

INVERSOR DE SEGUIMIENTO DE UTILIZACIÓN DE ENERGÍA MONOFÁSICO

ANTECEDENTES DE LA TÉCNICA

[0001] Un sistema de red eléctrica de CA (también denominado “red eléctrica de CA”, “red eléctrica” o simplemente “red”) es un sistema eléctrico que tiene al menos un par de líneas eléctricas para suministrar electricidad producida en una o más plantas de energía potencialmente distribuidas a consumidores distribuidos que tienen cargas conectadas en paralelo a las líneas eléctricas. Tales cargas se denominarán colectivamente como “la carga” o “la carga de la red” en este documento.

[0002] Es obligatorio que toda la electricidad suministrada a las líneas eléctricas de la red se ajuste a la “convención de la red eléctrica”. De acuerdo con la convención de la red eléctrica, la energía entregada a la red eléctrica debe tener la forma de un tren de voltaje de corriente alterna (CA) que oscila sinusoidalmente. De acuerdo con la convención de la red eléctrica, el tren de potencia de CA para cada par de líneas eléctricas debe tener un voltaje pico fijo específico, tener una frecuencia fija específica y estar sincronizado con una diferencia de fase fija específica entre las líneas eléctricas en el par de líneas eléctricas.

[0003] Un convertidor monofásico CC/CA conectado a la red es un convertidor que puede convertir electricidad de corriente continua (CC) en energía CA que se ajusta a la convención de la red eléctrica con respecto a un par específico de líneas eléctricas de las líneas eléctricas de la red, y que proporciona esa energía de CA al par específico de líneas eléctricas. Dicho convertidor CC/CA se denomina inversor de conexión a la red eléctrica, o en este documento se denomina “convertidor monofásico CC/CA”. El par específico de líneas eléctricas que está conectado al convertidor monofásico CC/CA se denomina aquí “par de líneas eléctricas”.

[0004] Una estación de energía eléctrica fotovoltaica (PV) convierte la energía solar para generar energía eléctrica de CC. La energía de CC generada se convierte luego en el tren de potencia de CA mediante convertidores CC/CA monofásicos para su suministro a través del par de líneas de alimentación y para el consumo de la carga. Este tren de potencia de CA tiene la forma de un tren de voltaje sinusoidal que oscila en el dominio del tiempo; y que se ajusta a la convención de redes eléctricas. La estación de energía eléctrica fotovoltaica se denomina aquí “estación fotovoltaica”.

[0005] La materia objeto reivindicada en el presente documento no se limita a las realizaciones que resuelven cualquier desventaja o que operan solo en entornos como los descritos anteriormente. Más bien, estos antecedentes solo se proporcionan para ilustrar un área de tecnología ejemplar en la que se pueden poner en práctica algunas realizaciones descritas en el presente documento.

BREVE RESUMEN

[0006] Las realizaciones descritas en el presente documento se refieren a un dispositivo que incluye un inversor monofásico que emplea un ajustador de fase y dos módulos de conversión CC/CA. De acuerdo con los principios descritos en este documento, el inversor monofásico comprende un primer módulo de conversión CC/CA para extraer y convertir la energía en una fuente CC para producir un primer tren de potencia CA sinusoidal que se ajusta a la convención de la red eléctrica y está sincronizado con un par de líneas eléctricas de la red. Este inversor monofásico comprende además un segundo módulo de conversión CC/CA para extraer y convertir al menos porción de la potencia CC restante, denominada aquí potencia complementaria (o excedente); para producir un segundo tren de potencia de CA sinusoidal que se ajusta a la convención de la red eléctrica, excepto que este segundo tren de potencia de CA sinusoidal está desfasado 90 grados con el par de líneas de potencia. Tenga en cuenta que estos dos dispositivos de conversión extraen su energía sin superponerse en el dominio del tiempo (por ejemplo, secuencialmente). Esta energía excedente normalmente se perdería en forma de calor.

[0007] De acuerdo con al menos algunas realizaciones descritas en el presente documento, el convertidor monofásico comprende además el ajustador de fase que ajusta la fase del segundo tren de voltaje de CA sinusoidal en 90 grados. El segundo tren de potencia de CA sinusoidal se sincroniza en fase con el primer tren de potencia de CA sinusoidal, lo que permite que ambos trenes de potencia de CA sinusoidales se ajusten a la convención de la red eléctrica y se sincronicen con el par de líneas eléctricas de la red eléctrica. Por lo tanto, ambos trenes de potencia de CA se pueden proporcionar en el par de líneas eléctricas. De acuerdo con algunas realizaciones descritas en este documento, el dispositivo incluye tres convertidores CC/CA monofásicos, uno para cada par de líneas eléctricas de una red eléctrica trifásica.

[0008] Este resumen se proporciona para presentar una selección de conceptos en una forma simplificada que se describen más adelante en la descripción detallada. Este resumen no pretende identificar características clave o características esenciales de la materia reivindicada, ni pretende ser utilizado como ayuda para determinar el alcance de la materia reivindicada.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

[0009] Con el fin de describir la manera en que se pueden obtener las ventajas y características mencionadas anteriormente y otras, se hará una descripción más particular de varias realizaciones con referencia a los dibujos adjuntos. Entendiendo que estos dibujos representan solo ejemplos de realizaciones y, por lo tanto, no deben considerarse como una limitación del alcance de la invención, las realizaciones se describirán y explicarán con especificidad y detalle adicionales mediante los dibujos adjuntos en los que:

[0010] La figura 1A representa los módulos de una secuencia de generación de energía solar para ilustrar y aclarar los términos extracción de energía, preparación, acondicionamiento, conversión CC/CA y suministro de energía CA a los que se hace referencia en el presente documento;

[0011] La Figura 1B muestra simbólicamente un tren de voltaje de CA sinusoidal variable en el tiempo (oscilante) que representa una señal de CA (salida del convertidor CC/CA) que se envía a través de un par de líneas eléctricas específicas de un sistema de red eléctrica;

[0012] La Figura 2A muestra un circuito típico de un convertidor de aumento CC/CA, el dispositivo de extracción/preparación (acondicionamiento) de energía monofásico descrito en el presente documento;

