

## CENTRAL ELÉCTRICA FOTOVOLTAICA

### ESTADO ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA

[0001] Las centrales eléctricas fotovoltaicas (PV) generan electricidad convirtiendo energía solar en electricidad. Esa electricidad generada se alimenta entonces a una red. La fuente de energía solar (es decir, los rayos recibidos del sol) se caracteriza por tener una intensidad variable en el tiempo. Por consiguiente, los generadores de energía PV en tales centrales eléctricas PV incorporan un dispositivo de optimización de generación de energía (denominado también como un "optimizador"). Un tipo de optimizador se denomina el "rastreador de punto de máxima potencia (MPPT - *maximum power point tracker*)" (o dispositivo "MPPT"), el cual rastrea un voltaje de punto de producción de máxima potencia (MPPP - *maximum power production point*) instantánea que el dispositivo MPPT utiliza para controlar la operación de la central eléctrica PV. Esta práctica se denomina aquí la "conformación MPPT ciega". Por lo general, el dispositivo MPPT es software o firmware, y rastrea el voltaje variable en el tiempo, lo cual tiene como resultado la producción de potencia máxima de la fuente de energía solar variable en el tiempo.

[0002] El asunto aquí reivindicado no se limita a modalidades que solucionan algunas desventajas o que operan únicamente en ambientes tales como los descritos más arriba. Por el contrario, este estado actual de la tecnología se señala únicamente para ilustrar un área de tecnología ejemplar en la que pueden ponerse en práctica algunas modalidades descritas aquí.

### BREVE RESUMEN

[0003] Las modalidades descritas aquí se relacionan con una central eléctrica PV que incluye por lo menos una unidad de producción de energía eléctrica de corriente alterna (CA). De acuerdo con una modalidad de la central eléctrica PV, cada unidad de producción de energía eléctrica CA comprende un generador de energía eléctrica de corriente continua (CC), un primer(os) convertidor(es) trifásico(s) CC/CA, un almacenador de energía (*energy reservoir*), y segundo(s) convertidor(es) trifásico(s) CC/CA. El generador de energía eléctrica CC se compone de cadenas solares de  $x$  MW, en donde  $x$  es un número positivo. El(los) primer(os) convertidor(es) trifásico(s)

CC/CA tiene(n) un régimen nominal declarado total (*a total declared power rating*) de  $y$  MW. El(los) primer(os) convertidor(es) trifásico(s) CC/CA recibe(n) energía eléctrica CC provista por el generador de energía eléctrica CC, convierte(n) la energía eléctrica CC recibida en energía eléctrica CA, e inyecta(n) esa energía eléctrica CA convertida, a través de un transformador, en una red. El almacenador de energía recibe por lo menos algo de una porción restante de la energía eléctrica CC generada por el generador de energía eléctrica CC. El(los) segundo(s) convertidor(es) trifásico(s) CC/CA tiene(n) un régimen nominal declarado total de  $z$  MW, en donde  $z$  es un número positivo, y la sumatoria de  $y$   $z$  es mayor que  $x$ . El(los) segundo(s) convertidor(es) trifásico(s) CC/CA recibe(n) energía eléctrica CC del almacenador de energía, convierte(n) la energía eléctrica CC, recibida del almacenador de energía, en energía eléctrica CA, e inyecta(n) esa energía eléctrica CA convertida, a través de un transformador, a la red. Puesto que la sumatoria de  $y$   $z$  es mayor que  $x$ , la central eléctrica de acuerdo con esta modalidad entrega más energía a la red.

**[0004]** De acuerdo con otra modalidad descrita aquí, cada unidad de producción de energía eléctrica CA incluye un generador de energía eléctrica CC compuesto por cadenas solares de  $x$  MW, y un almacenador de energía, y convertidores trifásicos CC/CA que tienen un régimen nominal declarado total de  $z$  MW, en donde  $z$  es mayor que  $x$ . El almacenador de energía recibe por lo algo de una porción restante de la energía eléctrica CC generada por el generador de energía eléctrica CC. El(los) convertidor(es) CC/CA trifásico(s) recibe(n) energía eléctrica CC del almacenador de energía, convierte(n) la energía eléctrica CC recibida del almacenador de energía en energía eléctrica CA e inyecta(n) esa energía eléctrica CA convertida, a través de un transformador, a la red. Puesto que  $z$  es mayor que  $x$ , la central eléctrica de acuerdo con esta modalidad entrega más energía a la red.

**[0005]** De acuerdo con todavía otra modalidad descrita aquí, cada unidad de producción de energía eléctrica CA comprende un generador de energía eléctrica CC compuesto por cadenas solares. El(los) convertidor(es) CC/CA trifásico(s) recibe(n) energía eléctrica CC del generador de energía eléctrica CC a través de un desacoplador (*decoupler*), convierte(n) la energía eléctrica CC recibida en energía

eléctrica CA, e inyecta(n) esa energía eléctrica CA convertida, a través de un transformador, a la red. El uso del desacoplador evita los problemas, descubiertos por los inventores, relacionados con el fenómeno de aniquilación de energía, aumentando así la cantidad de energía que la central eléctrica puede entregar a la red.

**[0006]** Este Resumen se provee para presentar en forma simplificada una selección de conceptos que se pormenorizan a continuación en la Descripción Detallada. Este Resumen no pretende identificar aspectos claves o características esenciales del asunto reivindicado, ni se pretende usarlo como una ayuda en determinar el ámbito del asunto reivindicado.

### **BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS**

**[0007]** Con el fin de describir la manera en la que pueden obtenerse las características y demás ventajas enumeradas más arriba, se presentará una descripción más particular de distintas modalidades por referencia a los dibujos adjuntos. Entendiendo que estos dibujos ilustran únicamente modalidades ejemplares y que, por consiguiente, no tienen que considerarse limitantes del ámbito de la invención, las modalidades se describirán y explicarán con especificidad y detalle adicionales mediante el uso de los dibujos acompañantes en los cuales:

**[0008]** Figuras 1 A - 1C ilustran diagramas de bloques de varias centrales eléctricas en las cuales se usan dispositivos desacopladores junto con un almacenador de energía;

**[0009]** Figura 2A ilustra un diagrama de bloques de una central eléctrica que se montó en un experimento, y en la cual hay dos unidades de producción de energía eléctrica CA que se instalan convencionalmente, y con medidores de potencia y energía que miden la salida de cada unidad de producción de energía eléctrica;

**[0010]** Figura 2B ilustra un diagrama de bloques de la central eléctrica de Figura 2A luego de la modificación para incluir los dispositivos desacopladores y un almacenador de energía, y la que se usó para verificar la salida de energía mejorada a la red;

[0011] Figura 3 ilustra un diagrama de bloques de una central eléctrica en la cual hay dos canales de entrega de energía, un canal que requiere el uso de un almacenador de energía, y uno que no requiere el uso del almacenador de energía;

[0012] Figura 4 ilustra un diagrama de bloques de una central eléctrica que representa una modalidad más amplia de Figura 3;

[0013] Figura 5 ilustra un diagrama de bloques de una central eléctrica en la cual se entrega energía mediante el uso de un almacenador de energía;

[0014] Figura 6 ilustra un diagrama de bloques de una central eléctrica que representa una modalidad más amplia de Figura 5;

[0015] Figura 7 ilustra un diagrama de bloques de una central eléctrica;

[0016] Figura 8 ilustra un diagrama de bloques de un controlador de Rastreo de Punto de Máxima Utilización de Energía (MEUPT - *Maximum Energy Utilization Point Tracking*) de acuerdo con los principios descritos aquí; y

[0017] Figura 9, ilustra un diagrama de bloques del controlador MEUPT de Figura 8 en el contexto de una central eléctrica.

#### **DESCRIPCIÓN DETALLADA**

[0018] Las publicaciones de patente, US2016/0036232 y US2017/0149250 A1 (cuyos contenidos se incorporan aquí por referencia) divulgan que los sistemas de energía fotovoltaica (PV) que ponen en práctica la conformación MPPT ciega (*blind MPPT conformation*) obtienen cantidades subóptimas de electricidad inyectada en la red. Estas publicaciones de patente enseñan que, con el fin de extraer eficientemente electricidad para la utilización de energía, se deberían coordinar las características del dispositivo de extracción de energía para extraer efectiva y eficientemente la energía eléctrica producida. Más aún estas solicitudes de patente enseñan que los dispositivos relacionados deben coordinarse igualmente para acondicionar y/o entregar la electricidad extraída para una utilización eficiente de energía.

[0019] Estas publicaciones de patente enfatizan además el hecho de que la eficiencia de la utilización de energía depende inextricablemente de la demanda de energía, además de su producción. Así mismo, enseñan que, en cualquier sistema de energía, el consumo típico de energía no es necesariamente igual a la

producción de energía, incluso cumpliendo las leyes de carga y conservación de energía.

**[0020]** En lugar de usar el dispositivo MPPT como el optimizador para centrales eléctricas solares, las publicaciones de patente referenciadas proponían emplear un "rastreador de punto de máxima utilización de energía ", o el "dispositivo MEUPT" como el optimizador de la central eléctrica PV. Tal optimizador se designará aquí como un "optimizador MEUPT". De acuerdo con las publicaciones de patente referenciadas, el optimizador MEUPT se planea para capturar lo que se denomina "energía excedente", que definen como la energía eléctrica que se produce, pero no se extrae y/o entrega a la red para utilización. Esa definición de "energía excedente" se emplea también aquí.

**[0021]** El optimizador MEUPT se planea también para almacenar temporalmente la energía excedente capturada en un almacenador de energía y, posteriormente, preparar y entregar esta energía eléctrica a la red para su utilización. Por consiguiente, cuando se incorpora el optimizador MEUPT, pueden mejorarse los ingresos por ventas de electricidad de la central eléctrica PV.

**[0022]** Sección Uno: Funcionalidad del Optimizador MEUPT

**[0023]** De acuerdo con los principios descritos en las patentes US2016/0036232 y US2017/0149250 A1 (las "publicaciones de patente referenciadas"), el optimizador MEUPT de una modalidad divulgada aquí comprende un extractor de energía excedente, un almacenador de energía, y un controlador MEUPT. El controlador MEUPT trabaja conjuntamente con los extractores de energía y los convertidores CC/CA. Los términos "potencia" y "energía" (aunque no son exactamente lo mismo) se emplean indistintamente en el estado actual de la tecnología. Por lo tanto, a menos que se especifique lo contrario, cada término tiene el mismo significado.

**[0024]** Un extractor de energía extrae un tren de energía oscilante inicial (*an initial oscillating power train*) de la fuente de energía eléctrica CC producida. El tren de energía inicial extraída se ajusta a los requisitos de la red de energía eléctrica CA. En otras palabras, el tren de energía inicial extraída tiene una tensión sinusoidal variable en el tiempo, con una tensión pico que se ajusta al intervalo de tensión de

la red (*power grid voltage range*). Más aún, la energía eléctrica (que es proporcional al cuadrado del voltaje) adopta la forma ( $\sin^2(\omega t)$  o  $\cos^2(\omega t)$ ), que se sincroniza (con la misma fase y la misma frecuencia) con la red.

