

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



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

51 Int. Cl.:

H02P 29/68

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

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

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

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

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

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

30 Prioridad:

18.12.2019 EP 19380036

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

20.05.2025

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

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

74 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 respectivo para proporcionar protección a un convertidor de una turbina eólica.

Antecedentes

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 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 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.

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 conmutadores 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 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 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.

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 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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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 μ s (microsegundos), más preferiblemente, inferior a 200 μ s. Por ejemplo, el período de tiempo puede estar en un intervalo entre 20 y 200 μ s, en particular entre 50 y 150 μ s. Por ejemplo, el período de tiempo puede ser de aproximadamente 100 μ s, tal como 80, 90, 100, 110 o 120 μ 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.

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 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.

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, 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.

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. 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.

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 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 un método simple y eficiente para estimar las pérdidas de conmutación.

Similarmemente, 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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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).

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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 estátor 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 estátor 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.

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.

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.

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.

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).

Como se muestra en la figura 4, la corriente es experimentada por uno o más componentes semiconductores conectados en el tramo respectivo del convertidor 110. La I_1 la experimenta, por ejemplo, el conmutador semiconductor 151, en particular, un IGBT, o el diodo 152, dependiendo del estado de conmutación/estado de funcionamiento del convertidor 110. Como se muestra para el estado de funcionamiento de la figura 4, la corriente I_1 está presente, por lo tanto, en el enlace 113 de CC. El valor de I_1 se obtiene ahora considerando las corrientes en el enlace de CC.

La corriente I_{CC} en el condensador 161 de enlace de CC se deriva basándose en el valor fijo de la capacitancia, que es conocido, y el voltaje de enlace de CC. Se puede proporcionar un sensor respectivo para permitir que el controlador 130 mida continuamente el voltaje del enlace de CC. Basándose en el voltaje del enlace de CC y del cambio de voltaje, se puede derivar la corriente que entra en el condensador 161 de enlace de CC.

La corriente I_{CH} a través de la etapa de troceo se deriva basándose en el valor fijo de la resistencia 163 de troceo, que es conocido, el voltaje medido de enlace de CC, y además basándose en el estado ENCENDIDO o APAGADO de la etapa 162 de troceo, que está controlado por el controlador 130 y, por lo tanto, también es conocido.

La corriente I_{red} que fluye hacia dentro o hacia fuera a través de la etapa 112 de conversión del lado de la red (que funciona como inversor) se conoce a partir de la potencia activa proporcionada a la red. La potencia activa se conoce a partir de las mediciones de la corriente y el voltaje de la red, por ejemplo, utilizando los sensores 145, 146 y 147. En particular, se miden el voltaje y la corriente CA en la salida del convertidor 110 y se usan para derivar I_{red} .

A partir de la suma de estas tres corrientes, se determina la corriente I_1 que está fuera de rango. En particular, se promedian las tres corrientes determinadas I_{CC} , I_{CH} e I_{red} y se suman para obtener I_1 , es decir, la mayor de las dos corrientes fuera de rango. Una vez que se conoce I_1 , se puede obtener la segunda corriente I_2 que está fuera de rango, ya que la suma de las tres corrientes I_1 , I_2 e I_3 es igual a cero.

Aunque dos de las corrientes del rotor están fuera de rango de los respectivos sensores 141, 142 y 143 de corriente, el presente método permite una estimación precisa de las tres corrientes al completo. En particular, durante la aparición de transitorios en la red eléctrica, que pueden deberse a una falla que se produce en la red y que provocan sobrecorrientes en el rotor 21, las corrientes experimentadas por el convertidor 110 se pueden obtener con una precisión relativamente alta. Esto no es posible en los métodos convencionales en los que una turbina eólica simplemente se desactiva si las corrientes están fuera de rango de los sensores de corriente respectivos.

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:

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

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

Ecuación (1)

en donde, para la primera ecuación relativa a un IGBT (transistor T), I_{en} designa la corriente que pasa por el IGBT; $V_{CE0(25\text{ °C})}$ 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, $r_{CE(25\text{ °C})}$ 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; K_i y K_v son exponentes de la dependencia de corriente y voltaje de las pérdidas de conmutación, respectivamente, que se obtienen de la hoja de datos ($K_i \sim 1$ y $K_v \sim 1,3 \dots 1,4$); 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.

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.

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.

