

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 977 460**

51 Int. Cl.:

H02J 7/00

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **12.08.2016 PCT/GB2016/052507**

87 Fecha y número de publicación internacional: **16.02.2017 WO17025756**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **12.08.2016 E 16753694 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.03.2024 EP 3335295**

54 Título: **Celdas inteligentes y métodos y sistemas de control**

30 Prioridad:

12.08.2015 GB 201514330

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

23.08.2024

73 Titular/es:

**OXFORD UNIVERSITY INNOVATION LIMITED
(100.0%)
Buxton Court, 3 West Way
Oxford, Oxfordshire, OX2 0JB, GB**

72 Inventor/es:

**FROST, DAMIEN y
HOWEY, DAVID**

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 2 977 460 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Celdas inteligentes y métodos y sistemas de control

5 La invención se refiere a celdas inteligentes y a métodos y sistemas de control para dichas celdas.

La electrónica de potencia está desempeñando un papel clave en la reducción de las emisiones de efecto invernadero a través de la integración de tecnologías de energía verde en la red eléctrica. Un área de mayor penetración de los dispositivos electrónicos son los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica, tales como los paquetes de baterías de ion litio, en el que el mercado está creciendo muy rápidamente. Esta rápida absorción del almacenamiento de energía conectado en red requiere convertidores electrónicos de energía y sistemas de gestión de la energía de última generación. Además, debido a que el dispositivo de almacenamiento de energía (las baterías, por ejemplo) es el componente más caro, la electrónica de potencia debe diseñarse para maximizar el rendimiento y la vida útil, garantizando simultáneamente la seguridad. En el peor de los casos, una cadena de baterías en serie no gestionada estará limitada por la celda más débil; de esta manera, un fallo en una única celda puede inutilizar la cadena entera.

En los sistemas de almacenamiento de energía que utilizan celdas electroquímicas, el rendimiento del paquete a largo plazo puede mejorarse mucho mediante la gestión activa de la energía al nivel de celdas individuales, instalando un convertidor de potencia y un sistema de gestión de batería individuales en cada celda. Los recientes avances en los dispositivos de conmutación de ancho de banda, cuyo coste se espera que se reduzca con el tiempo, incrementarán las eficiencias de conversión (y reducirán las pérdidas de potencia), además de reducir los costes globales del sistema a través de una mayor densidad de potencia y menores demandas de refrigeración. El documento n.º US2015/0115736 da a conocer un sistema de baterías que incluye un primer y segundo conmutador de estado sólido controlados por un controlador de estado sólido de manera que el conjunto de pilas de celda pueda activarse selectivamente.

Para determinadas químicas de celda, es necesaria la monitorización de celdas individuales y el equilibrado activo de celdas mejora el rendimiento. A título de ejemplo, la tecnología de batería de ion litio no es segura en casos de sobrecarga, cuando las celdas podrían explotar o romperse. Por lo tanto, con el fin de maximizar el potencial de almacenamiento de energía de varias celdas conectadas en serie y/o en paralelo, debe medirse y equilibrarse el estado de carga (EDC) de las celdas individuales en el paquete de batería.

Las baterías (u otros dispositivos de almacenamiento de energía) que incorporan un elemento de control o gestión de la carga y/o descarga del dispositivo de almacenamiento de energía pueden denominarse celdas inteligentes. El dispositivo de almacenamiento de energía puede incluir cualquiera de entre baterías (en particular, las baterías recargables), condensadores, supercondensadores, etc. Una celda puede incluir un paquete o subpaquete pequeño de dispositivos de almacenamiento. El nivel de granularidad es ajustable por el diseñador.

Los sistemas de gestión de baterías (SGB) (una forma habitual de control inteligente de celdas) se utilizan en todos los paquetes de batería modernos para garantizar que las celdas que constituyen el paquete funcionen dentro de sus límites de seguridad. A medida que envejece el paquete de batería, la capacidad de cada celda cambia durante el tiempo de una manera no uniforme y el estado de carga de las celdas individuales empieza a desviarse en unas respecto a otras. Para evitar este desvío, el SGB equilibra el estado de carga de cada celda individual, habitualmente por medios disipativos. Por ejemplo, durante la etapa de carga, las celdas que alcanzan su voltaje máximo antes que otras se conectarán a un resistor de descarga hasta que todas las celdas en el paquete estén totalmente cargadas. Este método de equilibrado de celdas funciona bien para paquetes de baterías bien emparejadas; sin embargo, en el caso de que se conecten entre sí celdas de capacidades diferentes, resulta muy ineficiente y lento.

Una topología de convertidor multinivel modular es esencialmente una cadena en serie de dispositivo de almacenamiento de energía, cada uno de los cuales puede estar conectado en línea (es decir, suministrar o recibir energía) o puentearse (es decir, que no suministra ni recibe energía). Dichas organizaciones se utilizan normalmente para la conversión de voltaje de corriente continua a alterna, en donde cada módulo incluye un condensador. Mediante el control del número e identidad de condensadores en la cadena que se conecta en serie, puede modificarse el voltaje de salida de un nodo en la cadena de manera que se produzca la forma de onda deseada (p. ej., una forma de onda de corriente alterna sinusoidal).

Según un primer aspecto, la invención proporciona una celda inteligente, según se reivindica en la reivindicación 1. Según un segundo aspecto, la invención proporciona una celda inteligente, según se reivindica en la reivindicación 2.

60 El inductor proporciona un medio mediante el cual se monitorizan los cambios de corriente en el resto del circuito. De esta manera, el inductor puede utilizarse para detectar los cambios de corriente percibidos por la celda inteligente y esta información detectada puede utilizarse para controlar la celda inteligente, p. ej., para controlar la fuente de energía (dispositivo de almacenamiento de energía) que forma parte de la celda inteligente.

65 Debido a que el inductor es parte de la celda inteligente, forma parte de una estrategia de controlador descentralizado para regular el estado de carga de las celdas dentro de un sistema más grande. Por ejemplo, puede formar parte de

una estrategia de controlador descentralizado para regular el estado de carga de celdas conectadas en serie de capacidades diferentes.

Otra ventaja de proporcionar un inductor como parte de las celdas inteligentes es que forma parte de un inductor de filtrado distribuido. Un inductor de filtrado se proporcionaría normalmente para una cadena de celdas (p. ej., en un controlador multinivel modular) como un único componente separado en serie con las celdas. La división de lo anterior en varios inductores más pequeños en una organización distribuida permite utilizar componentes más pequeños, lo que puede reducir significativamente los costes.

La invención puede utilizarse en sistemas de almacenamiento de energía para equilibrar el estado de cada celda en una batería. También puede utilizarse en contextos más amplios, en los que en lugar de gestionar el estado de carga de una celda individual, podría utilizarse para gestionar el estado de carga de una o más baterías.

El inductor se encuentra en serie con el circuito de conmutación. Lo anterior significa que el inductor está siempre conectado entre los terminales positivo y negativo con independencia del estado de conmutación del circuito de conmutación, es decir, con independencia de si está conectada una fuente de energía entre los terminales o está puenteada. En dicha configuración, el inductor puede continuar actuando como un detector de cambio de corriente y como parte de un inductor de filtrado distribuido, incluso en el caso de que el circuito de conmutación esté en un estado puenteado. El inductor puede conectarse en cualquiera de los lados del circuito de conmutación, es decir, entre el circuito de conmutación y el terminal positivo, o entre el circuito de conmutación y el terminal negativo. No es necesario que el inductor esté directamente conectado a cualquiera de los terminales o al circuito de conmutación (puede haber otros componentes o circuitos intermedios).

La celda inteligente comprende, además, un controlador dispuesto para la monitorización del voltaje que cruza el inductor y dispuesto para controlar el circuito de conmutación basándose en dicho voltaje del inductor.

En una topología de control multinivel modular, se ha observado que lo anterior permite que un controlador local determine cuándo conectar y desconectar su dispositivo de almacenamiento de energía. Lo anterior evita la necesidad de un controlador global que controle todos los módulos (es decir, permite un control descentralizado). Una ventaja de ello es que el controlador local puede llevar su propio dispositivo de almacenamiento de energía, conservando información sobre su historial, p. ej., información de estado de salud (EDS) y estado de carga (EDC). Otra ventaja del controlador local es que no hay necesidad de que un bus de comunicaciones en todo el sistema transfiera información entre celdas o entre las celdas y un controlador separado de todo el sistema.

El controlador puede disponerse para ajustar la temporización de la conmutación del circuito de conmutación basándose en el voltaje del inductor. El circuito de conmutación normalmente conectará y desconectará su dispositivo de almacenamiento de energía en un ciclo periódico que presenta un periodo de tiempo, un ciclo de trabajo (que puede representarse como una proporción del periodo de tiempo en el que está conectado, no puenteado, el dispositivo de almacenamiento) y una fase (que puede representarse como un tiempo de inicio respecto al inicio del ciclo). El ajuste de la temporización de conmutación del circuito de conmutación puede incluir el ajuste de cualquiera de entre: el ciclo de trabajo, la fase, el periodo de tiempo o frecuencia del ciclo de conmutación.

El controlador puede disponerse para realizar cualquier tipo de función de control de acuerdo con las características deseadas del sistema. Sin embargo, en algunas realizaciones preferentes, el controlador está dispuesto para determinar, basándose en el voltaje del inductor, una temporización deseada para el circuito de conmutación que minimiza el impacto sobre el rizado del voltaje de salida (p. ej., de una cadena en serie de celdas inteligentes) y está dispuesto para ajustar la temporización para el circuito de conmutación en la temporización deseada.

En un convertidor CC a CC, resulta deseable minimizar el rizado del voltaje de salida de manera que proporcione la salida más suave posible. En una cadena de dispositivos de almacenamiento de energía conectados en serie, cada vez que se conecta o desconecta un dispositivo, el voltaje de salida experimenta un salto. En el caso de que se conecten simultáneamente dos dispositivos, o en momentos muy próximos, el salto de voltaje será grande (es decir, se producirá un rizado grande). Por lo tanto, resulta deseable minimizar lo anterior de manera que el voltaje de salida globalmente se mantenga lo más constante posible. Debido a que cada controlador en el sistema puede detectar los sucesos de conmutación de otros dispositivos dentro del sistema mediante su inductor, cada controlador puede intentar minimizar su impacto sobre el rizado del voltaje global mediante la modificación de su temporización.