**[0025]** Por otra parte, un extractor de energía excedente extrae un tren de energía oscilante restante que queda luego de restar el tren de energía oscilante inicial de la energía eléctrica CC producida. En otras palabras, este tren de energía oscilante restante es un tren de energía oscilante sobrante que queda luego de inyectar el tren de energía oscilante inicial a la red. El tren de energía oscilante restante tiene un desplazamiento de fase de  $90^\circ$ , comparado con el tren de energía oscilante inicial que se inyectó a la red. Debido al desplazamiento de fase de  $90^\circ$ , este tren de energía oscilante restante no puede convertirse inmediatamente en energía eléctrica CA para inyectarlo a la misma red. Por consiguiente, se usa un almacenador de energía para almacenar temporalmente la energía excedente del tren de energía oscilante restante. Posteriormente, la energía almacenada se alimenta a un convertidor CC/CA, de modo que la energía excedente almacenada puede convertirse en energía eléctrica CA que se sincroniza (con la misma fase y la misma frecuencia) con la misma red.

**[0026]** El controlador MEUPT mide el nivel de energía del almacenador, estima la cantidad de energía en el almacenador que puede extraerse, y entrega esta información al (a los) convertidor(es) CC/CA asociado(s), de modo que esta cantidad de energía puede extraerse por los convertidores CC/CA. El(los) convertidor(es) CC/CA extraen entonces la energía almacenada del almacenador para conversión en energía eléctrica CA en la forma de un tren de energía pulsante apropiada e inyecta esa energía eléctrica CA a la red. Las centrales eléctricas PV pueden inyectar así casi toda la energía eléctrica producida a una red cuando incorporan el optimizador MEUPT. Por el contrario, sin el optimizador MEUPT, la central eléctrica PV de acuerdo con las publicaciones de patente referenciadas únicamente puede alimentar menos de la mitad de la potencia/energía producida a una red.

**[0027]** Sección Dos: Central eléctrica PV convencional mejorada con un MEUPT

[0028] Las centrales eléctricas solares se clasifican a menudo en términos de cierto número de megavatios (MW). Convencionalmente, cuando se declara que una central eléctrica solar se clasifica con  $x$  MW (donde  $x$  es algún número positivo), esto significa que la sumatoria total del régimen de producción de energía eléctrica CC de todas las cadenas solares es  $x$  MW. Tales centrales eléctricas solares convencionales tienen también convertidores trifásicos CC/CA con una capacidad de conversión CC/CA especificada que no es mayor que  $x$  MW. Este principio resume las operaciones de una central eléctrica convencional de acuerdo con la práctica MPPT estándar.

[0029] En otras palabras, la central eléctrica PV convencional de régimen  $x$  MW se compone de cadenas de paneles solares PV de  $x$  MW, los cuales convierten energía solar en electricidad CC. La electricidad CC generada se extrae entonces y se convierte por los convertidores trifásico(s) CC/CA en energía eléctrica CA adecuada, que se ajusta a todos los requisitos de energía eléctrica CA de una red, y se inyecta entonces a la red. Esta energía eléctrica CA inyectada a la red se designa también aquí como el "tren de energía oscilante inicial". Recuérdese que la capacidad de conversión CC/CA total, declarada por el fabricante, de los convertidores CC/CA no es mayor que  $x$  MW, la cual es la cantidad total de la capacidad de generación CC de los paneles solares instalados, declarada por la industria de paneles solares.

[0030] De acuerdo con la descripción de las publicaciones de patente referenciadas, US2016/0036232 y US2017/0149250 A1, existe un tren de energía oscilante restante que resulta cuando se resta el tren de energía oscilante inicial (extraído por el extractor de energía) de la energía eléctrica CC total producida por las cadenas de paneles solares. En otras palabras, este tren de energía es el tren de energía oscilante restante, que tiene una diferencia de fase de aproximadamente  $90^\circ$  del tren de potencia oscilante inicial, que se extrajo por el extractor de energía y se inyectó a la red.

[0031] Puesto que el tren de energía oscilante está desfasado aproximadamente  $90^\circ$  de la red, este tren de energía oscilante restante no puede acondicionarse y convertirse directamente en energía eléctrica CA y se inyecta a la misma red. De

acuerdo con los principios divulgados en las publicaciones de patente referenciadas, un almacenador de energía almacena temporalmente la energía contenida en este tren de energía oscilante restante desfasado 90° (el cual, cuando se almacenó, representaba energía excedente). Una vez esta energía excedente se almacena en el almacenador de energía, la energía excedente puede servir como energía eléctrica CC que puede inyectarse a un convertidor CC/CA. Esta energía excedente puede convertirse entonces en una energía eléctrica CA que se ajusta a todos los requisitos de la red (incluyendo la sincronización con la red), de modo que la energía eléctrica CA resultante puede inyectarse a la misma red.

**[0032]** Sección Tres: Evitar la Fuga de Energía del Almacenador de Energía

**[0033]** Antes de analizar la consideración del diseño del almacenador de energía para el optimizador MEUPT, se aborda aquí en primer lugar un problema importante. Específicamente, las cadenas de paneles solares pueden tener una resistencia muy alta a los períodos de oscuridad (*dusk*), pero la cadena de paneles solares puede conducir una corriente eléctrica significativa en cualquier dirección cuando el sol es fuerte al mediodía. Por consiguiente, la energía eléctrica almacenada en el almacenador puede fugarse y calentar los paneles solares durante el día. En consecuencia, pueden agregarse diodos desacopladores a cada una de las cadenas de paneles solares, de manera que la energía eléctrica pueda fluir de cada cadena de paneles solares para cargar el almacenador, pero la energía en el almacenador no puede refluir del almacenador a las cadenas de paneles solares. Varios sistemas almacenadores de energía que llevan a cabo este desacoplamiento se describirán ahora con respecto a Figuras 1A, 1B y 1C.

**[0034]** Sección Cuatro: Consideraciones de Diseño para el Almacenador de Energía

**[0035]** Figura 1A presenta un diagrama de bloques que ilustra un almacenador de energía **1300A** que se diseña para almacenar temporalmente la energía excedente resultante de un caudal de energía (*power stream*) producido de un conjunto de cadenas solares **1100A** restando la energía extraída por un convertidor CC/CA **1200A** cuando el convertidor CC/CA **1200A** convierte esa energía en energía eléctrica CA. La energía eléctrica CA se inyecta a una red de energía

eléctrica CA **1600A** a través de un transformador **1500A**. El almacenador **1300A** recibe el tren de energía oscilante restante a través de un conjunto de diodos desacopladores **1400A**. En un ejemplo, este almacenador de energía **1300A** se diseña para almacenar temporalmente la energía excedente de una central eléctrica PV de 1 MW durante 2 minutos.

**[0036]** Solo a modo de ejemplo, asumamos que la fuente de energía primaria puede mantener una intensidad constante (y que la producción de energía de las cadenas PV **1100A** se mantiene para permitir una producción constante de energía del generador de 1 MW) durante 2 minutos. Para el siguiente análisis, los dos trenes de energía oscilante inicial y restante tienen las mismas formas repetidas, pero con una diferencia de fase de 90°. En primer lugar, examinemos la forma en que podría planearse el almacenador de energía probando todas las opciones posibles (*using brute force*). Téngase presente que el propósito del almacenador de energía es almacenar temporalmente la energía excedente, de manera que los convertidores CC/CA puedan convertir más tarde esta energía almacenada.

**[0037]** Como se discute en las publicaciones de patente referenciadas, la razón estimada de la energía excedente a la energía eléctrica CC producida es superior a 0,5 para centrales eléctricas PV convencionales. Para los análisis, asumamos que la central eléctrica PV tiene cadenas de paneles solares PV de 1 MW, y que la energía eléctrica CC se convierte en energía eléctrica CA para inyectarla a una red que tiene una energía eléctrica CA trifásica de 50 hertzios y una tensión de línea de 380 V<sub>AC</sub>. En este caso, el tiempo de duración de un ciclo de potencia es igual a aproximadamente 0,01 segundos y la corriente de fase total es de hasta  $1.000.000/(380/1,732)$ , en donde 1,732 es el valor de la raíz cuadrada de 3. Esta razón es la razón de la tensión pico a la tensión de línea (tensión línea a fase, o "tensión de fase", en energía eléctrica CA trifásica). Almacenando la carga asociada con la energía excedente en un ciclo de potencia para esta central eléctrica requeriría una capacidad de carga equivalente de aproximadamente 8 V Faradios ( $0,5 * 0,01 * 1.000.000/(380/1,732)$ ), en donde "V" es la diferencia de tensión del almacenador planeado antes y después de cargar.

**[0038]** Para maximizar la utilización de energía de esta central eléctrica PV, en algunas modalidades, la tensión de servicio del optimizador MEUPT tiene que estar dentro del 75% de la tensión de producción de energía máxima PV. En otras palabras, el intervalo de tensión (*the voltage range*) de la producción de energía máxima del 75% tiene que observarse en aquellas modalidades del optimizador MEUPT. Los datos I-V medidos indican que normalmente este intervalo es de aproximadamente 80 voltios. Cuando se elige este intervalo de tensión como el intervalo de tensión de carga/descarga (es decir,  $V = 80$  voltios) para el almacenador de energía, la capacidad de carga de un almacenador de energía es aproximadamente 0,1 faradios por MW, por ciclo de potencia (donde el ciclo de potencia dura 0,01 segundos).

**[0039]** Si la consideración de diseño es almacenar esta cantidad máxima de energía excedente que se acumula durante dos (2) minutos, la capacidad de carga equivalente requerida es igual a 1200 faradios ( $100 * 120 * 0,1$ ) para la central eléctrica PV de 1 MW. Esta capacidad de carga equivalente requerida se designa aquí como la "capacidad de carga máxima total" y la cantidad de energía almacenada en el almacenador asociado se designa como la "capacidad del almacenador de energía máxima total", o "energía excedente máxima total".

**[0040]** Si se usaran únicamente condensadores de película fina para satisfacer esta capacidad de carga requerida, el conjunto de condensadores de película delgada requeridos para lograr esa capacidad de carga sería prohibitivamente grande en volumen y muy costoso en capital. Por consiguiente, no es práctico planear tal almacenador de energía conformado tan solo por condensadores de película delgada.

**[0041]** Como una alternativa a este diseño probando todas las opciones posibles, se podrían incorporar dispositivos Faraday (tales como baterías) en el diseño para disminuir el volumen y el tamaño. El cuidadoso análisis de los inventores revela que la capacitancia de carga requerida es, por supuesto, técnicamente manejable para un almacenador de energía con condensadores de película delgada y dispositivos Faraday. Sin embargo, el costo de tal almacenador es aún demasiado alto para ser

beneficioso, a menos que el precio de la batería pueda caer hasta en por lo menos un factor de 3, manteniendo simultáneamente el mismo rendimiento.

