarse.

Las figuras 4 a 6 son el diagrama de figura 1, en el que se ilustran posibles formas de realización de la carga reactiva regulable.

Las figuras 7 a 12 son el diagrama de figura 1, en el que se ilustran seis posibles formas de realización del filtro pasivo.

Descripción detallada

Las figuras ilustran un circuito eléctrico 100 configurado para controlar una o más cargas eléctricas 105 con una forma de onda de corriente eléctrica que es variable a lo largo del tiempo.

En términos generales, la(s) carga(s) eléctrica(s) 105 puede(n) ser sustancialmente de cualquier tipo, por ejemplo, cargas resistivas, cargas capacitivas o una combinación de cargas resistivas, capacitivas e inductivas, tal como se describirá más a fondo a continuación.

El circuito de controlador 100 comprende principalmente un generador de forma de onda de corriente eléctrica, que se indica en su totalidad mediante 110.

Sin embargo, en el ejemplo ilustrado, el generador 110 comprende un generador de corriente eléctrica continua 115 que presenta un primer terminal conectado a un potencial de referencia 120 apropiado, por ejemplo tierra, y un segundo terminal conectado a un circuito de conmutación, indicado en su totalidad mediante el número de referencia 125, que puede convertir la corriente eléctrica continua generada por el generador 115 en una forma de onda de corriente, es decir en una sucesión de pulsos de corriente en los que cada pulso de corriente varía entre un valor mínimo, por ejemplo pero no necesariamente un valor sustancialmente nulo, y un valor máximo dependiendo de la entidad de la corriente continua en la entrada y del tipo de circuito de conmutación 125, así como la manera de la que se controla el circuito 125.

El generador de corriente continua 115 puede ser, por ejemplo, una batería, pero asimismo puede ser un rectificador, por ejemplo, un rectificador de puente de diodos, con un único diodo, un diodo doble combinado, un rectificador síncrono u otro, que puede conectarse a una fuente de corriente alterna, por ejemplo, una red de distribución de electricidad de 230 V y 50 Hz común, de tal manera que rectifica la corriente alterna generada por la fuente. Puede estar presente un filtro de estabilización inmediatamente aguas abajo del rectificador. En este segundo caso, el generador 115 se configurará de manera más apropiada como un convertidor de CA/CC.

El circuito de conmutación 125 puede comprender una inductancia 130, denominada habitualmente una inductancia de choque o de alimentación, que se conecta al segundo terminal de generador 115. En serie con la inductancia 130, el circuito de conmutación 125 puede comprender un conmutador activo 135, por ejemplo un transistor BJT, MOS, IGBT, un relé, un relé de estado sólido, un conmutador MEMS, HEMT, HBT u otro conmutador, que presenta un primer terminal (por ejemplo, el drenaje para un MOSFET de tipo N) conectado al terminal de salida de la inductancia 130, un segundo terminal (por ejemplo, la fuente en el caso de un MOSFET de tipo N) conectado al potencial de referencia 120 del generador 115, y un tercer terminal de control (por ejemplo, la compuerta en el caso de un transistor de tipo FET o la base en el caso de un transistor de tipo BJT) conectado a un controlador o generador de señales 140. El controlador 140 es un dispositivo eléctrico/electrónico 140 que puede relacionarse con el mismo potencial de referencia 120 que el generador 115, o puede aislarse y ser independiente de la corriente de referencia 120 y, por tanto, conectarse mediante transformadores, optoacopladores, aislamientos capacitivos, etapas de amplificación apropiadas, etc. y que puede aplicar, al terminal de control del conmutador activo 135, una señal de controlador eléctrica apropiada, por ejemplo una forma de onda cuadrada/rectangular que presenta un ciclo de trabajo predeterminado que puede activar (es decir, llevar a saturación) y desactivar (llevar a corte) el conmutador activo 135.

Puede conectarse una reactancia, por ejemplo, una capacidad 145, a un nodo intermedio entre la inductancia 130 y el conmutador activo 135, cuyo segundo terminal se conecta al mismo potencial de referencia 120 que el generador 115. De esta manera, la capacidad 145 se conecta en serie con la inductancia 130 pero en paralelo al conmutador activo 135.

Alternativamente, el generador 110 puede ser un generador convencional de corriente alterna, por ejemplo, basado en los diagramas de amplificación lineales o de conmutación clásicos, por ejemplo, basados en medios puentes, en los que un segundo conmutador sustituye a la inductancia 130, o puentes en H completos.

Por ejemplo, la figura 2 ilustra una solución en la que el circuito de conmutación 125 está compuesto por un medio puente, que comprende dos conmutadores activos 135A y 135B dispuestos en serie uno con respecto a otro y en serie con el generador de corriente continua 115, conmutadores activos que se controlan mediante el controlador 140 de tal manera que se activan y desactivan de manera alternante, es decir cuando el conmutador 135A está activado, el conmutador 135B está desactivado, y viceversa.

En este caso asimismo el nodo de salida del generador 110 y el nodo intermedio entre los conmutadores activos 135A y 135B, a los que asimismo puede conectarse la capacidad 145, tal como se explicó anteriormente.

El circuito de control 100 comprende además un filtro pasivo, indicado en su totalidad mediante 150, que comprende un terminal de entrada conectado al nodo intermedio al que se conectan la inductancia 130 y el conmutador activo 135 (o los dos conmutadores activos 135A y 135B), y un terminal de salida conectado en serie a la carga 105 que va a controlarse. El filtro 150 pasivo asimismo puede presentar un tercer terminal conectado al mismo potencial de referencia 120 del generador 115.

El filtro 150 pasivo comprende generalmente componentes reactivos, capacitivos e inductivos, y asimismo puede comprender posiblemente elementos resistivos.

Una capacidad variable u otra carga reactiva 155 apropiada que pueda regularse bajo control puede conectarse al filtro 150 pasivo, filtro 150 pasivo que presenta un segundo terminal conectado al mismo potencial de referencia 120 que el generador 115.

El circuito de control 100 puede comprender además un condensador de aislamiento 160 conectado en serie entre la salida del filtro 150 pasivo y una carga 105 que va a controlarse. De esta manera, el condensador de aislamiento

160 subdivide el circuito de control 100 en un circuito primario (aguas arriba del condensador 160), que puede crear una forma de onda de corriente apropiada, y un circuito secundario (aguas abajo del condensador 160), que está aislado galvánicamente del primer condensador y puede transferir la forma de onda de corriente a la carga 105.

5

A este respecto, asimismo puede haber presente un segundo condensador de aislamiento 165, útil para desacoplar por completo el circuito primario del circuito secundario permitiendo, por ejemplo, que la carga que va a controlarse 105 se relacione con un potencial de referencia 120' que es diferente del potencial de referencia 120 del generador 115. Esto es particularmente útil, por ejemplo, cuando en el circuito de alimentación existen altos valores de corriente o tensión y se desea conservar la parte lógica que normalmente es particularmente sensible a sobretensiones.

10

Si está presente, el segundo condensador de aislamiento 165 presentará, por tanto, un primer terminal conectado al potencial de referencia 120 del generador 115, y un segundo terminal conectado al potencial de referencia 120' de la carga 105. Por otra parte, si no está presente el segundo condensador de aislamiento 165, está claro que el potencial de referencia de la carga 105 tendrá que coincidir con el potencial del generador 115.

15

En cualquier caso, el/los condensador(es) de aislamiento 160/165 puede(n) ser lo suficientemente grande(s) como para no alterar significativamente la forma de onda con la que se controla la carga 105, sin embargo, permitiendo una suma de la forma de onda de corriente eléctrica generada en la salida del filtro 150 pasivo a la corriente independiente presente en el circuito secundario.

20

Alternativamente el/los condensador(es) de aislamiento 160/165 puede(n) presentar unas dimensiones tales como para interactuar significativamente con el resto del circuito reactivo. Una dimensión de este tipo puede ser particularmente útil, por ejemplo, para minimizar los volúmenes del circuito para un rendimiento dado.

25

El circuito secundario del circuito de control 100 puede comprender un segundo generador de corriente continua 170 que presenta un primer terminal conectado al potencial de referencia 120' de la carga 105 que va a controlarse, y un segundo terminal conectado a un nodo eléctrico comprendido entre el condensador de aislamiento 160 y la carga 105.

30

De esta manera, el generador 170 puede ser útil para sumar o restar una corriente continua apropiada a o de la corriente generada por el circuito primario aguas abajo del filtro 150 pasivo.

35

Para impedir que el circuito primario del circuito de control 100, que funciona normalmente en un régimen de alta frecuencia, interactúe con el generador 170, puede ser útil incluir un inductor 175 conectado en serie entre el generador 170 y la carga 105, y de manera más precisa, entre el generador 170 y el nodo comprendido entre el condensador de aislamiento 160 y la carga 105. Este inductor 175 puede ser lo suficientemente grande como para bloquear todas las ondas de alta frecuencia que provienen del filtro 150 pasivo.

40

Funcionamiento

El sistema constituido por la inductancia 130 y el conmutador activo 135 controlado por el controlador 140 funciona en modo de conmutación, creando en el dominio del tiempo una forma de onda de corriente eléctrica que atraviesa el filtro 150 pasivo.

45

De hecho, durante el tiempo en el que el conmutador de llegada 135 está activado, la inductancia 130 se carga, mientras que durante el tiempo en el que el conmutador activo 135 está desactivado, la inductancia 130 se descarga sobre el filtro 150 pasivo. Por tanto, la inductancia 130 se comporta en una primera aproximación como generador de corriente, con una ondulación que depende del dimensionamiento de la inductancia 130. Se recalca lo útil que puede ser minimizar el dimensionamiento de la inductancia 130, haciendo que sea parte integrante del sistema resonante global con el objetivo, por ejemplo, de minimizar los volúmenes del sistema, o con el objetivo de aumentar la sección del conductor que constituye la inductancia 130, reduciendo por tanto las pérdidas parásitas y aumentando la eficiencia energética del sistema.

50

La capacidad 145 ubicada en paralelo al conmutador activo 135 permite maximizar la eficiencia energética del circuito de conmutación 125, garantizando que durante la activación y/o desactivación del conmutador activo 135 no haya altas tensiones y corrientes presentes en el nodo al mismo tiempo que conecta la inductancia 130 y el conmutador activo 135. A altas frecuencias, es posible que la capacidad 145 no esté presente físicamente, sino que la capacidad parásita del conmutador 135 se utilice con el mismo fin, ya que a menudo presenta el mismo orden de magnitud que las capacidades necesarias para una sintonización correcta del circuito.

60

La forma de onda de corriente generada por el circuito de conmutación 125 la modifica/acondiciona entonces de manera apropiada el filtro 150 pasivo, de modo que se alimenta la carga 105 con una forma de onda de corriente que presenta una forma de onda predeterminada en el dominio del tiempo.

65

En particular, el filtro 150 pasivo puede ser un filtro reactivo resonante, que comprende inductores y condensadores conectados de manera apropiada, que puede amplificar armónicos apropiados de la forma de onda de corriente recibida en la entrada y amortiguar otros, todo ello en función de la forma de onda que va a suministrarse a la carga 105.