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 enfría de modo que la temperatura ambiente T_a corresponda a una temperatura $T_{\text{enfriamiento}}$ de un medio de enfriamiento, en particular de un líquido tal como el agua.

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.

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 $Z_{\text{ter}(j-a)}(t_k)$ 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)

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

$\tau_i = r_i \cdot c_i$ 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 τ_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
τ_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 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)

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

Debe quedar claro que la ecuación se puede aplicar consecuentemente a una situación en la que el modelo térmico incluye un disipador 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.

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

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

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

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

en donde P indica la pérdida total de potencia y r , τ 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.

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 disipador de calor. En 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 disipador 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 disipador de calor. Tanto el diodo como el IGBT están conectados a través de la grasa térmica respectiva al disipador de calor. En el modelo se consideran las pérdidas P_{P_IGBT} y P_{P_DIODO} de potencia del IGBT y del DIODO.

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 subestima. 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 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 $T_{\text{máx}}=140$ °C. El umbral de temperatura se puede encontrar dentro de un rango del 60 % al 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 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 μs a 200 μs . Por ejemplo, el período de tiempo puede ser de aproximadamente 80, 90, 100, 110 o 120 μs . Una realización preferida emplea un período de tiempo de 100 μs .

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 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 desee para permitir que uno o más de los componentes semiconductores se enfíen. 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 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.

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 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 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 202-206) 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 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 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 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 T_i del modelo, como se describió en detalle anteriormente.

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.

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.

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.

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 de los 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.
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.
8. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el modelo térmico es un modelo de Foster o un modelo de Cauer.
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).
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.
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.
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:
 - 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 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;
 - 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
 - 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
 - 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
10 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.
- 15 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.