**[0042]** Usando condensadores electrolíticos se puede reducir sustancialmente el costo de capital requerido. No obstante, eso aumentaría el costo de funcionamiento debido a la vida útil relativamente corta de tales condensadores. Por consiguiente, en la actualidad, el uso de condensadores electrolíticos tampoco es práctico. Por lo tanto, probando todas las opciones posibles no se logran diseños económicamente beneficiosos con la capacidad de energía máxima total del almacenador.

**[0043]** Los principios descritos aquí utilizan los siguientes hechos observados por los inventores para resolver este problema:

- (1) La mayoría de los convertidores CC/CA pueden fácilmente subir o bajar la rampa un 3% en un segundo e, igualmente, los convertidores CC/CA de 500 kW existentes pueden subir o bajar fácilmente la rampa en más de 10 kW en un segundo durante la operación.
- (2) Como una operación aproximada, una central eléctrica PV típica de 1 MW arranca la producción de energía desde cero energía cada mañana, y raramente sube la rampa de su producción de energía a una velocidad mayor que 10 kW/segundo en su operación normal diaria.
- (3) Una central eléctrica PV de nivel MW (especificada con más de 1 MW) puede experimentar ocasionalmente una velocidad de subida de la rampa (a *ramping-up rate*) mayor que 10 kW por segundo durante una corta ráfaga de energía. Sin embargo, la energía contenida en esta corta ráfaga (o incluso en una ráfaga mayor que 100 kW por segundo) es insignificante si se compara con la energía diaria total producida en las centrales eléctricas de nivel MW.

**[0044]** Partiendo de estos tres hechos, los inventores establecieron que (1) la generación de energía en cada una de las cadenas de paneles solares empieza desde cero cada mañana; y (2) el generador PV no genera energía plena en forma instantánea. Por consiguiente, el tren de energía oscilante restante no acelera a su valor máximo en forma instantánea. En otras palabras, por lo general, el tren de energía oscilante restante aumenta mucho más suavemente que la velocidad de

aceleración de los convertidores CC/CA. Por lo demás, la cantidad de energía en cualquier ráfaga de aceleración corta no es un problema significativo en la recolección de energía para centrales eléctricas PV especificadas para 1 MW o más.

[0045] En consecuencia, en lugar de planear un almacenador de energía capaz de almacenar la cantidad total máxima de energía excedente, los principios descritos aquí sugieren planear un almacenador para almacenar la cantidad de energía neta igual a (durante, por decir algo, 2 minutos) la diferencia entre la entrada de energía excedente en el almacenador, y la energía que el (los) convertidor(es) CC/CA extrae(n) del almacenador. Esta cantidad de energía se designa aquí como la "energía excedente diferencial máxima". Esta cantidad de energía excedente diferencial máxima es mucho más pequeña que la energía excedente total máxima. En consecuencia, es más fácil planear tal almacenador de energía más pequeño, el cual es manejable desde el punto de vista de la tecnología y, además, efectivo en costos.

[0046] Figura 1B presenta un diagrama de bloques que ilustra esquemáticamente un almacenador de energía **1300B** que almacena la energía excedente que resulta de un flujo de energía (*power stream*) producido de un conjunto de cadenas solares **1100B** restando la energía extraída por un convertidor CC/CA **1201B**. Al mismo tiempo, otro convertidor CC/CA **1202B** se enruta por el controlador MEUPT **1310B** para recibir aproximadamente la misma cantidad de energía eléctrica CC del almacenador de energía **1300B** (que contiene la energía excedente). Los dos convertidores CC/CA **1201B** y **1202B** convierten simultáneamente la energía eléctrica CC recibida en energía eléctrica CA, e inyecta esa energía eléctrica CA a la misma red **1600B** a través del mismo transformador **1500B**. Como resultado, la carga de almacenamiento neto de energía al almacenador **1300B** puede reducirse a una capacidad muy pequeña cuando se compara con la del almacenador **1300A** representado en Figura 1A.

[0047] Figura 1C presenta una configuración que difiere de la configuración ilustrada en Figura 1B, pero que tiene aproximadamente el mismo rendimiento de la configuración mostrada en Figura 1B. Como se muestra en Figura 1C, un almacenador de energía **1300C** almacena el flujo de energía eléctrica CC producido

por las cadenas solares PV **1100C** a través de un conjunto de diodos **1400C**. Dos convertidores CC/CA **1201C** y **1202C** se enrutan por el controlador MEUPT **1310C** para recibir (en total) aproximadamente la misma energía eléctrica CC total del almacenador de energía **1300C** en una cantidad que equivale aproximadamente a la entrada de energía eléctrica CC producida por las cadenas PV. Por lo tanto, existe únicamente un equilibrio de entrada de energía neto en las entradas y salidas del almacenador **1300C**. Tanto **1201C** como **1202C** convierten simultáneamente la CC recibida en energía eléctrica CA inyectada a la misma red **1600B** a través del mismo transformador **1500C**.

[0048] En síntesis, como se ilustra en Figura 1B (si se desacopla adecuadamente) el almacenador de energía puede extraer y almacenar la energía excedente en la forma de un tren de energía oscilante restante, que queda después de que se extrae la energía eléctrica CC producida por un extractor de energía (el cual puede incorporarse como un módulo del convertidor CC/CA **1201B**). El otro convertidor CC/CA **1201B** se diseña para extraer una cantidad de energía aproximadamente igual del almacenador de energía **1300B** para reducir la cantidad neta de energía excedente almacenada en el almacenador. En consecuencia, es adecuado un almacenador relativamente pequeño.

[0049] Además, como se ilustra en Figura 1C, (si se desacopla adecuadamente) el almacenador de energía **1300C** puede recibir toda la energía eléctrica CC producida de las cadenas PV **1100C**. Un tren de energía oscilante se extrae entonces por los convertidores CC/CA **1201C** **1202C**, mientras que la energía excedente (la energía sobrante) se almacena también implícitamente en el almacenador de energía **1300C** en la forma de un tren de energía oscilante restante desfasado 90°. Como puede observarse, esta energía excedente se extrae también implícitamente en forma automática y se almacena en el almacenador **1300C**.

[0050] Aplicando uno cualquiera de los diseños ilustrado en Figura 1B (o en Figura 1C), el almacenador de energía planeado puede servir como el almacenador de energía propuesto para un optimizador MEUPT, el cual almacena temporalmente una pequeña cantidad de energía excedente neta que se encuentra desfasada 90°.

La difícil tarea del diseño del almacenador de energía se desplaza ahora a la tarea de planear un controlador MEUPT adecuado.

**[0051]** Sección Cinco: Funciones necesarias del Controlador MEUPT

**[0052]** El controlador debe ser capaz de enrutar los convertidores CC/CA asociados para extraer consistentemente una cantidad de energía adecuada del almacenador, que es sustancialmente igual a la cantidad en la energía excedente que se carga en el almacenador. Al hacer esto, se puede minimizar la cantidad neta del almacenamiento de energía en el almacenador, y mantener un almacenamiento de energía equilibrado adecuado en el almacenador para estabilizar la operación del sistema. Como resultado, el almacenador de energía solamente necesita almacenar (o inyectar) la diferencia de energía entre la energía excedente cargada y la energía extraída por los convertidores CC/CA en un corto período de tiempo.

**[0053]** Con un controlador capaz, la diferencia de energía puede planearse para que sea manejablemente pequeña. El período de tiempo puede planearse para ser lo suficientemente largo para que el(los) convertidores CC/CA suban o bajen la rampa (*to ramp up or down*) al coordinar la energía excedente; y lo suficientemente corto para reducir significativamente la capacidad del almacenador, manteniendo estable al mismo tiempo la operación del sistema. La capacidad estimada del almacenador se puede reducir así para que sea menor que 0,001 veces la de la energía excedente total máxima. Esta capacidad es menor que 2 faradios por central eléctrica PV de 1 MW, una capacidad de carga manejable incluso si se usan condensadores de película delgada. Un ejemplo de un controlador MEUPT adecuado se describirá con respecto a las Secciones Doce a Catorce más adelante.

**[0054]** Sección Seis: Almacenador de Energía combinado con Condensador/Batería

**[0055]** Otro problema es que un buen condensador de película delgada puede durar 10 a 15 años manteniendo aún más del 80% de su capacidad eléctrica (*capacitance*) original, mientras que una buena batería puede durar menos de 5 años y tener aproximadamente 70% de su capacidad de carga después de ese tiempo. Por lo tanto, se sugiere un cuidadoso equilibrio del diseño para optimizar los costos económicos. Por lo demás, la cantidad de energía en el almacenador debe

ser lo suficientemente grande para estabilizar la operación en todo momento. Las simulaciones de diseño muestran que, con los actuales precios de los condensadores de película delgada y las baterías, un diseño típico de un almacenador de energía óptimo de 20 años para una central eléctrica PV de 1 MW es un diseño con condensadores de película delgada de 0,1 a 1 faradio, combinados con una cadena (*string*) de baterías autónomas de aproximadamente 50 amperios/hora con una tensión de servicio adecuada.

**[0056]** Sección Siete: Prevención de la Aniquilación mutua de Energía en Cadenas PV

**[0057]** Como se describe más arriba, la técnica de desacoplamiento (*the decoupling technique*) aplicada en Figura 1B y Figura 1C permite que cadenas de paneles solares carguen el almacenador de energía, pero impide el refluo de energía desde el almacenador a las cadenas solares PV. Cuando se aplica el conjunto de diodos desacopladores en forma adecuada, esta técnica no solo impide la fuga de energía del almacenador a través de las cadenas de paneles solares PV, sino que también puede evitar un fenómeno descubierto por los inventores. Este fenómeno se designa aquí como el "fenómeno de aniquilación mutua de energía entre cadenas PV", el "fenómeno de aniquilación mutua de energía", o el "fenómeno de aniquilación de energía".

**[0058]** Este fenómeno ocurre cuando las cadenas solares PV conectadas en paralelo recolectan la energía producida. Este fenómeno es especialmente pronunciado cuando las cadenas PV conectadas en paralelo tienen características I-V, eficiencias de conversión fotoeléctrica, y/o voltajes máximos de producción de energía muy diferentes.

**[0059]** Por ejemplo, cuando menos de la totalidad de los paneles solares en menos de la totalidad de las cadenas está cubierta por sombras, las cadenas dentro de la sombra tendrán una menor eficiencia de conversión fotoeléctrica que las situadas fuera de la sombra. En otras palabras, estas cadenas solares tendrían características I-V muy diferentes incluso a la misma hora del día, debido a una proyección diferente de sombras. Cuando estas cadenas solares están conectadas en paralelo, las cadenas de alta eficiencia pueden descargar parte de su energía

eléctrica producida a las cadenas solares de menor eficiencia para alterar la producción de energía en las cadenas solares PV. Los inventores han confirmado este fenómeno experimentalmente. Los experimentos muestran igualmente que este fenómeno puede evitarse cuando las cadenas solares PV están desacopladas en forma adecuada.