5

Dicho de otro modo, según la forma de onda producida por el circuito de conmutación 125, el filtro 150 pasivo puede sintonizarse para proporcionar en la salida una forma de onda de corriente filtrada que presenta una forma predeterminada y que corresponde a la que va a controlar la carga 105.

10

Por ejemplo, si se desea controlar la carga 105 con una onda cuadrada/rectangular, el filtro 150 pasivo se sintonizará para amplificar la frecuencia fundamental de la señal, y la totalidad o muchos de los armónicos impares, con un factor de amplificación del 3^{er} armónico igual a 1/3 de la amplificación de la fundamental, un factor de amplificación del 5^o armónico igual a 1/5 de la fundamental, y así sucesivamente, y de tal manera que simultáneamente se absorban por completo o casi por completo la totalidad o muchos de los armónicos iguales.

15

Cuanto mayor sea el número de armónicos acondicionados de manera apropiada por el filtro 150, mejor será la similitud de la onda de salida con la onda deseada, por ejemplo, una onda cuadrada.

20

Claramente, al modificar la señal deseada en la salida será necesario modificar la sintonización del filtro 150 pasivo en consecuencia, específicamente sintonizando el filtro 150 para amplificar o amortiguar la señal de entrada, para reproducir tan fielmente como sea posible el contenido espectral de la forma de onda de corriente deseada en la salida.

25

En cualquier caso, la sintonización de los componentes reactivos del filtro 150 pasivo puede realizarse en el modo de conmutación a corriente cero (ZCS) o en el modo de conmutación a tensión cero (ZVS), incluso aunque sea más fácil y más conveniente para los objetivos de la presente divulgación funcionar en el modo de conmutación a tensión cero (ZVS) y, por tanto, con tensión nula durante la etapa de activación/desactivación del conmutador.

30

En este contexto, la carga reactiva regulable 155 puede desempeñar dos posibles funciones. La primera función está relacionada con la posibilidad de adaptar el filtro 150 pasivo si es necesario variar la forma de onda de control de la carga 105 (por ejemplo, si se modifica el ciclo de trabajo deseado o más en general la forma de onda deseada). La segunda función de la carga reactiva regulable 155 consiste en la posibilidad de compensar eventuales variaciones de la carga 105, si no constante, de modo que se requiere que el filtro 150 pasivo alimente una carga que presente una impedancia lo suficientemente estable y constante.

35

En términos generales, el circuito de control 100 puede considerarse un amplificador de conmutación suave resonante, de manera selectiva con respecto a los armónicos de interés, con una ganancia para cada armónico que se calibra de manera apropiada para obtener la forma de onda deseada, y un amortiguador de conmutación suave para los armónicos no deseados en la carga 105. Debe apreciarse que asimismo con respecto a los armónicos no deseados, el circuito de control 100 presenta una alta eficiencia, dado que el filtro 150 pasivo se comporta como un cortocircuito reactivo y, por tanto, que puede absorber por completo los armónicos no deseados sin disipar energía y, por tanto, manteniendo la alta eficiencia.

40

45

El circuito de control 100 se distingue de otros amplificadores, tales como amplificadores resonantes de las clases D, E, F, E/F, E⁻¹, F⁻¹ u otros circuitos similares, dado que el filtro 150 pasivo alimenta la carga 105 con más armónicos con respecto a la fundamental, amplificándose o amortiguándose cada uno de manera apropiada, precisamente para obtener en la carga formas de onda que sean diferentes de la sinusoidal simple, que constituye en cambio un caso particular del presente circuito que se conoce bien como fácil e inmediato de implementar.

50

En particular, el filtro 150 pasivo suministra a la carga 105 que va a controlarse los armónicos amplificados o amortiguados de manera apropiada útiles para construir el elemento único de control deseado, garantizando al mismo tiempo una eficiencia energética que puede alcanzar teóricamente el 100% y que puede traducirse en una eficiencia real de más del 90%.

55

En las secciones siguientes se proporcionará una aclaración adicional en relación con los diversos componentes del circuito de control 100.

Carga que va a controlarse

60

Haciendo referencia a la figura 3, la carga que va a controlarse 105 puede ser un conmutador activo, por ejemplo, el terminal de control de un transistor BJT, MOSFET, IGBT, HEMT, HBT, una carga piezoeléctrica (por ejemplo, accionadores o sensores piezoeléctricos) u otra carga caracterizada por presentar una componente capacitiva preponderante y/o significativa.

65

En particular, la carga eléctrica puede ser el terminal de control de un transistor MOS que va a controlarse con una señal de alta frecuencia, por ejemplo con una señal que presenta una frecuencia fundamental de MHz, decenas o

centenares de MHz, o incluso GHz para sistemas de tipo RF, o el terminal de control de un FET de un tipo HEMT (por ejemplo, GaN) que va a controlarse con frecuencias que pueden alcanzar decenas de MHz o GHz, o las compuertas de compuertas lógicas que van a controlarse a frecuencias mayores que GHz. En este contexto, el circuito de control 100 descrito anteriormente permite reducir significativamente las pérdidas y aumentar la frecuencia de conmutación sin incurrir en problemas importantes. Por tanto, el circuito de control 100 puede utilizarse con eficacia para controlar los terminales de control de conmutadores de potencia de alta frecuencia y con bajas pérdidas.

Por ejemplo, el circuito de control 100 puede ser particularmente útil para controlar con eficacia MOSFET basados en semiconductores binarios tales como los SiC, caracterizados por altas corrientes umbral (incluso por encima de 15 V) y, por tanto, hasta ahora penalizados en gran medida con respecto a los semiconductores a base de silicio.

De hecho, el circuito de control 100 permite controlar el MOS con ondas cuadradas que presentan una gran amplitud, unos tiempos de subida y bajada más cortos de los frentes y una corriente pico menor con respecto al valor de RMS, garantizando al mismo tiempo consumos muy bajos y frecuencias de conmutación muy altas.

En otras formas de realización, la carga que va a controlarse 105 puede comprender una multitud de terminales de control de un mismo número de transistores, tal como en el caso de un reloj de sincronización de todas las compuertas lógicas que constituyen los sistemas de cálculo de microconmutador o microprocesador modernos, incluyendo las memorias, tarjetas gráficas, así como cualquier dispositivo realizado hoy en día en la tecnología de CMOS, en la que un reloj dotado de memorias intermedias apropiadas para mejorar el abanico de salida debe cargar y descargar las compuertas lógicas de cada componente lógico.

En todos estos casos, la carga es sustancialmente capacitiva y en cada ciclo de control (por ejemplo, cada ciclo de reloj) es necesario cargar y descargar la capacidad de cada transistor individual por medio de un control apropiado. Ejecutando este control por medio del circuito de control 100 mencionado anteriormente es posible ventajosamente anular o en cualquier caso reducir significativamente la disipación de energía relacionada normalmente con los ciclos de carga y descarga.

De hecho, el sistema constituido por el conmutador activo 135 y el conjunto del filtro 150 pasivo y las reactancias 130, 145, 155 adicionales y por la reactancia de carga 105 constituye un sistema resonante con más de una frecuencia, sintonizado para funcionar en modo de ZCS y/o ZVS en todas las frecuencias de interés y que, por tanto, puede eliminar las pérdidas vinculadas con los ciclos de carga y descarga continuos de la carga 105. Una vez que se carga todo el circuito resonante, en esencia, existe un salto continuo de la energía de cada armónico desde el circuito de control hasta la carga en lo que respecta a los armónicos deseados, y entre componentes reactivos del circuito de control en lo que respecta a los armónicos no deseados en la carga, sin que sea necesario suministrar al circuito energía adicional excepto por la energía perdida en los elementos parásitos resistivos. Claramente, el filtro 150 debe diseñarse no sólo para garantizar que la amplitud de cada armónico sea la deseada sino, asimismo, en lo que respecta a los armónicos que deben llegar a la carga 105, incluso para garantizar que la fase de los armónicos se retarda o se adelanta de manera apropiada con respecto a la fase de la fundamental, para garantizar en la carga 105 la forma de onda deseada global.

Este tipo de funcionamiento no disipativo, junto con el control de conmutación suave del conmutador activo 135, permite un ahorro de energía muy alto y frecuencias de funcionamiento muy altas.

Igualmente, el circuito de control 100 puede utilizarse para generar un reloj que puede sincronizar un alto número de compuertas lógicas (un alto abanico de salida) y sustancialmente que sean cero las pérdidas y, por consiguiente, reducir las necesidades de sistemas de almacenamiento en memoria intermedia útiles para regenerar la señal de reloj más allá de un determinado número de compuertas lógicas conectadas, reduciendo significativamente la potencia perdida. Por tanto, un ordenador moderno, un teléfono inteligente, una tableta, o cualquier otro dispositivo electrónico que presente un reloj, en el que en la actualidad la carga capacitiva se carga y descarga millones de veces por segundo, estando constituida la carga capacitiva por la totalidad de las compuertas que constituyen las compuertas lógicas del sistema, puede mejorarse utilizando el circuito de control 100 como reloj, con el objetivo de que sean cero este tipo de pérdidas.

En este caso, la carga reactiva regulable 155 puede utilizarse con eficacia para equilibrar la variabilidad normal del número de compuertas lógicas que están activas en un momento dado, de modo que de manera global el sistema de generación de reloj vea una carga capacitiva que es sustancialmente constante e independiente de las compuertas lógicas activas en un momento dado.

Si es necesario aislar el circuito de control 100 de la carga 105 y/o modificar la corriente continua para polarizar la carga 105, es posible añadir, en serie en la salida del filtro 150 pasivo, los condensadores de aislamiento 160 y 165 y la inductancia 175, dimensionados con valores lo suficientemente grandes como para garantizar el paso de los armónicos de control a través de las capacidades 160 y 165 y para bloquear el paso de los armónicos hacia el generador 170 a través de la inductancia 175.

Este diagrama permite, por ejemplo, añadir o retirar una compensación de corriente continua apropiada a o de la onda generada por el filtro 150 pasivo aguas arriba, y asimismo es útil para desacoplar galvánicamente el circuito de control de la carga.

5 Este diagrama es particularmente ventajoso, por ejemplo, para compensar umbrales de activación/desactivación vinculados con el conmutador específico, y para garantizar un sencillo sistema de "habilitación" de la etapa de potencia, así como para impedir que corrientes de alta intensidad presentes en la carga dañen componentes sensibles en el circuito de control. Por ejemplo, puede utilizarse una compensación negativa en este circuito de control para poder utilizar, en el modo de conmutación, conmutadores basados en HEMT, por ejemplo, del tipo de
10 GaN, u otras heterouniones, caracterizadas normalmente por un canal normalmente activado y por la necesidad de que las corrientes negativas se envíen a un punto de corte.