Aunque el controlador podría ajustar sus temporizaciones a exactamente las temporizaciones deseadas que ha calculado, ello podría resultar en inestabilidad cuando varios de estos controladores funcionan individualmente a la vez. Con el fin de fomentar que se alcance una situación de equilibrio, resulta preferente que cada uno de los controladores haga ajustes de temporización más pequeños hacia las temporizaciones objetivo. Preferentemente, el controlador está dispuesto para ajustar la temporización a una tasa proporcional al ciclo de trabajo del circuito de conmutación. El ciclo de trabajo probablemente variará ligeramente de una celda a otra y, por lo tanto, ello evita la sincronía con otras celdas en el sistema y fomenta que las diferentes celdas realicen ajustes a tasas diferentes, evitando de esta manera un funcionamiento inestable.

En algunas realizaciones preferentes, el controlador está dispuesto para: detectar cambios de corriente dentro del sistema; analizar dichos cambios para determinar los tiempos de conmutación de otras celdas; calcular las temporizaciones de conmutación deseadas para la celda inteligente basándose en dichos cambios de corriente, y ajustar las temporizaciones de conmutación de la celda inteligente mediante ajuste de sus temporizaciones hacia las temporizaciones de conmutación deseadas.

Los cambios de corriente se detectan mediante la medición del voltaje que cruza el inductor. Preferentemente para analizar los cambios de corriente, el controlador está dispuesto para llevar a cabo la detección de bordes en la corriente detectada en el sistema a fin de detectar los tiempos de conmutación de otras celdas. Debido a que el controlador es local respecto a la celda, no puede determinar con facilidad qué bordes pertenecen a qué otras celdas. De hecho, en el caso más general, no sabrá cuántas otras celdas hay en el sistema o de qué tipo son. Por lo tanto, los bordes detectados no pueden asociarse fácilmente a una celda particular. Lo anterior presenta una dificultad en el análisis, ya que no resulta posible determinar cuándo se conecta una celda y cuándo se desconecta, es decir, la duración de su ciclo de trabajo. Sin esta información, no se dispone de un modelo completo de funcionamiento del sistema. Sin embargo, tal como se explicará en mayor detalle posteriormente en el presente documento, se ha encontrado que la detección de los bordes en la corriente del sistema resulta suficiente para permitir encontrar una solución. De esta manera, el algoritmo de control permite que múltiples fuentes independientes de energía (dispositivos de almacenamiento de energía) trabajen juntas hacia un objetivo común.

Preferentemente, para analizar los cambios, el controlador está dispuesto para combinar los tiempos de conmutación en parejas de tiempo de conexión y tiempo de desconexión. Este emparejamiento no es necesario que se ajuste a tiempos particulares de conexión y desconexión, es decir, los tiempos de conexión y desconexión no es necesario que correspondan a la misma celda (que el controlador no puede determinar). Por el contrario, puede emparejarse cualquier conexión y desconexión y puede mostrarse que ello es equivalente a emparejar los tiempos correctos de conexión y desconexión. Lo anterior simplifica en gran medida el procedimiento de análisis y permite modelizar el sistema de un modo computacionalmente eficiente, de manera que puede llevarse a cabo la optimización requerida.

Preferentemente, el controlador está dispuesto adicionalmente para formar vectores a partir de las parejas, en donde cada vector está definido por un ángulo que se determina calculando el promedio del tiempo de conexión y el tiempo de desconexión respecto al periodo de conmutación de la celda inteligente, y una magnitud igual al seno de la diferencia entre el tiempo de conexión y el tiempo de desconexión.

Se ha encontrado que dicha transformación particular simplifica adicionalmente el problema de optimización para determinar los tiempos de conmutación óptimos para la celda. Tal como se comentará en mayor detalle posteriormente, el problema de optimización puede expresarse como la minimización de una expresión de serie de Fourier para el voltaje de rizado. Con esta transformación, un vector suma de los vectores definido de esta manera es matemáticamente equivalente al problema de optimización con la serie de Fourier expandida a solo el primer orden. La transformación y el vector suma son de cálculo considerablemente menos intensivo que la expresión de Fourier completa y, de esta manera, permiten calcular el problema de optimización de manera más eficiente y rápida. Aunque la optimización es solo al primer orden de la serie de Fourier (es decir, el componente fundamental), se ha observado inesperadamente que ello conduce a una solución estable más rápida y fiablemente que la optimización a un orden superior.

Por lo tanto, preferentemente se dispone el controlador para minimizar la magnitud del vector suma de la totalidad de dichos vectores. Lo anterior puede conseguirse realizando la suma vectorial omitiendo las temporizaciones propias de la celda (ya sea omitiéndolas del procedimiento de emparejamiento, o sea deduciendo de la suma vectorial final el vector de la propia celda). Las temporizaciones óptimas para la celda seguidamente pueden determinarse fijando el vector deseado de la celda en la dirección contraria al vector suma e invirtiendo la transformación del vector a fin de determinar las temporizaciones óptimas para la celda.

Las temporizaciones de conmutación pueden ajustarse simplemente mediante el ajuste de la fase del ciclo de conmutación a un tiempo anterior o posterior. Sin embargo, en una alternativa, el controlador puede disponerse para ajustar las temporizaciones de conmutación mediante el ajuste del periodo de conmutación de la celda inteligente. La elección del método de cambio de fase utilizado puede basarse en el *hardware* disponible en el sistema. El controlador puede disponerse para ajustar las temporizaciones de conmutación mediante ajuste de las temporizaciones a una tasa proporcional al ciclo de trabajo de la celda inteligente. Tal como se ha comentado anteriormente, los ciclos de trabajo generalmente varían entre las diferentes celdas y, por lo tanto, ello tiene la ventaja de causar la convergencia a las temporizaciones deseadas a diferentes tasas, lo que evita mejor los estados inestables.

Mediante la distribución del inductor entre una pluralidad de celdas, puede conseguirse que los inductores individuales sean más pequeños. La minimización de componentes reduce los costes. En organizaciones especialmente preferentes, el inductor puede formarse como una pista de la placa de circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés). Esta es una de las maneras más efectivas respecto a los costes para producir un inductor.

Se apreciará que el dispositivo de almacenamiento de energía puede comprender por lo menos uno de entre una

batería, una batería recargable, un condensador o un supercondensador, o combinaciones de los mismos. Alternativamente pueden utilizarse otros dispositivos de almacenamiento de energía. Adicionalmente, el tamaño de los dispositivos de almacenamiento de energía puede variar mucho según la aplicación. Puede utilizarse la invención para baterías recargables conectadas en serie para dispositivos personales o domésticos, aunque se espera que resulte especialmente útil en dispositivos de almacenamiento de energía conectados a la red eléctrica, que podrían ser de capacidad total mucho mayor (p. ej., estar constituidos de un número muy grande de celdas más pequeñas). En particular, las celdas ya utilizadas (p. ej., de dispositivos electrónicos de consumo o vehículos eléctricos desechados) que podrían haberse degradado respecto a su capacidad original, podrían reutilizarse mediante su combinación con dispositivos electrónicos de control adecuados en dispositivos de almacenamiento de energía multicelda de gran tamaño que podrían conectarse a la red eléctrica. Lo anterior proporciona una fuente económica de almacenamiento y es medioambientalmente respetuosa, al reutilizar celdas que de otro modo se considerarían al final de su vida útil. Por ejemplo, las baterías de un vehículo eléctrico ya no resultarán de utilidad (y se considerarán al final de su vida útil) cuando ya no permitan alcanzar la autonomía requerida del vehículo, pero todavía podrían presentar un potencial de almacenamiento significativo que resulte utilizable para otras aplicaciones.

En algunas realizaciones, el dispositivo de almacenamiento de energía puede comprender una pluralidad de dispositivos de almacenamiento más pequeños en paralelo y/o en serie, con un controlador dispuesto para controlar el suministro de energía de dichos dispositivos más pequeños. El controlador que controla dicho grupo de celdas paralelas puede ser el mismo controlador que el utilizado tal como se ha indicado anteriormente para interactuar con otras celdas inteligentes conectadas en serie, o puede ser un controlador separado que solo controle el conjunto paralelo de subceldas.

Según otro aspecto, la invención proporciona un sistema de celdas inteligentes que comprende una pluralidad de celdas inteligentes, en el que dichas celdas están conectadas en serie, según se reivindica en la reivindicación 14. Las celdas inteligentes pueden ser tal como se ha indicado anteriormente, incluyendo opcionalmente cualquiera de las características opcionales o preferentes también indicadas anteriormente. La pluralidad de celdas inteligentes puede formar un convertor multinivel. El convertor multinivel puede ser un convertor CC a CC o puede ser un convertor CC a CA. Podría utilizarse un convertor multinivel formado de una pluralidad de celdas inteligentes en un aplicación en la que se mezclen celdas de batería y supercondensadores y otros dispositivos de almacenamiento de energía en la misma cadena de celdas inteligentes. Este tipo de aplicación podría resultar útil para vehículos eléctricos y vehículos híbridos en los que se dan ciclos frecuentes de carga y descarga. Además, sería muy aplicable una cadena en serie de celdas inteligentes en algunas arquitecturas de tren motriz eléctrico en las que se requiere una elevada tasa de conversión de batería a electrónica de control del motor.

El sistema de celdas inteligentes puede comprender una pluralidad de convertidores multinivel en paralelo, es decir, varias cadenas de celdas en paralelo, comprendiendo cada cadena celdas en serie, con el fin de incrementar la capacidad global del sistema hasta un valor deseado.

En algunas realizaciones preferentes, puede diseñarse el sistema para descargar y cargar cada celda en una cadena en serie de celdas proporcionalmente a la capacidad de las mismas. Mediante la utilización de cada celda en proporción a su capacidad, las células más débiles se utilizan menos y las celdas más potentes se utilizan más. Lo anterior evita el problema de que la celda más débil en la cadena falle y cause que toda la cadena quede inoperativa. Por el contrario, todas las celdas deberían alcanzar su carga máxima y/o descarga máxima individual aproximadamente en el mismo momento, maximizando el uso global de todas las celdas, además de extendiendo la vida útil de cada celda individual. El ciclo de trabajo de cada celda se modifica de acuerdo con su capacidad de manera que las celdas se autorregulen. En el caso de una celda de batería que se utilice en una celda inteligente, el ciclo de trabajo puede determinarse mediante comparación de la capacidad de la celda de batería con una capacidad máxima dada que se encontraría en el sistema. Dicha capacidad máxima puede haber sido prefijada por el diseñador del sistema, o programarse en el sistema en cualquier momento (p. ej., actualizarse a medida que se añaden y/o quitan baterías). Alternativamente, podría resultar posible en algunas realizaciones detectar o de otro modo determinar (o estimar) las capacidades de otras celdas en el sistema y determinar de esta manera el valor de la capacidad máxima. En el eventual caso de un fallo de celda, el circuito de conmutación de la celda inteligente puede puentear automáticamente la celda con el fallo, manteniendo operativa de esta manera la cadena.