**[0060]** Por lo demás, el fenómeno de aniquilación de energía puede ocurrir también cuando las cadenas PV conectadas en paralelo tienen tensiones de producción de energía máxima muy diferentes. Por ejemplo, supóngase que hay dos cadenas de paneles solares conectadas en paralelo una que cuenta con 15 paneles solares encadenados y otra que exhibe 19 paneles solares encadenados. La energía generada en la cadena con 19 paneles fluirá definitivamente a través de la cadena con 15 paneles y ocurre el fenómeno de aniquilación de energía. Los experimentos muestran que la energía recibida de las dos cadenas conectadas en paralelo, ya mencionadas, puede reducirse a menos de la mitad de la producida por la cadena con 19 paneles sola. Cuando están adecuadamente desacopladas, la energía recibida de las dos cadenas conectadas en paralelo, ya mencionadas, se puede recuperar hasta aproximadamente 1,53 veces la producida por la cadena con 19 paneles sola. El experimento descrito más arriba muestra que (a) existe el fenómeno de aniquilación de energía mutua; y (b) técnicas de desacoplamiento adecuadas pueden impedir el fenómeno.

**[0061]** En otro experimento, se dispuso una planta PV con dos unidades de producción de energía; cada unidad conformada por 85 paneles solares del mismo fabricante y modelo. Cada una de las dos unidades de producción de energía se configuró con cinco (5) cadenas PV conectadas en paralelo para recolectar la energía eléctrica CC producida. Dos cadenas PV se configuraron con 15 paneles conectados en serie, dos cadenas con 17 paneles conectados en serie, y otra cadena con 21 paneles conectados en serie. Cuando estas tensiones de producción de energía máxima de 10 cadenas se miden separadamente a mediodía con cielo despejado, las tensiones de producción de energía máxima variaron desde 420 voltios como mínimo hasta 610 voltios como máximo. En consecuencia, estas

cadenas solares PV conectadas en paralelo tienen tensiones de producción de energía máxima diferentes bajo el mismo cielo despejado.

**[0062]** Cada una de las unidades de producción de energía convierte la energía eléctrica CC recogida mediante un convertidor CC/CA diferente en energía eléctrica CA. Para medir la energía y la potencia producida en cada unidad de producción, se conectaron un medidor kilovatio-hora y un vatímetro a la salida CA de cada uno de los convertidores CC/CA de cada unidad de producción. Estas unidades se conectaron luego a un transformador para inyectar la energía eléctrica CA a una red. Con 72 lecturas idénticas de los dos vatímetros durante un período de 36 días, y con lecturas idénticas de los dos medidores de kilovatio-hora al final del período de 36 días, se confirma que todos los elementos en estas dos unidades de producción de energía (incluyendo los dos conjuntos de medidores) fueron sustancialmente idénticos.

**[0063]** Una unidad de producción de energía se modificó entonces para configurarse con 4 cadenas de 21 paneles (y 1 panel no en uso), mientras que la otra unidad de producción de energía se dejó sin modificar las 5 cadenas ya descritas. La producción de energía medida de la unidad de producción de energía modificada fue típicamente mayor que 4,1 veces la de la otra unidad de producción de energía al mediodía y con cielo despejado. A continuación, medimos sesenta (60) días de energía almacenada inyectada, la cual se dedujo de las lecturas de los dos medidores de kilovatio-hora. La unidad de producción de energía modificada inyectó una energía a la red de 3,38 veces la de la unidad de producción de energía no modificada. Los experimentos ya indicados demostraron clara y definitivamente que el fenómeno de aniquilación de energía mutua existe ciertamente en cadenas PV conectadas en paralelo, en especial con cadenas que tienen características I-V muy diferentes o tensiones de energía máxima muy distintas.

**[0064]** En conclusión, la técnica de desacoplamiento adecuado de acuerdo con los principios descritos aquí puede impedir la fuga de energía del almacenador de energía a través de las cadenas solares, e impedir igualmente el fenómeno de aniquilación de energía mutua descubierto entre las cadenas PV.

**[0065]** Sección Ocho: Experimentos que demuestran la Existencia de Energía Excedente

**[0066]** Antes de describir los diseños del optimizador MEUPT, esta sección reseña experimentos para probar definitivamente la existencia de energía excedente en tales centrales eléctricas PV, la cual se predice por las publicaciones de patente referenciadas, US2016/0036232 y US2017/0149250 A1. Reiterándolo, las publicaciones de patente referenciadas definen la energía excedente como la energía eléctrica producida pero no extraída y/o utilizada antes de transformarse en calor. Específicamente, en una central eléctrica PV, la "energía excedente" incluye la energía eléctrica sobrante que existe después de que la energía eléctrica CC producida se extrae y convierte en energía eléctrica CA por los convertidores trifásico(s) CC/CA. Un optimizador MEUPT puede planearse para capturar/utilizar esta energía eléctrica sobrante, la energía excedente. El siguiente aparte describe las configuraciones y la conducción paso a paso de los experimentos.

**[0067]** Figura 2A ilustra la configuración inicial de una central eléctrica PV **2000A** compuesta por 2 unidades de producción de energía eléctrica CA **2100A** y **2200A**. Cada una de las unidades de producción de energía eléctrica CA **2100A** y **2200A** pone en práctica la conformación MPPT ciega, e inyecta energía eléctrica CA trifásica a una red **2600A**. La unidad de producción de energía eléctrica CA **2100A** se compone de un generador de energía eléctrica CC **2110A** y un convertidor trifásico) CC/CA (15 kW) **2130A**. La unidad de producción de energía eléctrica CA **2200A** consta de un generador de energía eléctrica CC **2220A** y un convertidor trifásico) CC/CA (15 kW) **2230A**. El generador de energía **2110A** usa 2 cadenas PV conectadas en paralelo **2111A** y **2112A** para generar CC. El generador de energía **2220A** usa otras 2 cadenas solares conectadas en paralelo **2221A** y **2222A** para generar electricidad CC. Cada una de las 4 cadenas PV se compone de 25 paneles solares conectados en serie, cada panel siendo capaz de producir 250W de potencia al medio día y con cielo despejado.

**[0068]**El generador de energía eléctrica CC **2110A** inyecta energía eléctrica CC al convertidor trifásico) CC/CA **2130A**; y el generador de energía eléctrica CC **2220A** inyecta energía eléctrica CC al convertidor trifásico) CC/CA **2230A**. Estos dos

convertidores **2130A** y **2230A** convierten entonces la energía eléctrica CC suministrada en energía eléctrica CA trifásica. En el experimento, la corriente de salida CC de las unidades de producción de energía **2100A** y **2200A** se midió por los vatímetros AC trifásica (en kW) **2351A** y **2352A**, respectivamente. La producción de energía AC (en kW\*hora) de estas dos unidades de producción de energía **2100A** y **2200A** se midió así mismo por dos medidores kW\*h **2361A** y **2362A**, respectivamente. La energía eléctrica CA trifásica producida se inyectó entonces a la red **2600A** mediante el transformador **2500A**. La central eléctrica PV se puso en operación, y la producción de energía de las dos unidades de producción de energía eléctrica CA **2100A** y **2200A** se midió durante 7 días.

[0069] Las lecturas de los dos medidores kW\*h mostraron valores iguales cada día durante este período. Esto aporta una confianza elevada de que todos los elementos de estas dos unidades de producción de energía **2100A** y **2200A** (incluyendo los dos conjuntos de instrumentos para medición) son sustancialmente idénticos. Después de este paso, una de las dos unidades de producción de energía eléctrica CA **2200A** se mantuvo sin modificación, mientras que la otra unidad de producción de energía eléctrica CA, **2100A**, se modificó con una configuración diferente **2100B**, como se ilustra en el lado izquierdo de Figura 2B.

[0070] La unidad de producción de energía **2200B** de Figura 2B es la unidad de producción de energía **2200A** de Figura 2A no modificada. Además, los elementos **2351B**, **2361B**, **2352B**, **2362B**, **2500B**, **2600B** de Figura 2B son los mismos que los elementos **2351A**, **2361A**, **2352A**, **2362A**, **2500A**, **2600A**, respectivamente, de Figura 2A. Por lo demás, aunque la configuración de la unidad de producción de energía **2100B** es diferente en Figura 2B de la unidad de producción de energía **2100A** de Figura 2A, algunos de los elementos de la unidad de producción de energía **2100B** de Figura 2B son los mismos que los incluidos en la unidad de producción de energía **2100A** de Figura 2A. Por ejemplo, las cadenas PV **2111B** y **2112B** de Figura 2 son las mismas que las cadenas PV **2111A** y **2112A**, respectivamente, de Figura 2A. Análogamente, el convertidor CC/CA **2130B** de Figura 2B es el mismo que el convertidor CC/CA **2130A** de Figura 2A.

[0071] Los siguientes seis (6) pasos describen cómo se modificó la unidad de producción de energía **2100A** en la configuración de **2100B**, y se describe con respecto al lado izquierdo en Figura 2B. El paso 1 fue añadir un conjunto de diodos desacopladores **2311B** entre las cadenas solares **2111B** y **2112B** y el convertidor trifásico) CC/CA **2130B**, que está poniendo en práctica la conformación MPPT ciega. El paso 2 fue añadir un almacenador de energía **2410B** en la configuración. El paso 3 fue conectar el almacenador de energía **2410B** a los terminales CC del convertidor CC/CA **2130B** a través de otro conjunto de diodos desacopladores **2312B** y a través de un interruptor (*switch*) **SW1**. El paso 4 fue añadir otro convertidor trifásico CC/CA **2130S** (20 kW) en la configuración, convertidor **2130S** que se operó de acuerdo con la dirección de un controlador MEUPT planeado **2420B**. El paso 5 fue conectar el convertidor CC/CA **2130S** al almacenador de energía **2410B** a través de otro conjunto de diodos desacopladores **2313B** y a través de un interruptor **SW2**. El paso 6 fue conectar las terminales de salida del convertidor **2130S** al conjunto de instrumentos de medición de potencia y energía **2351B** y **2361B** a través de un interruptor **SW3**. Se debe observar que el "conjunto de diodos desacopladores" referenciado puede ser aquellos diodos que se denominan "diodos de bloqueo" en el estado actual de la tecnología. Se debe observar también que se añaden los interruptores **SW1**, **SW2**, y **SW3** como se ilustra en Figura 1B, de manera que los dispositivos relevantes pueden introducirse a (o retirarse de) los experimentos en un momento adecuado en los pasos planeados de conducción experimental descritos más adelante.