[0013] La Figura 2B muestra un circuito típico de un convertidor reductor CC/CC, el dispositivo de conversión/extracción de energía monofásico descrito en el presente documento;

[0014] La Figura 2C muestra una estructura de puente de interruptores que controlan la polaridad de la salida del convertidor reductor CC/CC; produciendo así la salida del tren de voltaje de CA resultante como se muestra en la Figura 1B;

[0015] La figura 2D representa simbólicamente el tren de potencia de CA sinusoidal pulsante de una salida de potencia de inversor CC/CA que se envía al puente de conmutadores de la figura 2C;

[0016] La Figura 3 representa simbólicamente el pulso de energía de CC a ser condicionado por el convertidor reductor en un ciclo PWM; que se describe como 3 regiones: la región-I representa la energía extraída, la región-II y la región-III representan la región de energía excedente;

[0017] La Figura 4A representa los módulos de energía solar y las secuencias de entrada/salida para las secuencias del inversor EUT monofásico de acuerdo con los principios descritos en este documento;

[0018] Las figuras 4B y 4C representan esquemáticamente la salida de los dos módulos de conversión de CC/CA, los dos trenes de potencia de CA sinusoidales pulsantes fuera de fase de 90 grados que se envían por separado al controlador de dos polaridades, los puentes de interruptores de bloqueo fuera de fase;

[0019] La figura 4D representa esquemáticamente los dos trenes de potencia que se proporcionan respectivamente a una estructura de puente desfasada;

[0020] Las Figuras 4E y 4F representan esquemáticamente las dos salidas de las estructuras de puente desfasadas; y

- 5 [0021] Las Figuras 4G y 4H representan esquemáticamente los dos últimos trenes de potencia sincronizados dentro de los cuales un tren de potencia es el resultado del retardo 405B por el ajuste de fase. La porción del retraso se muestra en la Figura 4I con una línea de trazos.

DESCRIPCIÓN DETALLADA

[0022] Las publicaciones de patente de Estados Unidos US 2016/0036232 y US 2017/0149250 A1 describen el hallazgo de que los convertidores monofásicos convencionales solo pueden extraer y convertir menos de la mitad de la entrada de energía de corriente continua (CC). Estas publicaciones de patentes enseñan que para extraer de manera eficiente la electricidad de CC producida para la utilización de la energía, las características del dispositivo de extracción de energía deben coincidir para extraer de manera efectiva y eficiente la energía eléctrica de CC producida.

10
15

[0023] Además, estas publicaciones de patentes enseñan que los dispositivos relacionados también deben adaptarse para acondicionar y/o entregar la electricidad extraída para una utilización eficiente de la energía. En lugar de utilizar el dispositivo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) como un optimizador para las estaciones de energía solar, las publicaciones de referencia propusieron utilizar un “rastreador del punto de máxima utilización de energía” como el optimizador para las centrales eléctricas; especialmente plantas de energía fotovoltaica (PV). Dicho optimizador se denominará en el presente documento “optimizador MEUPT”.

20

[0024] Según las publicaciones de patentes de referencia, el optimizador MEUPT está diseñado para capturar lo que ellos denominan “energía excedente” o “potencia excedente”, que definen

como la energía eléctrica (o potencia, respectivamente) que se produce, pero no extrae y/o entrega a la red eléctrica para su utilización. Esa definición de energía excedente (o potencia excedente) también se utiliza aquí. Este excedente de potencia tiene una diferencia de fase de aproximadamente 90 grados con respecto a la red eléctrica, de modo que la energía excedente no se puede vender directamente a la red eléctrica. El optimizador MEUPT también está diseñado para almacenar temporalmente toda la energía excedente capturada dentro de un depósito de energía; y luego preparar y entregar esta energía eléctrica a la red eléctrica para su utilización. Por lo tanto, los ingresos por ventas de electricidad de la central de energía fotovoltaica se pueden mejorar al incorporar el optimizador MEUPT.

[0025] Se pueden emplear varias habilidades en la técnica en la extracción de energía de CC, en la preparación de energía, en el acondicionamiento de la energía y en el suministro de energía. Los principios descritos en este documento pueden usarse independientemente de la fuente de energía de CC. No obstante, esta divulgación utiliza una cadena de generación de energía solar como ejemplo de la fuente de energía de CC para ilustrar y aclarar los términos extracción, preparación, acondicionamiento y suministro de energía a los que se hace referencia en este documento. Dicho esto, los principios descritos en este documento no se limitan a la extracción, preparación, acondicionamiento y suministro en el contexto de la energía solar. Aunque tienen un significado físico diferente, los términos “energía” y “potencia” son intercambiables en la técnica e intercambiables en el presente documento a menos que se indique lo contrario. Además, los términos “tren de potencia de CA” y “tren de voltaje de CA” son intercambiables en este documento a menos que se indique lo contrario.

[0026] La Figura 1 A muestra los componentes de una secuencia de generación de energía solar. La secuencia comienza en el dispositivo de conversión de energía fotoeléctrica (cadenas solares fotovoltaicas) 101, que genera energía eléctrica a partir de energía fotovoltaica (por ejemplo,

energía solar) como fuente de energía primaria. Esta energía eléctrica tiene un voltaje variable en el tiempo que depende de la nubosidad, el ángulo del sol, la eficiencia de las células fotovoltaicas y muchos otros factores. A continuación, la energía eléctrica se prepara y acondiciona mediante un convertidor elevador CC/CC 201 en una fuente de energía de CC con un voltaje fijo. Cuando se
5 añade un controlador 224 de conmutación de polaridad, el módulo 223 de conversión CC/CA convierte la potencia CC de voltaje fija preparada en un tren de voltaje CA sinusoidal variable en el tiempo (oscilante) representado en la Figura 1B.

[0027] Como ejemplo, el módulo 223 de conversión CC/CA puede ser un módulo reductor que es operado por un modulador de ancho de pulso (PWM). El módulo reductor así operado también se
10 denominará convertidor CC/CA. La Figura 2C ilustra un ejemplo de la estructura del puente 224. Como se muestra, la estructura del puente 224 consta de un conjunto de 4 interruptores (S1, S2, S3 y S4) que controlan el sincronismo y la polaridad del tren de voltaje de salida de CA de este convertidor CC/CA. Aquí, la “CARGA” representa la carga que está analizando el transformador 225 desde la estructura del puente 224. La combinación de los dispositivos 201 y 223 puede
15 denominarse “el extractor PWM” en el presente documento.