Por tanto, el sistema propuesto permite realizar un sistema de reloj o controlador eficiente no sólo para compuertas o conmutadores lógicos basados en semiconductores de silicio, sino asimismo en semiconductores binarios o ternarios tales como, por ejemplo, SiC, GaN, GaAs, AlGaIn, AlGaAs, InGaIn, InGaP, etc.

15 Sin embargo, cabe señalar que el circuito de control 100 puede utilizarse con eficacia para el suministro a cualquier tipo de carga, incluso una no capacitiva, por ejemplo, inductiva o resistiva tal como, por ejemplo, motores eléctricos, solenoides, antenas, transformadores etc.

20 En todos los casos (carga capacitiva, inductiva o resistiva) el circuito de control 100 puede sintonizarse incluyendo en la sintonización del valor de impedancia de la carga 105 o considerando que la carga 105 es insignificante con respecto a la carga ficticia constituida por la capacidad 145, el filtro 150 pasivo y la carga reactiva regulable 155.

25 Carga reactiva regulable

Haciendo referencia a la figura 4, la carga reactiva regulable 155 puede comprender una pluralidad de ramas eléctricas 180 conectadas entre sí en paralelo, cada una de las cuales presenta un primer terminal conectado a la salida del filtro 150 pasivo aguas arriba del condensador de aislamiento 160 (si está presente), y un segundo terminal conectado al potencial de referencia 120 del generador 115. Una reactancia respectiva se inserta a lo largo de cada una de las ramas eléctricas 180, por ejemplo, una capacidad, y un conmutador 190 respectivo se sitúa en serie entre la reactancia 185 y el potencial de referencia.

35 Los conmutadores 190 pueden ser conmutadores activos, por ejemplo, MOSFET, BJT, relés, relés de estado sólido, posiblemente de la tecnología de CMOS, MEMS, o cualquier otro tipo de conmutador.

40 De esta manera, al activar uno o más de los conmutadores 190, las reactancias 185 respectivas están en paralelo a la carga 105. Viceversa, si los conmutadores 190 están desactivados, las reactancias 185 respectivas están en flotación y, por tanto, no modifican la impedancia total constituida por la suma de las reactancias 185 que están en cabeza hacia los conmutadores 190 activados, la reactancia de la carga 105 y las reactancias del filtro 150 pasivo. Por tanto, al variar de manera apropiada el número de conmutadores 190 activados y desactivados, se obtiene una regulación global de la impedancia total.

45 Se recalca que los conmutadores 190 pueden controlarse de manera completamente independiente con respecto a la señal, normalmente de alta frecuencia, lo que controla el conmutador 135.

Además, se desea recalcar que la carga reactiva regulable 155 puede comprender incluso sólo una de las ramas eléctricas 180, con la reactancia 185 relativa y el conmutador 190 relativo, o puede comprender cualquier otra reactancia regulable, por ejemplo, una o más capacidades variables.

50 Por ejemplo, una alternativa puede ser la ilustrada en la figura 5, en la que cada conmutador 190 de la carga reactiva regulable 155, por ejemplo, los MOSFET o BJT mencionados anteriormente útiles para incluir/excluir las reactancias de la carga regulable, se reemplaza por un diodo 300 en serie con la reactancia 185, por ejemplo, la capacidad, y por una rama eléctrica 305 conectada a un nodo de la rama 180 comprendida entre la reactancia 185 y el diodo 300.

55 Con la rama eléctrica 305 es posible aplicar una señal digital apropiada en este nodo intermedio.

60 De esta manera, si la señal digital se lleva a una corriente lo suficientemente baja, el diodo 300 se corta y la reactancia 185, por ejemplo, la capacidad, se excluye del circuito reactivo, viceversa si la señal digital se lleva a una corriente lo suficientemente alta, entonces el diodo 300 se lleva a conducción y, por tanto, la reactancia de compensación interviene en la resonancia global del sistema.

65 Una resistencia 310 y una inductancia 315 pueden disponerse en serie en la rama eléctrica 305, en la que la resistencia 310 limita la corriente de polarización del diodo 300 mientras que la inductancia 315 impide que las señales de alta frecuencia interaccionen con la señal de polarización digital del diodo 300.

Por tanto, utilizando una multiplicidad de estos circuitos en paralelo es posible realizar una reactancia variable en función de las señales de control digitales, lo que puede compensar las variaciones de carga o forma de onda del circuito principal.

Se ilustra una alternativa adicional en la figura 6, en que la carga reactiva regulable 155 está realizada por medio de diodos del tipo varicap, que presentan una alta capacidad parásita que es función de la corriente aplicada al diodo varicap. Por ejemplo, la carga reactiva regulable 155 puede comprender dos diodos varicap 320 conectados en serie y, en particular, conectando los cátodos respectivos entre sí, y un generador de corriente continua 325, que puede aplicar una corriente de sintonización regulable a los cátodos de los diodos varicap 320.

Asimismo, en este caso, con el fin de impedir que el generador 325 interactúe con las señales de alta frecuencia, puede insertarse una inductancia 330 en serie entre el generador 325 y el punto de conexión de los dos cátodos del varicap 320.

De esta manera, el circuito reactivo presenta sustancialmente una capacidad variable que depende de la corriente CC aplicada a los cátodos de los diodos varicap 320.

Filtro pasivo

Tal como se explicó anteriormente, el filtro 150 pasivo presenta el objetivo de amplificar de manera apropiada determinados armónicos de la forma de onda de corriente generada por el circuito de conmutación 125 y amortiguar otros. Para hacer esto, el filtro 150 pasivo es preferentemente un sistema multirresonante, con reactancias apropiadas de un tipo capacitivo e inductivo colocadas en serie y en paralelo y dimensionadas para obtener el nivel correcto de amplificación/amortiguación de cada armónico con respecto a la frecuencia fundamental, útiles para producir la señal deseada en la salida para controlar la carga 105.

A este respecto, el filtro 150 pasivo puede realizarse componiendo una serie de módulos 195 (es decir, por lo menos dos módulos) conectados entre sí tal como se ilustra, por ejemplo, en la figura 7.

Cada módulo 195 puede comprender una primera rama eléctrica 200 conectada en serie con las primeras ramas eléctricas 200 de los demás módulos 195 y con el generador 110 de la forma de onda de corriente, en el ejemplo con el nodo eléctrico comprendido entre la inductancia 130 y el conmutador activo 135. Cada módulo 195 puede comprender además una segunda rama eléctrica 205 conectada al terminal de salida de la primera rama eléctrica 200 respectiva y que puede conectar la primera rama eléctrica 200 con el potencial de referencia 120 del generador 115, por ejemplo, la tierra.

Según la forma de realización ilustrada en la figura 7, una capacidad de entrada 210 puede estar presente en la primera rama eléctrica 200 de cada módulo 195, seguida por un circuito resonante LC en paralelo que comprende una inductancia 215 colocada en paralelo a una capacidad 220. Al mismo tiempo, un circuito resonante LC puede estar presente en la segunda rama eléctrica 205 de cada módulo 195, que comprende una capacidad 225 seguida por una inductancia 230. Cada módulo 195 asimismo puede comprender posiblemente una capacidad 235 adicional colocada en paralelo al circuito resonante LC en serie.

El nodo de salida de cada módulo 195, que puede conectarse a un módulo 195 siguiente y/o la carga que va a controlarse 105, está constituido por el nodo en común entre la primera rama eléctrica 200 y la segunda rama eléctrica 205, en el ejemplo de la figura 4 entre el resonador en paralelo y el resonador en serie.

Se recalca que existen diversas posibles topologías e implementaciones de circuitos para realizar el filtro 150 pasivo, pudiéndose dimensionar todas ellas de manera apropiada para conseguir el objetivo deseado de amplificación de algunos armónicos y amortiguación de otros con respecto a una frecuencia fundamental.

Por ejemplo, los módulos 195 ilustrados anteriormente pueden simplificarse de manera apropiada al tiempo que se garantizan todavía grados de libertad en el sistema, útiles para satisfacer las restricciones a las relaciones de amplificación entre los diversos armónicos y para construir la forma de onda deseada para alimentar la carga 105.

Según la forma de realización ilustrada en la figura 8, sólo se inserta el circuito resonante LC en paralelo en la primera rama eléctrica 200 de cada módulo 195, que comprende la inductancia 215 colocada en paralelo a la capacidad 220, mientras que sólo se inserta la capacidad 225 en la segunda rama eléctrica 205 de cada módulo 195.

Según la forma de realización ilustrada en la figura 9, sólo se inserta la inductancia 215 en la primera rama eléctrica 200 de cada módulo 195, mientras que se inserta la capacidad 235 en la segunda rama eléctrica 205 de cada módulo 195 en paralelo al circuito resonante LC en serie 225 que comprende la capacidad seguida por la inductancia 230.

Según la forma de realización ilustrada en la figura 10, sólo se inserta la inductancia 215 en la primera rama eléctrica 200 de cada módulo 195, mientras que sólo se inserta el circuito resonante LC en serie en la segunda rama eléctrica 205 de cada módulo 195 que comprende la capacidad 225 seguida por la inductancia 230.

5 Según la forma de realización ilustrada en la figura 11, no se inserta ningún componente reactivo en la primera rama eléctrica 200 de cada módulo 195, mientras que sólo se inserta el circuito resonante LC en serie en la segunda rama eléctrica 205 de cada módulo 195 que comprende la capacidad 225 seguida por la inductancia 230.

10 En todos los casos mencionados anteriormente, la carga que va a controlarse 105 puede conectarse al nodo de salida de uno cualquiera de los módulos 195. Específicamente, la carga que va a controlarse 105 puede conectarse al nodo de salida de un módulo 195 elegido para permitir que cada armónico llegue a la carga 105 con la fase correcta con respecto a otros con el fin de construir la señal de control deseada. Por ejemplo, en un caso en el que la carga eléctrica 105 va a controlarse con formas de onda cuadradas (obtenidas amplificando la frecuencia fundamental de la forma de onda en la entrada y los armónicos impares de la misma y amortiguando los armónicos iguales), la carga 105 puede conectarse ventajosamente al nodo de salida del primer módulo 195, es decir entre los módulos primero y segundo, de modo que los armónicos impares estén todos automáticamente en fase con respecto a la frecuencia fundamental.

20 Cualquiera que sea el diagrama preseleccionado, resulta preferido además que el filtro 150 pasivo presente, de manera global, bajos valores parásitos para mantener alta la eficiencia energética del circuito de control 100. Con este fin es posible, por ejemplo, utilizar condensadores cerámicos dotados de una baja ESR (*Equivalent Series Resistance*, resistencia en serie equivalente) y una baja autodescarga, así como inductores con bajas pérdidas en el material de imantación (por ejemplo, ferritas adecuadas para las altas frecuencias en juego o de hecho envueltas en aire o en material no ferromagnético). Esto es posible especialmente gracias a las altas frecuencias en juego, que permiten la miniaturización de los componentes, por ejemplo, con capacidades del orden de pF, decenas de pF, centenas de pF o como máximo unos pocos pF, e inductores con valores del orden de unos pocos nH hasta un máximo de unos pocos uH.