Se apreciará que la celda inteligente puede incluir el dispositivo de almacenamiento de energía o puede suministrarse por separado. Por ejemplo, el controlador de celda inteligente y los circuitos de conmutación pueden suministrarse con una ranura o soporte vacío para recibir un dispositivo de almacenamiento de energía (tal como una celda de batería o paquete de batería recargable) o puede suministrarse con terminales en los que pueda conectarse un dispositivo de almacenamiento de energía separado.

Según otro aspecto, la invención proporciona un método de control de una celda inteligente en un sistema multicelda, según se reivindica en la reivindicación 15.

Las características preferentes descritas anteriormente también se aplican a dicho método. Por lo tanto, dicho análisis preferentemente comprende llevar a cabo la detección de bordes en la corriente detectada en el sistema a fin de detectar tiempos de conmutación de otras celdas. Dicho análisis preferentemente comprende una etapa de detección

de los niveles de voltaje para detectar cuándo se conectan o desconectan múltiples celdas inteligentes en exactamente el mismo momento. Dicha operación de análisis preferentemente comprende combinar dichos tiempos de conmutación en parejas de tiempo de conexión y tiempo de desconexión. El método puede comprender, además, la formación de vectores de dichas parejas, en donde cada vector está definido por un ángulo que se determina calculando el promedio del tiempo de conexión y el tiempo de desconexión respecto al periodo de conmutación de la celda inteligente, y una magnitud igual al seno de la diferencia entre el tiempo de conexión y el tiempo de desconexión. Dicha operación de análisis comprende minimizar la magnitud de la suma vectorial de la totalidad de dichos vectores. El ajuste de los tiempos de conmutación puede comprender el ajuste del periodo de conmutación de la celda inteligente. El ajuste de las temporizaciones de conmutación puede comprender el ajuste de las temporizaciones a una tasa proporcional al ciclo de trabajo de la celda inteligente.

Tal como se ha comentado anteriormente, una de las mayores ventajas e la invención es que permite que un paquete de baterías grande equilibre el estado de carga de todas las celdas sin que se requiera ninguna comunicación entre ellas. Lo anterior simplifica mucho el cableado y los sensores necesarios dentro del paquete de batería. Además, está contemplado que puedan empaquetarse con la celda misma la electrónica de potencia y el algoritmo de control. Por lo tanto, la información sobre el estado de salud y el estado de carga de la celda siempre viajará con la celda, por ejemplo en el caso de que se instale en otro dispositivo.

Además, la invención permite diseñar sistemas modulares en los que el número de celdas en la cadena (es decir, en el paquete) no es un número fijo. Por el contrario, pueden añadirse nuevas celdas cuando se desee o estén disponibles y pueden quitarse celdas viejas a medida que se degraden o ya no resulten necesarias. Dicha flexibilidad resulta especialmente adecuada para el modelo de control descentralizado.

En algunas realizaciones preferentes, el sistema descargará y cargará celdas de capacidad diferente en proporción a su capacidad. Mediante la utilización de una topología de convertidor multinivel modular (CMM) modificada, resulta posible conseguir dicho objetivo. La topología CMM general permite conectar una celda con la salida, o puentear la celda por completo.

El algoritmo de control funciona porque se ha mostrado mediante un análisis teórico detallado (descrito en mayor detalle posteriormente) que resulta posible conseguir una salida suave de una cadena de celdas en conmutación utilizando la información disponible localmente en cada celda.

La invención puede utilizarse en cualquier caso en que se conecten en serie fuentes de energía de diferente capacidad. Además de instalar dicho algoritmo al nivel de celda, resulta posible utilizar el mismo algoritmo con paquetes más grandes de celdas, o incluso con diferentes combinaciones de fuentes de energía, como celdas de batería y celdas de combustible.

La fase define el tiempo (dentro de un ciclo de conmutación) en que un dispositivo de almacenamiento de energía dentro de la celda inteligente se conecta en serie en la cadena. El dispositivo de almacenamiento de energía entonces se mantiene en el estado conectado en serie durante todo el ciclo de trabajo y seguidamente se conmuta al estado puentead.

A continuación se describen realizaciones preferentes de la invención, únicamente a título de ejemplo y en referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

Las figs. 1a y 1b muestran una arquitectura CMM estándar.

La fig. 2 muestra una arquitectura de sistema de ejemplo según la invención.

La fig. 3 ilustra el voltaje de salida de una celda inteligente del sistema medido en la salida de la red de conmutación, punto v_i en la fig. 2.

La fig. 4 ilustra las temporizaciones de una celda inteligente como fases y vectores que representan las temporizaciones y voltaje de la celda inteligente.

La fig. 5 ilustra las etapas de procesamiento de un controlador.

La fig. 6 muestra los resultados de una simulación.

La fig. 7 muestra una captura de pantalla de osciloscopio de un experimento, y

la fig. 8 muestra una comparación del experimento con la teoría y la simulación.

Brevemente, el sistema descrito posteriormente funciona del modo siguiente: Cada celda monitoriza el voltaje que cruza el inductor local. En teoría, los presentes inventores han mostrado que la identificación de los sucesos de conmutación en la cadena de celdas resulta suficiente para determinar cuándo la celda local debería conectarse y desconectarse para minimizar el rizado de la corriente de salida y, por lo tanto, el rizado del voltaje de salida. A continuación, la celda local ajusta el desplazamiento de fase de sus acciones de conmutación respecto a las demás celdas en la cadena, minimizando el rizado del voltaje de salida.

Las realizaciones descritas en la presente memoria se refieren a la conexión en serie de celdas de capacidades diferentes. Están diseñadas de manera que las celdas se cargan y descargan en proporción a su capacidad.

Se utiliza una topología de conversor multinivel modular (CMM) modificada para cargar cada celda con una corriente proporcional a su capacidad. La topología CMM es una topología bien conocido que se utiliza para la conversión de corriente continua (CC) de alto voltaje a energía alternante (CA). La figura 1a muestra un esquema de un conversor CMM estándar 10 constituido por una cadena 11 de submódulos 12 conectados entre un raíl positivo P y un raíl negativo N. Se muestra un submódulo 12 en mayor detalle en la figura 1b. Cada submódulo 12 comprende un dispositivo de almacenamiento 14 de energía, tal como una batería o condensador (aunque puede utilizarse cualquier dispositivo de almacenamiento de energía). El submódulo 12 presenta dos conmutadores, S_R y S_F , que se encuentran siempre en estados opuestos. Cuando S_R está activado (y S_F está desactivado), el dispositivo de almacenamiento 14 de energía está conectado en serie con cualesquiera otros dispositivos de almacenamiento de energía en la cadena 11. Cuando S_F está activado (y S_R está desactivado), se puentea el dispositivo de almacenamiento 14 de energía, es decir, no está conectado en la cadena en serie 11.

La salida del conversor 10 se toma del nodo central 13. El voltaje en el nodo 13 puede modificarse mediante el control de cuántos submódulos 12 en el lado positivo y cuántos módulos 12 en el lado negativo del nodo 13 se conectan con sus fuentes de energía 14 respectivas en la cadena en serie 11 y cuántas puentean sus fuentes de energía 14.

Cada submódulo es capaz de conectar la fuente de almacenamiento 14 de energía local en la cadena en serie 11 o de puentearla, mediante el envío de las órdenes de activación adecuadas a los conmutadores semiconductores S_R , S_F de energía

En la realización de la invención mostrada en la figura 2, se añade un pequeño inductor 24 (L_{sc}) al submódulo 21.

En la descripción proporcionada a continuación los presentes inventores presentan un sistema de gestión de batería del nivel de celda y conversión de energía que utiliza una estrategia de controlador descentralizado para regular el estado de carga de celdas conectadas en serie de capacidad diferente. El sistema de gestión de batería distribuida está diseñado para descargar y cargar cada celda en una cadena en serie de celdas proporcional a la capacidad de las mismas. Los conversores están controlados de manera que minimizan el tamaño de los componentes de filtrado en la cadena en serie y, por lo tanto, minimizan el rizado del voltaje de salida.

Cada celda inteligente 21 utiliza un controlador autónomo 23 para determinar su patrón de conmutación óptimo a fin de reducir el rizado de voltaje de salida. Dicho algoritmo se basa en un análisis de Fourier de la forma de onda generada por varias celdas inteligentes 21 conectadas en serie. Utiliza el voltaje detectado que cruza el inductor pequeño 24 (L_{sc}), en cada celda inteligente 21 para determinar qué están haciendo las demás celdas 21, y calcula nuevos tiempos de conmutación. La descripción a continuación entra en más detalle en cómo funciona el algoritmo y las ecuaciones que involucra.

Arquitectura del sistema

En la fig. 2 se muestra un ejemplo de la arquitectura del sistema propuesto. La fig. 2 muestra un controlador multinivel modular (CMM) 20. En el presente ejemplo, el sistema está construido con tres celdas CMM 21, cada una de las cuales contiene una red de conmutación de medio puente 22 similar a las redes de conmutación observadas en los submódulos de otros conversores CMM conocidos. Dependiendo del estado de las conmutaciones, la red de conmutación 22 conecta el dispositivo de almacenamiento 26 de energía entre el terminal negativo 27 y el terminal positivo 28 del submódulo 21 o puentea el dispositivo de almacenamiento 26 de energía. Sin embargo, cada submódulo 21 (también denominado en la presente memoria «celda inteligente») presenta dos características claras que lo diferencian del submódulo CMM estándar (tal como el submódulo 12 mostrado en la fig. 1b):

1. Existe un controlador autónomo 23 independiente en cada celda inteligente 21.
2. Cada celda inteligente 21 incluye un pequeño inductor de filtrado 24, L_{sc} .

Los controladores autónomos 23 se utilizan para sincronizar los sucesos de conmutación de todos los submódulos 21 en una cadena 25 de celdas inteligentes para minimizar el voltaje de rizado global en la salida, V_{salida} . Cada controlador autónomo 23 también gestiona el estado de carga (EDC) y monitoriza el estado de salud (EDS) de su celda 26 de batería conectada localmente. Esta información se utiliza para aplicar un ciclo de trabajo a los conmutadores Q_L y Q_H , de manera que la celda 26 de batería conectada se descarga en proporción a su capacidad. La descarga de todas las celdas 26 de batería en proporción a sus capacidades respectivas proporciona dos grandes beneficios para la cadena de celdas inteligentes 25.