[0028] El tren de potencia de voltaje de CA producido por la estructura de puente 224 se ajusta a la convención de la red eléctrica. Haciendo referencia nuevamente a la Figura 1A, el tren de potencia de CA se alimenta a continuación a través de un transformador 225 para entregar la potencia a una red 300 que está conectada a la carga de la red. La Figura 2A muestra un ejemplo
20 de diseño de circuito típico de un convertidor elevador CC/CC 201 que puede regular la fuente de energía de CC de voltaje variable a una fuente de CC de voltaje fijo. La Figura 2B muestra un ejemplo de diseño de circuito de módulo reductor operado por PWM típico de un inversor 223 CC/CA monofásico para convertir la fuente CC de voltaje fijo en un tren de potencia CA sinusoidal. La estructura del puente de conmutación 224 (mostrada en la Figura 2C) controla la polaridad y el

sincronismo de la salida de este convertidor 223 CC/CA monofásico. El convertidor 223 CC/CA monofásico (o el extractor PWM cuando se combina el convertidor elevador CC/CA 201 y el convertidor monofásico CC/CA 223) también pueden actuar como un módulo de conversión/extracción de energía en el módulo de inversión monofásico convencional del convertidor CC/CA trifásico convencional que se compone de 3 inversores.

[0029] Sección uno: Revisión de la conversión de CC/CA convencional

[0030] En general, el voltaje en el punto máximo de producción de energía (MPPPV) en una cadena solar práctica varía con el tiempo y es menor que el voltaje pico especificado de la red eléctrica de CA. Se necesita un extractor de energía de aumento de voltaje en las estaciones fotovoltaicas para la extracción y preparación de energía; que condiciona la fuente de CC de bajo voltaje que varía en el tiempo en una fuente de energía de CC de alto voltaje fijo.

[0031] La figura 2A representa un circuito de aumento de voltaje de un módulo 201 de aumento CC/CC que consta de un inductor L; un interruptor controlable Q regulado por un ajustador del factor de trabajo de control de retroalimentación FCDFA (no mostrado); un diodo D; y un condensador C. El interruptor Q se conmuta a una frecuencia alta (típicamente alrededor de 18 kHz en productos comerciales) con un factor de trabajo ajustable. El ajustador del factor de trabajo de control de retroalimentación (FCDFA) regula el factor de trabajo ajustable de modo que este módulo 201 de aumento CC/CC produce un voltaje de salida CC sustancialmente constante (v_0). En otras palabras, este módulo 201 de aumento CC/CC modifica una fuente de energía CC con voltaje variable en el tiempo en una fuente de energía que tiene un voltaje CC fijo v_0 (típicamente, $v_0 = v_{pk}$, donde v_{pk} es el voltaje pico de la red CA) que es adecuado para el dispositivo subsiguiente en la secuencia (a saber, el módulo de conversión de CC/CA 223 en el caso de la Figura 1A). Este módulo de conversión CC/CA posterior convierte la potencia CC con un voltaje máximo

especificado en potencia CA en forma de un tren de potencia sinusoidal que se ajusta a la convención de la red eléctrica.

[0032] Durante el período en el que el interruptor Q está encendido, el inductor diseñado L extrae la energía de la unidad de entrada (en el caso de la Figura 1A, las cadenas solares fotovoltaicas 101). Específicamente, el inductor L se carga con la potencia de entrada dentro del período de tiempo especificado por un factor de trabajo controlado por retroalimentación del interruptor PWM. Esta carga ocurre impulsando el voltaje v_{sw} a través del interruptor Q hacia arriba hacia el voltaje de entrada v_{in} hasta que el voltaje v_{sw} a través del interruptor alcanza un valor apropiado. Durante el período en el que el interruptor Q está apagado, la corriente fluye desde el inductor L a través del diodo D para cargar el condensador diseñado C, produciendo así un voltaje de estado estable igual al voltaje de salida deseado (en el caso de conexión a la red, $v = v_0 = v_{pk}$). Al usar el control de retroalimentación para ajustar el factor de trabajo del período de encendido y apagado del interruptor Q de una frecuencia PWM fija correctamente diseñada, se puede aumentar el voltaje de salida de v_{in} al voltaje pico especificado de la red eléctrica de CA, $v_0 = v_{pk}$. Por lo tanto, este circuito de aumento de voltaje puede producir un voltaje máximo adecuado para enviar al módulo de conversión CC/CA posterior. El circuito descrito anteriormente se denomina “convertidor de aumento CC/CC” o “convertidor de aumento” en la técnica.

[0033] Como se describió anteriormente, el convertidor de aumento está diseñado para modificar una fuente de CC de voltaje variable en el tiempo (por ejemplo, cadenas fotovoltaicas) a una fuente de CC que tiene un voltaje sustancialmente constante que puede ser igual al valor de voltaje pico especificado para la red eléctrica de CA. Tenga en cuenta que para evitar que el voltaje pico de suministro decaiga en un ciclo de CA de operación normal, se diseña una capacitancia adecuada para el capacitor C del circuito de aumento que se muestra en la Figura 2A. Es decir, este condensador C es para mantener el voltaje sustancialmente constante a lo largo de un ciclo de CA.

Un condensador que realiza esta función descrita a menudo se denomina condensador de “enlace de CC” en la técnica. La convención de la red eléctrica tolera muy poca variación de voltaje en un enlace de CC. Por lo tanto, un capacitor de enlace de CC no está diseñado para almacenar un gran excedente de energía, ya que hacerlo requeriría un capacitor enorme (y por lo tanto costoso) para
5 mantenerse dentro de la variación de voltaje máxima tolerada de la red eléctrica de CA.