30 Todas las variantes propuestas permiten, si se dimensionan y sintonizan de manera apropiada, transferir la forma de onda deseada sobre la carga que va a controlarse 105, con un alto grado de eficiencia (de manera ideal sin pérdida) y una frecuencia de control muy alta de la carga, con la posibilidad de llevar a cabo al mismo tiempo una separación galvánica de la carga 105 del circuito de control 100 y un nivel de desplazamiento del valor de CC aplicado a la carga.

35 En una forma de realización alternativa ilustrada en la figura 12, el filtro 150 pasivo puede realizarse utilizando componentes reactivos distribuidos, por ejemplo, por medio de las líneas 240 de transmisión.

40 Las líneas 240 de transmisión pueden estar basadas, por ejemplo, en tramos de cables coaxiales, microcintas, líneas equilibradas tales como pares trenzados, cuadretes en estrella, conductores dobles, líneas de Lecher o líneas de cable sencillo, u otros tipos de líneas de transmisión, incluso en bucle, para obtener un filtro 150 pasivo dimensionado de manera apropiada para conseguir de manera apropiada el objetivo de amplificar y amortiguar de manera controlada cada armónico.

45 De hecho, las líneas 240 de transmisión son en sí mismas elementos modelables, que comprenden por lo menos una inductancia distribuida en paralelo a una capacidad distribuida y que, por tanto, pueden resonar para valores de frecuencia infinitos, múltiplos de una frecuencia fundamental dependiente de las características geométricas y de construcción de la línea de transmisión.

50 Al conectar de manera apropiada una o más líneas 240 de transmisión y posibles cargas reactivas de adaptación concentradas, es posible obtener, por tanto, el filtro deseado útil para realizar el circuito de control 100.

55 Evidentemente un experto en la materia puede introducir modificaciones de naturaleza técnica y de aplicación en el circuito de control 100 descrito anteriormente y el procedimiento de funcionamiento relativo, sin apartarse del alcance de la invención si tales modificaciones están comprendidas en las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Circuito eléctrico (100), que comprende por lo menos:

- 5 - una carga eléctrica que va a controlarse (105)
- un generador (110) de una forma de onda de corriente eléctrica, y
- 10 - un filtro pasivo (150) que comprende una entrada conectada al generador (110) y una salida conectada a la carga eléctrica (105) que va a controlarse, en el que el filtro pasivo (150) se sintoniza para generar una forma de onda de corriente eléctrica resultante de un acondicionamiento de uno o más armónicos de las formas de onda de corriente eléctrica en la entrada,

15 en el que el filtro pasivo (150) es un filtro reactivo resonante que comprende inductores y condensadores,

 en el que el filtro pasivo (150) se sintoniza para amplificar el primer armónico de la forma de onda de corriente eléctrica con un factor de multiplicación, amortiguar por completo o casi por completo el segundo armónico y amplificar el tercer armónico con un factor de amplificación igual a un tercio del factor de multiplicación del primer armónico,

20 en el que el generador (110) de la forma de onda de corriente comprende:

- un generador (115) de corriente eléctrica continua,
- 25 - un circuito de conmutación (125) apto para convertir la corriente eléctrica continua en una forma de onda de corriente eléctrica,

 en el que el circuito de conmutación (125) comprende por lo menos:

- 30 - un conmutador activo (135)
- un controlador (140) para generar una señal de controlador eléctrica apto para activar y desactivar el conmutador activo (135),

35 en el que el circuito de conmutación (125) comprende una primera inductancia (130) conectada en serie entre el generador (115) de corriente eléctrica continua y el conmutador activo (135) y la entrada del filtro pasivo (150) se conecta con un nodo eléctrico interpuesto entre la primera inductancia (130) y el conmutador activo (135),

40 en el que la carga (105) que va a controlarse comprende un terminal de control de un segundo conmutador activo, caracterizado por que el filtro pasivo (150) comprende una pluralidad de módulos eléctricos (195) que incluyen por lo menos un primer módulo eléctrico y un segundo módulo eléctrico, en el que cada uno de los por lo menos primer y segundo módulos eléctricos comprende por lo menos:

- 45 - una primera rama eléctrica (200) que comprende un terminal de entrada y un terminal de salida, y
- una segunda rama eléctrica (205) que comprende una segunda inductancia (230) y una primera capacidad (225), conectándose la segunda rama eléctrica (205) entre el terminal de salida de la primera rama eléctrica (200) del módulo eléctrico respectivo y un potencial de referencia y en el que el terminal de entrada de la primera rama eléctrica (200) del primer módulo eléctrico se conecta a la entrada del filtro pasivo (150) y el terminal de entrada de la primera rama eléctrica (200) del segundo módulo eléctrico se conecta al terminal de salida de la primera rama eléctrica (200) del primer módulo eléctrico.

55 2. Circuito (100) según la reivindicación 1, en el que el circuito de conmutación (125) comprende una segunda capacidad (145) conectada al nodo eléctrico interpuesto entre la primera inductancia (130) y el conmutador activo (135), presentando la segunda capacidad (145) un segundo terminal conectado a un mismo potencial de referencia que el generador (115) de corriente eléctrica continua.

60 3. Circuito (100) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el filtro pasivo (150) se sintoniza para proporcionar en la salida una forma de onda de corriente cuadrada/rectangular.

 4. Circuito (100) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el filtro pasivo (150) es multirresonante.

65 5. Circuito (100) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que:

- dentro de la segunda rama eléctrica (205) de cada uno de los módulos eléctricos (195) la segunda inductancia (230) está dispuesta en serie con la primera capacidad (225); y
 - la primera rama eléctrica (200) de cada módulo eléctrico (195) comprende una tercera inductancia (215).
- 5
6. Circuito (100) según la reivindicación 5, en el que cada módulo eléctrico (195) comprende una tercera capacidad (220) conectada en paralelo a la tercera inductancia (215) de la primera rama eléctrica (200).
- 10
7. Circuito (100) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que cada módulo eléctrico (195) comprende una cuarta capacidad (210) comprendida en la primera rama eléctrica (200).
- 15
8. Circuito (100) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la carga eléctrica que va a controlarse (105) se conecta al terminal de salida de la primera rama eléctrica (200) del primer módulo eléctrico (195) del filtro pasivo (150).
- 20
9. Circuito (100) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende una carga reactiva regulable (155) conectada a la salida del filtro pasivo (150).
- 25
10. Circuito (100) según la reivindicación 9, en el que la carga reactiva regulable (155) comprende por lo menos una tercera rama eléctrica (180) que conecta la salida del filtro pasivo (150) con un potencial de referencia y que comprende por lo menos una reactancia (185) y por lo menos un conmutador (190) conectado en serie con la reactancia (185).
- 30
11. Circuito (100) según la reivindicación 9, en el que la carga reactiva regulable (155) comprende por lo menos una tercera rama eléctrica (180) que conecta la salida del filtro pasivo (150) con un potencial de referencia y que comprende por lo menos una reactancia (185), por lo menos un diodo (300), una cuarta rama eléctrica (305) conectada a un nodo de la rama eléctrica (180) comprendida entre la reactancia (185) y el diodo (300) y una señal digital aplicada a la rama eléctrica adicional (305).
- 35
12. Circuito (100) según la reivindicación 11, en el que una resistencia (310) y una inductancia (315) están dispuestas en serie sobre la cuarta rama eléctrica (305).
- 40
13. Circuito (100) según cualquiera de las reivindicaciones 10 a 12, en el que la carga reactiva regulable (155) comprende una pluralidad de dichas terceras ramas eléctricas (180).
- 45
14. Circuito (100) según la reivindicación 9, en el que la carga reactiva regulable (155) comprende por lo menos una tercera rama eléctrica (180) que conecta la salida del filtro pasivo (150) con un potencial de referencia y que comprende dos diodos varicap (320) ubicados sobre la tercera rama eléctrica (180) con los cátodos respectivos conectados entre sí y un generador de corriente continua (325) para aplicar una corriente de sintonización regulable a los cátodos de los diodos varicap (320).
- 50
15. Circuito (100) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende:
- un primer condensador de aislamiento (160) conectado entre la salida del filtro pasivo (150) y la carga (105) que va a controlarse, y
 - un segundo generador (170) de corriente eléctrica continua conectado a un nodo comprendido entre el primer condensador de aislamiento (160) y la carga (105) que va a controlarse.
- 55
16. Circuito (100) según la reivindicación 15, que comprende una cuarta inductancia (175) conectada entre el segundo generador (170) de corriente eléctrica continua y la carga (105) que va a controlarse.
17. Circuito (100) según la reivindicación 15 o 16, que comprende un segundo condensador de aislamiento (165) que establece una conexión directa entre un potencial de referencia (120) del generador (110) de la forma de onda de corriente eléctrica y un potencial de referencia de la carga (105).

