



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS  
ESPAÑA



⑪ Número de publicación: **3 019 397**

⑮ Int. Cl.:  
**H02P 29/68**  
(2006.01)

⑫

## TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

⑥ Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **03.12.2020 PCT/EP2020/084478**

⑦ Fecha y número de publicación internacional: **24.06.2021 WO21122037**

⑨ Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.12.2020 E 20824136 (4)**

⑩ Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.02.2025 EP 4046269**

---

④ Título: **Método de protección de un convertidor de una turbina eólica y sistema de protección**

⑩ Prioridad:

**18.12.2019 EP 19380036**

⑤ Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

**20.05.2025**

⑦ Titular/es:

**SIEMENS GAMESA RENEWABLE ENERGY  
INNOVATION & TECHNOLOGY S.L. (100.00%)  
Avenida de la Innovación 9-11  
31621 Sarriguren (Navarra), ES**

⑦ Inventor/es:

**BERMEJO HERNANDEZ, VICTOR;  
VAZQUEZ-PRADA SIMON, FERNANDO y  
AGUDO ARAQUE, ANDRES**

⑦ Agente/Representante:

**DEL VALLE VALIENTE, Sonia**

**ES 3 019 397 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

Método de protección de un convertidor de una turbina eólica y sistema de protección

5 **Campo de la invención**

La presente invención se refiere a un método de protección de un convertidor de una turbina eólica, en donde el convertidor está acoplado a un generador de la turbina eólica para realizar la conversión de la potencia eléctrica producida por el generador, y a un sistema de protección. La invención se refiere además a un programa informático 10 respectivo para proporcionar protección a un convertidor de una turbina eólica.

**Antecedentes**

15 Las turbinas eólicas de velocidad variable comprenden un generador que convierte la potencia mecánica proporcionada por el vástago giratorio de la turbina eólica en potencia eléctrica, cuya frecuencia se ajusta a la frecuencia de la red por medio de un convertidor de potencia (abreviado en la presente memoria como "convertidor"). Por ejemplo, las turbinas eólicas se pueden equipar con un generador de inducción de doble alimentación (DFIG). El estator de dicho DFIG está conectado a la red sin ningún convertidor de frecuencia intermedio (generalmente está acoplado a la red a través de un transformador), mientras que el rotor del DFIG está conectado a la red a través del 20 convertidor de potencia. Esta configuración tiene varias ventajas. El convertidor de potencia sólo debe gestionar una fracción de la potencia eléctrica producida, lo que reduce su tamaño y sus costes. También, el propio generador es generalmente más rentable que un generador de imanes permanentes (PMG) usado en una topología de convertidor completa en la que el convertidor de potencia gestiona la potencia activa total generada por la turbina eólica y, por lo tanto, actúa como una interfaz entre el generador y la red. Por otro lado, en la configuración DFIG, el estator del 25 generador está conectado a la red y, por lo tanto, experimenta cualquier transitorio presente en la red, en particular, los transitorios que resultan de fallos en la red. Tales transitorios pueden provocar grandes sobrecorrientes en el generador y, en particular, como consecuencia del comportamiento inductivo del generador, pueden dañar el convertidor de potencia acoplado al rotor del generador. En las topologías de convertidores completas, estos transitorios solo se experimentan en el lado de la red del convertidor de potencia, pero no se transmiten al generador.

30 Los transitorios de la red pueden provocar sobrecorrientes dentro del convertidor de potencia que pueden dañar los componentes del convertidor de potencia, en particular los componentes semiconductores, como los commutadores semiconductores proporcionados para la rectificación e inversión de la potencia eléctrica. Para evitar dañar los componentes semiconductores, pueden equiparse con un sensor de temperatura interno para medir la temperatura de unión del componente semiconductor. Sin embargo, la temperatura de unión medida solo es válida para un 35 funcionamiento estacionario, ya que la medición de temperatura tiene un tiempo de respuesta relativamente lento. En consecuencia, cuando se produce un transitorio fuerte en la red, la sobrecorriente resultante puede provocar un aumento significativo de la temperatura de unión que pasa desapercibido y puede provocar la destrucción del componente semiconductor. Por lo tanto, el convertidor de potencia puede dañarse y es posible que haya que el 40 funcionamiento de la turbina eólica. El documento WO 2019/120404 A1 hace uso de una funcionalidad de un gestor de capacidad térmica para monitorizar la temperatura de los componentes de una planta de potencia eólica.

45 Las estrategias de protección efectivas son difíciles de implementar en tales situaciones, dado que las corrientes del rotor del convertidor pueden superar significativamente el rango operativo de los sensores de corriente. El rango operativo de los sensores de corriente no se puede extender indefinidamente, debido a la pérdida de precisión de la medición en condiciones estacionarias, que es necesaria para conseguir un buen rendimiento de control del convertidor. Como las corrientes del rotor del convertidor pueden superar las corrientes nominales de los 50 semiconductores y los rangos operativos del sensor de corriente durante varios milisegundos durante un transitorio, las mediciones de corriente respectivas generalmente no son adecuadas para implementar una estrategia de protección eficiente para proteger los semiconductores de una sobrecarga.

55 Asimismo, en los sistemas DFIG generalmente es deseable aumentar la potencia producida, lo que resulta en un aumento de las corrientes del convertidor y del generador. Esta tendencia hace que los problemas expuestos anteriormente sean aún más prominentes. Por lo tanto, es deseable diseñar una estrategia de protección mejorada para proteger un convertidor de una turbina eólica de este tipo. En particular, es deseable evitar que los componentes semiconductores de un convertidor de este tipo se dañen debido a los transitorios que se producen en la red eléctrica, en particular, en una configuración DFIG. También es deseable que, cuando se proporciona una protección tan eficiente, la potencia de salida de la turbina eólica aún se pueda mantener a un nivel relativamente alto.

60 **Resumen**

En consecuencia, existe la necesidad de mitigar al menos algunos de los inconvenientes mencionados anteriormente. En particular, existe la necesidad de mejorar la protección de un convertidor contra sobrecorrientes provocadas por los transitorios que se producen en la red eléctrica.

Esta necesidad se satisface por las funciones de las reivindicaciones independientes. Las reivindicaciones dependientes describen realizaciones preferidas de la invención.

- 5 Según una realización de la invención, se proporciona un método de protección de un convertidor de una turbina eólica. El convertidor está acoplado a un generador de la turbina eólica para realizar una conversión de la potencia eléctrica producida por el generador. El convertidor comprende una pluralidad de componentes semiconductores que están operativos para proporcionar la conversión de la potencia eléctrica. El método comprende realizar un paso (iteración) de estimación de la temperatura de unión de al menos uno de los componentes semiconductores. El paso de estimación se realiza determinando una corriente en el convertidor que está asociada con la pérdida de potencia en uno o más de los diversos componentes semiconductores; estimando la pérdida de potencia asociada con uno o más componentes semiconductores basándose en la corriente determinada y en el estado de uno o más componentes semiconductores; y usando un modelo térmico del uno o más componentes semiconductores para estimar la temperatura de unión de al menos uno del uno o más componentes semiconductores basándose en la pérdida de potencia estimada. El paso (iteración) de estimación de la temperatura de unión se lleva a cabo repetidamente. Un período de tiempo correspondiente a un tamaño de paso entre los pasos posteriores de estimación de la temperatura de unión es inferior a 1/10 del período de un voltaje de CA emitido por el convertidor. El método comprende además activar un mecanismo de protección que está configurado para reducir la temperatura de unión del al menos un componente semiconductor si la temperatura de unión estimada supera un umbral de temperatura predeterminado.
- 10
- 15
- 20 Por medio de tal método, la temperatura de unión puede estimarse significativamente más rápidamente que lo que se puede conseguir con sensores de temperatura convencionales. Básicamente, puede estimarse en tiempo real. Además, debido al pequeño tamaño del paso del paso de estimación, las corrientes alternas pueden considerarse constantes durante el período de tiempo correspondiente al tamaño del paso, lo que facilita significativamente la estimación de la temperatura de unión. De este modo, es posible una estimación en tiempo real de la temperatura de unión de uno o más componentes semiconductores del convertidor de la turbina eólica.
- 25
- 30 La pérdida de potencia asociada con el uno o más componentes semiconductores generalmente se refiere a la disipación de potencia en el componente semiconductor respectivo, es decir, a las pérdidas de conducción y las pérdidas de conmutación que se producen en el componente semiconductor. Consecuentemente, el estado del uno o más componentes semiconductores se refiere al estado de conmutación, es decir, puede indicar la presencia de un estado apagado (estado de bloqueo) durante un período de tiempo determinado, la presencia de un estado encendido (estado de conducción) durante un período de tiempo determinado, una conmutación del estado encendido a un estado apagado, una conmutación de un estado apagado a un estado encendido o cualquier combinación de los mismos, como se produce generalmente cuando se opera un convertidor respectivo que tiene componentes electrónicos de potencia para proporcionar una rectificación o inversión controlada de la potencia eléctrica.
- 35
- 40 El uno o más componentes semiconductores pueden formar parte de una etapa de conversión del lado del generador del convertidor que, en particular, puede estar conectada a un rotor del generador. Se puede estimar la temperatura de unión para cada uno de los componentes semiconductores de la etapa de conversión del lado del rotor.
- 45 Preferiblemente, el convertidor es un convertidor trifásico y el generador es un generador de inducción de doble alimentación (DFIG). La entrada del convertidor puede estar conectada a un rotor del generador de inducción de doble alimentación.
- 50
- 55 Preferiblemente, la determinación de una corriente en el convertidor comprende la determinación de una corriente de funcionamiento en el convertidor que es indicativa de la corriente a través del al menos un componente semiconductor. La corriente de funcionamiento del convertidor se puede medir si la corriente de funcionamiento se encuentra dentro de un rango de trabajo de un sensor de corriente respectivo y la corriente de funcionamiento se puede estimar basándose en los parámetros funcionales del convertidor si la corriente de funcionamiento se encuentra fuera del rango de trabajo del sensor de corriente. En particular, para un convertidor trifásico, se puede proporcionar un sensor de corriente respectivo para cada fase del convertidor, en particular para cada fase de una etapa de conversión del lado del generador del convertidor que está conectada a un rotor del generador. Por lo tanto, la corriente (corriente del rotor) se puede medir para una fase respectiva en la entrada del lado del generador del convertidor. La entrada para la fase respectiva puede conectarse a continuación, a un tramo de conversión respectivo de la etapa de conversión del lado del generador en cada uno de los cuales se conectan uno o más de los componentes semiconductores. Por lo tanto, la corriente de funcionamiento puede ser (sustancialmente) igual a la corriente a través del componente semiconductor respectivo.
- 60 Mediante tal configuración, se puede garantizar que la corriente de funcionamiento para estimar la temperatura de unión del componente semiconductor esté disponible incluso aunque la corriente de funcionamiento pueda estar fuera del rango del sensor de corriente respectivo. En consecuencia, si se produce un transitorio en la red eléctrica, que tenga como resultado una sobrecorriente en el rotor del generador, aún se puede obtener la corriente respectiva que experimenta el convertidor de potencia (aunque el sensor esté fuera de rango). También en tales situaciones, es posible una estimación fiable de la temperatura de unión del componente semiconductor y se puede activar un mecanismo de protección respectivo.
- 65

En una realización, el convertidor es un convertidor trifásico que tiene una etapa de conversión del lado de la red (que generalmente funciona como un inversor) y una etapa de conversión del lado del generador (que generalmente funciona como un rectificador). Si la corriente de funcionamiento para una fase de la etapa de conversión del lado del generador se encuentra fuera del rango de trabajo del sensor de corriente respectivo, la corriente de funcionamiento se estima a partir de la corriente de funcionamiento que se mide para cada una de las otras dos fases de la etapa de conversión del lado del generador, es decir, los parámetros funcionales del convertidor a partir de los cuales se estima la corriente que se encuentra fuera del rango del sensor incluyen las corrientes de funcionamiento medidas para las otras dos fases.

- 5 Si las corrientes de funcionamiento para dos fases de la etapa de conversión del lado del generador se encuentran fuera del rango de trabajo de los sensores de corriente respectivos, entonces la corriente de funcionamiento para al menos una de estas dos fases se estima basándose en la corriente en un enlace de CC del convertidor, en particular basándose en un balance de corriente en el enlace de CC del convertidor. En particular, se pueden considerar las corrientes que fluyen hacia dentro y hacia fuera en el enlace DC para estimar la corriente de funcionamiento para una de las dos fases. Preferiblemente, la mayor de las dos corrientes desconocidas se estima basándose en el balance de corriente en el enlace CC. La estimación puede basarse en la ley de Kirchhoff. Por ejemplo, si la mayor corriente desconocida está fluyendo hacia dentro de un nodo del enlace de CC, todas las corrientes que fluyen hacia fuera de ese nodo del enlace de CC se pueden usar para estimar la mayor corriente desconocida, lo que puede implicar mediciones de voltaje y corriente de red respectivas, así como mediciones de voltaje de enlace de CC.

- 10 En particular, si las corrientes de funcionamiento para dos fases de la etapa de conversión del lado del generador se encuentran fuera del rango de trabajo de los sensores de corriente respectivos, la corriente de funcionamiento puede estimarse para la fase en la que la corriente de funcionamiento es la mayor de las tres fases. Esto se puede saber, por ejemplo, por el sentido de la corriente que está dentro del rango del sensor de corriente respectivo, en donde la mayor corriente es la corriente que tiene el signo opuesto. La estimación de la mayor corriente de funcionamiento basándose en una corriente en el enlace de CC del convertidor puede incluir, determinar una corriente hacia un condensador de enlace de CC del enlace de CC, determinar una corriente hacia la etapa de conversión del lado de la red y, posiblemente, si está presente, determinar una corriente a través de una etapa de troceo del convertidor. Debe quedar claro que la estimación respectiva se puede hacer para cualquier sentido del flujo de corriente, es decir, hacia dentro o fuera de la entrada respectiva del convertidor para la fase respectiva.