1. El EDC de todas las celdas 26 de batería en la cadena 25 estará sincronizado.
2. Las celdas 26 de batería más sanas y grandes se cargarán en mayor medida que las celdas 26 de batería más degradadas y pequeñas; de esta manera, el paquete 25 se degradará a una tasa más uniforme.

El voltaje que cruza el inductor de filtrado pequeño, L_{sc} , es utilizado por el controlador local autónomo 23 para determinar las temporizaciones de conmutación óptimas para Q_H y Q_L . Además, mediante el reparto del inductor de filtrado de salida entre todas las celdas inteligentes 21, se reduce la inductancia. En algunas

implementaciones, L_{sc} podría ser suficientemente pequeño para implementarse en la pista de una PCB, reduciendo de esta manera en gran medida el coste y tamaño de este componente. La carga de salida de CC simplemente requiere un condensador de filtrado, C_{salida} , no se requiere ningún inductor adicional externo a las celdas inteligentes 21.

Patrón óptimo de conmutación

Con el fin de minimizar el rizado del voltaje de salida medido en v_{salida} , se determina un patrón óptimo de conmutación de todos los conmutadores Q_H y Q_L . Lo anterior es llevado a cabo por todas las celdas inteligentes 21, minimizando colectivamente el valor eficaz de la corriente alterna del inductor. Para ayudar a resolver este problema, se partirá de unas cuantas premisas respecto al sistema de celdas inteligentes 21.

Problema y premisas

Dado un conjunto de M celdas de batería, $B_i = \{B_1, B_2, \dots, B_M\}$, con capacidades $C_i = \{C_1, C_2, \dots, C_M\}$, el objetivo de los presentes inventores es encontrar un conjunto de fases, $\varphi_i = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_M\}$, para la conexión de cada celda inteligente que minimice la corriente de rizado en el inductor local, L_{sc} , minimizando de esta manera el voltaje de rizado de salida.

En aras de la simplicidad, los voltajes nominales de todas las celdas de batería serán $V_{nom} = V_1 = V_2 = \dots = V_M$, que es una premisa razonable, ya que los EDC de todas las celdas 26 de batería estarán sincronizados. El ciclo de trabajo de cada celda inteligente 21 puede calcularse utilizando la ecuación siguiente:

$$D_i = \frac{C_i}{C_{MAX}} \quad (1)$$

en la que C_{MAX} es la capacidad máxima esperada entre todas las celdas 26 de batería, o idealmente, el valor máximo observado en el conjunto de capacidades de manera que $0 \leq D_i \leq 1$ para todo i . En algunas realizaciones, el diseñador puede introducir C_{MAX} inicialmente durante la construcción del sistema.

En una cadena en serie de celdas inteligentes 25, el voltaje aplicado a cada inductor, L_{sc} , será idéntico. De esta manera, pueden agruparse todos los inductores distribuidos para considerarlos un único inductor, $L = ML_{sc}$. El voltaje que cruza L estará determinado por la suma de todos los voltajes v_i de las celdas inteligentes y el voltaje de corriente continua de salida. El voltaje de corriente continua de salida viene dado por (2):

$$V_{out} = \sum_{i=1}^M D_i V_{nom} = \sum_{i=1}^M \frac{C_i}{C_{MAX}} V_{nom} = \frac{V_{nom}}{C_{MAX}} \sum_{i=1}^M C_i \quad (2)$$

La raíz media cuadrática (rms, por sus siglas en inglés) o valor eficaz de la corriente alterna de rizado del inductor puede expresarse como (3):

$$I_{Lac-rms} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \left[I(s) + \frac{1}{L} \int_s^t (v_{out}(\tau) - V_{out}) d\tau \right]^2 dt} \quad (3)$$

en la que $I(s)$ es la antiderivada de $(v_{salida}(s) - V_{salida})/L$, τ y s son variables ficticias de integración y t es el tiempo. T_s es el periodo de conmutación. La variable $v_{salida}(t)$ se define como (4):

$$v_{salida}(t) = \sum_{i=1}^M v_i(t) \quad (4)$$

en la que $v_i(t)$ es el voltaje de salida de la i -ésima celda inteligente 21 medida entre el terminal negativo 27 de la celda 26 de batería y el terminal de salida 29 de los transistores, tal como se muestra en la fig. 2. Por lo tanto, $v_{salida}(t)$ es el voltaje de salida de una cadena en serie 25 de celdas inteligentes 21.

Determinación de $I_{Lac-rms}$

Con el fin de determinar un conjunto óptimo de ángulos de fase φ_i necesita obtenerse una función que describe la salida de una celda inteligente 21 en términos de φ_i . El voltaje de salida de una celda inteligente 21 generalmente tendrá el aspecto de una onda rectangular periódica, tal como se muestra en la fig. 3. Específicamente, la fig. 3 muestra el voltaje de salida, $d(t)V_{nom}$, de una celda inteligente 21 con fase φ_i , ciclo de trabajo D_i , y periodo de conmutación, T_s .

Utilizando los valores generalizados en la fig. 3, puede derivarse la representación de serie de Fourier del voltaje de salida de cualquier celda inteligente 21, y se muestra en las ecuaciones (5) a (9):

$$v_i(t) = d_i(t)V_{nom} \quad (5)$$

$$d_i(t) = \frac{a_{0i}}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_{ni} \cos\left(\frac{2\pi n t}{T_s}\right) + b_{ni} \sin\left(\frac{2\pi n t}{T_s}\right) \right] \quad (6)$$

en las que:

$$a_{0i} = 2d_i \quad (7)$$

$$a_{ni} = \frac{1}{n\pi} \left(\sin\left(2\pi n \left(D_i + \frac{\phi_i}{T_s}\right)\right) - \sin\left(2\pi n \frac{\phi_i}{T_s}\right) \right) \quad (8)$$

$$b_{ni} = \frac{1}{n\pi} \left(\cos\left(2\pi n \frac{\phi_i}{T_s}\right) - \cos\left(2\pi n \left(D_i + \frac{\phi_i}{T_s}\right)\right) \right) \quad (9)$$

Ahora puede sustituirse (5) en (4) y resolver para:

$$I_{Lac-rms}^2$$

utilizando (3). Puede mostrarse que el resultado es:

$$I_{Lac-rms}^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{V_{nom} T_s}{2\pi L} \right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \frac{4}{\pi^2 n^4} \left[\sin(\pi n D_i) \sin(\pi n D_j) \cos\left(\pi n \left(D_i - D_j + 2 \frac{\phi_i}{T_s} - 2 \frac{\phi_j}{T_s}\right)\right) \right] \quad (10)$$

A continuación, sea $\theta_x = 2\pi\phi_x/T_s$, de manera que pueden medirse los ángulos de conmutación en radianes en lugar de unidades de tiempo:

$$I_{Lac-rms}^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{V_{nom} T_s}{2\pi L} \right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \frac{4}{\pi^2 n^4} \left[\sin(\pi n D_i) \sin(\pi n D_j) \cos\left(\pi n (D_i - D_j) + n(\theta_i - \theta_j)\right) \right] \quad (11)$$

Ahora puede minimizarse la Ecuación (11) para determinar un grupo óptimo θ_i que minimizará el valor eficaz de la corriente alterna en el inductor L_{sc} , y por lo tanto, el rizado del voltaje de salida en V_{salida} .

Simplificando el problema

Al examinar (11), se observa inmediatamente que la resolución para un grupo óptimo θ_i para minimizar $I_{Lac-rms}$ no es trivial y resulta difícil de conseguir sin una potencia de computación considerable e información global sobre el sistema. Por lo tanto, a continuación los presentes inventores proporcionan un modo de identificar un grupo θ_i que rendirá una solución satisfactoria, con requisitos de computación significativamente inferiores, de una manera descentralizada.

En primer lugar, se representa la acción de conmutación de la i -ésima celda inteligente 21 como un vector, v_i , en el círculo unidad tal como se ilustra en la fig. 4. La i -ésima celda inteligente 21 se conectará en θ_i , y se desconectará en $\theta_i + 2\pi D_i$. A continuación, se define un nuevo vector, v'_i , cuya fase sitúa el vector a medio camino entre los tiempos de conexión y desconexión y cuya longitud es $\sin \pi D_i$. De esta manera, v'_i es un vector desfasado y ponderado. Las acciones de conmutación de la i -ésima celda inteligente también se muestran como vectores v_{ip} y v_{in} en la Fig. 4. La fase y longitud de v'_i vienen dadas por:

$$\angle v'_i = \theta'_i = \theta_i + \pi D_i \quad (12)$$

$$|v'_i| = \sin(\pi D_i) \quad (13)$$

A continuación, se aplica la transformación descrita en (12) y (13) a todas las celdas inteligentes 21 y después se suman todos los v'_i , y se calcula el cuadrado de la magnitud del vector suma total, $|v'_\Sigma|^2$:

$$|v'_\Sigma|^2 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sin(\pi D_i) \sin(\pi D_j) \cos(\pi(D_i - D_j) + \theta_i - \theta_j) \quad (14)$$

La Ecuación (14) presenta exactamente la misma forma que (11) con $n=1$ (es decir, solo se considera el componente fundamental). Por lo tanto, un algoritmo de control que rendirá un mínimo bueno aunque subóptimo de (11) es minimizar la magnitud del vector suma total, $|v'_\Sigma|^2$. Este algoritmo se utiliza en el estudio de simulación y configuración experimental, tal como se presenta en los apartados siguientes.

Implementación del algoritmo de control

El cálculo de la magnitud del vector suma total utilizando la fórmula en la Ecuación (14) todavía requiere un conocimiento exacto de los ciclos de trabajo y los desplazamientos de fase de todas las demás celdas inteligentes 21. Para eliminar la comunicación entre celdas inteligentes 21 este enfoque todavía no es ideal. El apartado siguiente se refiere a esta cuestión.

Mediciones de celda inteligente

En primer lugar, se consideran las mediciones que podrá realizar una celda inteligente 21. Mediante la medición del voltaje que cruza su inductor local, cada celda inteligente 21 solo conocerá cuándo se están conectando o desconectando otras celdas inteligentes 21. Estas acciones de conmutación se muestran en la fig. 4 como los vectores v_{ip} y v_{in} .

Utilizando la fig. 4 como referencia, desde el punto de vista de una única celda inteligente 21, considera las acciones de conmutación de la i -ésima celda inteligente 21 como dos transiciones de voltaje correspondientes: una transición de voltaje positiva cruzando el inductor L_{sc} , ilustrada por el vector v_{ip} con ángulo de conmutación θ_{ip} , y su transición de voltaje correspondiente negativa, ilustrada como el vector v_{in} con ángulo de conmutación θ_{in} . Para una celda inteligente 21 que detecte únicamente solo otra celda inteligente 21, el problema es trivial y resulta fácil determinar no sólo cuando está conmutando la otra celda inteligente 21, sino también su ciclo de trabajo.