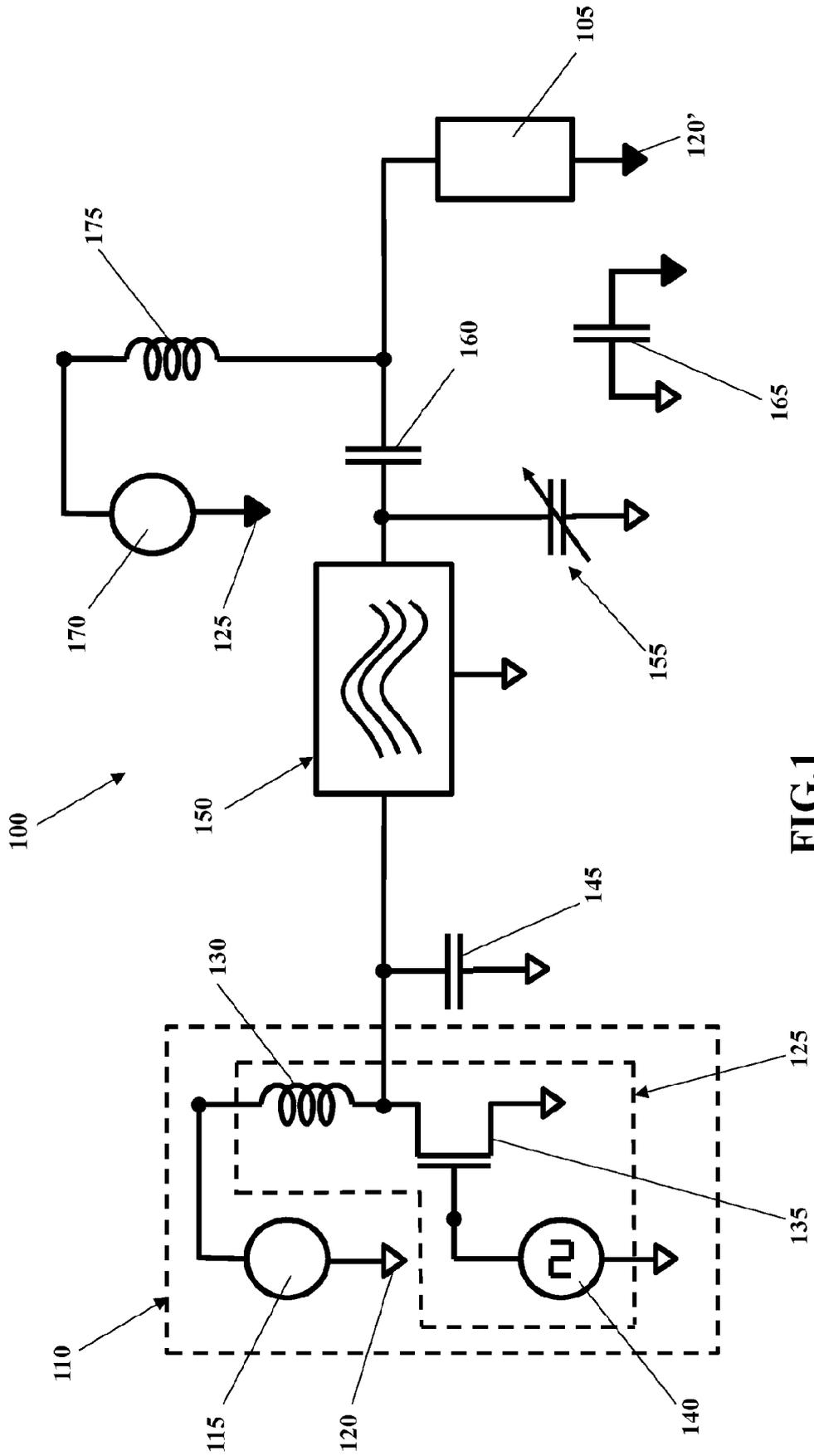


FIG. 1

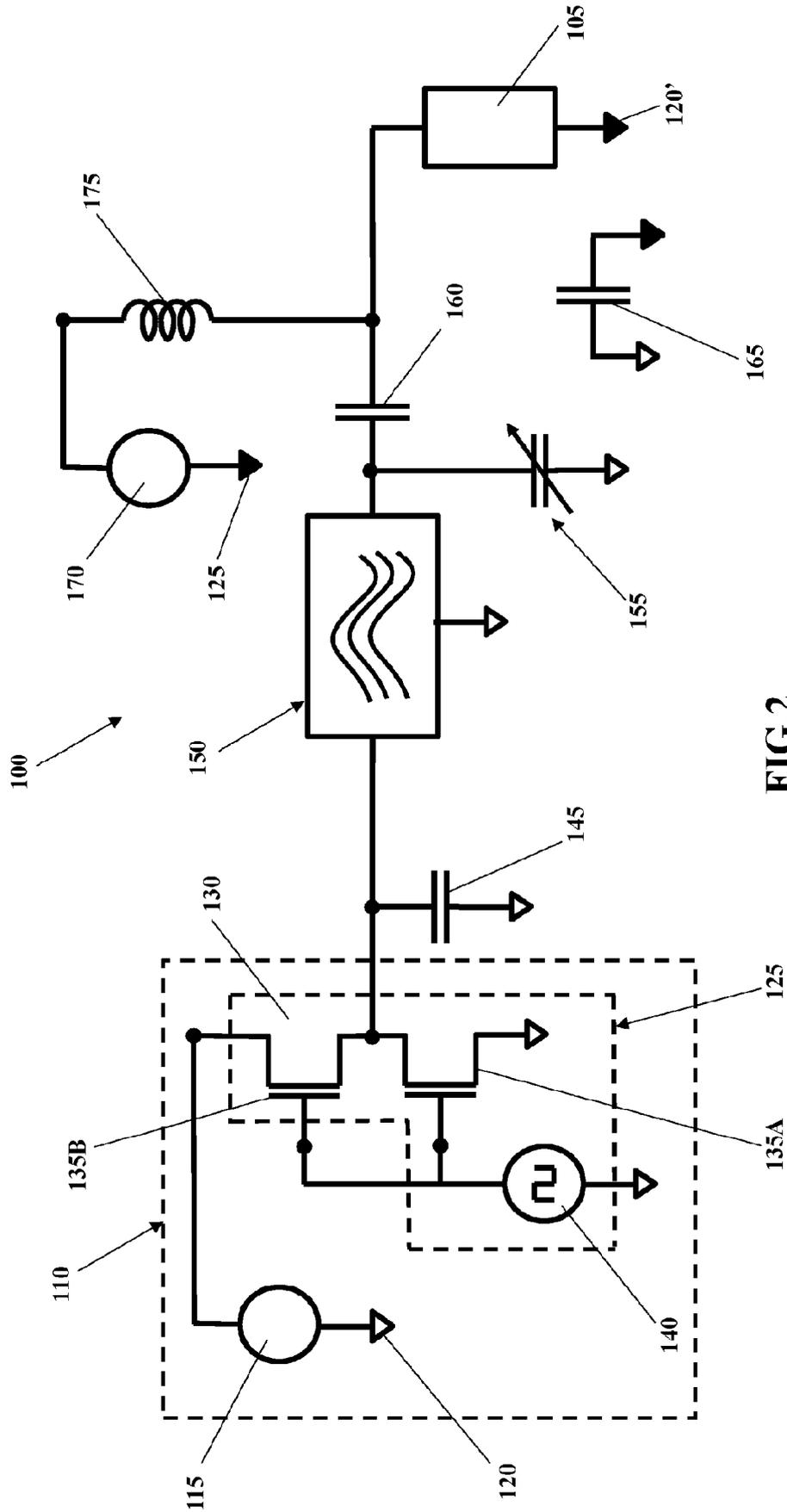


FIG. 2

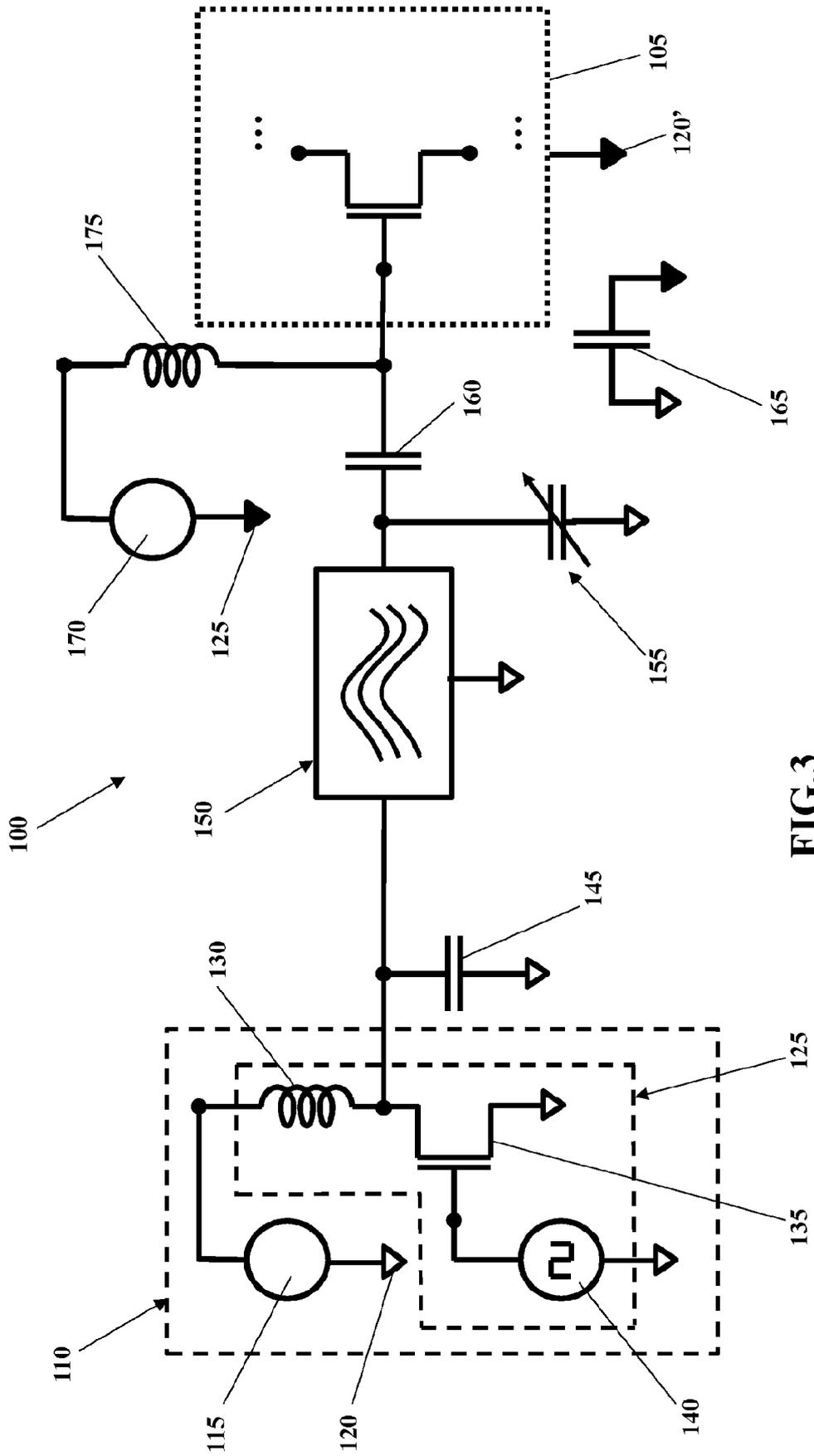


FIG.3