- 15 Los parámetros funcionales del convertidor para determinar dicha mayor corriente de funcionamiento pueden incluir el voltaje de enlace de CC, un valor de capacitancia del condensador de enlace de CC, una resistencia de troceo de la etapa de corte, un estado de encendido/apagado de la etapa de troceo; así como el voltaje y la corriente en el lado de la red del convertidor, por ejemplo, en la salida del convertidor conectada a la red eléctrica. Por ejemplo, la corriente hacia el condensador de enlace de CC se puede determinar basándose en un valor de capacitancia fijo y una medición continua del voltaje de enlace de CC. La corriente se puede determinar proporcionalmente al cambio de voltaje y a la capacitancia. La corriente a través de la etapa de troceo se puede determinar a partir de las mediciones de voltaje de enlace de CC, el estado de encendido/apagado del troceador y un valor de la resistencia de troceo. La corriente hacia la etapa de conversión del lado de la red del convertidor se puede determinar a partir de la potencia de red activa, en particular a partir de las mediciones de voltaje y corriente en la salida de la etapa de conversión del lado de la red.

- 20 Basándose en los parámetros funcionales del convertidor mencionados anteriormente, se hace posible, por lo tanto, determinar de manera eficiente y fiable la mayor corriente en la entrada a la etapa de conversión del lado de la red, aunque pueda superar significativamente el rango operativo del sensor de corriente. Como la corriente respectiva es la corriente más importante en vista del aumento de la temperatura de unión de los componentes semiconductores, su determinación permite una protección eficiente de los componentes semiconductores respectivos mediante la estimación de la temperatura de unión como se ha expuesto anteriormente y más adelante. A partir de la corriente medida para una fase y la mayor corriente determinada para una segunda fase, se puede obtener la corriente presente en la tercera fase, que también está fuera de rango. La tercera corriente se puede obtener a partir de un balance de corriente simple, ya que las tres fases del rotor generalmente están conectadas en triángulo. A este respecto, cabe señalar que generalmente no se produce una situación en la que las corrientes de las tres fases al completo estén fuera del rango del sensor. En primer lugar, el rango del sensor de corriente se extiende hasta valores significativos, tales como 5.000 amperios o 7.000 amperios, de modo que para que las tres corrientes al completo estén fuera del rango, la mayor corriente tendría que superar los 14.000 amperios. En tal situación, generalmente se activarán otros mecanismos de protección.

- 25 En una realización, el tamaño del paso entre los pasos posteriores de estimación de la temperatura de unión corresponde a un período de tiempo inferior a 2 ms (milisegundos) o 1 ms, preferiblemente inferior a 500  $\mu$ s (microsegundos), más preferiblemente, inferior a 200  $\mu$ s. Por ejemplo, el período de tiempo puede estar en un intervalo entre 20 y 200  $\mu$ s, en particular entre 50 y 150  $\mu$ s. Por ejemplo, el período de tiempo puede ser de aproximadamente 100  $\mu$ s, tal como 80, 90, 100, 110 o 120  $\mu$ s. Al usar tal período de tiempo como el tamaño del paso, se hace posible una estimación en tiempo real de la temperatura de unión. Además, como se ha expuesto anteriormente, las corrientes de CA pueden considerarse constantes a lo largo de tales períodos de tiempo, lo que simplifica la estimación de la temperatura de unión.

La pérdida de potencia asociada con el componente semiconductor puede depender de la temperatura de unión del componente semiconductor. Cuando se estima la pérdida de potencia asociada con el uno o más componentes semiconductores, se puede emplear una temperatura de unión determinada en un paso anterior de estimación de la temperatura de unión.

- 5 En general, la estimación de la temperatura de unión se puede realizar de forma iterativa, y la temperatura de unión estimada en un paso de estimación anterior se puede emplear en el paso de estimación actual. La estimación se puede inicializar usando una temperatura ambiente como valor inicial de la temperatura de unión, o usando un valor de temperatura de funcionamiento promedio predeterminado (por ejemplo, 25 °C) o típico. Cuando se opera en 10 condiciones normales, la estimación de la temperatura de unión convergerá en un corto período de tiempo y proporcionará a partir de entonces una estimación en tiempo real de la temperatura de unión de uno o más componentes semiconductores.
- 15 La estimación de la pérdida de potencia asociada con el uno o más componentes semiconductores puede comprender determinar uno o más estados de funcionamiento del uno o más componentes semiconductores durante el período de tiempo, y determinar la pérdida de potencia a partir de la pérdida de potencia asociada con cada uno del uno o más estados de funcionamiento del uno o más componentes semiconductores durante el período de tiempo. Por ejemplo, 20 un conmutador semiconductor, tal como un IGBT, puede tener pérdidas de conmutación cuando se enciende y se apaga el conmutador semiconductor, y puede tener más pérdidas de conducción cuando el conmutador semiconductor está en estado encendido y conduciendo corriente. Las pérdidas por bloqueo son generalmente bajas y, por lo tanto, no es necesario considerarlas. Un diodo puede tener, por ejemplo, un estado de conducción y un estado de bloqueo y, de nuevo, las pérdidas de bloqueo son relativamente bajas y no es necesario considerarlas.
- 25 Al considerar los estados semiconductores, y en particular las pérdidas de conmutación y las pérdidas de conducción, de conformidad con el ciclo de trabajo, se puede obtener una estimación precisa de las pérdidas de potencia asociadas con el uno o más componentes semiconductores. Las pérdidas de conmutación y las pérdidas de conducción se pueden estimar con precisión. La estimación se puede realizar individualmente para cada componente semiconductor (basándose en los estados de funcionamiento individuales y la corriente durante el período de tiempo), o se puede hacer una estimación global de la pérdida de potencia total asociada con todos los componentes semiconductores. 30 Tal estimación se puede realizar empleando la corriente para cada tramo de fase de la etapa de conversión respectiva, por ejemplo, considerando por separado las corrientes en los tres tramos, uno para cada fase, de la etapa de conversión del lado del rotor.
- 35 Para facilitar la determinación, solo se puede considerar la mayor corriente, y la estimación se puede hacer solo en función de la mayor corriente, por ejemplo, para el tramo de fase respectivo de la etapa de conversión, o para todos los tramos de fase de la etapa de conversión. Por lo tanto, se puede conseguir una simplificación de la estimación de las pérdidas de potencia, reduciendo así el esfuerzo computacional requerido para una determinación en tiempo real de la temperatura de unión. Por ejemplo, las pérdidas de potencia pueden estimarse independientemente para la etapa 40 de conversión del lado del rotor del convertidor. Una estimación global de las pérdidas de conmutación para la etapa de conversión del lado del rotor se puede basar en el número de componentes semiconductores, el número de eventos de conmutación (conexión y desconexión de todos los dispositivos), el voltaje del enlace de CC y la entrada de la mayor corriente en la etapa de conversión del lado del rotor. La pérdida de conmutación respectiva determinada como un valor total para todos los componentes semiconductores puede asignarse entonces a cada componente semiconductor (es decir, la fracción respectiva de la pérdida de conmutación total). Por lo tanto, se puede conseguir 45 un método simple y eficiente para estimar las pérdidas de conmutación.
- 50 Similarmente, para las pérdidas de conducción, las pérdidas de conducción totales para la etapa de conversión del lado del rotor pueden determinarse basándose en la entrada de la mayor corriente en la etapa de conversión del lado del rotor (que, como se ha mencionado anteriormente, puede ser una corriente que fluye hacia dentro o que fluye hacia fuera). Las pérdidas de conducción pueden entonces asignarse de nuevo a cada componente semiconductor.
- 55 Sin embargo, es preferible que, para cada componente semiconductor, la corriente individual que lo atraviesa y su estado de conmutación se consideren individualmente y por separado de los demás componentes semiconductores, de modo que las pérdidas de conmutación y las pérdidas de potencia para cada componente semiconductor puedan determinarse con mucha precisión.
- 60 En una realización, el al menos un componente semiconductor comprende o es un conmutador semiconductor, en particular, un transistor bipolar de puerta aislada (IGBT), en donde las pérdidas de potencia incluyen al menos pérdidas de conmutación y pérdidas de conducción del conmutador semiconductor durante el período de tiempo. La temperatura de unión también se puede determinar para un diodo o para cada uno de la pluralidad de componentes semiconductores, incluyendo tanto los conmutadores semiconductores como los diodos.
- 65 Preferiblemente, la pluralidad de componentes semiconductores comprende una pluralidad de módulos, incluyendo, cada uno, un conmutador semiconductor y un diodo, en donde la temperatura de unión se estima por separado para el conmutador semiconductor y el diodo. Cuando se realiza el paso de estimación, solo se puede emplear la mayor de

las dos temperaturas de unión estimadas en el paso de estimación anterior para este módulo, mejorando así el margen de seguridad de la estimación.

5 El modelo térmico del componente semiconductor puede ser un modelo de Foster o un modelo de Cauer. El modelo respectivo puede configurarse para considerar la impedancia térmica desde la unión del componente semiconductor a la temperatura ambiente. Tal modelo se puede construir, por ejemplo, para las diferentes capas de un módulo de componentes semiconductores que comprende el componente semiconductor, tal como un módulo IGBT, que puede incluir solo un IGBT o puede incluir un IGBT y un diodo, tal como un diodo de circulación libre o corporal. Por lo tanto, el modelo térmico puede incluir tanto un IGBT como un diodo y puede considerar la disipación de potencia en el componente semiconductor respectivo como una fuente de calor.

10 15 El modelo térmico puede considerar la temperatura de un medio ambiente al que está expuesto el componente semiconductor. El método puede comprender además la obtención de la temperatura del medio ambiente. El medio ambiente puede ser, por ejemplo, un fluido de enfriamiento, tal como agua, proporcionado para enfriar el componente semiconductor. La temperatura del medio ambiente puede medirse, por ejemplo. El medio ambiente puede ser un líquido de enfriamiento que puede enfriar directamente una placa base de un módulo semiconductor del componente semiconductor respectivo, o puede enfriar un disipador de calor de tal módulo semiconductor. El modelo térmico puede adaptarse en consecuencia para considerar tal disipador de calor y, posiblemente, grasa térmica entre tal placa base y el disipador de calor.

20 25 En una realización, las pérdidas de potencia se estiman por separado para una etapa de conversión del lado del generador y una etapa de conversión del lado de la red del convertidor. Las pérdidas de potencia pueden estimarse solo para la etapa de conversión del lado del generador, en particular, para la etapa de conversión del lado del rotor.

30 35 40 45 Las pérdidas de potencia pueden estimarse basándose en la mayor corriente para la etapa de conversión respectiva y los estados de conmutación de los componentes semiconductores, en particular de todos los componentes semiconductores conmutados, de la etapa de conversión respectiva (es decir, los componentes semiconductores relacionados con la conversión de potencia eléctrica). En consecuencia, se puede estimar una pérdida de potencia global para la etapa de conversión respectiva. La pérdida de potencia determinada puede entonces asignarse a cada componente semiconductor de la etapa de conversión respectiva. Por lo tanto, el cálculo se simplifica, lo que permite una estimación rápida y esencialmente en tiempo real de la temperatura de unión. Las pérdidas de conmutación globales se pueden determinar, por ejemplo, en función del número de componentes semiconductores, el número total de eventos de conmutación (el número de cambios de estado para todos los dispositivos de la etapa de conversión), el voltaje en el enlace de CC del convertidor y la mayor corriente estimada. Estas pérdidas de conmutación pueden entonces asignarse a cada componente semiconductor. De manera similar, se puede determinar un valor global para las pérdidas de conducción de los componentes semiconductores.

45 50 55 Preferiblemente, la determinación de la corriente comprende la determinación de la corriente a través de cada uno del uno o más componentes semiconductores, en donde las pérdidas de potencia se estiman individualmente para cada uno del uno o más componentes semiconductores basándose en la corriente a través del componente semiconductor respectivo y el estado de conmutación del componente semiconductor respectivo. La temperatura de unión puede estimarse para cada uno del uno o más componentes semiconductores basándose en la pérdida de potencia estimada para el componente semiconductor respectivo. La estimación de la temperatura de unión puede basarse además en una temperatura de unión estimada previamente para el componente semiconductor respectivo, o para un componente semiconductor asociado (por ejemplo, para un componente semiconductor en el mismo módulo).

55 60 65 La activación de un mecanismo de protección puede implicar, en particular, la reducción de la corriente a través del componente semiconductor respectivo. A modo de ejemplo, el disparo de un mecanismo de protección puede comprender al menos uno de entre abrir uno o más disyuntores asociados con el funcionamiento del convertidor, activar una etapa de palanca acoplada al convertidor, en particular acoplada del lado de un generador del convertidor, y retrasar la conmutación de los componentes semiconductores del convertidor. Mediante tales medidas, el flujo de corriente a través del componente semiconductor se puede reducir o se puede detener.

65 Por ejemplo, al hacer uso de la etapa de palanca, las corrientes en la etapa de conversión del lado del generador se pueden reducir muy rápidamente, evitando un aumento adicional de la temperatura de unión.

70 75 80 85 Similarmente, al retrasar aún más la conmutación de los componentes semiconductores, en particular, la conmutación al estado conductor (estado encendido), se permite que la temperatura de unión caiga a valores en los que es seguro operar el componente semiconductor. La etapa de palanca puede incluir, por ejemplo, una palanca pasiva. La palanca puede estar acoplada a una conexión entre el rotor del generador y la entrada del convertidor de la etapa de conversión del lado del generador. Las una o más medidas de protección pueden tomarse mientras la turbina eólica permanece conectada a la red. En consecuencia, la turbina eólica puede seguir suministrando potencia a la red después de que hayan pasado los transitorios y las corrientes en el rotor hayan vuelto al valor nominal, de modo que las medidas de protección ya no sean necesarias.