Figura 1

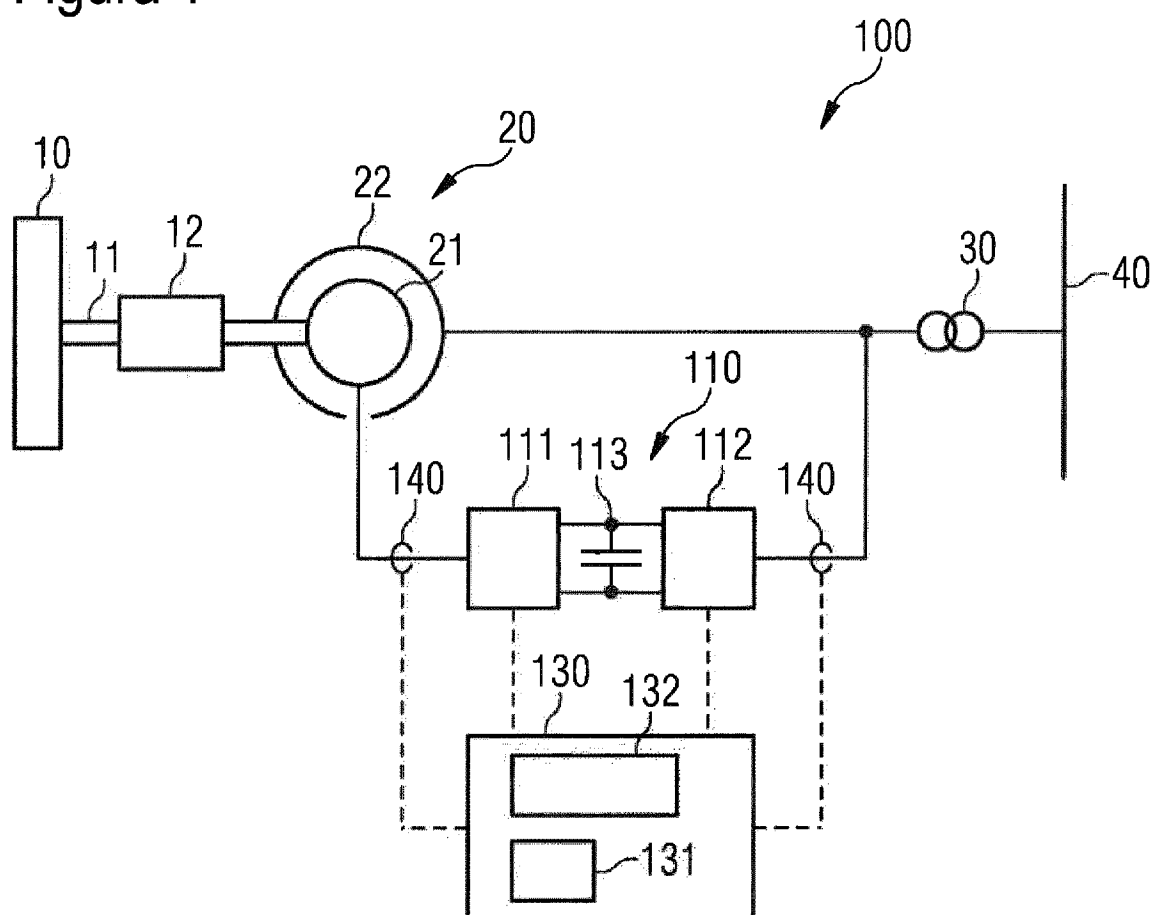


Figura 2

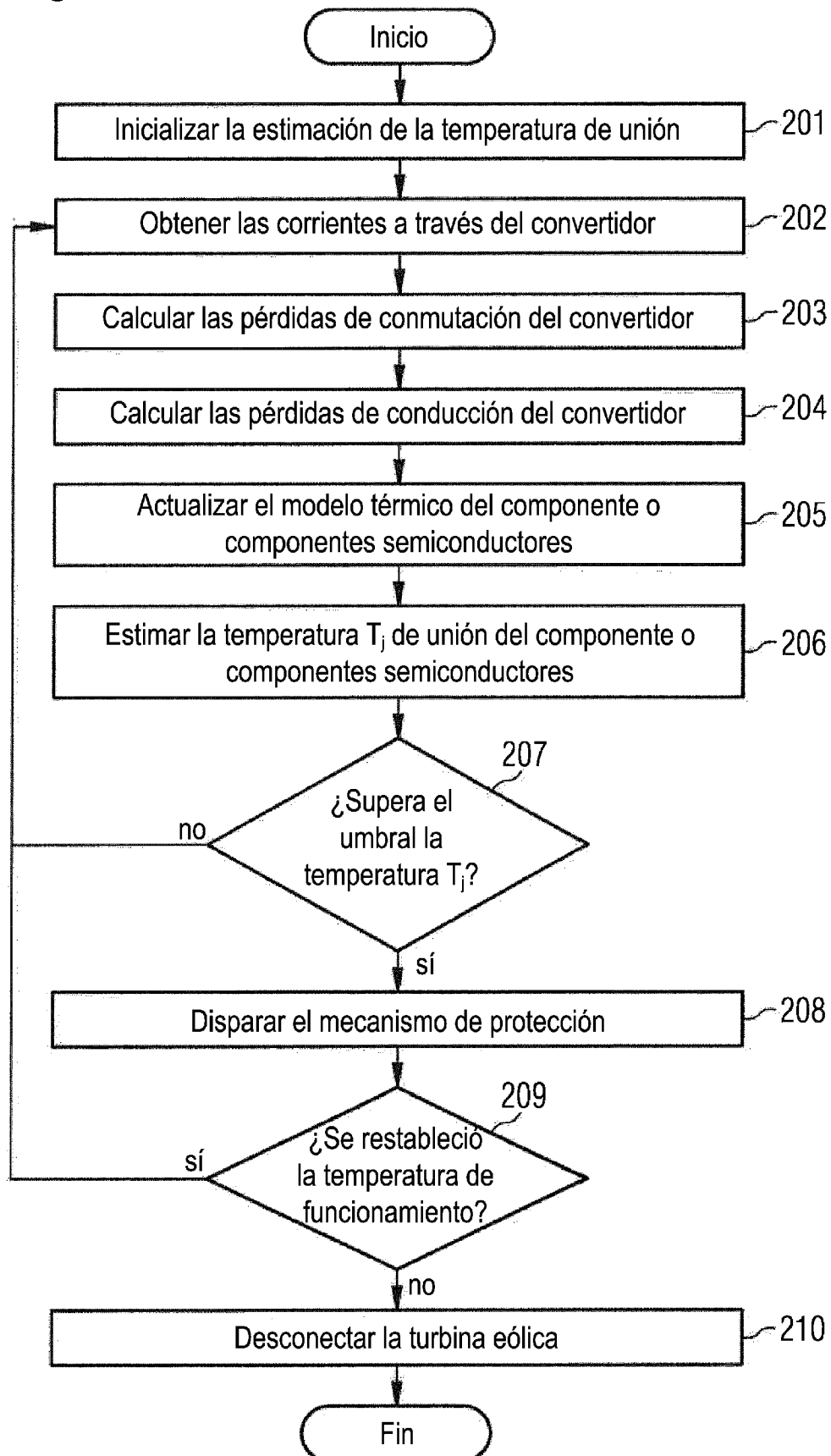