[0034] La Figura 2B representa un módulo 223 de conversión CC/CA típico, que consta de un inductor LL, un interruptor controlable QQ regulado por un ajustador de factor de trabajo DFA, un diodo DD y un condensador CC de enlace CC. El interruptor QQ se conmuta a una frecuencia alta (típicamente alrededor de 18 kHz en productos comerciales) con un factor de trabajo ajustable. El
10 interruptor QQ (que a menudo se denomina “interruptor PWM”) está regulado por una señal de modulador de ancho de pulso (PWM). El factor de trabajo de este interruptor PWM está regulado por el ajustador de factor de trabajo DFA, de modo que el tren de potencia de CA producido de este módulo de conversión 223 se ajusta a la convención de la red eléctrica. El módulo 223 de conversión CC/CA representado se denomina “convertidor reductor” en la técnica. El convertidor
15 reductor 223 asociado con el DFA puede convertir la fuente de energía de CC con un voltaje máximo especificado en un tren de potencia de CA sinusoidal. Este tren de potencia de CA pulsante se envía a través de una estructura de puente de conmutación representada en la Figura 2C (que es un ejemplo del controlador de polaridad/sincronismo 224 de la Figura 1A); y luego a través del transformador (por ejemplo, el transformador 225 de la Figura 1A) hacia la red (por ejemplo, la
20 red 300 de la Figura 1A). Como se describe, la estructura del puente de conmutación actúa como controlador de polaridad y sincronismo.

[0035] Como se muestra en la Figura 2C, cuando los interruptores S1 y S2 están encendidos y los interruptores S3 y S4 apagados, se aplica un voltaje positivo a través de la carga. A la inversa, cuando los interruptores S3 y S4 están encendidos y los interruptores S1 y S2 apagados, se aplica

un voltaje negativo a través de la carga. Cuando esta conmutación es controlada por el ajustador de sincronización (no mostrado en la Figura 2C) que detecta las transiciones de voltaje positivo/negativo (o cruce de voltaje cero) en la red eléctrica, esta estructura de puente 224 (combinada con el ajustador del factor de trabajo DFA) puede efectivamente controlar la polaridad de salida y el sincronismo de un convertidor monofásico CC/CA.

[0036] El ajustador síncrono puede regular oportunamente el ajuste del factor de trabajo PWM variable en el tiempo; tal que se produzca una forma de onda de potencia sinusoidal pura representada por $\cos^2(\omega t + \theta)$, con la frecuencia angular de CA requerida ω , con el voltaje de pico de CA requerido v_{pk} , y con su fase θ sincrónica con el par de líneas de potencia correspondiente de la red. Cuando se incorporan con una entrada de CC de voltaje fijo y con la inductancia parásita y la capacitancia parásita en la red, el inductor LL y el condensador CC pueden hacerse pequeños o incluso omitirse en la práctica. En la técnica, los términos “convertidor” e “inversor” (y para el caso, “conversión” e “inversión”) son intercambiables y, por lo tanto, son intercambiables aquí.

[0037] El ajustador del factor de trabajo DFA ajusta el factor de trabajo como una función del tiempo de acuerdo con el diseño para encender/apagar el interruptor QQ del convertidor reductor. Por lo tanto, con un circuito diseñado correctamente y el voltaje pico preparado, este módulo de conversión puede producir el valor de voltaje de salida deseado, la forma de potencia, la frecuencia y la fase que cumplen con los requisitos de diseño, incluidos los requisitos de la convención de la red eléctrica de CA y la fase de la correspondiente línea eléctrica de la red. En el caso de una unidad conectada a la red, el ajustador síncrono de CA (normalmente integrado en el convertidor CC/CA) se emplea para hacer que la salida de potencia de CA preparada se desvíe junto con la red eléctrica en caso de que el voltaje máximo de la red eléctrica se desvíe y/o en caso de que la frecuencia de la red eléctrica varíe. Una señal de alimentación de CA producida de este tipo se muestra en la

Figura 3. En otras palabras, utilizando el extractor de energía PWM descrito anteriormente, un convertidor monofásico CC/CA puede extraer y convertir energía eléctrica CC de una fuente de energía CC de voltaje fijo en energía CA que cumple con la convención de la red eléctrica.

[0038] Muy importante, tener en cuenta que la potencia de salida, $P(t)$ del inversor monofásico

anterior varía en el tiempo con una forma de $\cos^2(\omega t + \theta)$. Por lo tanto, durante un período de tiempo específico, la energía entregada a través de la línea eléctrica de la red eléctrica es igual a la integración de su tren de potencia de salida variable en el tiempo durante este período. El valor integral resultante es solo igual a la mitad de la integración de la potencia de CC constante de la fuente de energía durante el mismo período de tiempo. En otras palabras, el inversor monofásico convencional descrito anteriormente solo puede extraer y convertir como máximo solo la mitad de la energía proporcionada por la fuente de energía de CC. La energía sobrante y no utilizada es, por tanto, más de la mitad de la energía de entrada disponible. Esta cantidad sobrante contribuye a la mayor porción del excedente de energía descrito en las publicaciones de patentes mencionadas anteriormente.

[0039] Para los propósitos del siguiente análisis, suponga que la fuente de energía de CC es de potencia constante P_{mx} en un período de varios ciclos de potencia de CA. La Figura 3 representa el pulso de energía CC extraído en un ciclo PWM (que tiene el período D). Como se demostrará, la potencia CC extraída P_x es menor o igual que la potencia CC P_{mx} . El factor de trabajo $d(t)/D$ en este ciclo PWM se ajusta a un valor igual a $d(t)/D = \cos^2(\omega t + \theta)$ de modo que la potencia producida sea sustancialmente igual a $P_x * \cos^2(\omega t + \theta)$ que se ajusta a la convención de la red eléctrica, y donde θ es la fase del par de líneas eléctricas correspondiente de la red. La Figura 3 (específicamente, la mitad inferior de la Figura 3) también representa el espacio de tiempo de

potencia (llamado espacio de energía) con el intervalo de tiempo D como un período de PWM; siendo la potencia CC de entrada P_{mx} ; y siendo la potencia extraída P_x .