La apertura de los respectivos disyuntores interrumpe el flujo de corriente a través del convertidor y, por lo tanto, también reduce la temperatura de unión del componente semiconductor. Al abrir los disyuntores, es posible que la turbina eólica se desconecte de la red eléctrica.

5 Según una realización adicional, se proporciona un sistema de protección para proteger un convertidor de una turbina eólica. El convertidor está acoplado a un generador de la turbina eólica para realizar la conversión de la potencia eléctrica producida por el generador. El convertidor comprende una pluralidad de componentes semiconductores que están operativos para proporcionar la conversión de la potencia eléctrica. El sistema de protección comprende un controlador que está configurado para realizar un paso de estimación de una temperatura de unión de al menos uno de los componentes semiconductores. El paso de estimación de una temperatura de unión de al menos un componente semiconductor comprende determinar una corriente en el convertidor que está asociada con la pérdida de potencia en uno o más de la pluralidad de componentes semiconductores; estimar la pérdida de potencia asociada con uno o más componentes semiconductores basándose en la corriente determinada y en el estado de uno o más componentes semiconductores; y usando un modelo térmico del uno o más componentes semiconductores para estimar la temperatura de unión de al menos uno del uno o más componentes semiconductores basándose en la pérdida de potencia estimada. El paso de estimación de la temperatura de unión se realiza repetidamente, en donde un período de tiempo correspondiente a un tamaño de paso entre los pasos posteriores de estimación de la temperatura de unión es inferior a 1/10 del período de una salida de voltaje de CA por el convertidor. El controlador está configurado además para disparar un mecanismo de protección que está configurado para reducir la temperatura de unión del componente semiconductor si la temperatura de unión estimada supera un umbral de temperatura predeterminado.

20 Mediante tal sistema de protección, se pueden conseguir ventajas similares a las expuestas anteriormente. En particular, tal sistema de protección permite una estimación en tiempo real de la temperatura de unión y, además, proporciona una reacción rápida que reduce la temperatura de unión de modo que se pueda evitar daños en el convertidor.

25 El sistema de protección puede comprender el convertidor, y el convertidor puede ser un convertidor trifásico que está preferiblemente acoplado a un rotor del generador. El sistema de protección puede comprender además tres sensores de corriente acoplados a la entrada del convertidor en un lado del generador del convertidor. Cada sensor de corriente puede tener un rango de trabajo predeterminado respectivo, que es preferiblemente el mismo para los tres sensores. La determinación de una corriente asociada con la pérdida de potencia en el componente semiconductor puede comprender medir la corriente para al menos una fase del convertidor usando el sensor de corriente respectivo. Como se ha expuesto antes en detalle, el controlador se puede configurar para estimar una de las tres corrientes, en particular, la mayor corriente, basándose en los parámetros funcionales del convertidor, en particular, si la corriente está fuera del rango operativo del sensor de corriente respectivo durante dos de las fases. Como se ha mencionado anteriormente, el controlador se puede configurar para estimar una de las corrientes a partir de las dos corrientes restantes si solo la corriente de una fase está fuera del rango de funcionamiento del sensor de corriente respectivo.

30 En particular, el controlador se puede configurar para realizar cualquiera de los pasos del método expuestos anteriormente. Asimismo, el sistema de protección puede comprender cualquiera de los elementos descritos en la presente memoria, tal como el convertidor que incluye la etapa de conversión del lado del generador, el enlace de CC y la etapa de conversión del lado de la red; la etapa de palanca; un sensor para medir el voltaje de CC en el enlace de CC; un sensor para medir la corriente de CA y el voltaje de CA en la salida del lado de la red del convertidor; disyuntores para desconectar el convertidor; y similares. El sistema de protección puede incluir además el generador, que puede ser, en particular, un generador de inducción de doble alimentación.

35 Por ejemplo, a una frecuencia de salida de 50 Hz, el período del voltaje de CA es de 20 ms, de modo que el período de tiempo puede ser, en consecuencia, inferior a 2 ms.

40 50 Según una realización adicional, se proporciona una turbina eólica que comprende un sistema de protección en cualquiera de las configuraciones descritas anteriormente. La turbina eólica puede incluir, en particular, el generador, el convertidor y el controlador del convertidor, y puede incluir además cualquiera de los otros componentes descritos en la presente memoria con respecto a una turbina eólica.

55 55 Según una realización adicional de la invención, se proporciona un programa informático para proteger un convertidor de una turbina eólica. El programa informático puede comprender instrucciones de control que, cuando son ejecutadas por un procesador de datos de un controlador del convertidor, hacen que el procesador de datos realice cualquiera de los métodos descritos en la presente memoria, en particular, cualquiera de las realizaciones descritas anteriormente del método de protección de un convertidor.

60 60 Debe entenderse que las funciones mencionadas anteriormente y las que aún se han de explicar a continuación se pueden usar no solo en las respectivas combinaciones indicadas, sino también en otras combinaciones, o por sí solas, sin alejarse del alcance de la presente descripción.

65 **Breve descripción de los dibujos**

Las funciones y ventajas anteriores de la invención, así como otras resultarán más evidentes a partir de la siguiente descripción detallada leída junto con los dibujos adjuntos. En los dibujos, los números de referencia similares se refieren a elementos similares.

5 La figura 1 es un dibujo esquemático que muestra un sistema de protección de una turbina eólica según una realización de la invención.

La figura 2 es un diagrama de flujo que ilustra un método según una realización de la presente invención.

10 La figura 3 es un dibujo esquemático que ilustra la estimación de la temperatura de unión de conformidad con una realización.

La figura 4 es un dibujo esquemático que muestra las corrientes en un convertidor según una realización de la invención.

15 La figura 5 es un dibujo esquemático que muestra un modelo térmico usado en una realización de la invención.

La figura 6 es un dibujo esquemático que muestra un modelo térmico usado en una realización de la invención.

20 **Descripción detallada**

En lo sucesivo, se describirán en detalle las realizaciones de la invención con referencia a los dibujos adjuntos. Debe entenderse que la siguiente descripción de las realizaciones se proporciona solo con fines ilustrativos, y no debe tomarse en un sentido limitante. Cabe señalar que los dibujos deben considerarse como representaciones esquemáticas solamente, y los elementos en los dibujos no están necesariamente a escala entre sí. Más bien, la representación de los diversos elementos se elige de tal manera que su función y el propósito general resulten evidentes para un experto en la técnica. Como se utiliza en la presente memoria, las formas singulares “un”, “una” y “el/la” pretenden incluir también las formas plurales, a menos que el contexto indique claramente lo contrario. Los términos “que comprende”, “que tiene”, “que incluye” y “que contiene”, deben interpretarse como términos abiertos (es decir, que significan “que incluye, pero no se limita a”), a menos que se indique lo contrario.

La figura 1 muestra esquemáticamente una turbina eólica que incluye un sistema 100 de protección según una realización. La turbina eólica tiene un rotor con un buje 10 que está acoplado a un vástago 11. El rotor convierte la energía eólica en energía mecánica rotacional. El vástago 10 está acoplado a un generador 20 a través de una caja 12 de engranajes. Debe quedar claro que, en otras configuraciones, la caja 12 de engranajes puede no estar presente (por ejemplo, una turbina eólica de accionamiento directo). En la realización de la figura 1, el generador 20 es un generador de inducción de doble alimentación (DFIG), pero también son concebibles realizaciones que emplean diferentes tipos de generadores. El vástago 11 está acoplado, en particular, a través de la caja 12 de engranajes al rotor 21 del DFIG para hacer girar el rotor. El estator 22 del generador 20 está conectado eléctricamente a una red eléctrica 40 a través de un transformador 30. Debe quedar claro que la conexión respectiva puede incluir componentes adicionales no mostrados en la figura 1, tales como disyuntores o similares.

El rotor 21 está conectado eléctricamente a una entrada de un convertidor 110 de la turbina eólica. El convertidor 100 incluye una etapa 111 de conversión del lado del generador que está conectada al rotor 21, y una etapa 112 de conversión del lado de la red eléctrica que está conectada a la red eléctrica 40 (a través del transformador 30). Ambas etapas 111, 112 de conversión están acopladas a través de un enlace 113 de CC. Ambas etapas 111, 112 de conversión funcionan como un rectificador o como un inversor para permitir que la potencia fluya en cualquier sentido a través del convertidor 110. El convertidor 110 puede configurarse, en particular, para alimentar una potencia de CA de frecuencia ajustable a los devanados de campo del rotor 21 para permitir que el generador funcione a velocidad variable mientras proporciona potencia de CA a la frecuencia deseada en la salida del estator 22. En funcionamiento, una fracción de hasta 20 % o 30 % de la potencia eléctrica generada se suministra a la red eléctrica a través del convertidor 110, suministrándose la potencia eléctrica restante directamente a la red desde el estator 22. El experto en la técnica conoce el funcionamiento general de un DFIG y, por lo tanto, no se explica con mayor detalle en la presente memoria.

Cada etapa de conversión comprende una pluralidad de componentes semiconductores 150 que son operables para proporcionar la conversión deseada de potencia eléctrica. Estos incluyen, en particular, conmutadores semiconductores, como los IGBT. Se proporciona un controlador 130 del convertidor para controlar los componentes semiconductores, por ejemplo, usando un esquema de control de modulación por ancho de pulso (PWM). En consecuencia, el controlador 130 del convertidor puede incluir conexiones de control respectivas a los componentes semiconductores 150, en particular, a los módulos IGBT, del convertidor 110. Los sensores de corriente 140 se proporcionan además para medir la corriente en una entrada al convertidor 110 (es decir, las corrientes del rotor) y en una salida del convertidor 110 (es decir, las corrientes de la potencia de CA proporcionada a la red eléctrica). Cabe señalar que, aunque el convertidor 110 puede funcionar bidireccionalmente, la conexión hacia el rotor 21 se denomina entrada en la presente memoria, mientras que la conexión hacia la red 40 se denomina salida del convertidor 110.

El controlador 130 del convertidor comprende una unidad 131 de procesamiento, tal como un microprocesador, FPGA, PLD (dispositivo lógico programable) o DSP (procesador de señales digitales), y una memoria 132 (tal como RAM, ROM, memoria flash o una unidad de disco duro) que almacena instrucciones de control que, cuando son ejecutadas por la unidad de procesamiento 131, realizan cualquiera de los métodos descritos en la presente memoria. La unidad 131 de procesamiento opera, en particular, el convertidor 110 para proporcionar la conversión de potencia deseada y la frecuencia de CA deseada en la salida del estator 22. El controlador 130 del convertidor puede incluir, evidentemente, entradas adicionales para recibir información adicional, tal como una entrada para un sensor de temperatura para la recepción de la medición neta de una temperatura ambiente y/o una temperatura de un medio de enfriamiento, tal como un líquido de enfriamiento, para enfriar los componentes semiconductores del convertidor 110. Además, se pueden proporcionar entradas para recibir mediciones del voltaje de CC en el enlace 113 de CC, del voltaje de CA en la salida del convertidor 110 y similares. Asimismo, el controlador 130 del convertidor puede estar acoplado o puede implementar un controlador de turbina eólica que controle el funcionamiento de la turbina eólica. Tal turbina eólica puede, por ejemplo, establecer la potencia de salida que se suministrará a la red eléctrica 40 basándose en las condiciones de viento predominantes proporcionando un punto de ajuste del par conforme al cual se controlan el convertidor 110 y, por lo tanto, el generador 20. Puede controlar además el ángulo de inclinación de las palas unidas al buje 10 para ajustar la eficiencia de conversión de la energía eólica en energía giratoria, ajustando de este modo la velocidad y/o el par del rotor.

El controlador del convertidor 110 está configurado para realizar un método de protección del convertidor 110 de la turbina eólica. Según este método, el controlador 110 del convertidor estima la temperatura de unión de uno o más componentes semiconductores del convertidor 110 y dispara un mecanismo de protección si la temperatura de unión supera un valor umbral.

La unión de un componente semiconductor generalmente se refiere a la unión entre semiconductores de tipo n y tipo p en el componente, en donde un componente tal como un IGBT puede comprender varias capas alternas de dichos semiconductores. La temperatura de unión se refiere a la temperatura más alta que se produce en un dispositivo semiconductor durante el funcionamiento, que generalmente se encuentra cerca de una o más uniones del dispositivo a través de las cuales se conduce la corriente.

El sistema 100 de protección incluye el controlador 130 del convertidor. Puede incluir además el sensor de corriente 145 en la entrada del convertidor 110. Opcionalmente, puede incluir además el convertidor 110 y el sensor de corriente 140 en la salida del convertidor. En algunas realizaciones, puede incluir además el generador 20.

En la figura 4 se muestra un ejemplo de implementación del convertidor 110. Como se puede ver, el convertidor es un convertidor trifásico que tiene tres entradas (una por cada fase) en las que se proporcionan los respectivos sensores 141, 142 y 143 de corriente. Asimismo, los sensores de corriente 145, 146 y 147 se proporcionan en cada una de las tres fases de la salida del convertidor 110. Tanto la etapa 111 de conversión del lado del generador como la etapa 112 de conversión del lado de la red incluyen tres tramos de conversión que comprenden componentes semiconductores que se conmutan (mediante el controlador 130 del convertidor) para efectuar la conversión deseada de potencia eléctrica. En el ejemplo mostrado en la figura 4, cada tramo del convertidor comprende dos módulos semiconductores, comprendiendo cada módulo componentes semiconductores en forma de un conmutador semiconductor 151, en particular un IGBT, y un diodo 152. El IGBT 151 y el diodo 152 pueden, por ejemplo, formar parte de un módulo IGBT. Debe quedar claro que son concebibles otras topologías de convertidor, por ejemplo, conectando más de dos módulos semiconductores en serie en cada tramo, proporcionando celdas de conversión conectadas en serie que se alimentan cada una desde la entrada trifásica o similar.