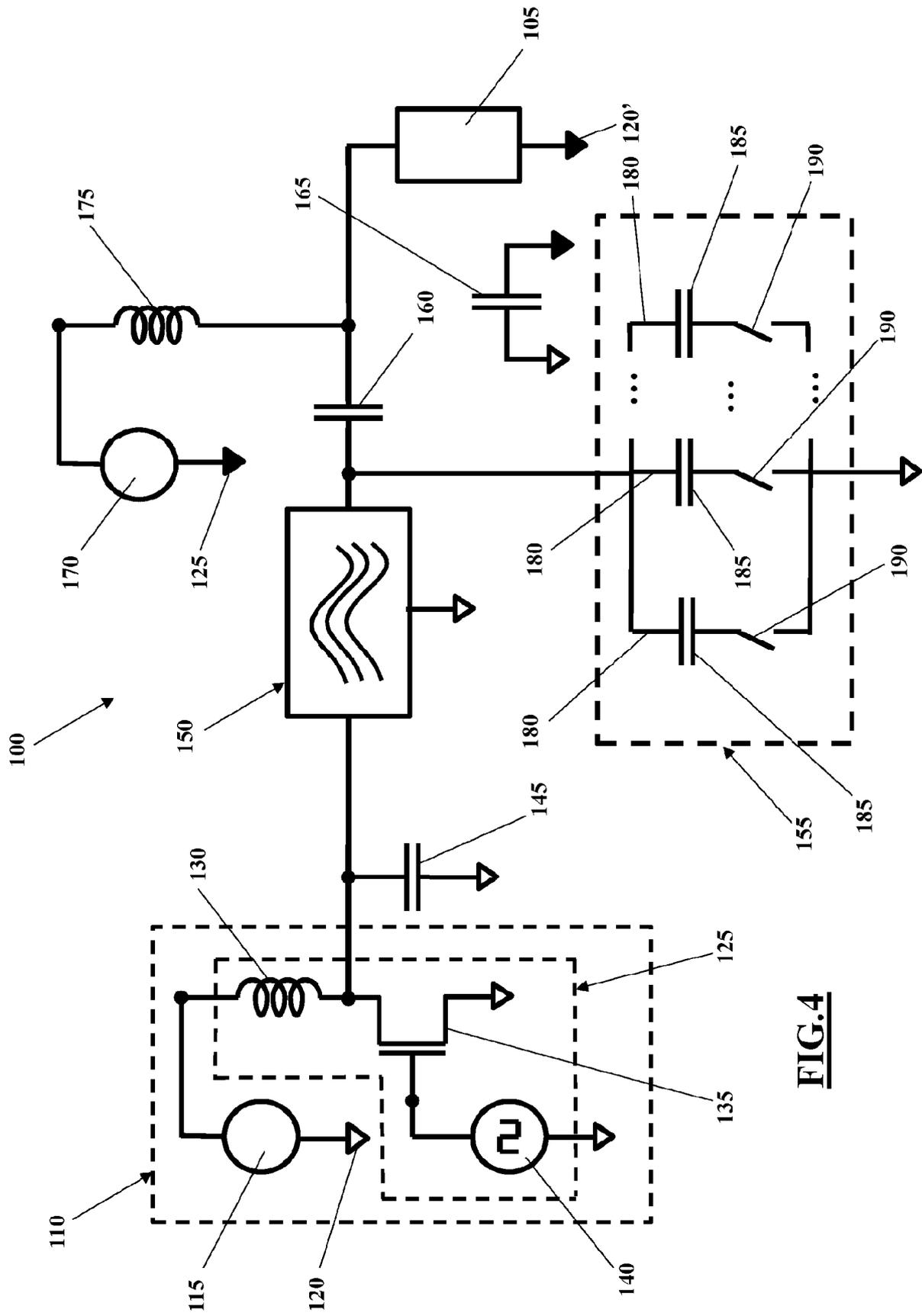


FIG.4

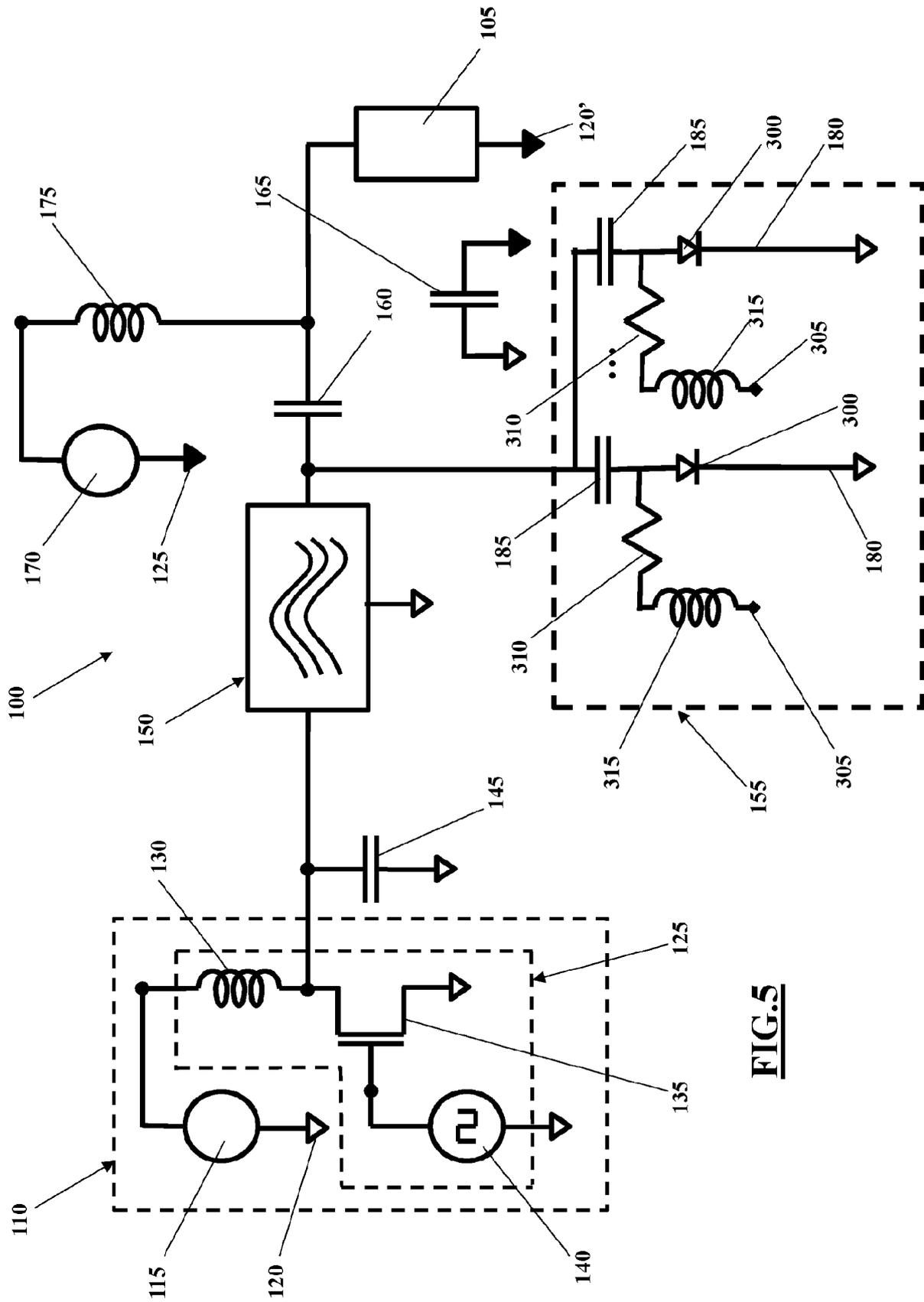


FIG.5

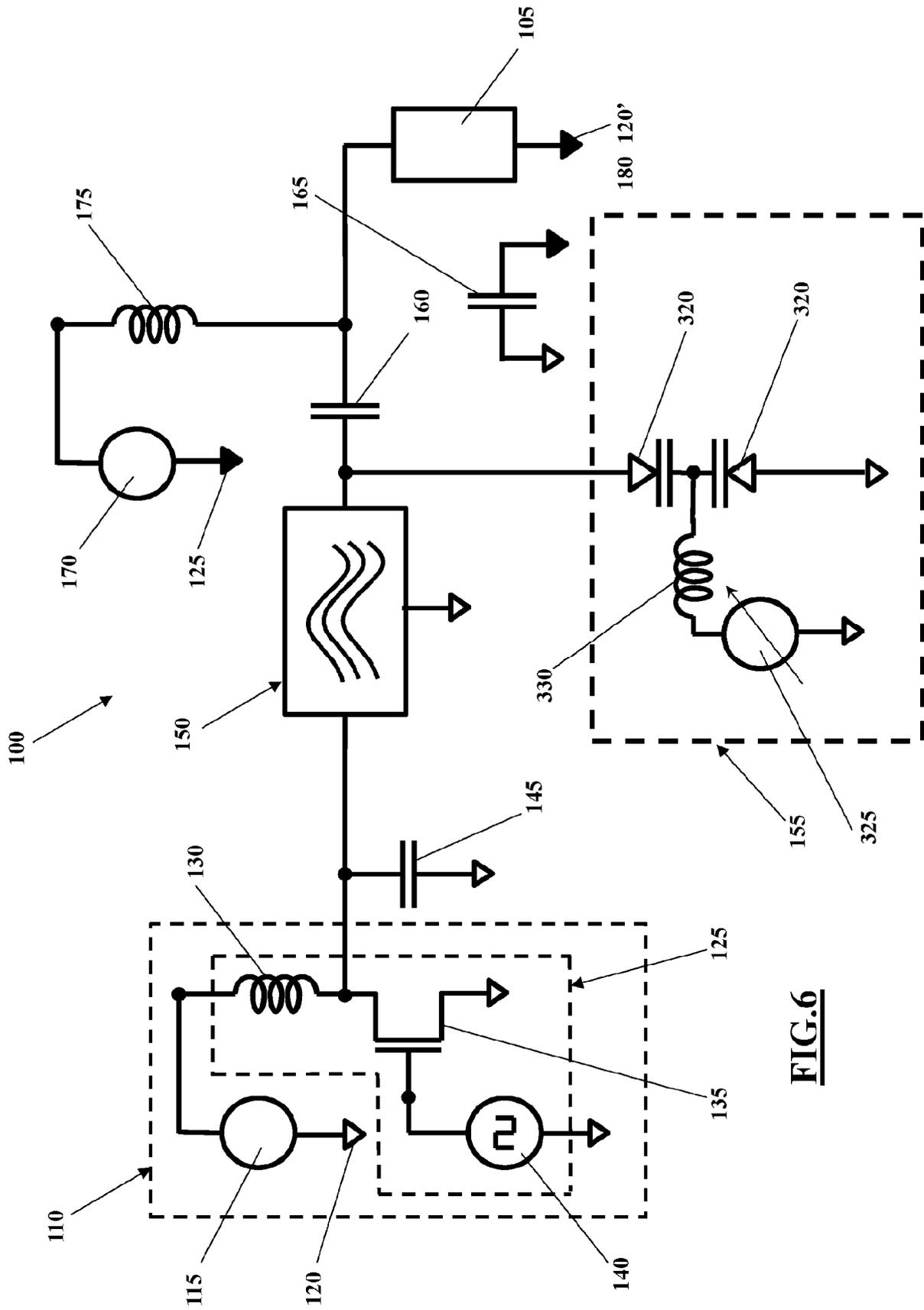


FIG.6