[0072] La primera noche después de hacer la modificación ya mencionada, se prendió el **SW1** mientras que los interruptores **SW2** y **SW3** se apagaron. Los convertidores **2130B** y **2230B** empezaron a funcionar temprano la mañana siguiente. Los medidores de potencia **2351B** y **2352B** que miden las dos salidas de las unidades de producción de energía **2100B** y **2200B** mostraron la misma lectura. El almacenador **2410B** comenzó también a cargar como se indica por la medición de la alta tensión del terminal del almacenador **2410B**. El sistema operó como se describe durante todo el primer día. La energía medida suministrada de las dos unidades de producción de energía **2100B** y **2200B** fue igual, como se muestra en las lecturas de los medidores kW\*h **2361B** y **2362B**. Este paso

experimental demostró que los conjuntos de diodos desacopladores añadidos **2311B** y el almacenador **2410B** no cambió las producciones de potencia y energía de la unidadde producción de energía **2100B**.

[0073] Los interruptores **SW1**, **SW2**, y **SW3** se prendieron en la noche después de la operación del primer día (la segunda noche). Los convertidores **2130B** y **2230B** comenzaron a funcionar temprano en la mañana (el segundo día), mientras que el convertidor **2130S** empezó a funcionar en un nivel de conversión de energía más bajo en aproximadamente 15 minutos después de que los convertidores **2130B** y **2230B** empezaran a funcionar. Posteriormente, el convertidor **2130** aumentó su nivel de conversión de energía aproximadamente cada 2 minutos; esto es consistente con el diseño del controlador y el incremento del nivel del almacenador de energía. La lectura del medidor de potencia **2351B** (para la unidad **2100B**) alcanzó aproximadamente el doble de la lectura del medidor de potencia **2352B** (para la unidad **2200B**) durante todo el día hasta cerca de la puesta del sol. La energía suministrada de las dos unidades de producción de energía **2100B** y **2200B** al final del segundo día se derivó de las lecturas de los dos medidores kW\*h. El resultado mostró que la energía provista de la unidad de producción de energía modificada **2100B** fue más del doble la energía provista de unidad de producción de energía no modificada **2200B**. Durante los siguientes seis días consecutivos, los interruptores **SW1**, **SW2** y **SW3** permanecieron prendidos, y la energía suministrada de la unidad de producción de energía modificada **2100B** fue consistentemente más del doble la de la unidad de producción de energía **2200B** cada día.

[0074] La siguiente noche, los interruptores **SW2** y **SW3** se apagaron. La energía provista de las unidades de producción de energía **2100B** y **2200B** regresaron al mismo nivel los siguientes 5 días consecutivos durante los cuales los interruptores **SW2** y **SW3** permanecieron apagados. La siguiente noche, los interruptores **SW2** y **SW3** se encendieron de nuevo. La producción de energía medida de la unidad de producción de energía **2100B** se volvió nuevamente más del doble la de la unidad de producción de energía **2200B** cada día para los siguientes 5 días consecutivos con los interruptores **SW2** y **SW3** permaneciendo prendidos.

[0075] Como se describió más arriba, la conducción paso a paso de estos experimentos demuestra definitivamente la existencia de la energía excedente mencionada en la central eléctrica PV como pronosticaron las publicaciones de patente referenciadas (US2016/0036232 y US2017/0149250 A1). Específicamente, en una central eléctrica PV, cuando se extrae la energía eléctrica CC producida por un convertidor trifásico CC/CA, existe aún energía sobrante. El optimizador MEUPT puede capturar y utilizar esta energía excedente para aumentar la electricidad inyectada a la red.

[0076] Sección Nueve: Configuraciones del Optimizador MEUPT planeado

[0077] La unidad de generación de energía modificada **2100B** (como se describe más arriba y se representa en Figura 2B) puede servir como un ejemplo de una unidad de generación de energía PV que incorpora un optimizador MEUPT. En este caso, el optimizador MEUPT comprende tres conjuntos de diodos desacopladores **2311B**, **2312B**, y **2313B**, un almacenador **2140B**, y un controlador MEUPT **2320B**. Nótese que el conjunto de diodos desacopladores se designa como el "dispositivo desacoplador", a partir de ahora.

[0078] Las conexiones de los módulos del optimizador MEUPT se representan en Figura 2B y se describen más arriba. Se debe observar que la energía excedente se extrae pasivamente por el almacenador de energía **2410B** en esta modalidad. Otro extractor de energía se incluye como un módulo en el inversor CC/CA trifásico **2130S**, el cual extrae la energía excedente que se almacena en el almacenador **2410B**. El nivel de conversión de energía eléctrica CA del convertidor **2130S** se regula por el controlador MEUPT **2320B** de modo que las cargas de energía en el almacenador de energía **2410B** se equilibran aproximadamente con la energía descargada del almacenador de energía **2410B**. Por consiguiente, la energía "neta" cargada en almacenador dentro de un período puede ser tan pequeña como se desee. Cargas más pequeñas de energía neta tienen la ventaja de permitir un almacenador de energía **2410B** más pequeño, a expensas de un control más estricto por el controlador MEUPT **2320B**.

[0079] Otra modalidad se representa en Figura 3. Esta modalidad ilustra una configuración de la central eléctrica PV **3000** que incorpora un optimizador MEUPT

que comprende una unidad de producción de energía eléctrica CA **3100** únicamente, la cual utiliza paneles solares de 500 kW **3110** para convertir energía solar en energía eléctrica CC. En otras palabras, la unidad de producción de energía eléctrica CA **3100** se compone de un generador de energía eléctrica CC **3110** y un convertidor trifásico CC/CA (500 kW) **3130**. El generador de energía **3110** usa 80 cadenas solares conectadas en paralelo para generar electricidad CC. Cada una de las 80 cadenas solares consta de 25 paneles solares conectados en serie; se declara que cada panel tiene una capacidad de producción de energía eléctrica CC de 250W al mediodía y con cielo despejado. Se debe observar que este generador CC **3110** se designa como un generador de energía eléctrica de 500 kW ( $80 \times 25 \times 250 \text{ W} = 500 \text{ kW}$ ); y esta central eléctrica PV se designa como una central eléctrica PV de 500 kW.

**[0080]** Como se representa en Figura 3, el generador de energía **3110** suministra energía eléctrica CC a un convertidor trifásico CC/CA **3130** (con 500 kW declarados) a través de un dispositivo desacoplador **3311**. El generador **3110** provee también energía eléctrica CC al almacenador de energía **3410** a través del dispositivo desacoplador **3312**, y sirve como una fuente de energía eléctrica CC que carga el almacenador de energía **3410**. En consecuencia, la energía excedente se extrae pasivamente por el almacenador **3410**. El almacenador **3410** suministra entonces (o descarga) energía eléctrica CC a otro convertidor trifásico CC/CA **3130S** (con 500 kW declarados) a través del dispositivo desacoplador **3313**. El convertidor **3130** opera como un optimizador MPPT, mientras que el convertidor **3130S** opera como un controlador MEUPT. Los convertidores **3130** y **3130S** convierten la energía eléctrica CC suministrada separadamente en energía eléctrica CA trifásica y la inyectan a una red **3600** mediante el mismo transformador **3500**.

**[0081]** Adviértase que los convertidores CC/CA usados en las descripciones anteriores pueden clasificarse en dos tipos, a saber, un tipo que recibe su energía eléctrica CC directamente de las cadenas solares PV, y otro tipo que recibe su energía eléctrica CC del almacenador de energía. Cuando es necesaria la distinción del tipo de convertidor en la divulgación y en la siguiente descripción detallada, el que recibe energía eléctrica CC de las cadenas solares PV se designa también

como el "convertidor CC/CA PS", mientras que el otro que recibe energía eléctrica CC del almacenador de energía se designa igualmente aquí como el "convertidor CC/CA ER". Cuando la distinción es necesaria en los casos que usan convertidores trifásicos CC/CA en esta divulgación, los convertidores se clasificarán y designarán también aquí como el "convertidor trifásico CC/CA PS" y el "convertidor trifásico CC/CA ER", respectivamente.

**[0082]** Para reiterarlo a un nivel más amplio, tal como lo muestra la configuración ilustrada en Figura 4, este optimizador MEUPT ofrece un servicio de optimización a una central eléctrica fotovoltaica de  $x$  MW que tiene cadenas de paneles solares dispuestos adecuadamente con una capacidad de generación de energía especificada de  $x$  MW. La energía eléctrica CC producida se extrae por un "convertidor trifásico CC/CA PS" de  $y$  MW, declarado por el fabricante, **4130** a través de un dispositivo desacoplador **4311**. La energía sobrante se carga en un almacenador de energía **4410** a través de otro dispositivo desacoplador **4312**; extrayendo así y almacenando la energía excedente. La energía excedente almacenada se convierte entonces por otro "convertidor trifásico CC/CA ER" de  $z$  MW, declarado por el fabricante, **4130S** a través de otro dispositivo desacoplador. Uno de los convertidores **4130** se regula por un optimizador MPPT, mientras que el otro convertidor **4130S** se regula por un controlador MEUPT. Los dos convertidores convierten una cantidad adecuada de energía eléctrica CC en energía eléctrica CA trifásica, e inyectan la energía eléctrica CA trifásica a una red **4600** mediante el mismo transformador **4500**. Adviértase que  $x = y = z = 0,5$  en esta configuración.

**[0083]** Figura 5 representa otra modalidad de incorporar un optimizador MEUPT en una central eléctrica PV grande. La central eléctrica está equipada con cadenas de paneles solares especificadas para 0,5 MW **5110** y dos convertidores trifásicos CC/CA de 500 kW declarados **5130** y **5130S**. Esta modalidad ilustra otra configuración para el optimizador MEUPT. La central eléctrica PV **5000** puede concebirse como compuesta por una unidad de producción de energía eléctrica CA (indicada a partir de ahora también como "unidad de producción de energía eléctrica CA **5100**"). La unidad de producción de energía eléctrica CA **5100** consta de un generador de energía eléctrica CC **5110** compuesto por paneles solares

especificados para 500 kW, y dos convertidores trifásicos CC/CA (cada uno declarado como 500 kW) **5130** y **5130S**. El generador de energía **5110** usa 80 cadenas solares conectadas en paralelo que generan energía eléctrica CC. Cada una de las 80 cadenas solares está conformada por 25 paneles solares conectados en serie; cada panel solar panel está especificado para tener una capacidad de producción de energía de 250W. El almacenador de energía **5410** recibe la energía eléctrica CC del generador **5110** a través de un dispositivo desacoplador **5311**. Los dos convertidores trifásicos CC/CA **5130** y **5130S** reciben energía eléctrica CC del almacenador **5410** a través de dos dispositivos desacopladores separados incluyendo el dispositivo desacoplador **5312** para el convertidor **5130**, y dispositivo desacoplador **5313** para el convertidor **5130S**. Los convertidores **5130** y **5130S** se regulan por el controlador MEUPT para extraer la cantidad apropiada de energía del almacenador **5410**, y convertir la energía eléctrica CC en energía eléctrica CA trifásica para inyectarla en la red **5600** mediante el transformador **5500**.