El convertidor incluye además el enlace de corriente continua con el condensador de enlace de corriente continua 161. Además, se proporciona una etapa 162 de troceo e incluye la resistencia 163 de troceo, así como los respectivos conmutadores semiconductores para conectar la resistencia 163 de troceo al circuito de enlace de CC. A la entrada del convertidor 110, se conecta una etapa 170 de palanca. La palanca puede ser una palanca pasiva, pero también se puede usar una palanca activa.

La figura 2 es un diagrama de flujo que muestra un método de protección de un convertidor de una turbina eólica, en particular, el convertidor 110, según una realización. El método implica la estimación de la temperatura de unión de al menos un componente semiconductor 150 del convertidor 110. Preferiblemente, se estima la temperatura de unión de cada conmutador semiconductor 151 de la etapa 111 de conversión del lado del generador. En una realización preferida, se estima la temperatura de unión tanto de los conmutadores semiconductores 151 como de los diodos 152 que son operables para proporcionar la conversión de potencia en la etapa 111 de conversión del lado del generador.

En el ejemplo de la figura 2, el convertidor es un convertidor trifásico acoplado en su entrada al rotor 21 de un DFIG, como se muestra en la figura 1. Por lo tanto, las explicaciones anteriores se aplican igualmente a la realización de la figura 2.

En el paso 201, se inicializa la estimación de temperatura de unión. Por ejemplo, a los parámetros que se determinan durante la estimación se les puede dar un valor inicial actual, por ejemplo, se puede usar la temperatura ambiente o una temperatura predeterminada como valor inicial para la temperatura de unión (por ejemplo, 25 °C). El método

realiza pasos repetidos (iteraciones) de estimación de la temperatura de unión, en donde la temperatura de unión estimada resultante se usa en el paso posterior. Por lo tanto, el método puede emplear un proceso iterativo para estimar la temperatura de unión.

- 5 El tamaño del paso entre los pasos subsiguientes (iterativos) está predeterminado y es inferior a 1/10 del período del voltaje de CA convertida entregada en la salida del convertidor 110 (es decir, en el lado de la red). De este modo, se puede garantizar que las corrientes permanezcan relativamente constantes durante un ciclo o paso, lo que permite simplificar la estimación. Asimismo, de este modo se hace posible una estimación en tiempo real, es decir, solo hay un breve retraso entre la temperatura real de unión y la obtención del resultado de la estimación de la temperatura de unión.

10 En el paso 202, se obtienen las corrientes en el convertidor. En particular, cuando se aplica a la etapa 111 del convertidor del lado del generador, las corrientes para las tres fases se miden en la entrada al convertidor 110, en particular, mediante un sensor 141, 142 y 143 de corriente para cada fase (como se muestra en la figura 4). Cada sensor 141, 142 y 143 de corriente tiene un rango de funcionamiento particular en el que se pueden realizar mediciones de corriente precisas. Fuera del rango de funcionamiento, las mediciones de corriente ya no son indicativas de la corriente en la conexión respectiva o no son posibles.

15 20 Si en el paso 202, una de las corrientes está fuera del rango de funcionamiento del sensor 141, 142 y 143 respectivo, se estima la corriente para esta fase basándose en los parámetros de funcionamiento del convertidor 110, en particular, basándose en las corrientes medidas para las otras dos fases. Esto es posible, ya que en el rotor 21, los devanados de campo están generalmente conectados en triángulo, como se muestra en la figura 4, de modo que se puede emplear la ley de Kirchhoff para derivar la tercera corriente. En consecuencia, se pueden obtener las tres corrientes.

25 30 35 Si en el paso 202, dos de los sensores de corriente están fuera de rango, se determina la mayor de estas dos corrientes basándose en los parámetros funcionales del convertidor 110. Si dos corrientes están fuera de rango, sus valores deben tener signo opuesto, es decir, fluyen en distintos sentidos. Con referencia a la figura 4, se puede ver que la mayor de estas corrientes (aquí  $I_1$ ) es la corriente con el signo opuesto al signo de la corriente que tiene el valor más pequeño y que aún puede medirse con el sensor de corriente (aquí la corriente  $I_3$  medida por 143). Esto se debe al hecho de que la suma de estas tres corrientes debe ser igual a cero. El sentido/signo de la corriente respectiva se puede determinar mediante el sensor 141, 142 y 143 de corriente respectivo (por ejemplo, para la corriente en el rango) y se puede derivar del estado de funcionamiento del convertidor 110 para las otras corrientes (lo cual es conocido por el controlador 130 del convertidor que controla el estado de conmutación del convertidor 110).

40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95 100 105 110 115 120 125 130 135 140 145 150 155 160 165 170 175 180 185 190 195 200 205 210 215 220 225 230 235 240 245 250 255 260 265 270 275 280 285 290 295 300 305 310 315 320 325 330 335 340 345 350 355 360 365 370 375 380 385 390 395 400 405 410 415 420 425 430 435 440 445 450 455 460 465 470 475 480 485 490 495 500 505 510 515 520 525 530 535 540 545 550 555 560 565 570 575 580 585 590 595 600 605 610 615 620 625 630 635 640 645 650 655 660 665 670 675 680 685 690 695 700 705 710 715 720 725 730 735 740 745 750 755 760 765 770 775 780 785 790 795 800 805 810 815 820 825 830 835 840 845 850 855 860 865 870 875 880 885 890 895 900 905 910 915 920 925 930 935 940 945 950 955 960 965 970 975 980 985 990 995 1000 1005 1010 1015 1020 1025 1030 1035 1040 1045 1050 1055 1060 1065 1070 1075 1080 1085 1090 1095 1100 1105 1110 1115 1120 1125 1130 1135 1140 1145 1150 1155 1160 1165 1170 1175 1180 1185 1190 1195 1200 1205 1210 1215 1220 1225 1230 1235 1240 1245 1250 1255 1260 1265 1270 1275 1280 1285 1290 1295 1300 1305 1310 1315 1320 1325 1330 1335 1340 1345 1350 1355 1360 1365 1370 1375 1380 1385 1390 1395 1400 1405 1410 1415 1420 1425 1430 1435 1440 1445 1450 1455 1460 1465 1470 1475 1480 1485 1490 1495 1500 1505 1510 1515 1520 1525 1530 1535 1540 1545 1550 1555 1560 1565 1570 1575 1580 1585 1590 1595 1600 1605 1610 1615 1620 1625 1630 1635 1640 1645 1650 1655 1660 1665 1670 1675 1680 1685 1690 1695 1700 1705 1710 1715 1720 1725 1730 1735 1740 1745 1750 1755 1760 1765 1770 1775 1780 1785 1790 1795 1800 1805 1810 1815 1820 1825 1830 1835 1840 1845 1850 1855 1860 1865 1870 1875 1880 1885 1890 1895 1900 1905 1910 1915 1920 1925 1930 1935 1940 1945 1950 1955 1960 1965 1970 1975 1980 1985 1990 1995 2000 2005 2010 2015 2020 2025 2030 2035 2040 2045 2050 2055 2060 2065 2070 2075 2080 2085 2090 2095 2100 2105 2110 2115 2120 2125 2130 2135 2140 2145 2150 2155 2160 2165 2170 2175 2180 2185 2190 2195 2200 2205 2210 2215 2220 2225 2230 2235 2240 2245 2250 2255 2260 2265 2270 2275 2280 2285 2290 2295 2300 2305 2310 2315 2320 2325 2330 2335 2340 2345 2350 2355 2360 2365 2370 2375 2380 2385 2390 2395 2400 2405 2410 2415 2420 2425 2430 2435 2440 2445 2450 2455 2460 2465 2470 2475 2480 2485 2490 2495 2500 2505 2510 2515 2520 2525 2530 2535 2540 2545 2550 2555 2560 2565 2570 2575 2580 2585 2590 2595 2600 2605 2610 2615 2620 2625 2630 2635 2640 2645 2650 2655 2660 2665 2670 2675 2680 2685 2690 2695 2700 2705 2710 2715 2720 2725 2730 2735 2740 2745 2750 2755 2760 2765 2770 2775 2780 2785 2790 2795 2800 2805 2810 2815 2820 2825 2830 2835 2840 2845 2850 2855 2860 2865 2870 2875 2880 2885 2890 2895 2900 2905 2910 2915 2920 2925 2930 2935 2940 2945 2950 2955 2960 2965 2970 2975 2980 2985 2990 2995 3000 3005 3010 3015 3020 3025 3030 3035 3040 3045 3050 3055 3060 3065 3070 3075 3080 3085 3090 3095 3100 3105 3110 3115 3120 3125 3130 3135 3140 3145 3150 3155 3160 3165 3170 3175 3180 3185 3190 3195 3200 3205 3210 3215 3220 3225 3230 3235 3240 3245 3250 3255 3260 3265 3270 3275 3280 3285 3290 3295 3300 3305 3310 3315 3320 3325 3330 3335 3340 3345 3350 3355 3360 3365 3370 3375 3380 3385 3390 3395 3400 3405 3410 3415 3420 3425 3430 3435 3440 3445 3450 3455 3460 3465 3470 3475 3480 3485 3490 3495 3500 3505 3510 3515 3520 3525 3530 3535 3540 3545 3550 3555 3560 3565 3570 3575 3580 3585 3590 3595 3600 3605 3610 3615 3620 3625 3630 3635 3640 3645 3650 3655 3660 3665 3670 3675 3680 3685 3690 3695 3700 3705 3710 3715 3720 3725 3730 3735 3740 3745 3750 3755 3760 3765 3770 3775 3780 3785 3790 3795 3800 3805 3810 3815 3820 3825 3830 3835 3840 3845 3850 3855 3860 3865 3870 3875 3880 3885 3890 3895 3900 3905 3910 3915 3920 3925 3930 3935 3940 3945 3950 3955 3960 3965 3970 3975 3980 3985 3990 3995 4000 4005 4010 4015 4020 4025 4030 4035 4040 4045 4050 4055 4060 4065 4070 4075 4080 4085 4090 4095 4100 4105 4110 4115 4120 4125 4130 4135 4140 4145 4150 4155 4160 4165 4170 4175 4180 4185 4190 4195 4200 4205 4210 4215 4220 4225 4230 4235 4240 4245 4250 4255 4260 4265 4270 4275 4280 4285 4290 4295 4300 4305 4310 4315 4320 4325 4330 4335 4340 4345 4350 4355 4360 4365 4370 4375 4380 4385 4390 4395 4400 4405 4410 4415 4420 4425 4430 4435 4440 4445 4450 4455 4460 4465 4470 4475 4480 4485 4490 4495 4500 4505 4510 4515 4520 4525 4530 4535 4540 4545 4550 4555 4560 4565 4570 4575 4580 4585 4590 4595 4600 4605 4610 4615 4620 4625 4630 4635 4640 4645 4650 4655 4660 4665 4670 4675 4680 4685 4690 4695 4700 4705 4710 4715 4720 4725 4730 4735 4740 4745 4750 4755 4760 4765 4770 4775 4780 4785 4790 4795 4800 4805 4810 4815 4820 4825 4830 4835 4840 4845 4850 4855 4860 4865 4870 4875 4880 4885 4890 4895 4900 4905 4910 4915 4920 4925 4930 4935 4940 4945 4950 4955 4960 4965 4970 4975 4980 4985 4990 4995 5000 5005 5010 5015 5020 5025 5030 5035 5040 5045 5050 5055 5060 5065 5070 5075 5080 5085 5090 5095 5100 5105 5110 5115 5120 5125 5130 5135 5140 5145 5150 5155 5160 5165 5170 5175 5180 5185 5190 5195 5200 5205 5210 5215 5220 5225 5230 5235 5240 5245 5250 5255 5260 5265 5270 5275 5280 5285 5290 5295 5300 5305 5310 5315 5320 5325 5330 5335 5340 5345 5350 5355 5360 5365 5370 5375 5380 5385 5390 5395 5400 5405 5410 5415 5420 5425 5430 5435 5440 5445 5450 5455 5460 5465 5470 5475 5480 5485 5490 5495 5500 5505 5510 5515 5520 5525 5530 5535 5540 5545 5550 5555 5560 5565 5570 5575 5580 5585 5590 5595 5600 5605 5610 5615 5620 5625 5630 5635 5640 5645 5650 5655 5660 5665 5670 5675 5680 5685 5690 5695 5700 5705 5710 5715 5720 5725 5730 5735 5740 5745 5750 5755 5760 5765 5770 5775 5780 5785 5790 5795 5800 5805 5810 5815 5820 5825 5830 5835 5840 5845 5850 5855 5860 5865 5870 5875 5880 5885 5890 5895 5900 5905 5910 5915 5920 5925 5930 5935 5940 5945 5950 5955 5960 5965 5970 5975 5980 5985 5990 5995 6000 6005 6010 6015 6020 6025 6030 6035 6040 6045 6050 6055 6060 6065 6070 6075 6080 6085 6090 6095 6100 6105 6110 6115 6120 6125 6130 6135 6140 6145 6150 6155 6160 6165 6170 6175 6180 6185 6190 6195 6200 6205 6210 6215 6220 6225 6230 6235 6240 6245 6250 6255 6260 6265 6270 6275 6280 6285 6290 6295 6300 6305 6310 6315 6320 6325 6330 6335 6340 6345 6350 6355 6360 6365 6370 6375 6380 6385 6390 6395 6400 6405 6410 6415 6420 6425 6430 6435 6440 6445 6450 6455 6460 6465 6470 6475 6480 6485 6490 6495 6500 6505 6510 6515 6520 6525 6530 6535 6540 6545 6550 6555 6560 6565 6570 6575 6580 6585 6590 6595 6600 6605 6610 6615 6620 6625 6630 6635 6640 6645 6650 6655 6660 6665 6670 6675 6680 6685 6690 6695 6700 6705 6710 6715 6720 6725 6730 6735 6740 6745 6750 6755 6760 6765 6770 6775 6780 6785 6790 6795 6800 6805 6810 6815 6820 6825 6830 6835 6840 6845 6850 6855 6860 6865 6870 6875 6880 6885 6890 6895 6900 6905 6910 6915 6920 6925 6930 6935 6940 6945 6950 6955 6960 6965 6970 6975 6980 6985 6990 6995 7000 7005 7010 7015 7020 7025 7030 7035 7040 7045 7050 7055 7060 7065 7070 7075 7080 7085 7090 7095 7100 7105 7110 7115 7120 7125 7130 7135 7140 7145 7150 7155 7160 7165 7170 7175 7180 7185 7190 7195 7200 7205 7210 7215 7220 7225 7230 7235 7240 7245 7250 7255 7260 7265 7270 7275 7280 7285 7290 7295 7300 7305 7310 7315 7320 7325 7330 7335 7340 7345 7350 7355 7360 7365 7370 7375 7380 7385 7390 7395 7400 7405 7410 7415 7420 7425 7430 7435 7440 7445 7450 7455 7460 7465 7470 7475 7480 7485 7490 7495 7500 7505 7510 7515 7520 7525 7530 7535 7540 7545 7550 7555 7560 7565 7570 7575 7580 7585 7590 7595 7600 7605 7610 7615 7620 7625 7630 7635 7640 7645 7650 7655 7660 7665 7670 7675 7680 7685 7690 7695 7700 7705 7710 7715 7720 7725 7730 7735 7740 7745 7750 7755 7760 7765 7770 7775 7780 7785 7790 7795 7800 7805 7810 7815 7820 7825 7830 7835 7840 7845 7850 7855 7860 7865 7870 7875 7880 7885 7890 7895 7900 7905 7910 7915 7920 7925 7930 7935 7940 7945 7950 7955 7960 7965 7970 7975 7980 7985 7990 7995 8000 8005 8010 8015 8020 8025 8030 8035 8040 8045 8050 8055 8060 8065 8070 8075 8080 8085 8090 8095 8100 8105 8110 8115 8120 8125 8130 8135 8140 8145 8150 8155 8160 8165 8170 8175 8180 8185 8190 8195 8200 8205 8210 8215 8220 8225 8230 8235 8240 8245 8250 8255 8260 8265 8270 8275 8280 8285 8290 8295 8300 8305 8310 8315 8320 8325 8330 8335 8340 8345 8350 8355 8360 8365 8370 8375 8380 8385 8390 8395 8400 8405 8410 8415 8420 8425 8430 8435 8440 8445 8450 8455 8460 8465 8470 8475 8480 8485 8490 8495 8500 8505 8510 8515 8520 8525 8530 8535 8540 8545 8550 8555 8560 8565 8570 8575 8580 8585 8590 8595 8600 8605 8610 8615 8620 8625 8630 8635 8640 8645 8650 8655 8660 8665 8670 8675 8680 8685 8690 8695 8700 8705 8710 8715 8720 8725 8730 8735 8740 8745 8750 8755 8760 8765 8770 8775 8780 8785 8790 8795 8800 8805 8810 8815 8820 8825 8830 8835 8840 8845 8850 8855 8860 8865 8870 8875 8880 8885 8890 8895 8900 8905 8910 8915 8920 8925 8930 8935 8940 8945 8950 8955 8960 8965 8970 8975 8980 8985 8990 8995 9000 9005 9010 9015 9020 9025 9030 9035 9040 9045 9050 9055 9060 9065 9070 9075 9080 9085 9090 9095 9100 9105 9110 9115 9120 9125 9130 9135 9140 9145 9150 9155 9160 9165 9170 9175 9180 9185 9190 9195 9200 9205 9210 9215 9220 9225 9230 9235 9240 9245 9250 9255 9260 9265 9270 9275 9280 9285 9290 9295 9300 9305 9310 9315 9320 9325 9330 9335 9340 9345 9350 9355 9360 9365 9370 9375 9380 9385 9390 9395 9400 9405 9410 9415 9420 9425 9430 9435 9440 9445 9450 9455 9460 9465 9470 9475 9480 9485 9490 9495 9500 9505 9510 9515 9520 9525 9530 9535 9540 9545 9550 9555 9560 9565 9570 9575 9580 9585 9590 9595 9600 9605 9610 9615 9620 9625 9630 9635 9640 9645 9650 9655 9660 9665 9670 9675 9680 9685 9690 9695 9700 9705 9710 9715 9720 9725 9730 9735 9740 9745 9750 9755 9760 9765 9770 9775 9780 9785 9790 9795 9800 9805 9810 9815 9820 9825 9830 9835 9840 9845 9850 9855 9860 9865 9870 9875 9880 9885 9890 9895 9900 9905 9910 9915 9920 9925 9930 9935 9940 9945 9950 9955 9960 9965 9970 9975 9980 9985 9990 9995 10000 10005 10010 10015 10020 10025 10030 10035 10040 10045 10050 10055 10060 10065 10070 10075 10080 10085 10090 10095 10100 10105 10110 10115 10120 10125 10130 10135 10140 10145 10150 10155 10160 10165 10170 10175 10180 10185 10190 10195 10200 10205 10210 10215 10220 10225 10230 10235 10240 10245 10250 10255 10260 1