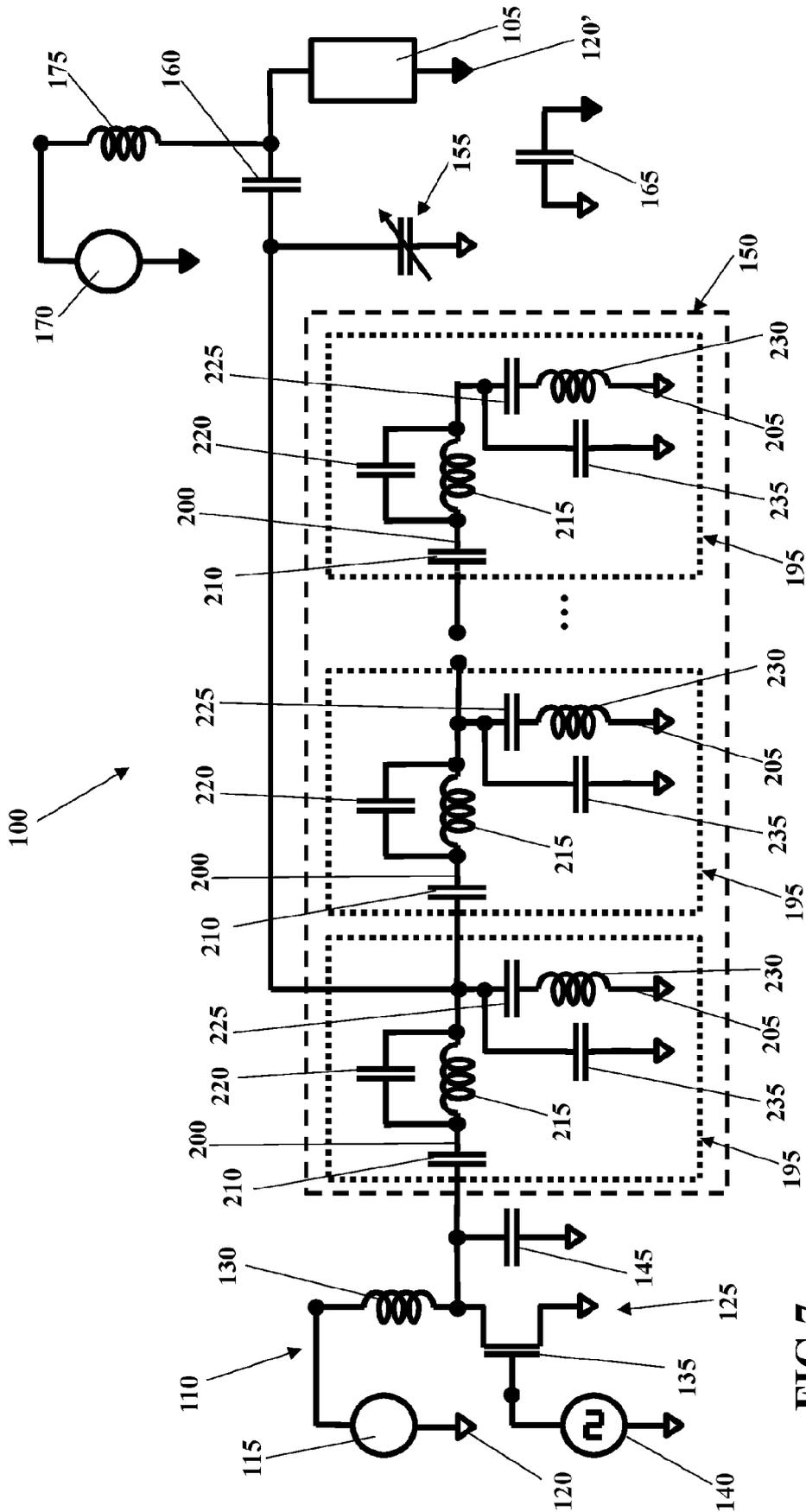


FIG.7

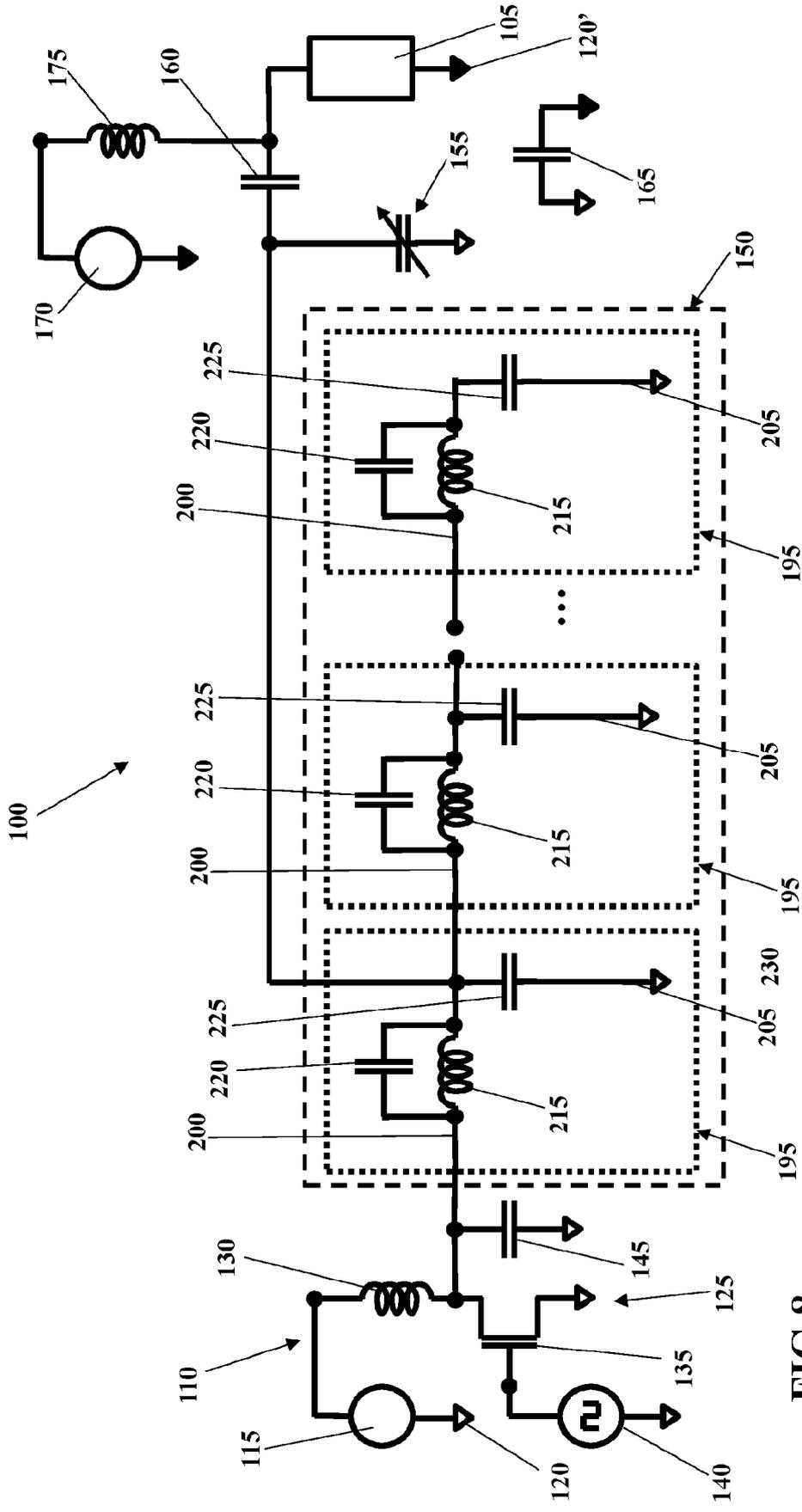


FIG.8

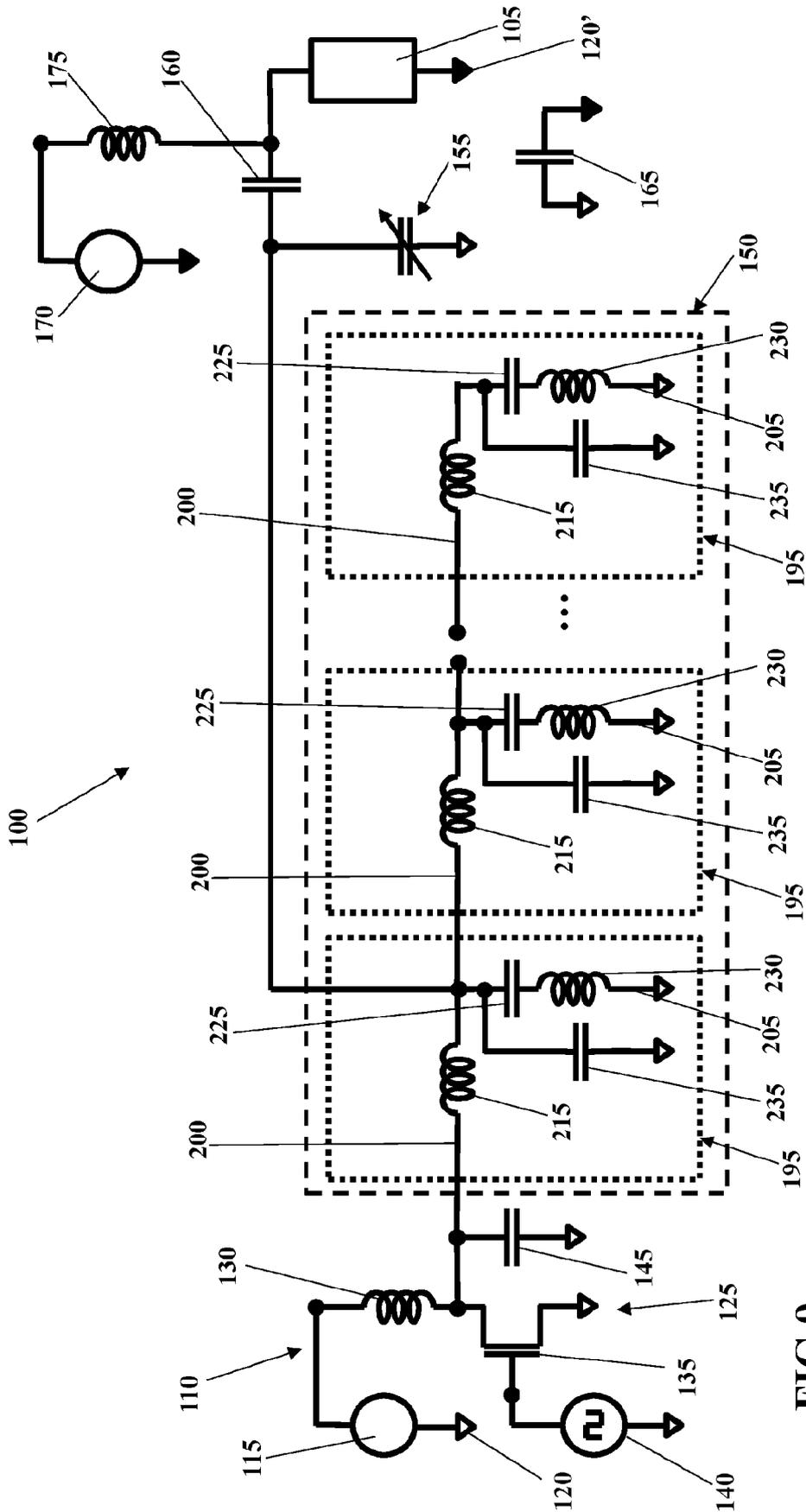


FIG.9