**[0084]** Para desarrollar más ampliamente la configuración ilustrada en Figura 5, el optimizador MEUPT provee un servicio de optimización a una central eléctrica PV de  $x$  MW. Esta central eléctrica PV tiene una unidad de producción de energía eléctrica CA con cadenas de paneles solares que tienen una capacidad de generación de energía eléctrica CA total especificada de  $x$  MW. El generador CC carga un almacenador de energía a través de un dispositivo desacoplador. El almacenador de energía suministra electricidad CC a dos convertidores trifásicos CC/CA a través de dos conjuntos separados de dispositivos desacopladores. La capacidad de conversión total declarada por el fabricante de los dos "convertidores trifásicos CC/CA ER " es  $z_1 + z_2 = z$  MW. Los dos convertidores se regulan por un controlador MEUPT para convertir una cantidad apropiada de energía eléctrica CC en energía eléctrica CA trifásica. La electricidad producida por los dos convertidores se inyecta a una red mediante el mismo transformador. La configuración ya descrita se redibuja y representa en Figura 6. Adviértase, por favor, que  $x = 0,5$ ,  $y = 0$ ,  $z = 1$  en esta configuración.

**[0085]** Esta descripción comparará ahora las dos configuraciones ilustradas en Figuras 4 y 6. En la configuración mostrada en Figura 4, el generador CC suministra

energía eléctrica CC a un "convertidor trifásico CC/CA PS" con una capacidad declarada por el fabricante de  $y$  MW, y carga la energía sobrante a un almacenador de energía. En Figura 4, el almacenador de energía suministra energía eléctrica CC a un "convertidor trifásico CC/CA ER" con una capacidad declarada por el fabricante de  $z$  MW. Sin un "convertidor trifásico CC/CA PS" en la configuración representada en Figura 6 (es decir,  $y=0$ ), toda la energía eléctrica CC generada se carga en un almacenador de energía a través de un dispositivo desacoplador, y el almacenador de energía suministra electricidad CC a dos "convertidores trifásicos CC/CA ER" a través de dos conjuntos separados de dispositivos desacopladores. Por lo tanto,  $x = y = z = 0,5$  en la configuración de Figura 3, mientras que  $x = 0,5$ ,  $y = 0$ ,  $z = 1$  en la configuración de Figura 6. En una modalidad adicional de Figura 6, no hay almacenador de energía **6410**. En su lugar, las cadenas solares **6110** proveen energía eléctrica CC a los convertidores **6130** mediante el dispositivo desacoplador **6311**.

[0086] Ahora, el único problema de diseño restante para el optimizador MEUPT es identificar la energía óptima que se corresponde con la relación entre los parámetros que representan la capacidad especificada de las cadenas solares y la de los convertidores. Específicamente, la tarea es identificar la relación entre el valor de  $x$ ,  $y$ , y  $z$  en la situación óptima. Como recordatorio, el valor de la sumatoria  $y + z$  no es mayor que el valor  $x$  en una central eléctrica PV convencional, como se describe en la Sección Dos.

[0087] Adviértase también que el valor  $x$  se designa para el valor MW de la capacidad de producción de energía eléctrica CC especificada de las cadenas PV, el valor  $y$  se designa para el valor MW total de la capacidad declarada por el fabricante del "convertidor trifásico CC/CA PS" que convierte la energía eléctrica CC suministrada por las cadenas PV, mientras que el valor  $z$  se designa para el valor MW total de la capacidad declarada por el fabricante del "convertidor trifásico CC/CAER" que convierte la energía eléctrica CC suministrada por el almacenador de energía.

[0088] Por ejemplo, en Figura 6, la  $x$  equivale a 0,5, la capacidad PV total declarada por el fabricante de 0,5 MW, la  $y$  equivale a 0, lo cual significa que no hay

instalado un "convertidor trifásico CC/CA PS"; la  $z$  equivale a 1, lo cual significa que la capacidad total de 1 MW declarada por el fabricante de los dos "convertidores trifásicos CC/CA ER" se incorpora para recibir la energía eléctrica CC del almacenador de energía y convertir la energía eléctrica CC en energía eléctrica CA trifásica. Se debe observar que el valor de  $y + z$  es no menor que 2 veces el valor de  $x$  en las dos configuraciones descritas más arriba. El término "capacidad" se designa también como el "régimen nominal" del dispositivo, y es intercambiable a partir de ahora, a menos que se indique lo contrario.

**[0089]** Sección Diez: La Energía Óptima que se corresponde con la Relación

**[0090]** Debido a los diferentes ramos (industrias), la definición del régimen nominal para paneles solares es diferente de la de los convertidores CC/CA. El régimen nominal de los paneles solares se define como la energía eléctrica CC máxima que un panel solar puede producir al mediodía y con cielo despejado. La industria fabricante de paneles solares usa un tipo predeterminado de lámpara de iluminación (llamada aquí una "lámpara estándar") para simular un cielo despejado, y el mediodía se simula proyectando un flujo lumínico perpendicularmente a través de la superficie del panel solar. Por consiguiente, la capacidad de producción de energía declarada por el fabricante puede estar muy cercana a la capacidad real del generador CC. Experimentos realizados por los inventores corroboran igualmente la afirmación anterior. Por consiguiente, la capacidad de generación de energía eléctrica CC total de las cadenas solares PV se considera creíble, y la designación "capacidad declarada por el fabricante" se omite aquí cuando se describe el régimen nominal de las cadenas solares. Por otra parte, la industria fabricante de los convertidores CC/CA define el régimen nominal de los convertidores CC/CA de acuerdo con la convención de la industria de redes eléctricas, indicada aquí como la "convención de la red". Esta convención y la definición de la capacidad del convertidor CC/CA se definen con mayor detalle a continuación.

**[0091]** La industria de redes eléctricas CA aplica una convención (indicada como la convención de la red) para garantizar que la red de energía eléctrica CA trifásica construida pueda cumplir la capacidad de entrega de energía declarada. La red de energía eléctrica CA trifásica consta de 3 o 4 líneas de alta tensión (*power lines*)

que pueden entregar funciones sinusoidales variables en el tiempo de tensión y corriente en cada par de líneas de alta tensión como una fase. La convención de la red define la tensión indicada en las especificaciones como la tensión máxima "estándar" que soportan las líneas de alta tensión (indicada como la "tensión de línea"). Análogamente la corriente máxima especificada declarada en las especificaciones es la corriente máxima que transportan las líneas de alta tensión (indicada como la "corriente de fase máxima"). Cuando un dispositivo se fabrica ajustándose a la convención de la red, la tensión declarada en las especificaciones del dispositivo es la tensión máxima que deben soportar todos los componentes relacionados. De igual manera, la corriente máxima declarada en las especificaciones es la capacidad de transporte de corriente máxima para todos los componentes relacionados de una fase, que se conectan a un par de líneas de alta tensión. Las funciones variables en el tiempo de la tensión y la corriente también necesitan ajustarse a la función sinusoidal de cada fase en la red de energía eléctrica CA.

**[0092]** Para decirlo una vez más, la tensión especificada de un convertidor trifásico CC/CA se define como la tensión de la energía trifásica, la corriente máxima especificada se define como la capacidad de transporte de corriente máxima del par de líneas de alta tensión para cada fase, y la energía máxima especificada se define como la sumatoria total de la capacidad de energía máxima que pueden soportar las tres fases. En otras palabras, cuando se cumple con la convención de la red, las líneas de alta tensión de cada fase y los dispositivos eléctricos conectados tienen que ser capaces de transmitir un tercio ( $1/3$ ) de la energía máxima especificada, dicho de otro modo, el "régimen nominal declarado por el fabricante" del convertidor trifásico CC/CA es  $3 \cdot U \cdot I$ , en donde  $U$  es la tensión de fase y la  $I$  es la corriente de fase. Cada par de líneas de alta tensión es capaz de entregar energía  $U \cdot I$ , o  $1/3$  del "régimen nominal declarado por el fabricante", y se requiere que cada módulo conectado al par de líneas de alta tensión transporte también o entregue  $1/3$  del régimen nominal especificado declarado, cuando se cumple con la convención de la red.

[0093] Verbigracia, considérese como un ejemplo un convertidor trifásico CC/CA que especifica "tensión CA = 315 VAC, corriente máxima = 916 amperios, y la potencia máxima de salida = 500 kW". La especificación "tensión CA = 315 VAC" debe leerse como: "la tensión de la línea de salida de este convertidor es 315 voltios". O, si se equilibra el convertidor trifásico CC/CA, la tensión de fase U de cada fase es  $U = 315/1,732 = 181,9$  voltios (en donde 1,732 es la raíz cuadrada de 3, que es la razón de la tensión de línea a la tensión de fase). La "corriente máxima = 916 amperios" especificada debe leerse como que las líneas de alta tensión y todos los componentes en cada fase están planeados para garantizar la capacidad de transporte de corriente de  $I = 916$  amperios. La "salida de potencia máxima = 500 kW" especificada debe entenderse como la conversión de energía máxima y la capacidad de entrega de todos los componentes de cada fase de conversión CC/CA =  $U \cdot I = 181,9 \cdot 916 = 500/3$  KW; y la conversión de energía máxima total y la capacidad de entrega de los módulos relacionados en la conversión trifásica es la sumatoria de cada fase,  $3 \cdot U \cdot I = 3 \cdot 181,9 \cdot 916 = 500$  kW, el cual es el "régimen nominal declarado por el fabricante" definido =  $3 \cdot U \cdot I$ , cuando se cumple la convención de la red estipulada en el párrafo anterior.

[0094] Las 3 fases en un convertidor trifásico CC/CA se correlacionan estrictamente para tener diferencias de fase de  $120^\circ$ . En otras palabras, un par de líneas de alta tensión (fase) entrega energía variable en el tiempo de  $U \cdot I \sin^2(\omega t)$ ; mientras que la segunda fase entrega energía variable en el tiempo de  $U \cdot I \sin^2(\omega t + 120^\circ)$ , y la tercera fase entrega energía variable en el tiempo de  $U \cdot I \sin^2(\omega t - 120^\circ)$ . Cada par de líneas de alta tensión de las tres fases entrega tres trenes de energía eléctrica CA oscilante relacionados entre sí en una correlación estricta. Se debe observar que la capacidad de conversión de energía,  $P(t)$ , no es igual al "régimen nominal declarado por el fabricante" definido. La capacidad de conversión de energía,  $P(t)$ , se expresa como una función del tiempo y se deriva de acuerdo con las restricciones de la energía eléctrica CA trifásica definidas.

[0095] En otras palabras, la capacidad de conversión de energía CC/CA,  $P(t)$ , se deriva de la sumatoria de las salidas de energía variables en el tiempo de las 3 fases, con una diferencia de fase estrictamente correlacionada de  $120^\circ$ , y con

formas de ondas de energía que se ajustan a las oscilaciones sinusoidales cuadradas de  $\sin^2(\omega t)$ , o  $\cos^2(\omega t)$ , y sincronizadas con la red (la misma fase y frecuencia), lo cual obliga a la frecuencia angular  $\omega$  a ser constante.