De conformidad con lo anterior, debe quedar claro que depende del valor de las corrientes qué método se usa para obtener las corrientes en el paso 202, en particular, de si una o dos de las corrientes están fuera de rango.

En los pasos 203 y 204, se determinan las pérdidas de conmutación y las pérdidas de conducción que se producen en uno o más componentes semiconductores. Para cada uno de los componentes semiconductores de la etapa 111 de conversión del lado del generador, se conoce el estado de conmutación durante el período de tiempo del paso de iteración (ya que el controlador 130 del convertidor controla los estados de conmutación) y a partir del paso 202 anterior, se conoce la corriente a través de cada componente semiconductor. Por consiguiente, es posible que el controlador 130 del convertidor calcule las pérdidas de conmutación y las pérdidas de conducción para cada componente semiconductor individual.

En particular, el controlador del convertidor tiene disponibles las corrientes a través del componente semiconductor y los estados de conmutación de los componentes semiconductores y además mide el voltaje del enlace de CC. Para cada componente semiconductor, como un IGBT o un diodo, el fabricante proporciona datos que permiten derivar las pérdidas de conducción y conmutación. Para un IGBT, las pérdidas de conducción se derivan de una curva del voltaje  $V_{CE}$  del colector-emisor con respecto a la corriente  $I_C$  del colector. A continuación se proporciona una ecuación ejemplar para derivar las pérdidas de conducción.

Para un diodo, las pérdidas de conducción se derivan de una curva de voltaje directo  $V_f$  con respecto a la corriente directa  $I_f$  dada por el fabricante.

Similarmente, las pérdidas de conmutación se derivan de los datos del fabricante en función del voltaje del enlace de CC, la corriente respectiva a través del componente semiconductor y la temperatura de unión. Dado que el método es iterativo, la temperatura de unión determinada en el paso anterior para el componente semiconductor se emplea para determinar las pérdidas de conmutación. Las curvas usadas para derivar las pérdidas de conmutación y conducción pueden aproximarse mediante una simple expresión analítica para facilitar y acelerar la determinación de las pérdidas respectivas.

La determinación de las pérdidas de conmutación y las pérdidas de conducción de un componente semiconductor es generalmente conocida por los expertos en la técnica y, por lo tanto, no se explica con mayor detalle aquí. En particular, con respecto a la determinación de las pérdidas de conmutación y las pérdidas de conducción de un diodo o un IGBT, se hace referencia al manual "Application Manual Power Semiconductors" de Semikron, segunda edición, disponible en "<https://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-application-manual-power-semiconductors-english-en-2015.pdf>", que describe la determinación respectiva en detalle. El documento se incorpora por referencia en su totalidad en la presente memoria. En particular, la determinación de las pérdidas de conducción y las pérdidas de conmutación del IGBT se puede basar en las siguientes fórmulas que se dan en el manual.

Para una temperatura de referencia de 25 °C, una corriente  $I_{ref}$  de referencia predeterminada y un voltaje  $V_{ref}$  de referencia (valores de referencia de las mediciones de pérdida de conmutación tomados de la hoja de datos del fabricante), se pueden determinar las pérdidas  $P_{cond(T)}$  de conducción y las pérdidas  $P_{com(T)}$  de conmutación de un IGBT (indicadas con el índice T de transistor) basándose en las siguientes ecuaciones:

$$P_{cond(T)} = (I_{en} \cdot (V_{CE0(25\text{ }^{\circ}\text{C})} + TC_v \cdot (T_j - 25\text{ }^{\circ}\text{C})) + I_{en}^2 \cdot (r_{CE(25\text{ }^{\circ}\text{C})} + TC_r \cdot (T_j - 25\text{ }^{\circ}\text{C})))DC_{(T)}$$

$$P_{com(T)} = f_{com} \cdot E_{encendido+apagado} \cdot \left( \frac{I_{en}}{I_{ref}} \right)^{Ki} \cdot \left( \frac{V_{sal}}{V_{ref}} \right)^{Kv} \cdot (1 + TC_{Ecom} \cdot (T_j - T_{ref}))$$

Ecuación (1)

en donde, para la primera ecuación relativa a un IGBT (transistor T),  $I_{en}$  designa la corriente que pasa por el IGBT;  $V_{CE0(25\text{ }^{\circ}\text{C})}$  es un voltaje que se da en la hoja de datos y se usa para derivar los coeficientes de temperatura a diferentes temperaturas;  $TC_v$  es el coeficiente de temperatura de la característica de estado encendido del IGBT,  $r_{CE(25\text{ }^{\circ}\text{C})}$  es la resistencia volumétrica a la temperatura de referencia de 25 °C;  $TC_r$  es el coeficiente de temperatura de la característica de estado encendido relacionada con las pérdidas de conducción;  $T_j$  es la temperatura de unión; y  $DC_{(T)}$  es el ciclo de trabajo del transistor, es decir, el tiempo que el IGBT está conduciendo durante el período de tiempo. Para la segunda ecuación relativa a las pérdidas  $P_{com}$  de conmutación,  $f_{com}$  designa la frecuencia de conmutación, que en el presente caso es 1 si la conmutación se produjo durante el período de tiempo y es cero en caso contrario;  $E_{encendido+apagado}$  designa un valor derivado de la hoja de datos en función de la corriente conmutada;  $Ki$  y  $Kv$  son exponentes de la dependencia de corriente y voltaje de las pérdidas de conmutación, respectivamente, que se obtienen de la hoja de datos ( $Ki \sim 1$  y  $Kv \sim 1,3 \dots 1,4$ );  $TC_{Ecom}$  es el coeficiente de temperatura de las pérdidas de conmutación y  $T_{ref}$  es un valor de referencia de las mediciones de pérdida de conmutación tomadas de la hoja de datos.

Al conocer el estado de conmutación del IGBT durante el período de tiempo (tamaño de paso del proceso iterativo), la corriente a través del IGBT, el voltaje en el enlace de CC y la temperatura de unión (del paso de iteración anterior), las pérdidas de conmutación y las pérdidas de conducción del conmutador semiconductor se pueden derivar, por lo tanto, sin dificultad a partir de los datos dados en la hoja de datos del fabricante para el componente semiconductor respectivo. Debe quedar claro que las ecuaciones respectivas se pueden derivar de las hojas de datos del fabricante para el diodo. Además, también debe quedar claro que las ecuaciones se pueden adaptar a la configuración de circuito respectiva en la que se usa el componente semiconductor.

10 En consecuencia, a partir de la información disponible, se pueden calcular las pérdidas de conmutación y las pérdidas de conducción para el convertidor, en particular, la etapa de conversión del lado del generador, en los pasos 203 y 204. Preferiblemente, las pérdidas de conmutación y las pérdidas de conducción se determinan individualmente para cada componente semiconductor, en particular, para cada diodo e IGBT de la etapa de conversión del lado del generador implicada en la conversión de la potencia eléctrica.

15 En los pasos 205 y 206, se usa un modelo térmico del componente semiconductor para estimar la temperatura  $T_j$  de unión actual del componente semiconductor. El modelo térmico puede ser, por ejemplo, un modelo de Cauer o preferiblemente un modelo de Foster, que también se denomina circuito de fracción parcial. En dichos modelos, se utiliza un circuito de resistencias y condensadores como equivalente a la configuración térmica del componente semiconductor. Mientras que el modelo de Cauer refleja la configuración física real del componente semiconductor, para lo cual deben conocerse las características del material de las capas individuales, el modelo de Foster no representa la secuencia de las capas, sino que en su lugar deriva los coeficientes del modelo a partir de una curva de enfriamiento medida del módulo semiconductor.

20 25 Preferiblemente, se emplea un modelo Foster como modelo térmico para el componente semiconductor. La figura 5 ilustra un modelo térmico para un componente semiconductor en forma de conmutador semiconductor. El modelo considera la conducción térmica a partir de la unión del semiconductor (temperatura  $T_j$  de unión actual) a través de las capas del módulo semiconductor, la grasa térmica y un disipador de calor que está expuesto a una temperatura ambiente  $T_a$ . Preferiblemente, el disipador de calor se enfriá de modo que la temperatura ambiente  $T_a$  corresponda a una temperatura  $T_{enfriamiento}$  de un medio de enfriamiento, en particular de un líquido tal como el agua.

30 35 En el modelo térmico de la figura 5, el número de referencia 601 designa el modelo fraccionario parcial para el módulo IGBT o de diodos, el número de referencia 602 designa el modelo fraccionario parcial para la grasa térmica y el número de referencia 603 designa el modelo fraccionario parcial para el disipador de calor, que se combinan en un modelo de sistema. Debe quedar claro que el modelo térmico depende de la configuración particular empleada. Por ejemplo, la placa base del módulo semiconductor puede enfriarse directamente con agua, en cuyo caso se pueden eliminar los modelos para la grasa térmica y el disipador de calor. También debe quedar claro, que se puede usar un número diferente de elementos de circuito para modelar el componente del sistema respectivo, por ejemplo, se puede usar un condensador y una resistencia adicionales para modelar el disipador de calor.