[0040] Como se muestra en la Figura 3, este espacio de energía se divide en 3 regiones. La región I representa el pulso de energía CC extraído con la potencia extraída P_x ; y con una duración de tiempo de $D \cdot \cos^2(\omega t + \theta)$, que se convierte a la potencia de CA monofásica de $P(t) = P_x \cdot \cos^2(\omega t + \theta)$ en un tiempo arbitrario t que corresponde a el tiempo de extracción de PWM. La Región I también se conoce como el “área de extracción de energía” o la “región de extracción de energía”. El área entre la potencia P_{mx} de la fuente de energía y la potencia P_x es la región III. La región II es el área después del área de extracción de energía PWM en el período D . El área combinada de las regiones II y III representa un área de energía excedente en este espacio energético. La energía en el área (región) de energía excedente no se extrae, no se convierte en energía de CA y, por lo tanto, no se utiliza de manera convencional. En cambio, esta energía excedente se absorbe finalmente en forma de calor.

[0041] Para reiterar, el convertidor monofásico CC/CA convencional emplea un módulo de aumento de voltaje para modificar una fuente de alimentación de CC con voltaje variable en el tiempo en una fuente de alimentación de CC con un voltaje sustancialmente constante y específico, como el voltaje pico de la cuadrícula. Esta fuente de CC sirve como fuente de CC de entrada para que un extractor PWM extraiga y convierta la energía de entrada de CC. Cuando el factor de trabajo en un ciclo PWM está regulado por $\cos^2(\omega t + \theta)$ en el tiempo t (donde la fase θ es la fase de la línea de potencia correspondiente de la red eléctrica), la forma de potencia de salida se ajusta a la potencia de CA convención. En un nivel alto, el espacio de energía de cada ciclo de PWM consta de dos regiones: la región de energía extraída (por ejemplo, la Región-I en la Figura 3) y la región de energía excedente (por ejemplo, la combinación de la Región-II y la Región-III en la Figura 3).

La energía extraída se convierte así potencia CA y se suministra al par de líneas de potencia correspondiente de la red eléctrica; mientras que la energía excedente se convierte en calor a menos que se capture y almacene en un dispositivo como el optimizador MEUPT.

[0042] Como se describió anteriormente, las publicaciones de patente referenciadas enseñan que

5 la cantidad de energía excedente es al menos tan grande como la energía extraída cuando se integra a través de varios períodos de tiempo de CA. En otras palabras, un convertidor monofásico CC/CA convencional solo puede extraer y convertir como máximo la mitad de la energía CC de entrada. En otras palabras, cuando se utiliza el convertidor monofásico CC/CA convencional, al menos la mitad de la energía CC de entrada se convertirá en energía excedente; que no se extrae, que no se
10 convierte, que no se entrega a la red eléctrica, que no es aprovechada por la carga y que finalmente se convertirá en calor.

[0043] Sección dos: Los principios del inversor EUT monofásico

[0044] Aunque no lo reconocen los expertos en la técnica, en realidad existen dos formas de mitigar las consecuencias indeseables descritas anteriormente para un inversor monofásico. La primera

15 forma es seguir los principios descritos en las publicaciones de patentes de referencia para incorporar el optimizador MEUPT en el sistema energético. La otra forma es seguir los principios aquí descritos, que propone diseñar un inversor monofásico compuesto por un conjunto de dos módulos de conversión CC/CA y un ajustador de fase, y extraer secuencialmente energía alternando entre los dos módulos de conversión CC/CA donde la alternancia es causada por el
20 ajustador de fase. Este nuevo inversor monofásico se conoce como inversor de seguimiento de utilización de energía monofásico o inversor EUT monofásico.

[0045] El primer módulo de conversión CC/CA del inversor EUT monofásico produce un primer tren de potencia CA extrayendo y convirtiendo la primera región de energía (por ejemplo, la Región I en la Figura 3) en el espacio de energía de cada ciclo PWM. A la inversa, el segundo módulo de

conversión CC/CA del inversor EUT monofásico produce un segundo tren de potencia CA extrayendo y convirtiendo la región de energía después de la Región-I (por ejemplo, Región-II en la Figura 3). Por tanto, en el tiempo t , la primera potencia de CA es $P(t) = P_x * \cos^2(\omega t + \theta)$ mientras que la segunda potencia de CA es $P'(t) = P_x - P_x * \cos^2(\omega t + \theta) = P_x * (1 - \cos^2(\omega t + \theta)) = P_x * \sin^2(\omega t + \theta)$. Estos dos trenes de potencia de CA de salida tienen la misma potencia máxima y la misma frecuencia, pero están desfasados 90 grados entre sí. Eso significa que cuando el primer tren de potencia de CA se ajusta a la convención de la red eléctrica y la fase del par de líneas eléctricas correspondiente, el segundo tren de potencia de CA estará desfasado 90 grados con el par de líneas de energía correspondiente de la red. En otras palabras, el primer tren de potencia de CA puede suministrarse y proporcionar energía eléctrica al par de líneas eléctricas correspondiente de la red eléctrica; mientras que el segundo tren de potencia de CA no es adecuado para entregar y proporcionar energía al mismo par de líneas eléctricas.

[0046] De acuerdo con el principio descrito en este documento, el inversor EUT monofásico propuesto comprende además un ajustador de fase. Este ajustador de fase puede ajustar la fase del segundo tren de potencia de CA mencionado anteriormente en 90 grados. Por lo tanto, el segundo tren de potencia de CA se transforma para sincronizarse con el par de líneas eléctricas correspondiente de la red. Como se describe, ambas salidas del inversor EUT monofásico (el primer y segundo tren de potencia de CA) pueden entonces ajustarse a la convención de la red eléctrica del mismo par de líneas eléctricas. Por lo tanto, los dos trenes de potencia de CA monofásicos pueden entregarse en el mismo par de líneas eléctricas de la red para su posterior consumo por las cargas de conexión.

[0047] La Figura 4A representa esquemáticamente un diagrama de bloques que muestra la generación de energía y la entrada al inversor EUT monofásico 400. La energía de entrada

(caracterizada por tener voltaje variable en el tiempo) es generada por la cadena solar fotovoltaica 401. La energía de entrada pasa por un módulo de aumento 402 que realiza el acondicionamiento de energía para producir una fuente de energía de CC con voltaje fijo. El módulo de aumento 402 puede estructurarse como se describió anteriormente para el módulo de aumento 201 de la Figura 2 A.