El reto se plantea cuando empiezan a conmutarse múltiples celdas inteligentes 21. En cuanto una única celda inteligente 21 necesite determinar los ángulos de conmutación y ciclos de trabajo de dos o más otras celdas inteligentes 21, resultará imposible emparejar cada transición «conexión» con su transición correspondiente «desconexión». A continuación, los presentes inventores muestran que lo anterior no resulta necesario para rendir la solución óptima tal como se define en (14).

En primer lugar, se utiliza (15) y (16) para sustituir la totalidad de los D_x y θ_x con la notación de la fig. 4.

$$\theta_i = \theta_{ip} \quad (15)$$

$$\pi D_i = \left(\frac{\theta_{in} - \theta_{ip}}{2} \right) \quad (16)$$

Ello rinde una expresión en términos de cantidades medidas:

$$|v'_\Sigma|^2 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sin\left(\frac{\theta_{in} - \theta_{ip}}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_{jn} - \theta_{jp}}{2}\right) \cos\left(\left(\frac{\theta_{in} + \theta_{ip}}{2}\right) - \left(\frac{\theta_{jn} + \theta_{jp}}{2}\right)\right) \quad (17)$$

La Ecuación (17) proporciona la magnitud del vector total en términos de cantidades medidas por cada celda inteligente 21. Sin embargo, dicha ecuación aparentemente todavía implica que las transiciones de «conexión» deben emparejarse correctamente con cada una de sus transiciones de «desconexión» correspondientes. A continuación, los presentes inventores muestran que este no es el caso, considerando en primer lugar el caso en que solo se

intercambian un grupo de transiciones de «conexión». Por lo tanto, considérese un grupo de M celdas inteligentes 21, en las que las k -ésimas y l -ésimas transiciones positivas se emparejan con las l -ésimas y k -ésimas transiciones negativas, respectivamente. Puede mostrarse que:

$$\begin{aligned}
 |v_{\Sigma}'|^2 = & \sum_{i=1}^M \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq k, i \neq l \\ j \neq k, j \neq l}}^M \left[\sin\left(\frac{\theta_{in} - \theta_{ip}}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_{jn} - \theta_{jp}}{2}\right) \cos\left(\left(\frac{\theta_{in} + \theta_{ip}}{2}\right) - \left(\frac{\theta_{jn} + \theta_{jp}}{2}\right)\right) \right] \\
 & + \sin^2\left(\frac{\theta_{kn} - \theta_{lp}}{2}\right) + \sin\left(\frac{\theta_{ln} - \theta_{kp}}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_{kn} - \theta_{lp}}{2}\right) \cos\left(\left(\frac{\theta_{ln} + \theta_{kp}}{2}\right) - \left(\frac{\theta_{kn} + \theta_{lp}}{2}\right)\right) \\
 & + \sin^2\left(\frac{\theta_{ln} - \theta_{kp}}{2}\right) + \sin\left(\frac{\theta_{kn} - \theta_{lp}}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_{ln} - \theta_{kp}}{2}\right) \cos\left(\left(\frac{\theta_{kn} + \theta_{lp}}{2}\right) - \left(\frac{\theta_{ln} + \theta_{kp}}{2}\right)\right) = \\
 & \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sin\left(\frac{\theta_{in} - \theta_{ip}}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_{jn} - \theta_{jp}}{2}\right) \cos\left(\left(\frac{\theta_{in} + \theta_{ip}}{2}\right) - \left(\frac{\theta_{jn} + \theta_{jp}}{2}\right)\right) \quad (18)
 \end{aligned}$$

Por extensión, puede intercambiarse mutuamente cualquier pareja y cualquier número de transiciones y obtener el mismo resultado. Por lo tanto, con el fin de minimizar el vector suma total de (14), cada celda inteligente 21 solo necesita conocer cuándo *ocurren* las transiciones positivas y negativas para determinar su patrón de conmutación óptimo local. Además, puede mostrarse que estos resultados también son ciertos para todos los armónicos, 1 a n .

Diseño del controlador

Se construyó un modelo de MATLAB-Simulink de una celda inteligente 21 utilizando la teoría expuesta anteriormente, utilizando la caja de herramientas SimPowerSystems. El modelo utiliza el modelo de batería Simscape y MOSFET para simular el circuito de potencia. El controlador 23 se implementó con una función MATLAB incrustada, y se ejecuta una vez por ciclo de conmutación cuando el MOSFET superior, Q_H , está conectado.

La figura 5 ilustra el algoritmo que implementa el controlador 23, como un diagrama de flujo. Las etapas 1 a 8 (indicadas por el número en el círculo en la esquina inferior derecha de cada caja) son las etapas implementadas por la función MATLAB incrustada que proporcionan la fase deseada al generador de modulador de anchura de impulsos (PWM, por sus siglas en inglés) que produce señales de activación para los conmutadores en la etapa 9.

1. Detector de bordes: Detecta la totalidad de las transiciones positivas y negativas que ocurren durante todos los ciclos de conmutación, T_s . El detector de bordes gestiona los casos en que múltiples celdas inteligentes 21 se conectan o desconectan simultáneamente mediante la monitorización de los diferentes niveles de voltaje medidos por v_i .
2. Transformación: Los bordes positivos y negativos se emparejan para formar un grupo de celdas inteligentes 21 detectadas. Se aplica la transformación descrita por (12) y (13).
3. Suma de todos los vectores: Todos los vectores encontrados y transformados se suman tal como se describe en (14).
4. Restar v_0' local: El vector que describe la acción de conmutación de la celda local se resta del vector suma total, rindiendo v_{otros}' .
5. Cálculo de referencia: A fin de minimizar la suma del vector total, se calcula $\angle v_{ref}'$ mediante la simple adición de π a $\angle v_{otros}'$. De esta manera, se minimiza el vector suma total.
6. Cálculo del ángulo: Se calcula el desplazamiento de fase real de la celda inteligente local mediante inversión de la transformada de (12).
7. Aplicar límites: se añade $\pm 2\pi$ a $\angle v_{ref}'$ hasta que se encuentre comprendido entre $-\pi$ y π .
8. Calcular la fase: Finalmente, se calcula la fase que se enviará al generador PWM mediante multiplicación del error de fase ($0 - \angle v_{ref}'$) por el ciclo de trabajo de la celda inteligente local, D_0 , y una ganancia de G_{PhCtrl} . Mediante la multiplicación del error por el ciclo de trabajo, los desplazamientos de fase de celdas inteligentes con diferentes capacidades cambiarán a tasas diferentes, permitiendo que el sistema encuentre un punto de equilibrio.
9. Generador PWM: $\theta_0^{trussvo}$ es utilizado por el generador PWM para producir señales de activación para los MOSFET.

Estudio de simulación

Se llevó a cabo un estudio de simulación de una cadena en serie 25 de tres celdas inteligentes 21. La fig. 2 muestra un esquema del paquete de 3 celdas inteligentes. La Tabla 1 proporciona los parámetros de simulación utilizados.

Tabla 1: parámetros del estudio de simulación de tres celdas inteligentes

Descripción	Parámetro	Valor
Capacidades de las celdas de batería	C_1	0,75 Ah
	C_2	1,20 Ah
	C_3	3,00 Ah
Parámetros de celda inteligente	L_{sc}	100 μH
	f_s	50 kHz
	V_{nom}	4,19 V
Salida	C_{salida}	4,7 μF
	R	23,5 Ω

5 La simulación incluye las tres celdas inteligentes funcionando de manera completamente independiente unas de otras. El controlador de conmutación óptimo se conecta 1,0 ms después de iniciar la simulación. Se preprogramó un valor de $C_{MAX} = 4,00$ Ah en cada celda inteligente.

10 La fig. 6 muestra cómo evolucionan las diferentes características del sistema durante el periodo de la simulación. Al inicio de la simulación, la totalidad de las tres celdas inteligentes se conectan simultáneamente y se desconectan en proporción a su capacidad, lo que produce una corriente de rizado de valor eficaz de la corriente alterna muy elevado en el inductor, tal como se muestra en el gráfico superior. El gráfico inferior muestra cómo la fase de cada celda inteligente varía durante el tiempo y, en consecuencia, cómo se reduce mucho la corriente de rizado en el inductor, tal como se observa en los gráficos insertados. Al inicio de la simulación, $I_{Lac-rms}$ era 34 mA (valor eficaz), y el voltaje de salida pico a pico, $V_{salida-pp}$, era de 64 mV. Tras activar el controlador de conmutación óptimo, el desplazamiento de fase de cada celda inteligente evoluciona gradualmente de manera suave a su valor de estado estable. Al final de la simulación, $I_{Lac-rms}$ y $V_{salida-pp}$ han mejorado considerablemente a 10 mA (valor eficaz) y 11 mV, respectivamente.

Resultados experimentales

20 La teoría desarrollada en el presente trabajo se sometió a ensayo en el laboratorio con un diseño experimental que consistía en tres celdas inteligentes en serie, tal como se muestra en la fig. 2, utilizando los parámetros proporcionados en la Tabla 2. El *hardware* se construyó en torno a una plataforma *mbed* de ARM, en la que cada celda inteligente se implementa con la placa NUCLEO-F401RE y una placa de circuito impreso (PCB) construida al efecto que contenía la etapa de potencia. Se sometieron a ensayo utilizando una fuente de alimentación de laboratorio.

25 Se seleccionó la placa NUCLEO-F401RE por su microcontrolador relativamente potente, el STM32F401RE6, con el fin de centrar la atención en cómo el controlador de celdas inteligentes puede implementarse en hardware. El STM32F401RET6 está basado en la CPU Corte-M4 de 32 bits de ARM y presenta una unidad de coma flotante.

30 La fig. 7 muestra una captura de pantalla de osciloscopio de las tres celdas inteligentes en funcionamiento y que buscan su patrón de conmutación óptimo, aplicando el promedio con 512 muestras. En la fig. 7, el canal 1 (parte superior) es el voltaje que cruza L_{sc} de la primera celda inteligente, con una capacidad C_1 . El canal 2 (parte intermedia) es el rizado del voltaje de salida. El canal 3 (parte inferior) es la corriente en los inductores de celda inteligente.