40 45 Los coeficientes del modelo generalmente se pueden obtener de la hoja de datos proporcionada por el fabricante para el componente semiconductor respectivo. Se puede determinar la impedancia térmica  $Z_{ter(j-a)}$  ( $t_k$ ) del modelo (desde la unión  $j$  hasta el ambiente  $a$ , en donde  $t_k$  designa el tiempo en el paso de iteración  $k$ ) basándose en una ecuación tal como:

Ecuación (2) en donde  $r_i$  designa la  $i$ -ésima resistencia del modelo y

Ecuación (2)

$$Z_{ter}(t) = \sum_{i=1}^n r_i \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right)$$

50  $\tau_i = r_i * c_i$  designa la  $i$ -ésima constante de tiempo, en donde  $c_i$  es la  $i$ -ésima capacitancia del modelo. En la hoja de datos del fabricante,  $r_i$  y  $\tau_i$  generalmente se proporcionan en forma de tabla para el modelo térmico del componente semiconductor respectivo, tal como:

i	1	2	3	4
$r_i$	0,8	4	13,2	1,5
$\tau_i$	0,008	0,013	0,05	0,6

para un ejemplo de modelo que considere la conducción térmica desde la unión a la placa base/carcasa de un IGBT;  $n=4$ .

En la figura 5,  $P_P(t)$  designa las pérdidas de potencia totales (incluyendo las pérdidas de conmutación y las pérdidas de conducción) del componente semiconductor respectivo en el tiempo  $t$ . Debe quedar claro que las pérdidas de potencia se refieren a la disipación de potencia eléctrica en la unión del componente semiconductor y, en consecuencia, proporcionan un calentamiento de la unión, conduciéndose la energía térmica lejos de la unión de conformidad con el modelo térmico y la impedancia térmica  $Z_{ter}$ . Por lo tanto, para cada paso de iteración, el cambio 5 en la temperatura de unión se puede determinar a partir del modelo térmico (impedancia  $Z_{ter}$ ) y a partir de las pérdidas de potencia totales  $P_P(t)$ . La siguiente ecuación simplificada describe el desarrollo de la temperatura  $T_j(t)$  de unión actual para una temperatura de carcasa conocida  $T_c(t)$  y las pérdidas  $P_P(t)$  de potencia totales conocidas:

Ecuación (3)

$$T_j(t) = P_P(t) * \dot{Z}_{ter(j-c)}(t) + T_c(t)$$

15 Debe quedar claro que la ecuación se puede aplicar consecuentemente a una situación en la que el modelo térmico incluye un dissipador de calor y considera la temperatura ambiente  $T_a$  en lugar de  $T_c$ . El controlador 130 del convertidor puede obtener la temperatura ambiente (temperatura del agente de enfriamiento) o la temperatura de la carcasa a partir de una lectura del sensor respectivo.

20 La temperatura de unión en el tiempo  $t_k$  se puede calcular, por ejemplo, según

$$T_j(t_k) = T_j(t_{k-1}) + \Delta T_j(t_k) \quad \text{Ecuación (4)}$$

25 El cambio en la temperatura  $\Delta T_j(t_k)$  de unión debe considerar las pérdidas de potencia en las etapas anteriores y se puede determinar según

$$\Delta T_j(t_k) = \sum_{l=0}^k (P_l - P_{l-1}) \sum_{\mu=0}^n r_{ter\mu} \cdot \left(1 - e^{\frac{-(t_k - t_{l-1})}{\tau_{ter\mu}}}\right) \quad \text{Ecuación (5)}$$

30 en donde  $P$  indica la pérdida total de potencia y  $r, \tau$  son los coeficientes del modelo térmico, como se ha expuesto anteriormente.

En consecuencia, los pasos 205 y 206 permiten una estimación precisa de la temperatura de unión del componente semiconductor basándose en la temperatura de unión determinada previamente, las pérdidas de potencia totales determinadas en los pasos 203 y 204 y el modelo térmico con sus parámetros respectivos.

35 Debe quedar claro que se pueden usar diferentes modelos térmicos o modelos térmicos más complejos para derivar la temperatura  $T_j$  de unión. Por ejemplo, si el convertidor incluye un módulo semiconductor que comprende componentes semiconductores en forma de diodo y de IGBT, entonces se puede emplear un modelo térmico combinado que considere tanto el diodo como el IGBT, que pueden estar acoplados al mismo dissipador de calor. En 40 la figura 6 se muestra un ejemplo de modelo combinado 700 de este tipo, en donde el número de referencia 701 es el modelo para el IGBT, el 702 un modelo para la grasa térmica, el 703 un modelo para el dissipador de calor, el 704 un modelo para el diodo y el 705 un modelo para la grasa térmica mediante la cual el diodo se acopla al dissipador de calor. Tanto el diodo como el IGBT están conectados a través de la grasa térmica respectiva al dissipador de calor. En el modelo se consideran las pérdidas  $P_{P\_IGBT}$  y  $P_{P\_DIODO}$  de potencia del IGBT y del DIODO.

45 Además, debe quedar claro que se pueden usar determinadas simplificaciones y aproximaciones en la determinación de la temperatura de unión para hacer que la determinación sea más eficiente y segura. Por ejemplo, cuando se estima la temperatura de unión tanto de un diodo como de un IGBT del mismo módulo, la mayor de las dos temperaturas de unión determinadas en el paso de iteración anterior puede usarse en el cálculo de la temperatura de unión de ambos componentes en el paso actual. De este modo, se puede garantizar que la temperatura de unión no se subestime. En otras realizaciones, solo se estima la temperatura de unión de un conmutador semiconductor, en particular, de un IGBT.

En el paso de decisión 207, se comprueba si la temperatura de unión estimada supera un umbral de temperatura predeterminado. Preferiblemente, la temperatura de unión se estima para cada uno de los componentes semiconductores de al menos la etapa 111 de conversión del lado del generador. La mayor de las temperaturas de unión estimadas puede compararse entonces con el umbral de temperatura. Como alternativa, cada una de las

5 temperaturas de unión estimadas se puede comparar con el umbral de temperatura para determinar si existe una condición de exceso de temperatura para uno de los componentes semiconductores. A modo de ejemplo, el umbral de temperatura puede establecerse en 100 °C para un componente semiconductor para el que la temperatura máxima de unión tenga un valor de  $T_{máx}=140$  °C. El umbral de temperatura se puede encontrar dentro de un rango del 60 % al 10 90 % aproximadamente de la temperatura máxima de unión del componente semiconductor respectivo. El umbral de temperatura se puede ajustar para lograr la función de protección deseada.

Si la mayor temperatura de unión estimada (o cualquier temperatura de unión estimada) no supera el valor umbral de temperatura, se realiza el siguiente paso de iteración de estimar la temperatura de unión, es decir, los pasos 202 a 15 206 se repiten con un contador aumentado  $k= k+1$ .

El período de tiempo entre los pasos de iteración posteriores de estimar la temperatura de unión (es decir, para un ciclo de la iteración) se elige de tal manera que se consiga una estimación en tiempo real de la temperatura de unión y que las corrientes de CA puedan aproximarse como constantes durante el período de tiempo. Por ejemplo, el período de tiempo puede ser inferior a 1/10 del período de CA del voltaje de CA en la salida del convertidor 110. En consecuencia, a una tensión de salida de 50 Hz, el período de tiempo puede ser inferior a 2 ms. El período de tiempo puede ser inferior a 1 ms y preferiblemente, puede estar dentro de un rango de aproximadamente 20  $\mu$ s a 200  $\mu$ s. Por ejemplo, el período de tiempo puede ser de aproximadamente 80, 90, 100, 110 o 120  $\mu$ s. Una realización preferida emplea un período de tiempo de 100  $\mu$ s.

25 Si en el paso 207, la temperatura de unión más alta supera el umbral de temperatura, se activa un mecanismo de protección (etapa 208). Por ejemplo, el disparo de un mecanismo de protección puede incluir la activación de la etapa 170 de palanca pasiva para provocar una caída inmediata de las corrientes asociadas con el fin de evitar que la temperatura  $T_j$  de unión alcance valores destructivos. El disparo de un mecanismo de protección puede incluir adicional o alternativamente la inserción de un retardo para permitir que la temperatura de unión caiga y solo reanudar la 30 conmutación del componente semiconductor una vez que la temperatura de unión haya bajado a valores lo suficientemente bajos como para que el diodo pueda bloquear el voltaje del enlace de CC si se enciende el IGBT opuesto (asociado). El controlador 130 puede retrasar la conmutación según se deseé para permitir que uno o más de los componentes semiconductores se enfríen. De forma adicional o alternativa, el disparo del mecanismo de protección puede incluir el disparo de un mecanismo de protección principal de la turbina eólica, que puede 35 desconectar el equipo eléctrico de la red eléctrica. Por ejemplo, el convertidor 110 y/o el generador 20 pueden desconectarse de la red eléctrica 40.

Adicionalmente, el disparo de un mecanismo de protección puede comprender el disparo de una alarma, por ejemplo, para informar a un operador sobre la aparición del evento de exceso de temperatura.

40 En el paso 209, se comprueba si se ha restablecido la temperatura de funcionamiento del componente semiconductor respectivo. Se puede definir, por ejemplo, un segundo umbral de temperatura y la temperatura de unión actual se puede comparar con este segundo umbral para determinar si ha caído por debajo de este segundo umbral, lo que indica el restablecimiento de las condiciones de funcionamiento normales. El segundo umbral de temperatura puede 45 ser el mismo que el primer umbral de temperatura o puede ser inferior.

Si en el paso 209 se descubre que la temperatura no se ha restablecido a las condiciones de funcionamiento, se 50 pueden emplear mecanismos de protección adicionales, tales como desconectar la turbina eólica de la red eléctrica 40, por ejemplo, abriendo los disyuntores respectivos.

Debe quedar claro que también durante los pasos 208 y 209, la estimación de la temperatura de unión (pasos 202- 55 206) se puede seguir realizando en paralelo (no se muestra en la figura 2), de modo que esté disponible una estimación actual (en tiempo real) de la temperatura de unión cuando se implementa el mecanismo de protección y cuando se determina que la condición de exceso de temperatura ya no está presente.

La figura 3 ilustra la estimación de la temperatura de unión en bloques de un diagrama de flujo. En el bloque 301, se 60 estiman las corrientes de funcionamiento del convertidor 110, como se describe con respecto al paso 202. La estimación de corriente recibe como entrada las corrientes  $I_{OP}$  de funcionamiento medidas, que son  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$  mostradas en la figura 4 y medidas por los sensores 141, 142 y 143. Debe quedar claro que uno o más de estos pueden estar fuera del alcance. La estimación de corriente 301 recibe además el voltaje y las corrientes  $I_{red}$  y  $V_{red}$  de red de CA a la 65 salida del convertidor 110, así como la corriente  $I_{CC}$  en el condensador de CC y en la etapa  $I_{CH}$  de troceo de CC. Basándose en estos parámetros de funcionamiento del convertidor, el bloque 301 estima una o dos corrientes que están fuera de rango, en particular, la corriente mayor si dos corrientes están fuera de rango, como se describió anteriormente. A continuación, se proporcionan las corrientes de funcionamiento  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$  obtenidas al bloque 302, en el que se estiman las pérdidas de potencia asociadas con los componentes semiconductores.

La estimación de pérdida de potencia 302 usa las corrientes  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$  en cada tramo de la etapa de conversión respectiva, el voltaje  $V_{CC}$  de enlace de CC, la temperatura  $T_{j(k-1)}$  de unión estimada en el paso de iteración anterior y los estados de conmutación como entradas para derivar las pérdidas de potencia asociadas con cada componente semiconductor, como se describió anteriormente con respecto a los pasos 203 y 204 de la figura 2. Las pérdidas  $P_P$  de

5 potencia totales estimadas se proporcionan al bloque de estimación de temperatura de unión 304. Asimismo, el bloque de estimación de temperatura de unión 304 recibe el modelo térmico 303 que se basa en los parámetros  $r_i$  y  $\tau_i$  del modelo, como se describió en detalle anteriormente.

10 La temperatura de unión actual se estima en el bloque 304 basándose en la temperatura de unión del paso anterior, la pérdida  $P_P$  de potencia total, el modelo térmico y la temperatura  $T_A$  del líquido de enfriamiento. Como resultado 305, se proporciona una temperatura de unión actualizada. A continuación, se aumenta el índice de iteración  $k$  (bloque 306) y se repite la estimación.

15 Debe quedar claro que los bloques 301 a 305 se pueden implementar en el controlador 130 del convertidor o en cualquier otro controlador adecuado de la turbina eólica. Además, debe quedar claro que los bloques 301 a 306 pueden implementar el método de estimación de la temperatura de unión descrito anteriormente con respecto a la figura 2.

20 La descripción anterior se ha dado con respecto a la estimación de la temperatura de unión de un componente semiconductor en una etapa del lado del generador del convertidor 110. El método descrito es particularmente beneficioso para una estimación de este tipo, ya que las corrientes del rotor pueden alcanzar valores altos que ya no pueden medirse con los sensores de corriente asociados. Las presentes realizaciones superan esta deficiencia, ya que permiten la estimación de las corrientes respectivas incluso cuando están fuera de rango. Evidentemente, el método y el sistema también se pueden aplicar para estimar la temperatura de unión de uno o más componentes semiconductores de la etapa de conversión del lado de la red del convertidor 110.