[0048] La energía CC de voltaje fijo del módulo de aumento 402 es parcialmente extraída por el primer módulo reductor CC/CA 403A operado por PWM para producir el primer tren de potencia CA 4031 A (ver Figura 4B), $P(t) = P_x * \cos^2(\omega t + \theta)$, que se ajusta a la convención de la red eléctrica, y tiene la misma fase θ como la correspondiente línea eléctrica de la red eléctrica. Haciendo referencia a la Figura 2B, recuerde que esto se logra haciendo que el ajustador del factor de trabajo DFA controle el interruptor QQ para tener un factor de trabajo $d(t)/D = \cos^2(\omega t + \theta)$. El primer módulo reductor CC/CA 403A operado por PWN puede estar estructurado de la misma manera que el módulo reductor CC/CA 223 descrito anteriormente con respecto a la Figura 2B, excepto que el DFA también está acoplado a un módulo 405 de bloqueo desfasado.

[0049] La energía CC de voltaje fijo del módulo de aumento también se extrae parcialmente mediante un segundo módulo reductor CC/CA 403B operado por PWM. El segundo módulo reductor CC/CA 403B puede estar estructurado de la misma manera que el primer módulo reductor CC/CA 403A, e incluye el interruptor SQQ, el diodo SDD, el inductor SLL y el condensador SCC que se conectan entre sí de manera similar a como el interruptor QQ, el diodo DD, el inductor LL y el condensador CC del primer módulo reductor CC/CA 403A se conectan entre sí. Además, el conmutador SQQ, el diodo SDD, el inductor SLL y el condensador SCC del segundo módulo reductor CC/CA 403B pueden tener los mismos tamaños respectivos que el conmutador QQ, el diodo DD, el inductor LL y el condensador CC del primer módulo reductor CC/CA 403 A.

[0050] Sin embargo, el interruptor SQQ del segundo módulo reductor CC/CA 403B está acoplado al ajustador del factor de trabajo DFA a través de un módulo de bloqueo desfasado 405. El módulo de bloqueo desfasado 405 asegura que cuando el interruptor QQ del primer módulo reductor CC/CA está encendido, el interruptor SQQ del segundo módulo reductor CC/CA está apagado y viceversa. Por lo tanto, el ciclo de trabajo del interruptor SQQ sería

$1-dl(t) = 1 - \cos^2(\omega t + \theta) = \sin^2(\omega t + \theta)$. Por tanto, el segundo tren de potencia de CA 4031B (ver Figura 4C) producido por el segundo módulo reductor CC/CA 403B tiene un tren de potencia variable en el tiempo $P'(t) = P_x * \sin^2(\omega t)$. Como se describe más adelante, la fase de este segundo tren de potencia de CA se ajusta además mediante un ajustador de fase de modo que la fase del segundo tren de potencia de CA

[0051] El tren de potencia 4031B de la Figura 4B se ajusta posteriormente en 90 grados en un tren de potencia de CA, $P''(t) = P_x * \sin^2(\omega t + \theta + 90^\circ)$. Después del ajuste de fase, ambos trenes de potencia de CA $P(t)$ y $P''(t)$ se sincronizan desde el primer tren de potencia de CA 4031A tren de potencia (que es $P(t) = P_x * \cos^2(\omega t + \theta)$), y el segundo tren de potencia de CA 4031B (que con el ajuste se convierte en $P'''(t) = P_x * \sin^2(\omega t + \theta + 90^\circ) = P_x * \cos^2(\omega t + \theta)$) se sincroniza y es adecuado para proporcionarse en el mismo par de líneas eléctricas de la red. Por ahora, basta con decir que el primer tren de potencia $P(t)$ (es decir, la señal 4031A de la Figura 4B) se proporciona a las estructuras de interruptor de puente de bloqueo 404A, y el segundo tren de potencia $P'(t)$ (es decir, una 4031B de la Figura 4C) se proporciona a una segunda estructura de puente de bloqueo 404B que está desfasada con la primera estructura de puente de bloqueo 404A. El funcionamiento y la estructura de las estructuras de puente de bloqueo desfasadas 404A y 404B se describen más adelante con respecto a las Figuras 4D a 4H.

[0052] Sección tres: Los principios se aplican al inversor EUT trifásico

[0053] La causa fundamental de la extracción de energía ineficaz de los convertidores CC/CA monofásicos convencionales también está presente en los convertidores CC/CA trifásicos convencionales. En esencia, un convertidor CC/CA trifásico convencional opera tres convertidores CC/CA monofásicos que realizan extracción y conversión, y entregan energía CA promediada en el tiempo similar a tres pares de líneas eléctricas; con diferencias de fase de 120 grados. El excedente de energía que surge en el convertidor monofásico CC/CA también surge en cada uno de los tres convertidores CC/CA monofásicos del convertidor CC/CA trifásico convencional. La mala noticia es que cualquier causa raíz de la ineficiencia en la extracción de energía de los convertidores CC/CA monofásicos persiste tres veces en los convertidores CC/CA trifásicos convencionales. La buena noticia es que cualquier remedio efectivo aplicable a la deficiencia de extracción de energía del inversor monofásico también puede ser un remedio efectivo aplicable tres veces a la deficiencia de extracción de energía del inversor trifásico.