35 Utilizando los datos del osciloscopio, puede representarse gráficamente la corriente de L_{sc} medida junto con las corrientes de L_{sc} teóricas y simuladas, y ello se muestra en la fig. 8. La corriente de L_{sc} experimental se corresponde muy bien con los valores teóricos y simulados, y se encuentra perfectamente comprendida dentro del error experimental al considerar la variación de la inductancia de cada L_{sc} , que es $\pm 20\%$ para el inductor Vishay Dale IHLP6767GZER101M11 utilizado en estos experimentos.

40 El rizado de voltaje pico a pico de los experimentos se redujo a 24 mV desde 78 mV y el rizado de corriente de L_{sc} pico a pico se redujo a 54 mA desde 102 mA.

Conclusiones

45 La gestión de la energía de las celdas de batería conectadas en serie se ha abordado con un nuevo sistema de gestión de batería descentralizado que se basa en una topología CMM. Cada submódulo 21 de CMM, o celda inteligente, funciona autónomamente dentro de una cadena 25, minimizando el rizado de voltaje de salida y equilibrando las baterías 26. Una celda inteligente 21 contiene un controlador completamente descentralizado 23 y un pequeño inductor, L_{sc} , utilizado para detectar las transiciones en el resto de la cadena 25. Se ha desarrollado un enfoque teórico para minimizar el rizado del voltaje de salida mediante la derivación de una ecuación para el valor eficaz de la corriente alterna de rizado en los inductores de celda inteligente utilizando la descomposición de Fourier, considerando como entradas el ciclo de trabajo y la fase de conmutación de cada celda inteligente 21 y minimizándolos. Este resultado puede aplicarse a los convertidores CMM en general. Con el fin de simplificar el enfoque de manera que pueda aplicarse localmente a un conjunto de controladores 23 de celda inteligente autónomos, también

se ha derivado una solución que rinde resultados óptimos al considerar únicamente el armónico fundamental mediante minimización de la magnitud del vector suma total de todos los voltajes de celda inteligente. Se ha demostrado la teoría en los resultados de simulación y experimentales, en los que un sistema de tres celdas inteligentes 21 fue capaz de encontrar un punto operativo estable y se redujo el rizado del voltaje de salida de 78 mV a 24 mV.

61

REIVINDICACIONES

1. Celda inteligente (21), que comprende:
 - 5 un terminal positivo (28),
 - un terminal negativo (27),
 - un dispositivo de almacenamiento (26) de energía,
 - un circuito de conmutación (22) que está dispuesto para seleccionar un primer estado de conmutación en el que el dispositivo de almacenamiento (26) de energía está conectado entre el terminal positivo (28) y el terminal negativo (27), y un segundo estado de conmutación que puentea dicho dispositivo de almacenamiento (26) de energía, y
 - 10 caracterizada porque se ha proporcionado un inductor (24) entre el terminal positivo (28) y el terminal negativo (27), y en el que dicho inductor (24) está en serie con dicho circuito de conmutación (22) de manera que el inductor está entre el circuito de conmutación y el terminal positivo, o el inductor está entre el circuito de conmutación y el terminal negativo, y
 - 15 caracterizado además porque comprende un controlador (23) dispuesto para monitorizar el voltaje que cruza el inductor (24) y está dispuesto para controlar el circuito de conmutación (22) basándose en el voltaje de dicho inductor.

- 20 2. Celda inteligente (21), que comprende:
 - un terminal positivo (28),
 - un terminal negativo (27),
 - 25 un circuito de conmutación (22), que comprende terminales en los que puede conectarse un dispositivo de almacenamiento de energía separado, en el que el circuito de conmutación (22) está dispuesto para seleccionar entre un primer estado de conmutación en el que dichos terminales del circuito de conmutación (22) están conectados entre el terminal positivo (28) y el terminal negativo (27), y un segundo estado de conmutación que puentea dichos terminales del circuito de conmutación (22), y
 - 30 caracterizada porque se proporciona un inductor (24) entre el terminal positivo (28) y el terminal negativo (27), y en el que dicho inductor (24) está en serie con dicho circuito de conmutación (22) de manera que el inductor está entre el circuito de conmutación y el terminal positivo, o el inductor está entre el circuito de conmutación y el terminal negativo, y
 - 35 caracterizado además porque comprende un controlador (23) dispuesto para monitorizar el voltaje que cruza el inductor (24) y está dispuesto para controlar el circuito de conmutación (22) basándose en el voltaje de dicho inductor.

3. Celda inteligente (21) según se reivindica en cualquier reivindicación anterior, en la que el controlador (23) está dispuesto para ajustar la temporización de conmutación del circuito de conmutación (22) basándose en el voltaje de dicho inductor.

- 40 4. Celda inteligente (21) según se reivindica en cualquier reivindicación anterior, en el que el controlador (23) está dispuesto para determinar, basándose en el voltaje de dicho inductor, una temporización deseada para el circuito de conmutación (22) que minimiza el impacto sobre el rizado de voltaje y está dispuesto para ajustar la temporización para el circuito de conmutación (22) hacia la temporización deseada.

- 45 5. Celda inteligente (21) según se reivindica en la reivindicación 4, en la que el controlador (23) está dispuesto para ajustar la temporización a una tasa proporcional al ciclo de trabajo del circuito de conmutación (22).

- 50 6. Celda inteligente (21), según se reivindica en cualquier reivindicación anterior, en la que el controlador (23) está dispuesto para:
 - detectar cambios de corriente dentro del sistema,
 - analizar dichos cambios para determinar los tiempos de conmutación de otras celdas,
 - 55 calcular las temporizaciones de conmutación deseadas para la celda inteligente (21) basándose en dichos cambios de corriente, y
 - ajustar las temporizaciones de conmutación de la celda inteligente (21) mediante el ajuste de sus temporizaciones hacia las temporizaciones de conmutación deseadas.

- 60 7. Celda inteligente (21) según se reivindica en la reivindicación 6, en la que para analizar dichos cambios, dicho controlador (23) está dispuesto para realizar la detección de bordes en la corriente detectada en el sistema a fin de detectar tiempos de conmutación de otras celdas.

- 65 8. Celda inteligente (21) según se reivindica en la reivindicación 7, en la que para analizar dichos cambios, dicho controlador (23) está dispuesto para combinar dichos tiempos de conmutación en parejas de un tiempo de conmutación de conexión y un tiempo de conmutación de desconexión.

- 5
9. Celda inteligente según se reivindica en la reivindicación 8, en la que dicho controlador (23) está dispuesto además para:
formar vectores a partir de dichas parejas, en donde cada vector está definido por un ángulo que se determina mediante el cálculo de la media del tiempo de conmutación de conexión y el tiempo de conmutación de desconexión respecto al periodo de conmutación de la celda inteligente y una magnitud igual al seno de la diferencia entre el tiempo de conmutación de conexión y el tiempo de conmutación de desconexión.
- 10
10. Celda inteligente (21) según se reivindica en la reivindicación 9, en la que dicho controlador (23) está dispuesto para minimizar la magnitud del vector suma de la totalidad de dichos vectores.
- 15
11. Celda inteligente (21) según se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones 3 a 10, en la que el controlador (23) está dispuesto para ajustar las temporizaciones de conmutación mediante el ajuste del periodo de conmutación de la celda inteligente (21).
- 20
12. Celda inteligente (21) según se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones 3 a 11, en la que el controlador (23) está dispuesto para ajustar las temporizaciones de conmutación mediante el ajuste de las temporizaciones a una tasa proporcional al ciclo de trabajo de la celda inteligente (21).
- 25
13. Celda inteligente (21), según se reivindica en cualquier reivindicación anterior, en la que el inductor (24) está formado como una pista de PCB.
- 30
14. Sistema de celdas inteligentes (21) que comprende una pluralidad de celdas inteligentes según cualquier reivindicación anterior, en el que dichas celdas están conectadas en serie.
- 35
15. Método de control de una celda inteligente (21) según se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la celda inteligente (21) se encuentra dentro de un sistema multicelda (25), en el que el método comprende:
detectar cambios de corriente dentro del sistema utilizando el inductor (24) dentro de la celda inteligente (21) mediante la medición del voltaje que cruza el inductor (24),
analizar dichos cambios para determinar los tiempos de conmutación de otras celdas (21),
calcular las temporizaciones de conmutación deseadas para la celda inteligente (21) basándose en dichos cambios de corriente,
ajustar las temporizaciones de conmutación de la celda inteligente (21) mediante el ajuste de sus temporizaciones hacia las temporizaciones de conmutación deseadas.