**[0096]** Ahora, derivemos la capacidad de conversión de energía variable en el tiempo,  $P(t)$  del convertidor trifásico CC/CA. La capacidad de conversión de energía de un convertidor trifásico CC/CA como función del tiempo es  $P(t) = U \cdot I \cdot (\sin^2(\omega t) + \sin^2(\omega t + 120^\circ) + \sin^2(\omega t - 120^\circ))$ . Tal como se define más arriba,  $U$  es la tensión de fase,  $I$  es la corriente de fase, y  $\omega$  es la frecuencia angular constante de la red. Asimismo, puede demostrarse que  $\sin^2(\omega t + 120^\circ) + \sin^2(\omega t - 120^\circ) = \cos^2(\omega t) + 1/2$ . Por consiguiente, la capacidad de conversión de energía,  $P(t)$ , de un convertidor trifásico CC/CA como función del tiempo es  $P(t) = U \cdot I \cdot (\sin^2(\omega t) + \sin^2(\omega t + 120^\circ) + \sin^2(\omega t - 120^\circ)) = U \cdot I \cdot (\sin^2(\omega t) + \cos^2(\omega t) + 1/2) = U \cdot I \cdot (1 + 1/2) = 3/2 (U \cdot I)$ .

**[0097]** En otras palabras, la sumatoria total de estos tres trenes de energía pulsante, estrictamente correlacionados en las tres fases, es una constante. En otras palabras, la sumatoria total de entrega de energía de estos tres pares de líneas de alta tensión es una constante. O la sumatoria total de los tres módulos relacionados con las tres fases es una constante. Sin embargo, esta constante es únicamente igual a la mitad ( $1/2$ ) de la "capacidad de energía declarada". Esta es la relación entre la capacidad de conversión de energía y la "capacidad de energía declarada" definida de un convertidor trifásico CC/CA cuando se cumple con la convención de la red.

**[0098]** Recuérdese que, como se describe previamente el "régimen nominal declarado por el fabricante", o la "capacidad de energía declarada por el fabricante" mencionada de un convertidor trifásico CC/CA es  $3 \cdot U \cdot I$ , cuando se cumple con la convención de la red. Si se compara esto con la capacidad de conversión de energía derivada más arriba,  $P(t) = 3/2 (U \cdot I)$ ; es claro que la capacidad de conversión de energía CC/CA derivada de un convertidor trifásico CC/CA es únicamente la mitad de la "capacidad de energía declarada por el fabricante".

**[0099]** Como un ejemplo, tómese nuevamente el convertidor trifásico CC/CA descrito más arriba, el cual especifica: "tensión CA = 315 VAC; corriente de fase máxima = 916 amperios, y la salida de potencia máxima = 500 kW". En realidad, la

capacidad de conversión de energía CC/CA de este convertidor trifásico CC/CA es únicamente 250 kW. Para sacar la conclusión anterior, primero confirmamos que la potencia máxima especificada, 500 kW es ciertamente igual a  $3 \cdot U \cdot I$ , en donde  $U$  es la tensión de fase derivada de la tensión de línea especificada, e  $I$  es la corriente máxima declarada, la capacidad de conversión de energía de este convertidor es igual a  $3/2 \cdot U \cdot I = 250$  kW.

**[00100]** La relación de correspondencia de energía óptima para los parámetros  $x$ ,  $y$ , y  $z$  (como se definen) es que el valor de  $(y + z)$  será no menor que el de  $2x$ . Donde la central eléctrica PV relacionada está compuesta por cadenas solares PV de  $x$  MW, con los "convertidores trifásicos CC/CA PS" teniendo una "capacidad de energía declarada por el fabricante" total de  $y$  MW, y con los "convertidores trifásicos CC/CA ER" teniendo una "capacidad de energía declarada por el fabricante" total de  $z$  MW, los "convertidores trifásico CC/CA PS" y los "convertidores trifásico CC/CA ER" pueden operarse por uno o más controladores MPPT, o por uno o más controladores MEUPT. Para poner en práctica la optimización MEUPT, se prefiere operar todos los convertidores CC/CA por un controlador(es) MEUPT.

**[00101]** Sección Once: Resúmenes

**[00102]** Figura 7 ilustra esquemáticamente la configuración de una central eléctrica solar PV **7000**. La central eléctrica comprende paneles solares de  $x$  MW en total organizados en cadenas solares **7100**. La energía eléctrica CC generada en las cadenas solares **7100** suministra entrada de energía eléctrica CC a un grupo de convertidores trifásicos CC/CA **7301** a través de un dispositivo desacoplador **7201**, y carga la corriente excedente en un almacenador **7400** a través de un dispositivo desacoplador **7202**. El almacenador de energía **7400** provee entrada de energía eléctrica CC a un grupo de convertidores trifásicos CC/CA **7302** a través de un dispositivo desacoplador **7203**. Los dos convertidores trifásicos CC/CA **7301** y **7302** inyectan la energía eléctrica CA trifásica convertida a una red **7600** por un transformador **7500**. La "capacidad declarada por el fabricante" total de los convertidores **7301** es  $y$  MW. La "capacidad declarada por el fabricante" total de los convertidores **7302** es  $z$  MW. El valor de la sumatoria  $(y + z)$  es no menor que el

valor de  $2x$ . Recuérdese, por favor, que cuando se usa una configuración similar para describir una central eléctrica PV convencional, como se describe en la Sección Dos, el valor de  $(y + z)$  es no mayor que el valor de  $x$ . En consecuencia, cuando un diseño con un valor de  $(y + z)$  es mayor que  $x$  o incluso mejor que  $1,1$  veces  $x$ , esto significa que algo de la energía excedente puede capturarse para aumentar la energía eléctrica inyectada a la red.

**[00103]** Los convertidores **7301** y **7302** pueden operarse todos por el (los) controlador(es) MEUPT descritos más arriba. En algunas modalidades, alguno, uno, o incluso ninguno de los convertidores se operan por un controlador MEUPT. Por lo demás, en algunas modalidades, uno o alguno de los dispositivos desacopladores **7201**, **7202**, y **7203** puede omitirse en la configuración. Las cadenas solares PV **7100** proveen entrada de energía eléctrica CC a los convertidores **7301**. Por consiguiente, se designan aquí como los "convertidores PS". El almacenador de energía **7400** provee entrada de energía eléctrica CC a los convertidores **7302**. En consecuencia, se designan aquí como los "convertidores ER". Los términos "régimen nominal declarado por el fabricante" total y "capacidad de energía declarada por el fabricante" total se abreviarán aquí como la "energía especificada".

**[00104]** Repitiendo la descripción de la configuración mostrada en Figura 7: una central eléctrica PV **7000** comprende cadenas solares de  $x$  MW **7100** como el generador de energía eléctrica CC. El generador de energía eléctrica CC **7100** provee entrada a los "convertidores PS" **7301** con "energía declarada" de  $y$  MW, a través del dispositivo desacoplador **7201**, y carga la energía sobrante al almacenador **7400** a través de otro dispositivo desacoplador **7202**. El almacenador **7400** provee entrada a los "convertidores ER" **7302** con "energía declarada" de  $z$  MW a través del dispositivo desacoplador **7203**. Todos los convertidores trifásicos CC/CA **7301** y **7302** inyectan la energía eléctrica CA trifásica convertida en una red **7600** por un transformador **7500**. En una modalidad, el valor de  $(y + z)$  es no menor que el valor de  $2x$ . Sin embargo, si el valor de  $(y + z)$  es mayor que el valor de  $x$ , el diseño puede recibir un beneficio parcial para aumentar la venta de energía eléctrica a la red.

[00105] Un optimizador MEUPT de acuerdo con los principios descritos aquí puede servir a una central eléctrica PV pequeña o una central eléctrica PV grande que comprende una o más unidades de producción de energía eléctrica CA. Más aún, con un dispositivo desacoplador planeado apropiadamente, puede evitarse la fuga de energía del almacenador de energía a través de las cadenas solares PV. Además, con un dispositivo desacoplador planeado adecuadamente, puede evitarse el fenómeno de la "aniquilación de energía mutua" descubierto. Del mismo modo, el almacenador de energía puede usarse para recibir únicamente la energía excedente luego de la extracción de energía del "convertidor PS", o recibir toda la energía eléctrica CC producida antes de cualquier extracción. Finalmente, el optimizador MEUPT puede servir también para una central eléctrica PV equipada con un convertidor(es) CC/CA monofásico(s).

[00106] Sección Doce: Limitaciones de Diseño del Controlador MEUPT

[00107] Figura 8 ilustra un controlador MEUPT **8000** (indicado igualmente como un "controlador del sistema") que representa un ejemplo del controlador MEUPT **2320B** de Figura 2B. El controlador MEUPT **8000** se compone de 3 componentes ejecutables: un componente de detección **8100**, un componente de determinación **8200**, y un componente de entrega **8300**.

[00108] El componente de detección **8100** mide el nivel de energía almacenada en un almacenador **8400**. Un ejemplo del almacenador es el almacenador **2410B** de Figura 2B, el almacenador de energía **3410** de Figura 3, el almacenador de energía **4410** de Figura 4, el almacenador de energía **5410** de Figura 5, el almacenador de energía **6410** de Figura 6, y el almacenador de energía **7410** de Figura 7.

[00109] Un componente de determinación **8200** determina el nivel de extracción de energía apropiado para equilibrar aproximadamente la carga suministrada al almacenador de energía **8400** y descargada del mismo.

[00110] Un componente de entrega **8300** entrega un mensaje codificado del nivel de extracción de energía adecuado y determinado a los convertidores CC/CA excedente **8500**. Los convertidores interpretan el mensaje codificado, y cumplen el mensaje codificado, de modo que el(los) convertidor(s) puede(n) operar continuamente en el nivel de energía ordenado para equilibrar aproximadamente la

energía de carga entrante (*the in-charging energy*). Un ejemplo de los convertidores **8500** que extraen energía del almacenador **8400** son los convertidores **2130S** de Figura 2B, Los convertidores **3130S** de Figura 3, los convertidores **4130S** de Figura 4, los convertidores **5130S** de Figura 5, los convertidores **6130S** de Figura 6, los convertidores **7302** de Figura 3.

**[00111]** Con el fin de obtener el optimizador MEUPT beneficioso desde el punto de vista económico, el diseño del controlador MEUPT toma en consideración los siguientes parámetros y variables, (1) la capacidad del almacenador de energía **8400**; (2) la velocidad de subida/caída de la rampa del (de los) convertidor(es) CC/CA **8500**; (3) las características I-V de las cadenas solares; (4) el clima en la ubicación de la central eléctrica PV, y (5) la posibilidad del controlador MEUPT de trabajar con el convertidor CC/CA excedente minimizan la diferencia entre (o el equilibrio) la cantidad de carga alimentada al almacenador de energía, y la cantidad de carga extraída del almacenador de energía. Un diseño simple puede obtenerse únicamente aplicando un controlador hecho a la medida para todas y cada una de las centrales eléctricas PV tomando en cuenta estos parámetros y variables.