25 Además, el método y el sistema descritos emplean un proceso iterativo que es lo suficientemente rápido como para simplificar la determinación de la temperatura de unión y que permite una estimación en tiempo real de la temperatura de unión. La expresión tiempo real se refiere al hecho de que se estima la temperatura de unión real, repitiéndose la estimación en intervalos de tiempo cortos como se especifica en la presente memoria. De este modo, el método y el sistema descritos pueden reaccionar rápidamente ante los transitorios que se producen en la red eléctrica, lo cuales conllevan altas sobrecorrientes en el rotor del generador que pueden dañar el convertidor 110. El esfuerzo computacional se puede mantener relativamente bajo y se pueden usar sensores de corriente estándar para detectar las corrientes en la entrada al convertidor 110.

## REIVINDICACIONES

1. Un método para proteger un convertidor (110) de una turbina eólica, en donde el convertidor (110) se acopla a un generador (20) de la turbina eólica para realizar una conversión de la potencia eléctrica producida por el generador, comprendiendo el convertidor (110) una pluralidad de componentes semiconductores (150) que están operativos para proporcionar la conversión de la potencia eléctrica, en donde el método comprende:

realizar un paso de estimación de una temperatura ( $T_j$ ) de unión real de al menos uno de dichos componentes semiconductores (150) mediante

-la determinación de una corriente ( $I_1, I_2, I_3$ ) en el convertidor (110) asociada con la pérdida de potencia en uno o más de los componentes semiconductores (150);  
-la estimación de la pérdida ( $P_P$ ) de potencia asociada con el uno o más componentes semiconductores (150) basándose en la corriente determinada y en un estado (com) del uno o más componentes semiconductores; y  
-el uso de un modelo térmico (600, 700) del uno o más componentes semiconductores (150) para estimar la temperatura ( $T_j$ ) de unión real de al menos uno del uno o más componentes semiconductores (150) basándose en la pérdida ( $P_P$ ) de potencia estimada;

caracterizado por el paso de estimación de la temperatura ( $T_j$ ) de unión real que se realiza repetidamente, en donde un período de tiempo correspondiente a un tamaño de paso entre pasos posteriores de estimación de la temperatura ( $T_j$ ) de unión real es inferior a 1/10 del período de un voltaje de CA emitido por el convertidor (110); y si la temperatura ( $T_j$ ) de unión real estimada supera un umbral de temperatura predeterminado, disparar un mecanismo de protección que está configurado para reducir la temperatura ( $T_j$ ) de unión real del al menos un componente semiconductor (150), en donde la determinación de una corriente en el convertidor comprende determinar una corriente ( $I_1, I_2, I_3$ ) de funcionamiento del convertidor que es indicativa de la corriente a través del al menos un componente semiconductor, en donde la corriente de funcionamiento del convertidor se mide si la corriente de funcionamiento se encuentra dentro de un rango de trabajo de un sensor (141, 142, 143) de corriente respectivo y en donde la corriente de funcionamiento se estima basándose en los parámetros funcionales del convertidor (110) si dicha corriente de funcionamiento se encuentra fuera del rango de trabajo de dicho sensor (141, 142, 143) de corriente.

2. El método según la reivindicación 1, en donde el convertidor (110) es un convertidor trifásico que tiene una etapa (112) de conversión del lado de la red y una etapa (111) de conversión del lado del generador, en donde si la corriente ( $I_1, I_2, I_3$ ) de funcionamiento para una fase de la etapa (111) de conversión del lado del generador se encuentra fuera del rango de trabajo del sensor (141, 142, 143) de corriente respectivo, dicha corriente de funcionamiento se estima a partir de la corriente de funcionamiento para las otras dos fases de la etapa (111) de conversión del lado del generador, y/o en donde si las corrientes de funcionamiento para dos fases de la etapa (111) de conversión del lado del generador se encuentran fuera del rango de trabajo de los sensores (141, 142, 143) de corriente respectivos, la corriente de funcionamiento para al menos una de las dos fases se estima basándose en una corriente en un enlace (113) de CC del convertidor (110).

3. El método según la reivindicación 2, en donde, si las corrientes de funcionamiento para dos fases de la etapa de conversión del lado del generador se encuentran fuera del rango de trabajo de los sensores (141, 142, 143) de corriente respectivos, la corriente de funcionamiento se estima para la fase para la que la corriente de funcionamiento es la mayor de las tres fases, en donde la estimación de dicha corriente de funcionamiento mayor basándose en una corriente en el enlace (113) de CC del convertidor (110) incluye determinar una corriente hacia un condensador (161) de enlace de CC del enlace de CC, determinar una corriente a través de una etapa (162) de troceo del convertidor y determinar una corriente hacia la etapa (112) de conversión del lado de la red.

4. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el tamaño de paso entre pasos posteriores de estimación de la temperatura de unión real corresponde a un período de tiempo inferior a 1 milisegundo, preferiblemente inferior a 500 microsegundos, más preferiblemente inferior a 200 microsegundos.

5. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la pérdida ( $P_P$ ) de potencia asociada con el componente semiconductor (150) depende de la temperatura ( $T_j$ ) de unión real del componente semiconductor, en donde cuando se estima la pérdida de potencia asociada con el uno o más componentes semiconductores, se emplea una temperatura ( $T_{j(k-1)}$ ) de unión determinada en un paso anterior de estimación de la temperatura de unión real.

6. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde estimar la pérdida de potencia asociada con el uno o más componentes semiconductores comprende determinar uno o más estados (com) de funcionamiento del uno o más componentes semiconductores (150) durante dicho período de tiempo y determinar la pérdida de potencia a partir de la pérdida de potencia asociada con cada uno del uno o más estados de funcionamiento del uno o más componentes semiconductores (150) durante el período de tiempo.
- 5
7. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el al menos un componente semiconductor (150) comprende o es un conmutador semiconductor (151), en particular un IGBT, en donde las pérdidas de potencia incluyen al menos pérdidas ( $P_{com}$ ) de conmutación y pérdidas ( $P_{cond}$ ) de conducción del conmutador semiconductor (151) durante el período de tiempo.
- 10
8. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el modelo térmico es un modelo de Foster o un modelo de Cauer.
- 15
9. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el modelo térmico considera una temperatura ( $T_A$ ) de un medio ambiente al que está expuesto el componente semiconductor, comprendiendo además el método la obtención de la temperatura del medio ambiente, en donde el medio ambiente es preferiblemente un fluido de enfriamiento proporcionado para enfriar el componente semiconductor (150).
- 20
10. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la determinación de la corriente ( $I_1, I_2, I_3$ ) comprende la determinación de la corriente a través de cada uno del uno o más componentes semiconductores, en donde la pérdida ( $P_P$ ) de potencia se estima individualmente para cada uno del uno o más componentes semiconductores (150) basándose en la corriente a través del componente semiconductor (150) respectivo y en el estado de conmutación del componente semiconductor respectivo, en donde la temperatura ( $T_j$ ) de unión real se estima para cada uno del uno o más componentes semiconductores basándose en la pérdida ( $P_P$ ) de potencia estimada para el componente semiconductor (150) respectivo.
- 25
- 30
11. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el disparo de un mecanismo de protección comprende al menos uno de entre abrir uno o más disyuntores asociados con el funcionamiento del convertidor (110), activar una etapa (170) de palanca acoplada al convertidor (110), en particular a una etapa (111) de conversión del lado del generador del convertidor, y retrasar la conmutación de los componentes semiconductores (150) del convertidor.
- 35
12. Un sistema de protección para proteger un convertidor de una turbina eólica, en donde el convertidor (110) está acoplado a un generador (20) de la turbina eólica para realizar la conversión de la potencia eléctrica producida por el generador (20), comprendiendo el convertidor (110) una pluralidad de componentes semiconductores (150) que están operativos para proporcionar la conversión de la potencia eléctrica, en donde el sistema (100) de protección comprende un controlador (130), en donde el controlador (130) está configurado para realizar los pasos de:
- 40
- realizar un paso de estimación de una temperatura ( $T_j$ ) de unión real de al menos uno de dichos componentes semiconductores (150) mediante
- 45
- la determinación de una corriente ( $I_1, I_2, I_3$ ) en el convertidor (110) asociada con la pérdida de potencia en uno o más de la pluralidad de componentes semiconductores (150);  
- la estimación de la pérdida ( $P_P$ ) de potencia asociada con el uno o más componentes semiconductores (150) basándose en la corriente determinada y en un estado (com) del uno o más componentes semiconductores (150); y  
- el uso de un modelo térmico (600, 700) del uno o más componentes semiconductores (150) para estimar la temperatura ( $T_j$ ) de unión real de al menos uno del uno o más componentes semiconductores (150) basándose en la pérdida ( $P_P$ ) de potencia estimada;
- 50
- 55
- caracterizado porque** el paso de estimación de la temperatura ( $T_j$ ) de unión real se realiza repetidamente, en donde un período de tiempo correspondiente a un tamaño de paso entre pasos posteriores de estimación de la temperatura de unión real es inferior a 1/10 del período de un voltaje de CA emitido por el convertidor (110); y
- 60
- si la temperatura ( $T_j$ ) de unión real estimada supera un umbral de temperatura predeterminado, disparar un mecanismo de protección que está configurado para reducir la temperatura ( $T_j$ ) de unión real del componente semiconductor (150), y
- 65
- en donde la determinación de una corriente en el convertidor comprende determinar una corriente ( $I_1, I_2, I_3$ ) de funcionamiento del convertidor que es indicativa de la corriente a través del al menos un componente semiconductor, en donde la corriente de funcionamiento del convertidor se mide si la corriente de funcionamiento se encuentra dentro de un rango de trabajo de un sensor (141, 142),

143) de corriente respectivo y en donde la corriente de funcionamiento se estima basándose en los parámetros funcionales del convertidor (110) si dicha corriente de funcionamiento se encuentra fuera del rango de trabajo de dicho sensor (141, 142, 143) de corriente.

- 5      13.     El sistema de protección según la reivindicación 12, en donde el sistema (100) de protección comprende el convertidor (110), en donde el convertidor es un convertidor trifásico que está preferiblemente acoplado a un rotor (21) del generador (20), en donde el sistema (100) de protección comprende además tres sensores (141, 142, 143) de corriente acoplados a la entrada del convertidor (110) en el lado del generador del convertidor, teniendo cada sensor (141, 142, 143) de corriente un rango de trabajo predeterminado, en donde la determinación de una corriente asociada con la pérdida de potencia en el componente semiconductor (150) comprende medir la corriente para al menos una fase del convertidor usando el sensor (141, 142, 143) de corriente respectivo.
- 10     14.     Un programa informático para proteger un convertidor de una turbina eólica, en donde el programa informático comprende instrucciones de control que, cuando las ejecuta un procesador (131) de datos de un controlador (130) del convertidor (110), hacen que el procesador (131) de datos realice el método de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11.
- 15