[0054] Cuando un inversor CC/CA trifásico se compone de tres conjuntos de los inversores EUT monofásicos descritos anteriormente, el inversor CC/CA trifásico se denomina inversor EUT trifásico. Cada uno de los inversores EUT monofásicos del inversor EUT trifásico puede extraer y convertir un tercio ($1/3$) de la potencia de CC proporcionada por la fuente de energía de CC (por ejemplo, una cadena o estación fotovoltaica) en dos trenes de energía de CA y enviarlos al mismo par de líneas eléctricas de la red eléctrica trifásica. Por ejemplo, el primer inversor EUT monofásico extraería un tercio de la potencia de CC proporcionada por la fuente de energía de CC en un primer conjunto de dos trenes de potencia de CA monofásicos sincronizados y entregaría ese primer conjunto de trenes de potencia de CA monofásicos sincronizados a un primer par de líneas eléctricas correspondiente de la red. El segundo inversor EUT monofásico extraería otro tercio de la potencia de CC proporcionada por la fuente de energía de CC en un segundo conjunto de dos trenes de potencia de CA monofásicos sincronizados (que están desfasados 120 grados con el

primer conjunto de trenes de potencia de CA monofásicos sincronizados, pero que están sincronizados con un segundo par de líneas eléctricas de la red) y entregan ese segundo conjunto de trenes de potencia de CA monofásicos sincronizados al segundo par de líneas de potencia correspondiente de la red. El tercer inversor EUT monofásico extraería otro tercio de la potencia de CC proporcionada por la fuente de energía de CC en un tercer conjunto de dos trenes de potencia de CA monofásicos sincronizados (que están desfasados 120 grados con el primero y el segundo trenes de potencia de CA monofásicos, pero que están sincronizados con un tercer par de líneas eléctricas de la red) y entregan ese tercer conjunto de trenes de potencia de CA monofásicos sincronizados al tercer par de líneas eléctricas correspondiente de la red.

[0055] Por lo tanto, el esfuerzo combinado de los tres inversores EUT monofásicos en el inversor EUT trifásico puede extraer y entregar casi toda la potencia de CC de entrada proporcionada por la fuente de energía a los tres pares de líneas eléctricas trifásicas de la red eléctrica. Por lo tanto, de acuerdo con los principios descritos en este documento, cuando se utiliza el inversor EUT trifásico para reemplazar el inversor CC/CA trifásico convencional, podemos extraer el doble de la cantidad de energía extraída de la fuente de energía CC; para la entrega de la potencia de CA de salida a la red eléctrica trifásica para consumo.

[0056] Sección cuatro: Ejemplos del ajustador de fase

[0057] Se pueden emplear varias habilidades en la técnica para diseñar un ajustador de fase mencionado en este documento. Por ejemplo, como es bien conocido en la técnica, un transformador monofásico puede retrasar un tren de voltaje CA monofásico en medio ciclo CA asociado con una inversión de polaridad. Eso significa que un transformador monofásico puede cambiar la fase de un tren de potencia de CA en 90 grados sin cambiar la forma de onda o la frecuencia. Un transformador ideal (con una relación de giro primario y secundario igual a uno) puede preservar aún más el voltaje pico del tren de potencia de CA de entrada. Un transformador

real con una relación de giro de uno puede introducir una ligera caída del voltaje máximo. Sin embargo, esta caída inducida en el voltaje pico puede corregirse ajustando la relación de giro del secundario al primario a un valor adecuado. Por lo tanto, un transformador monofásico puede ser un ajustador de fase muy práctico para los principios descritos en este documento. Cada inversor EUT monofásico puede emplear un transformador monofásico adecuado como su ajustador de fase. Un inversor EUT trifásico puede emplear 3 inversores EUT monofásicos, cada uno con dichos ajustadores de fase. Dicho esto, el ajuste de fase también se puede lograr mediante el uso de un inductor o un condensador.

[0058] Además, un transformador trifásico puede cambiar cada una de las fases en los trenes de potencia de CA trifásicos en 90 grados sin cambiar la forma de onda o la frecuencia. Por lo tanto, como se describió anteriormente, un inversor EUT trifásico también podría emplear solo un transformador trifásico como un ajustador de fase combinado para ajustar los tres trenes de voltaje de CA fuera de fase para sincronizar con 3 pares de líneas eléctricas la red eléctrica trifásica. Reemplazando los tres ajustadores en un inversor EUT trifásico con un solo ajustador combinado; este ajustador de fase candidato puede reducir aún más el costo del inversor EUT trifásico.

[0059] Sección Cinco: Resúmenes

[0060] Como se analizó en la sección uno, un extractor monofásico de CA convencional emplea un extractor PWM para extraer la potencia de entrada de CC. Cuando el factor de trabajo en un ciclo de PWM está regulado por $\cos^2(\omega t + \theta)$ en el tiempo t , la potencia de salida se ajusta a la convención de energía de CA suponiendo una fase adecuada θ sincronizada. Tenga en cuenta que el espacio de energía de cada ciclo de PWM consta de dos regiones; una es la región de energía extraída mientras que la otra es la región de energía excedente. Las publicaciones de patentes referenciadas enseñan que la cantidad de energía excedente es al menos tan grande como la energía

extraída cuando se integra a lo largo de varios períodos de tiempo de CA. En otras palabras, un convertidor monofásico CC/CA solo puede extraer y convertir como máximo la mitad de la potencia CC de entrada. La energía extraída se convierte en corriente alterna y se suministra a la red eléctrica; mientras que la energía excedente se convierte en calor a menos que se capture y almacene en un dispositivo como el dispositivo MEUPT.

[0061] Como se describe en la sección dos, los nuevos diseños de convertidores CC/CA monofásicos propuestos comprenden un conjunto de dos módulos de conversión CC/CA y un ajustador de fase, y utilizan los mismos para practicar la extracción de energía secuencial. Los nuevos convertidores CC/CA monofásicos también se denominan en el presente documento “inversores EUT monofásicos”. El primer módulo de conversión CC/CA del inversor EUT monofásico produce un primer tren de potencia CA extrayendo y convirtiendo la primera región de energía (por ejemplo, Región I en la Figura 3) en el espacio de energía de cada ciclo PWM; mientras que el segundo módulo de conversión de CC/CA se produce un segundo tren de potencia de CA a partir de la extracción y conversión de la región de energía después de eso (por ejemplo, la Región II en la Figura 3). Por tanto, en el momento t , la primera potencia de CA es $P(t) = P_x * \cos^2(\omega t + \theta)$ mientras que la segunda potencia de CA es $P'(t) = P_x * \sin^2(\omega t + \theta)$. Estos dos trenes de potencia de CA de salida tienen la misma potencia máxima, la misma frecuencia, pero están desfasados 90 grados entre sí (compare las Figuras 4B y 4C). Eso significa que cuando el primer tren de potencia de CA se ajusta a la convención de la red eléctrica y está sincronizado con el par de líneas eléctricas correspondiente de la red eléctrica, pero el segundo tren de potencia de CA está 90 grados desfasado con ese mismo par de líneas de energía de la red. En otras palabras, el primer tren de potencia de CA puede suministrarse y proporcionar energía eléctrica al par de líneas

eléctricas correspondiente de la red eléctrica; mientras que el segundo tren de potencia de CA no es adecuado para entregar y proporcionar energía al mismo par de líneas eléctricas.