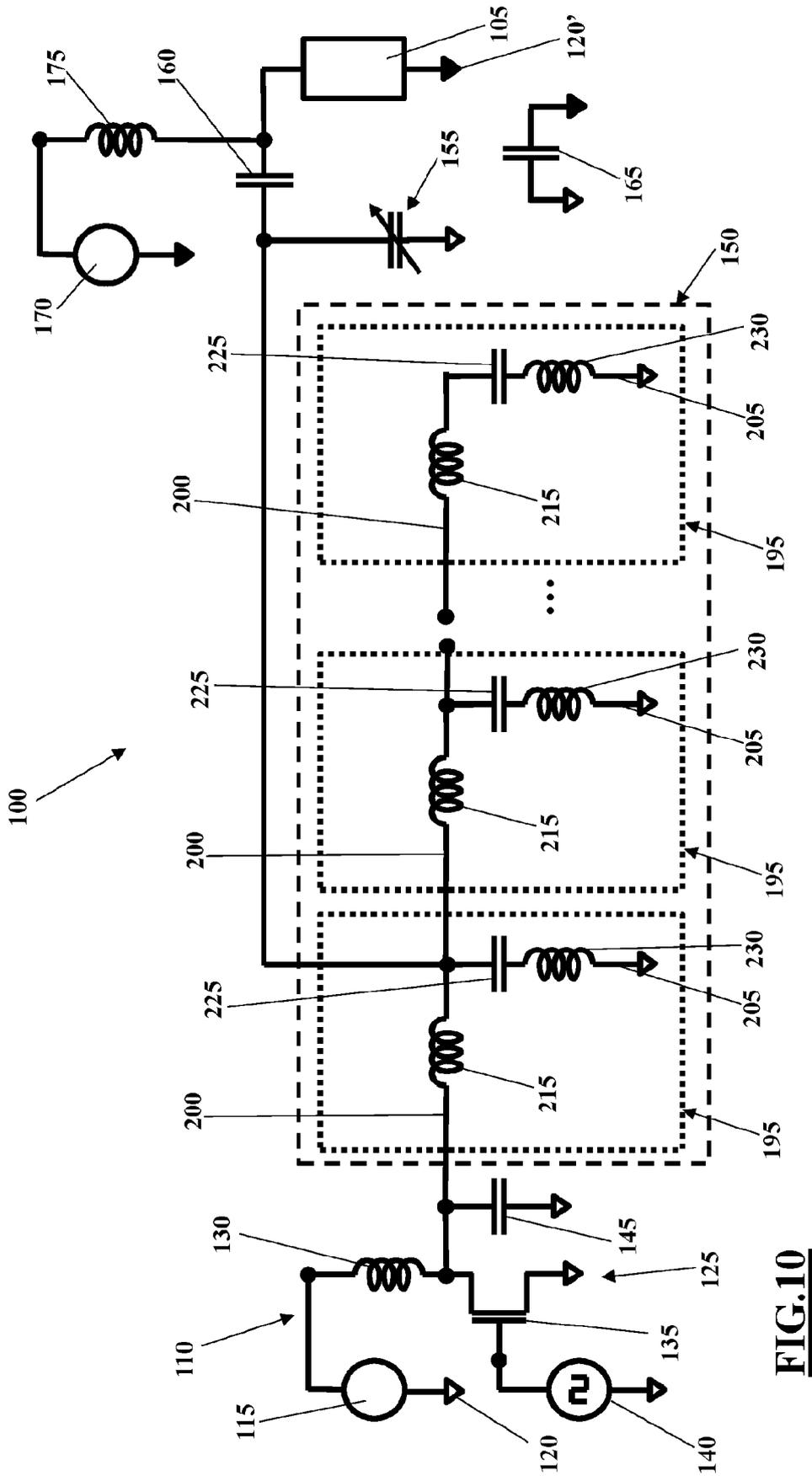


FIG.10

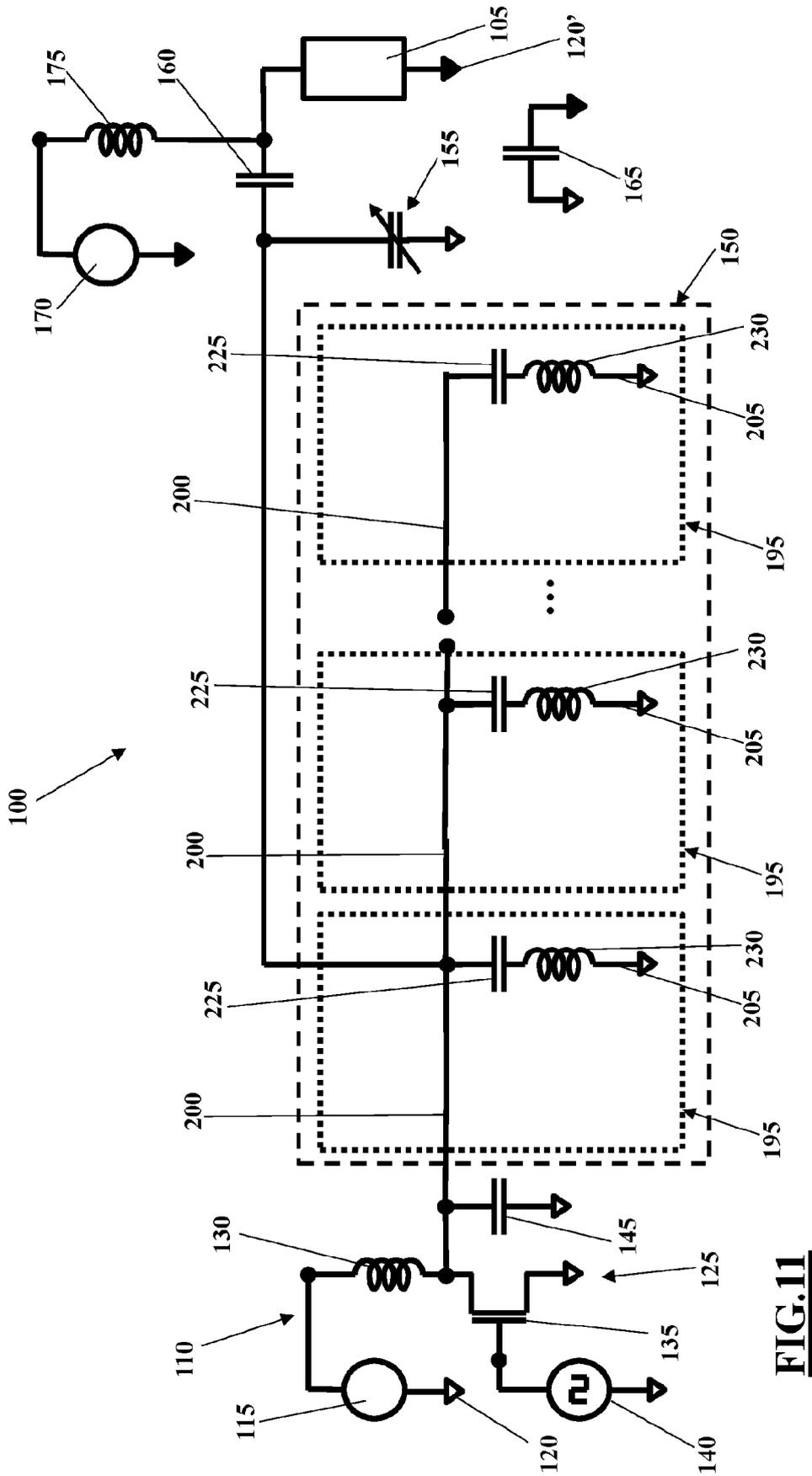


FIG.11

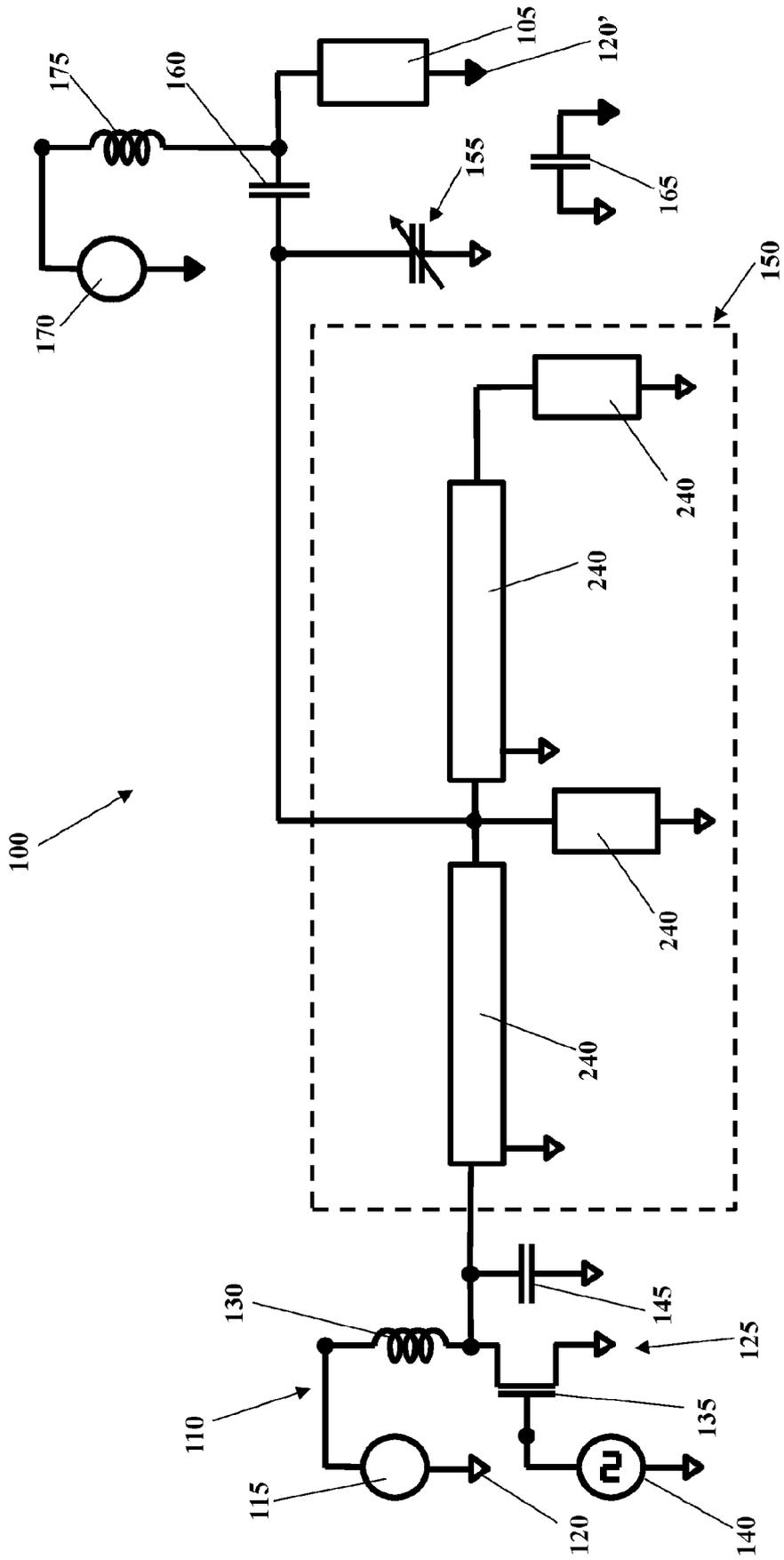


FIG.12