Fig. 1a

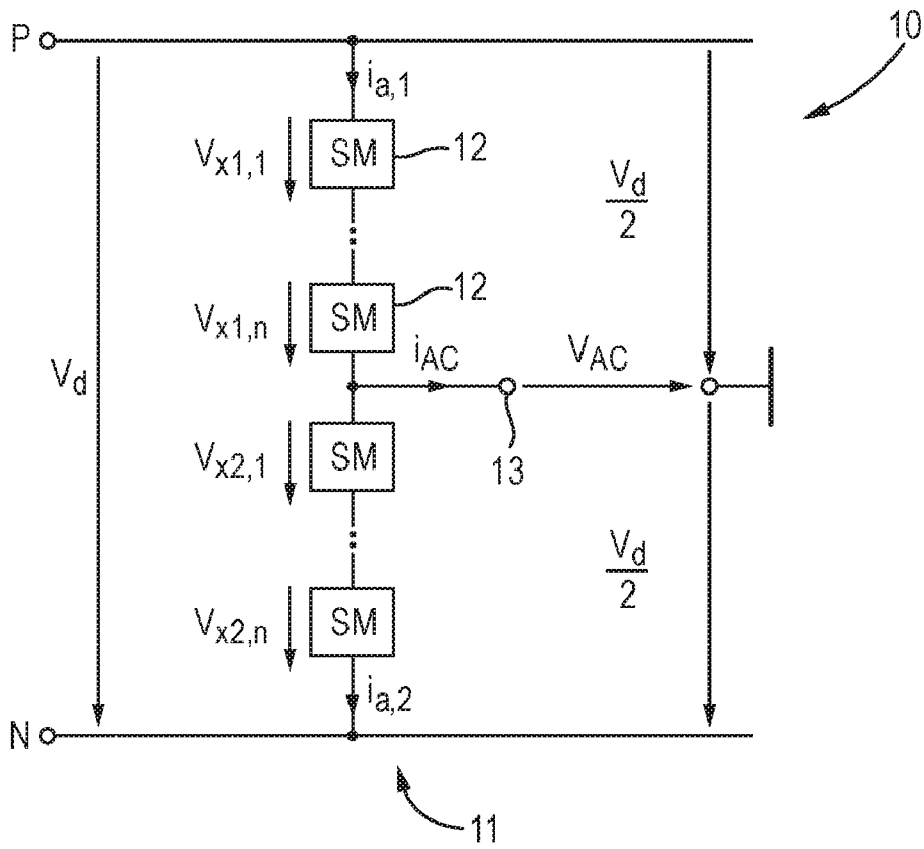


Fig. 1b

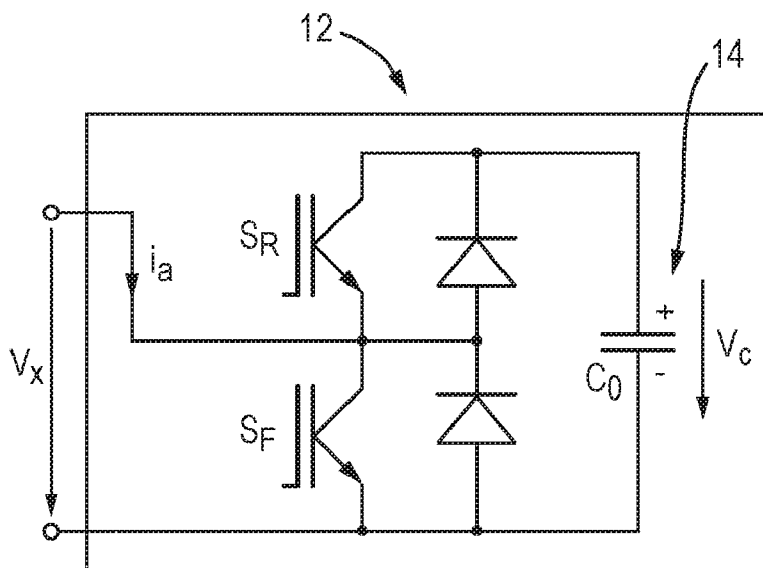


Fig. 2

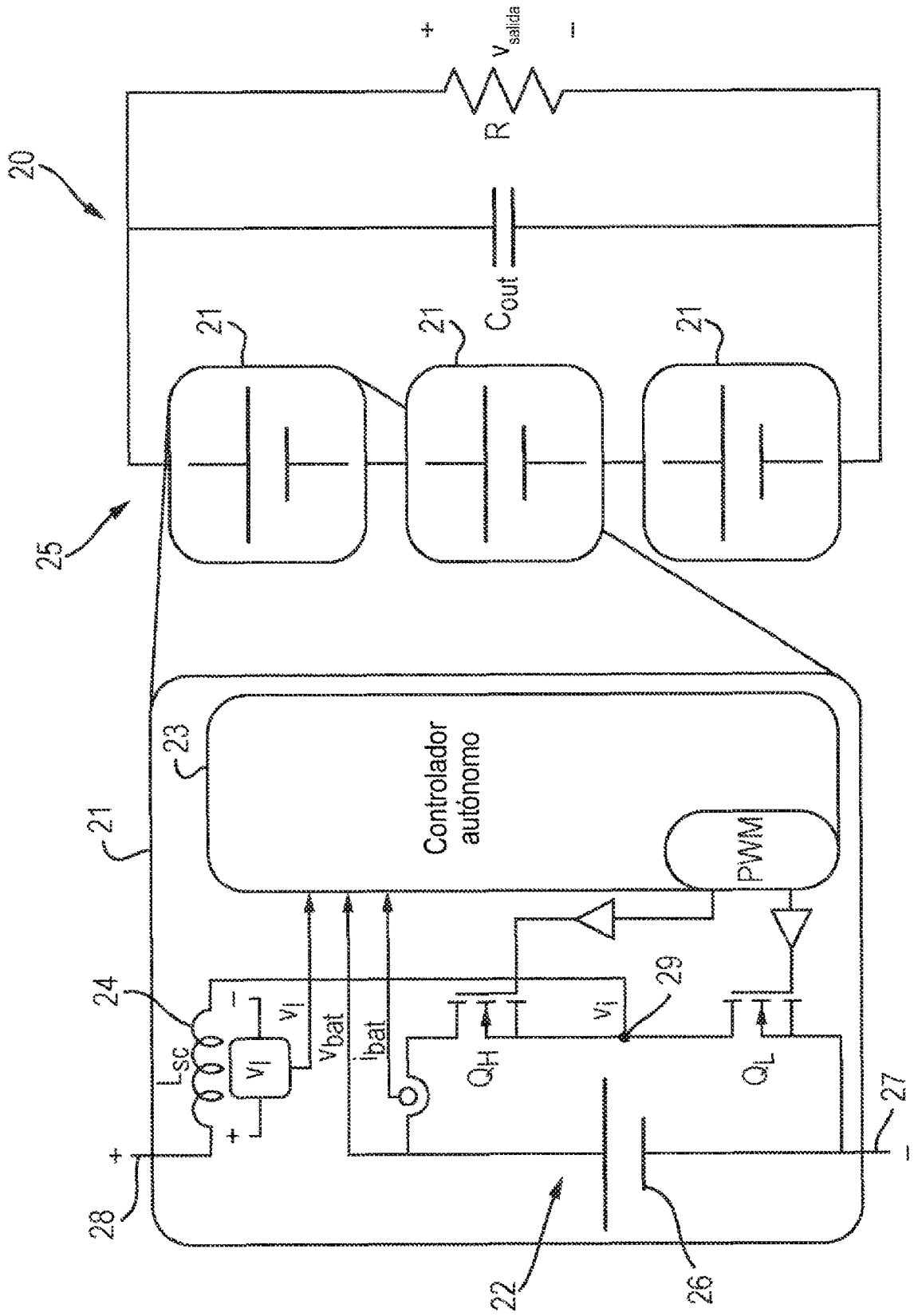


Fig. 3

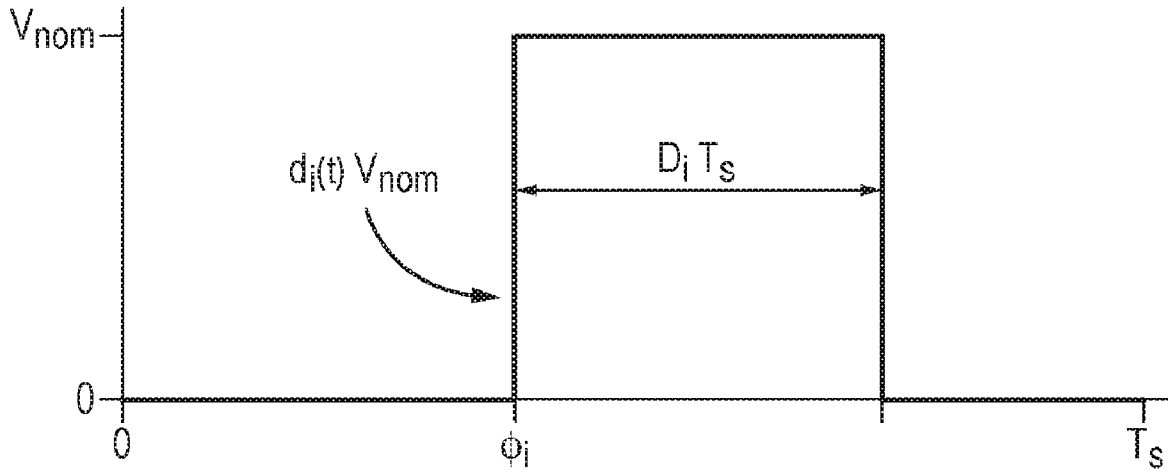


Fig. 4

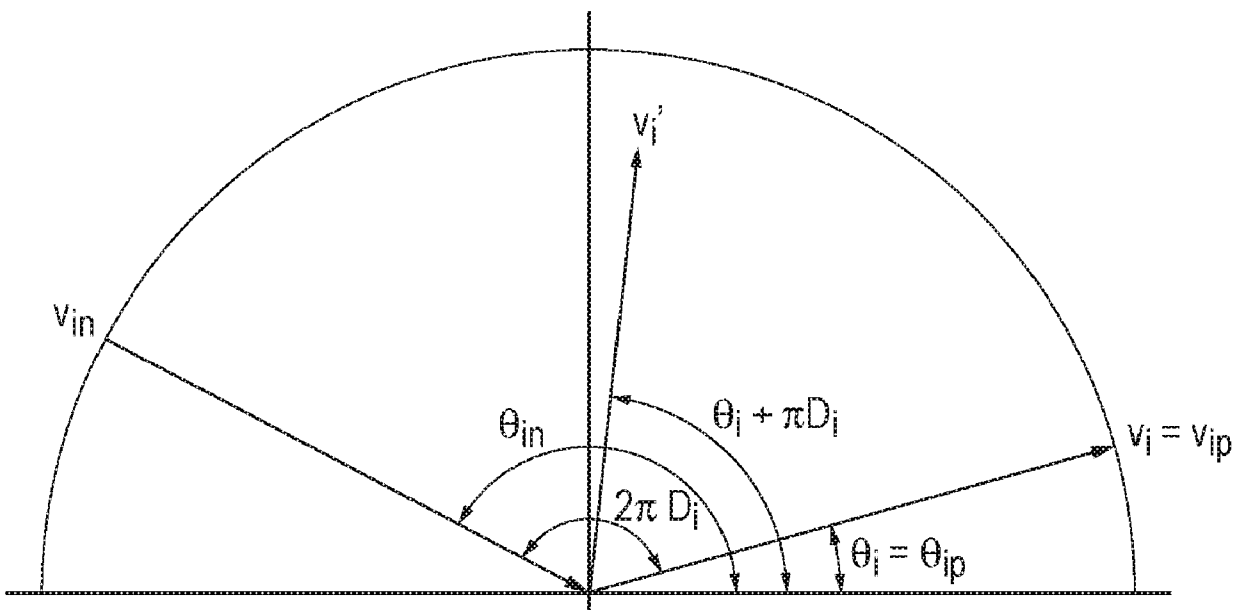