**[00112]** Sección Trece: Los Diseños del Controlador MEUPT

**[00113]** Es poco práctico construir a la medida un controlador MEUPT para todas y cada una de las centrales eléctricas PV que usan un controlador MEUPT. Por otra parte, es muy difícil encontrar un diseño sencillo para el controlador MEUPT requerido, especialmente si no se permiten controladores hechos a la medida. No obstante, el voltaje terminal del almacenador de energía puede verse como una medida en la que inciden cada uno de los 5 parámetros y variables. Por consiguiente, las 5 limitaciones de diseño ya mencionadas pueden derrumbarse si la tensión terminal del almacenador de energía MEUPT se elige como el parámetro determinante.

**[00114]** Cuando se comparó la tensión terminal medida con un conjunto de "intervalos de tensión estándar" específicos del sitio, se hizo evidente para los inventores que el nivel de extracción y conversión de energía ejecutado actualmente por el sistema que puede cuantificarse como el nivel de extracción de energía fue (1) demasiado bajo, (2) demasiado alto, o (3) apenas correcto. Por consiguiente, la

tarea del diseño del controlador MEUPT puede dividirse en 1) un controlador industrial ordinario, más 2) una tabla de "intervalos de tensión estándar" específica del sitio, creada a la medida (indicada aquí como la "tabla de intervalos de tensión").

**[00115]** Una vez creada una tabla de voltaje específica del sitio para la central eléctrica PV, la tabla de intervalos de tensión puede trabajar en forma concertada con un controlador industrial para cumplir las funciones requeridas del controlador MEUPT. El controlador industrial se compone entonces de un componente de detección, un componente de determinación y un componente de entrega como también se ilustra en Figura 8. Sin embargo, en este caso, el componente de detección **8100** mide la tensión terminal del almacenador de energía **8400**. El componente de determinación **8200** compara la tensión medida con la tabla de intervalos de tensión, y determina la cantidad de extracción de energía apropiada para equilibrar aproximadamente la energía de entrada de carga. Un componente de entrega **8300** envía nuevamente el mensaje codificado del nivel de extracción de energía apropiado, determinado más arriba, al (a los) convertidor(es) CC/CA excedente, de modo que el (los) convertidor(s) pueda(n) operar continuamente en el nivel de energía ordenado para equilibrar aproximadamente la entrada y salida de carga del almacenador de energía **8400**.

**[00116]** En una modalidad, el componente de detección **8100** del controlador MEUPT **8000** mide la tensión terminal del almacenador de energía excedente **8400** en tiempo real. Aun así, el componente de determinación **8200** puede efectuar todavía la comparación de la tensión medida versus la tabla de intervalos de tensión cada intervalo de tiempo planeado. Esta comparación puede tener como resultado una de las siguientes tres situaciones:

(1) Si la comparación de la tensión medida y la tabla de intervalos de tensión indica que el nivel de energía es demasiado bajo, el controlador **8000** puede solicitar (a través del componente de entrega **8300**) que el convertidor trifásico CC/CA **8500** aumente en un nivel de extracción y conversión de energía para el siguiente intervalo de tiempo planeado;

(2) Si la comparación de la tensión medida y la tabla de intervalos de tensión indica que el nivel de energía es demasiado alto, el controlador **8000** puede solicitar

(a través del componente de entrega **8300**) que el convertidor trifásico CC/CA **8500** disminuya en un nivel de extracción y conversión de energía para el siguiente intervalo de tiempo planeado;

(3) Si la comparación de la tensión medida y la tabla de intervalos de tensión indica que el nivel de energía es el adecuado, el controlador **8000** puede solicitar que el convertidor trifásico CC/CA **8500** permanezca en el mismo nivel de extracción de energía para el siguiente intervalo de tiempo planeado, por lo menos hasta la próxima ocurrencia de la comparación.

**[00117]** Si los niveles de ajuste de extracción/conversión de energía del convertidor CC/CA son lo suficientemente pequeños, el diseño anterior puede funcionar para todas las clases de capacidad del almacenador de energía, para todas las clases de velocidad de subida/caída de la rampa del convertidor CC/CA, para todas las clases de características I-V de las cadenas, y para todos los climas del sitio PV. Por consiguiente, es importante que el controlador pueda ordenar pequeños pasos de ajuste para el convertidor trifásico CC/CA que extrae energía del almacenador de energía.

**[00118]** Los convertidores trifásicos CC/CA centralizados convencionales típicos pueden operar con pasos de ajuste muy pequeños cuando son controlados. No obstante, el canal de comunicación equipado, indicada como la "caja de conexiones a prueba de intemperie" en el estado actual de la tecnología (y denominada así aquí) tiene típicamente tan solo canales de comunicación de 6-bits mediante mensajes ópticos. Para comandar más de 6 niveles de extracción de energía a través de la caja de conexiones a prueba de intemperie, se emplea una técnica de codificación-decodificación. Esta técnica permite pasar hasta  $2^6 = 64$  mensajes para ordenar los niveles de extracción de energía. Con hasta 64 niveles de ajuste de extracción de energía, el equilibrio neto requerido cercano a cero en la entrada y salida de energía del almacenador puede lograrse técnicamente.

**[00119]** Sección Catorce: Central Eléctrica PV que incorpora el Optimizador MEUPT

**[00120]** Como se muestra en Figura 9, una central eléctrica PV **9000** incorpora un optimizador MEUPT **9200** conformado por un controlador MEUPT **9210**. El

controlador MEUPT **9200** comprende 3 componentes ejecutables, a saber, un componente de detección **9211** para medir la tensión terminal del almacenador de energía excedente **9400**, un componente de determinación **9212** para comparar la tensión medida con la tabla de intervalos de tensión de la central eléctrica PV, y un componente de entrega **9213** para notificar al convertidor trifásico CC/CA **4502** arrancar, parar, o permanecer al mismo nivel mediante el componente de entrega **4213**. Los componentes **9211**, **9212** y **9213** de Figura 9 son ejemplos de los componentes **8100**, **8200** y **8300**, respectivamente de Figura 8. El almacenador de energía **9400** de Figura 9 es un ejemplo del almacenador de energía **8400** de Figura 8. Los convertidores **9502** son ejemplos de los convertidores **8500** de Figura 8.

[00121] La central eléctrica PV **9000** se compone asimismo de cadenas solares PV **9100**. Las cadenas solares **9100** convierten la energía solar en electricidad y entregan la energía eléctrica CC generada a un almacenador de energía excedente **9400** a través del dispositivo desacoplador **9320**. El convertidor trifásico CC/CA **9502** recibe entrada de energía eléctrica CC del almacenador de energía excedente **9400** a través del dispositivo desacoplador **9330**. Las cadenas solares **9100** de Figura 9 son colectivamente una fuente de energía eléctrica CC para cargar el almacenador de energía, y son ejemplos de las cadenas solares **2111A** y **2111B** de Figura 2B, la cadena solar **3110** de Figura 3, la cadena solar **4110** de Figura 4, la cadena solar **5110** de Figura 5, la cadena solar **6110** de Figura 6, y la cadena solar **7110** de Figura 7. El dispositivo desacoplador **9320** de Figura 9 es un ejemplo del dispositivo desacoplador **2312B** de Figura 2B, el dispositivo desacoplador **3312** de Figura 3, el dispositivo desacoplador **4312** de Figura 4, el dispositivo desacoplador **5311** de Figura 5, el dispositivo desacoplador **6311** de Figura 6, y el dispositivo desacoplador **7202** de Figura 7. El dispositivo desacoplador **9330** de Figura 9 es un ejemplo del dispositivo desacoplador **2313B** de Figura 2B, el dispositivo desacoplador **3313** de Figura 3, el dispositivo desacoplador **4313** de Figura 4, el dispositivo desacoplador **5313** de Figura 5, el dispositivo desacoplador **6313** de Figura 6, y el dispositivo desacoplador **7203** de Figura 7.

[00122] Tal como se mencionó más arriba, el controlador MEUPT **9210** ordena al convertidor trifásico CC/CA **9502** extraer una cantidad de energía apropiada del

almacenador de energía **9400** para equilibrar la entrada de energía que se carga de las cadenas solares **9100**, lo cual tuvo como resultado en una energía de carga o extracción cercanas a cero en el almacenador **9400**. Por consiguiente, un almacenador de energía pequeño **9400** es adecuado para la estación PV. La energía eléctrica CA convertida del convertidor CC/CA se inyecta en la red conectada **9700** a través del transformador **9600**.

**[00123]** Tal como se emplea aquí, el término "componente ejecutable" se usa con respecto a Figuras 8 y 9. El término "componente ejecutable" es la denominación para una estructura que es bien entendida por una persona experta en el campo de la computación como una estructura que puede ser software, hardware, firmware o una combinación de las anteriores. Por ejemplo, si se implementa en software, una persona experta entenderá que la estructura de un componente ejecutable puede incluir objetos de software, rutinas, métodos que pueden ejecutarse en el sistema informático, si el componente ejecutable existe en el montículo de un sistema informático, o si el componente ejecutable existe en medios de almacenamiento legibles por computador.

**[00124]** En tal caso, una persona experta reconocerá que la estructura del componente ejecutable existe en un medio legible por computador tal que, cuando interpretado por uno o más procesadores de un sistema informático (v.g., por un hilo de un procesador), se hace que el sistema informático realice una función. Tal estructura puede ser legible por computador directamente por los procesadores (como es el caso si el componente ejecutable fuera binario). Alternativamente la estructura puede desarrollarse para interpretarse y/o compilarse (en una sola etapa o en etapas múltiples), con el fin de generar tal componente binario que se puede interpretar directamente por los procesadores. Tal entendimiento de las estructuras ejemplares de un componente ejecutable se encuentra perfectamente dentro del conocimiento de una persona experta en informática cuando se usa el término "componente ejecutable".

**[00125]** El término "componente ejecutable" se entiende también perfectamente por una persona experta como incluyendo estructuras que se implementan exclusivamente o casi exclusivamente en firmware o hardware, tal como dentro de

una matriz de puertas lógicas programable en campo (FPGA - *Field Programmable Gate Array*), un circuito integrado para aplicaciones específicas (ASIC - *application specific integrated circuit*), o cualquier otro circuito especializado. En consecuencia, el término "componente ejecutable" es un término para una estructura que se entiende perfectamente por una persona experta en informática, si implementada en software, hardware, o una combinación de las anteriores.

**[00126]** La presente invención puede incorporarse en otras formas específicas sin apartarse de su espíritu o características esenciales. Las modalidades descritas tienen que considerarse en todo respecto únicamente como ilustrativas y no como restrictivas. El ámbito de la invención se indica, por consiguiente, por las reivindicaciones incluidas al final y no por la anterior descripción. Todos los cambios que caen dentro del significado y alcance de equivalencia de las reivindicaciones tienen que quedar abarcados por su ámbito.