[0062] El inversor EUT monofásico comprende además un ajustador de fase. Este ajustador de fase puede ajustar la fase del segundo tren de potencia de CA mencionado anteriormente en 90 grados.

5 Por lo tanto, el segundo tren de potencia de CA se transforma para sincronizarse con el par de líneas eléctricas correspondiente de la red. Como se describe, ambas salidas del inversor EUT monofásico (el primer y segundo tren de potencia de CA) pueden entonces ajustarse a la convención de la red eléctrica del mismo par de líneas eléctricas. Por lo tanto, la salida del inversor EUT monofásico, los dos trenes de potencia de CA monofásicos pueden entregarse en el mismo par de líneas
10 eléctricas de la red y consumirse por las cargas de conexión.

[0063] Como se describe en la sección tres, cuando un inversor CC/CA trifásico compuesto por un conjunto de 3 de los inversores EUT monofásicos descritos anteriormente, el inversor CC/CA trifásico se denomina inversor trifásico EUT. Cada uno de los inversores EUT monofásicos del inversor EUT trifásico puede extraer y convertir un tercio de la potencia de CC proporcionada por
15 la fuente de energía de CC (por ejemplo, una cadena o estación fotovoltaica) en dos trenes de potencia de CA monofásicos y entregar al mismo par de líneas eléctricas de la red eléctrica trifásica. Por lo tanto, el esfuerzo combinado de los tres inversores EUT monofásicos en el inversor EUT trifásico puede extraer y entregar toda la potencia de CC de entrada proporcionada por la fuente de energía en tres pares de líneas eléctricas de la red eléctrica trifásica. Por tanto, de acuerdo con los
20 principios descritos en el presente documento, cuando se usa el inversor EUT trifásico para reemplazar el inversor CC/CA trifásico convencional, se puede extraer el doble de potencia de la fuente de energía CC; y entregar la potencia de CA de salida a la red eléctrica trifásica para su consumo. Como se ha descrito, el remedio del inversor monofásico convencional es también el remedio del inversor trifásico convencional.

[0064] La sección cuatro describió un dispositivo práctico que puede realizar el ajuste de fase de 90 grados requerido para el segundo tren de potencia de CA y mantener todas las demás especificaciones para cumplir con la convención de la red eléctrica. Además, este candidato también es adecuado para los inversores EUT trifásicos.

5 **[0065]** Para ilustrar y aclarar los términos relacionados usados en el principio descrito aquí, la Figura 4A representa los módulos de una entrada de energía solar y las secuencias de salida para el inversor EUT monofásico 400. Esta secuencia de entrada comienza con la energía generada en las cadenas solares 401 como fuente de energía con voltaje variable, que sirve como fuente de entrada al módulo de aumento de voltaje 402. La salida de la fuente de energía se almacena en un
10 condensador C y es una fuente de CC de voltaje casi constante.

[0066] En otras palabras, este módulo de aumento de voltaje 402 modifica la fuente de energía de CC de voltaje variable en una fuente de energía de CC de voltaje fijo almacenada en el condensador C del enlace de CC (véase el condensador C de la Figura 2A). Esta fuente de energía de CC de voltaje fijo es cargada como una entrada a los dos conjuntos de módulos de conversión de CC/CA
15 403A y 403B. Estos dos módulos de conversión son operados por interruptores PWM de bloqueo fuera de fase QQ y SQQ que provocan una extracción de energía secuencial del condensador C de enlace de CC. Los módulos de conversión de CC/CA generan cada uno un tren de potencia sinusoidal pulsante respectivo 4031 A y 4031B (también mostrados en las Figuras 4B y 4C) que están desfasados 90 grados entre sí. Como se muestra en la Figura D, estos dos trenes de potencia
20 pulsantes desfasados de 90 grados 4031A ($P'(t)$) y 4031B ($P'(t)$) se envían cada uno a una respectiva estructura de interruptor de puente de bloqueo fuera de fase 404A y 404B (como también se muestra en la Figura 4D). Cada una de las estructuras de puente de bloqueo 404A y 404B se puede estructurar como se describe para la estructura de puente 224 de la Figura 2C, excepto que los interruptores S1 del SS1 se controlan fuera de fase, los interruptores S2 y S22 se controlan para

estar fuera de fase, interruptores S3 y S33 se controlan para que estén desfasados, y los interruptores S4 y S44 se controlan para que estén desfasados.

[0067] Estas estructuras de puente controlan la polaridad de las entradas 4031 A y 4031B; y producen dos trenes de voltaje CA con una diferencia de fase de 90 grados, representados como 405A y 405B de las Figuras 4E y 4F, respectivamente. Como se muestra en la Figura 4F, el segundo tren de voltaje de CA 405B se puede proporcionar en un ajustador de fase de 90 grados 406, lo que da como resultado que el segundo tren de voltaje de CA 405B se sincronice en fase con el primer tren de voltaje de CA 405 A. Por lo tanto, ambos trenes de voltaje de CA son adecuados para la entrega (a través del transformador) al mismo par de líneas eléctricas de una red. Para completar, las Figuras 4G y 4H también representan los dos últimos trenes de potencia sincronizados dentro de los cuales un tren de potencia es la señal 407B resultante del retraso por el ajuste de fase 406. La porción de retraso se representa en la Figura 4H con una línea de trazos. La otra señal de potencia resultante 407A no se retrasa.

[0068] La presente invención puede materializarse en otras formas específicas sin apartarse de su espíritu o características esenciales. Las realizaciones descritas deben considerarse en todos los aspectos solo como ilustrativas y no restrictivas. El alcance de la invención, por lo tanto, se indica mediante las reivindicaciones adjuntas en lugar de la descripción anterior. Todos los cambios que entren dentro del significado y rango de equivalencia de las reivindicaciones deben incluirse dentro de su alcance.