Fig. 5

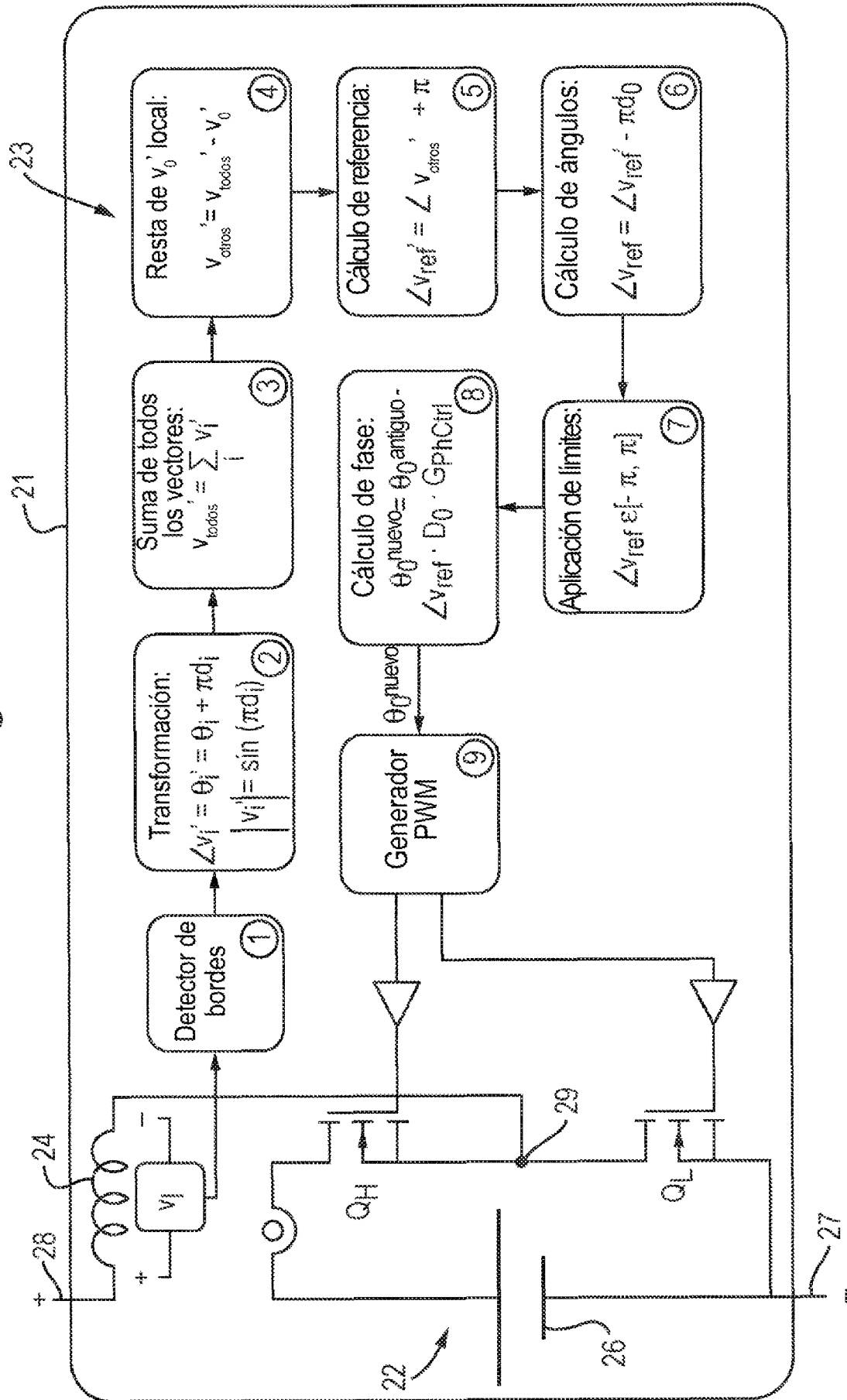


Fig. 6

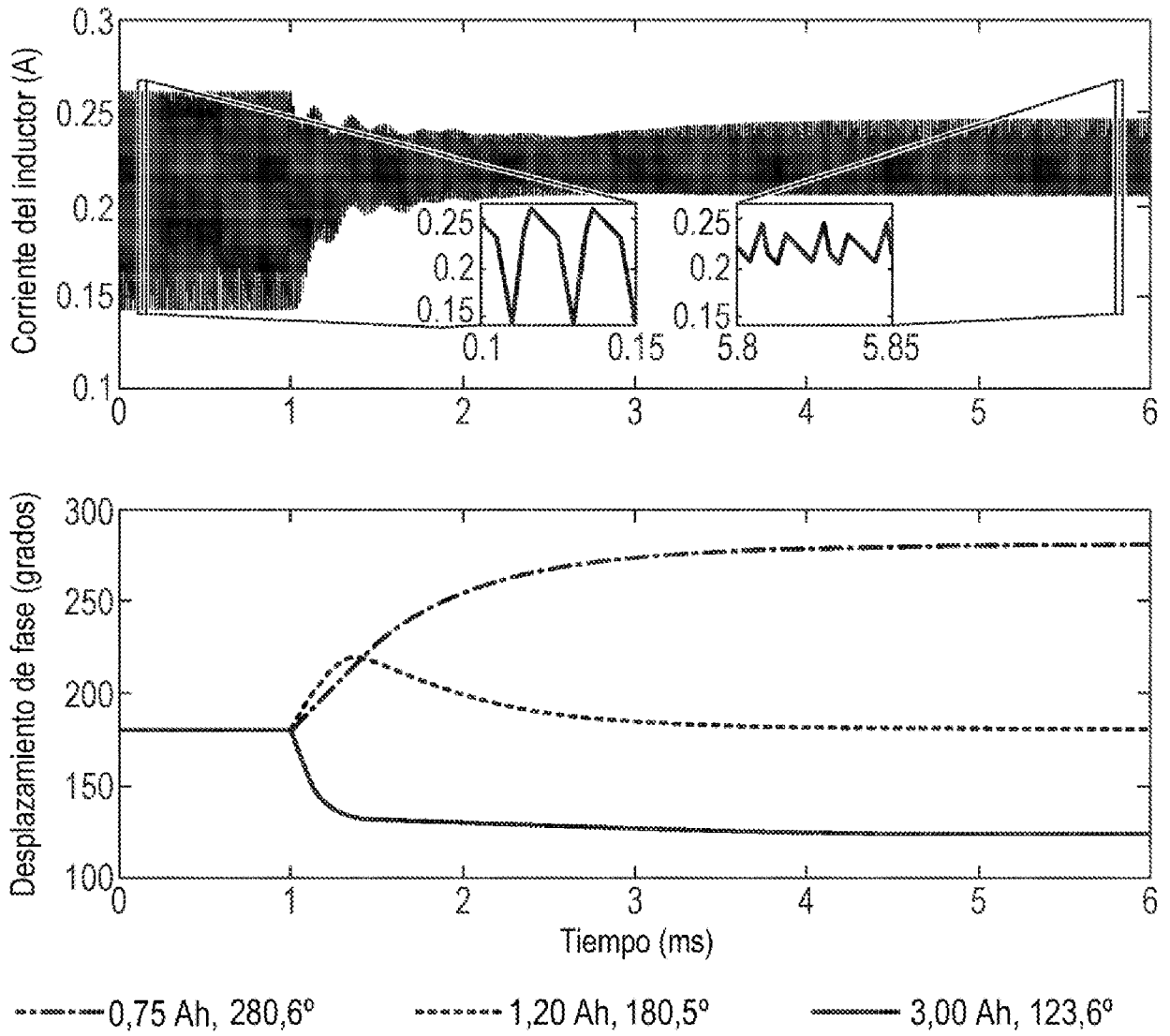


Fig. 7

MSO-X 4024A, MY53110104: Sáb., 23 de mayo 13:52 15 2015

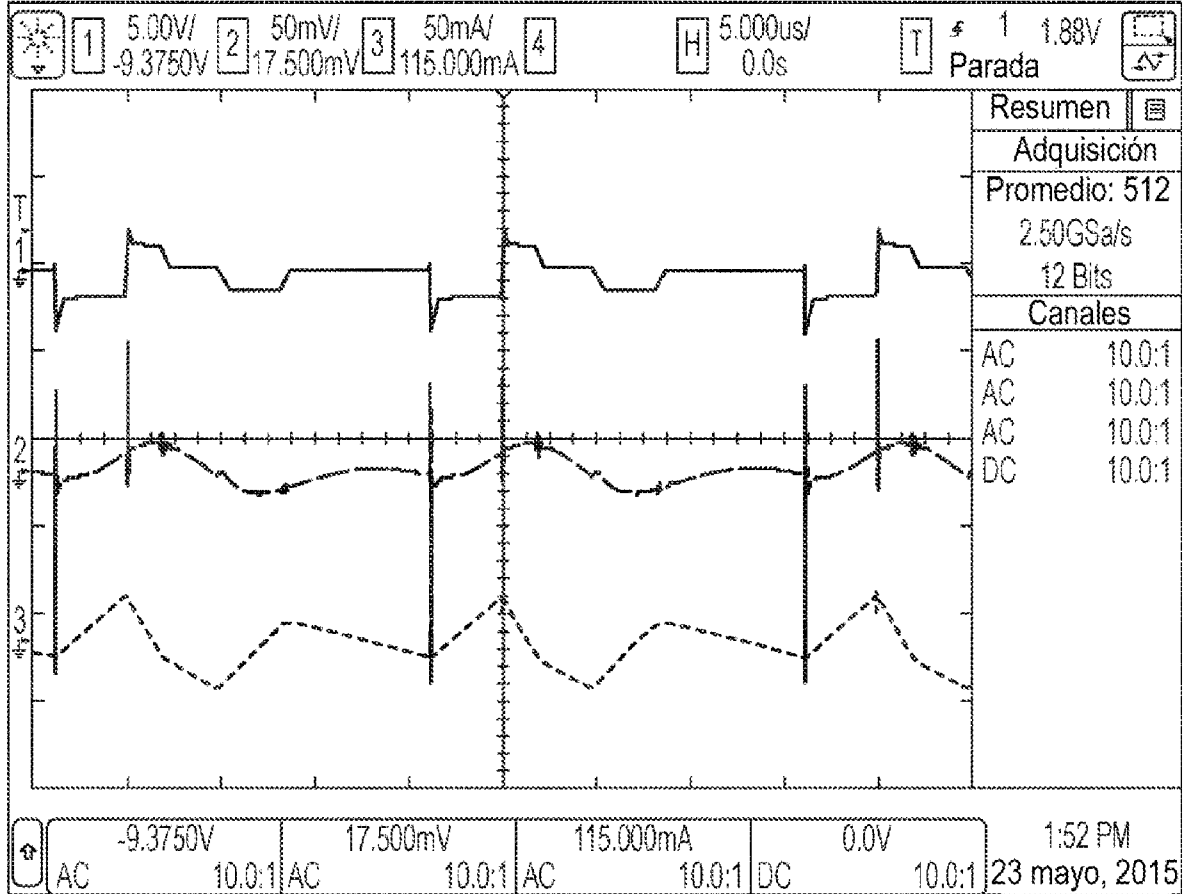


Fig. 8