Figura 1

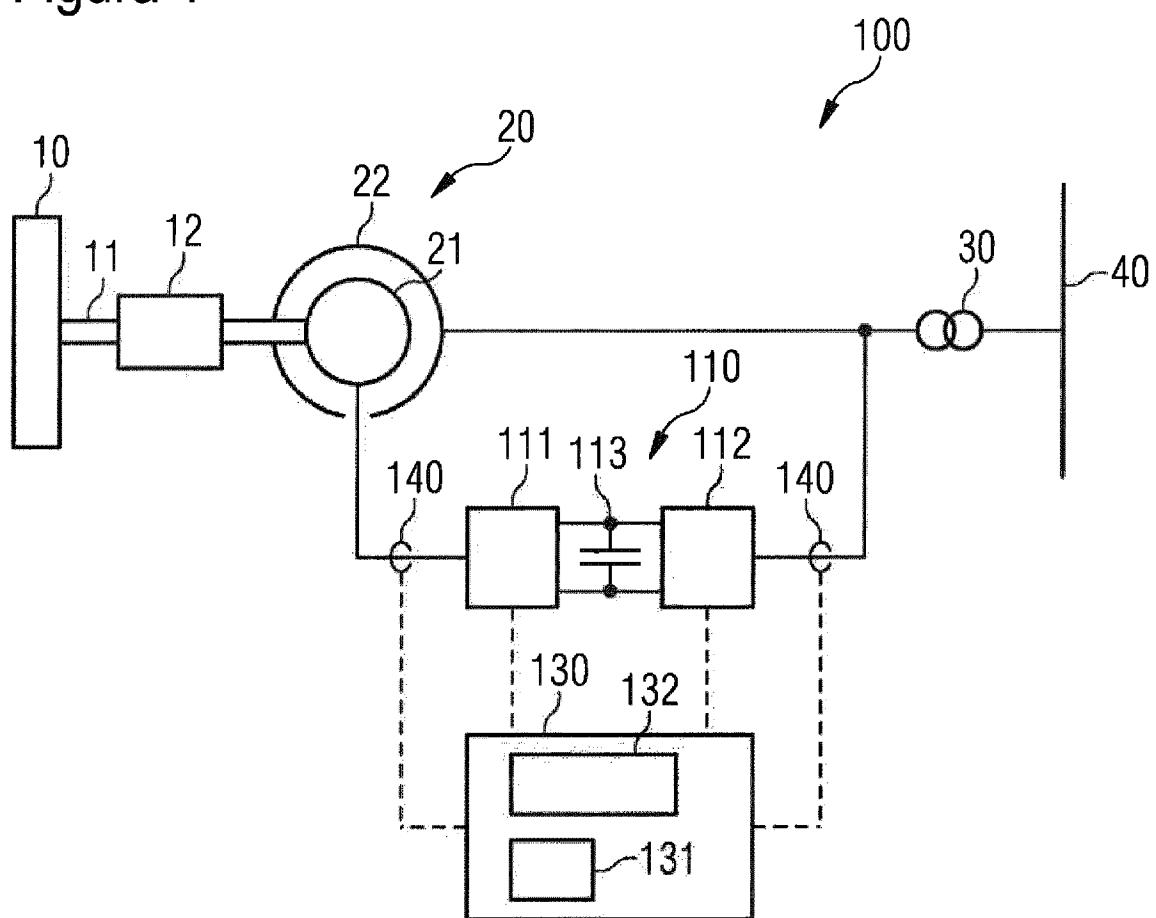


Figura 2

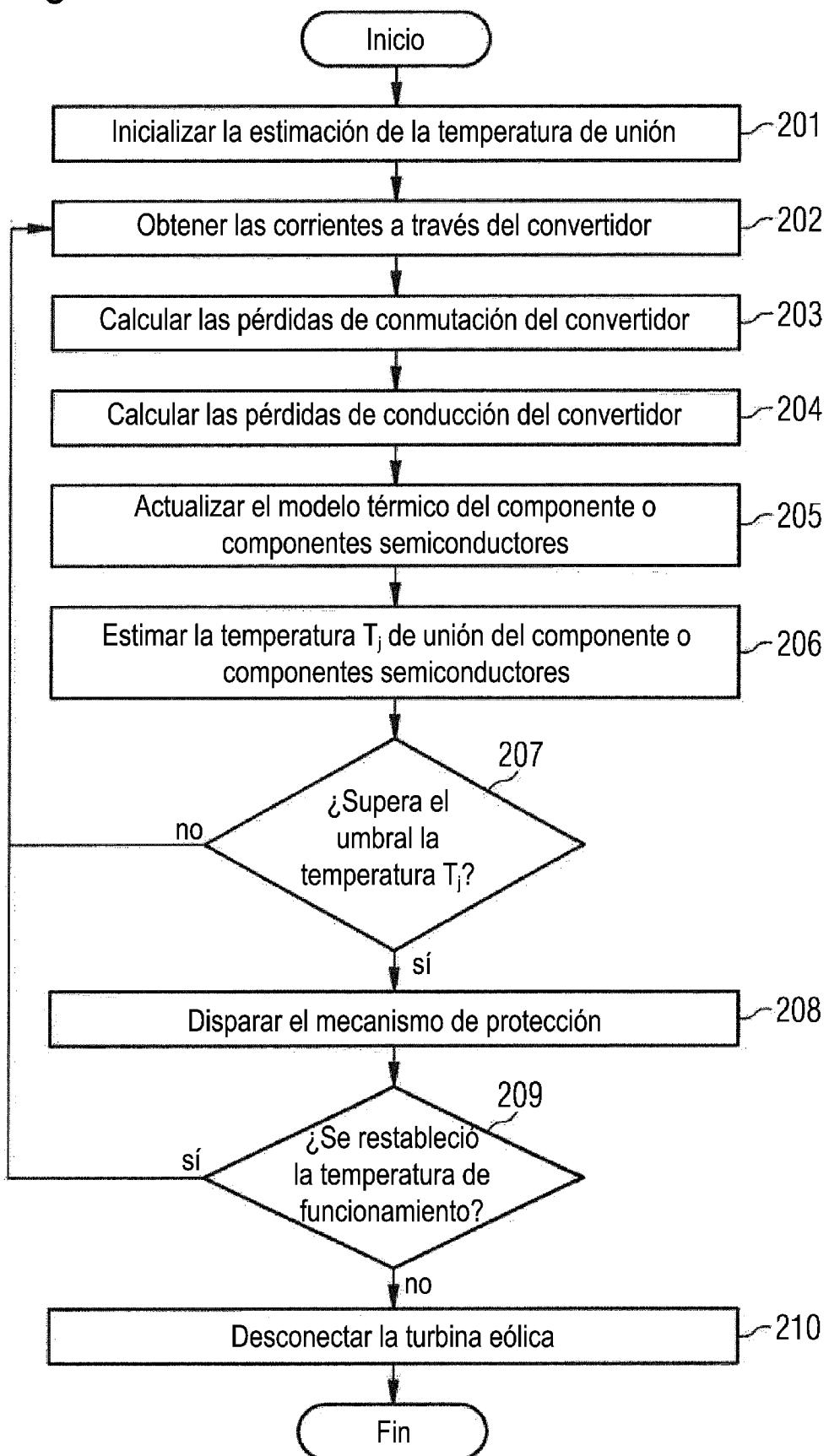


Figura 3

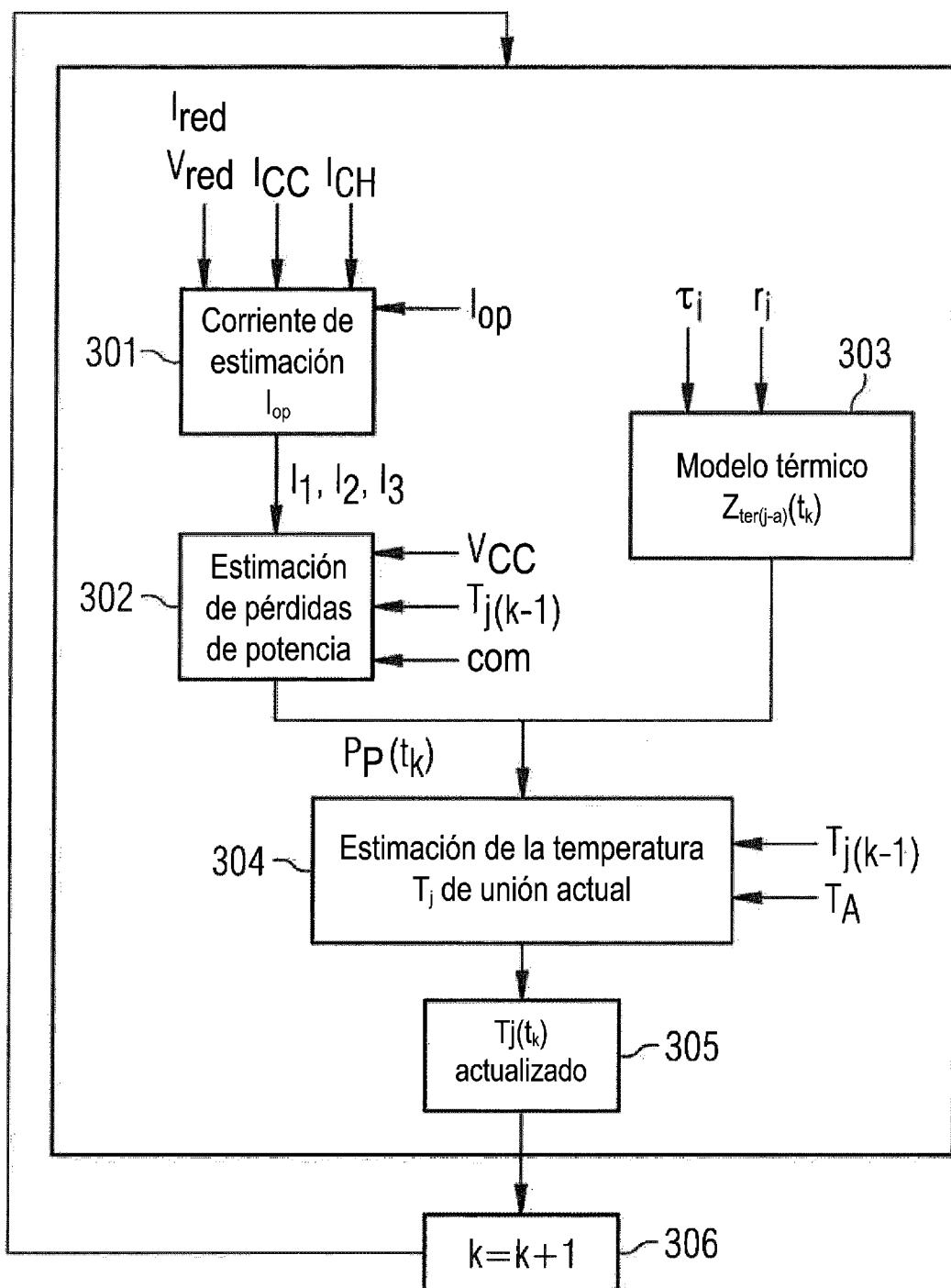


Figura 4

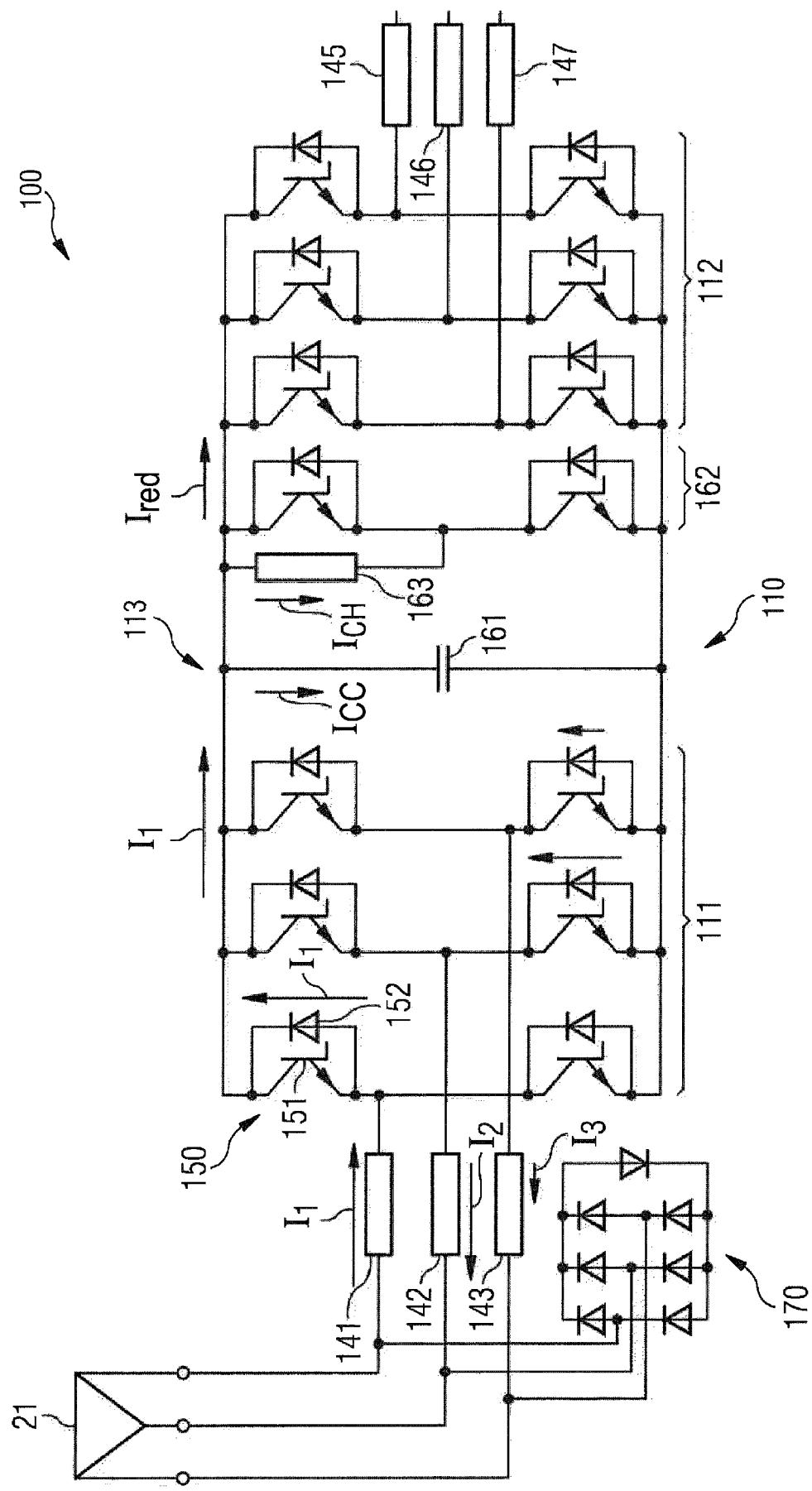


Figura 5

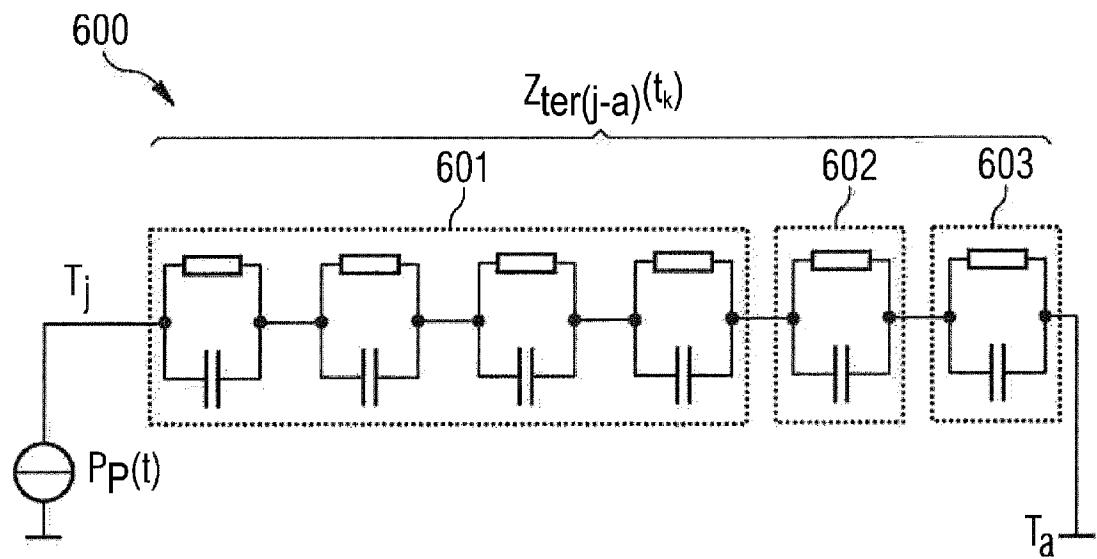


Figura 6