Figura 3

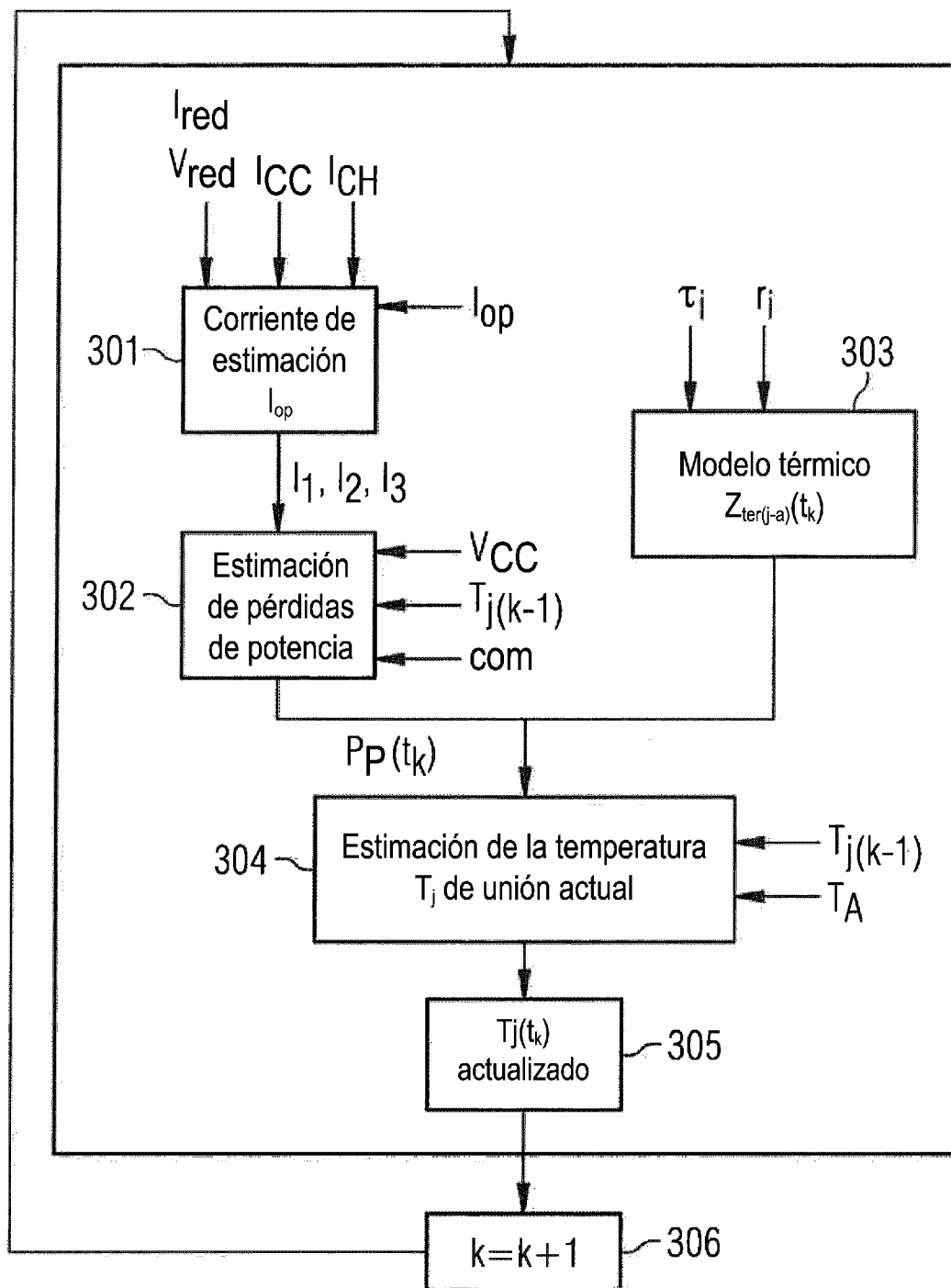


Figura 4

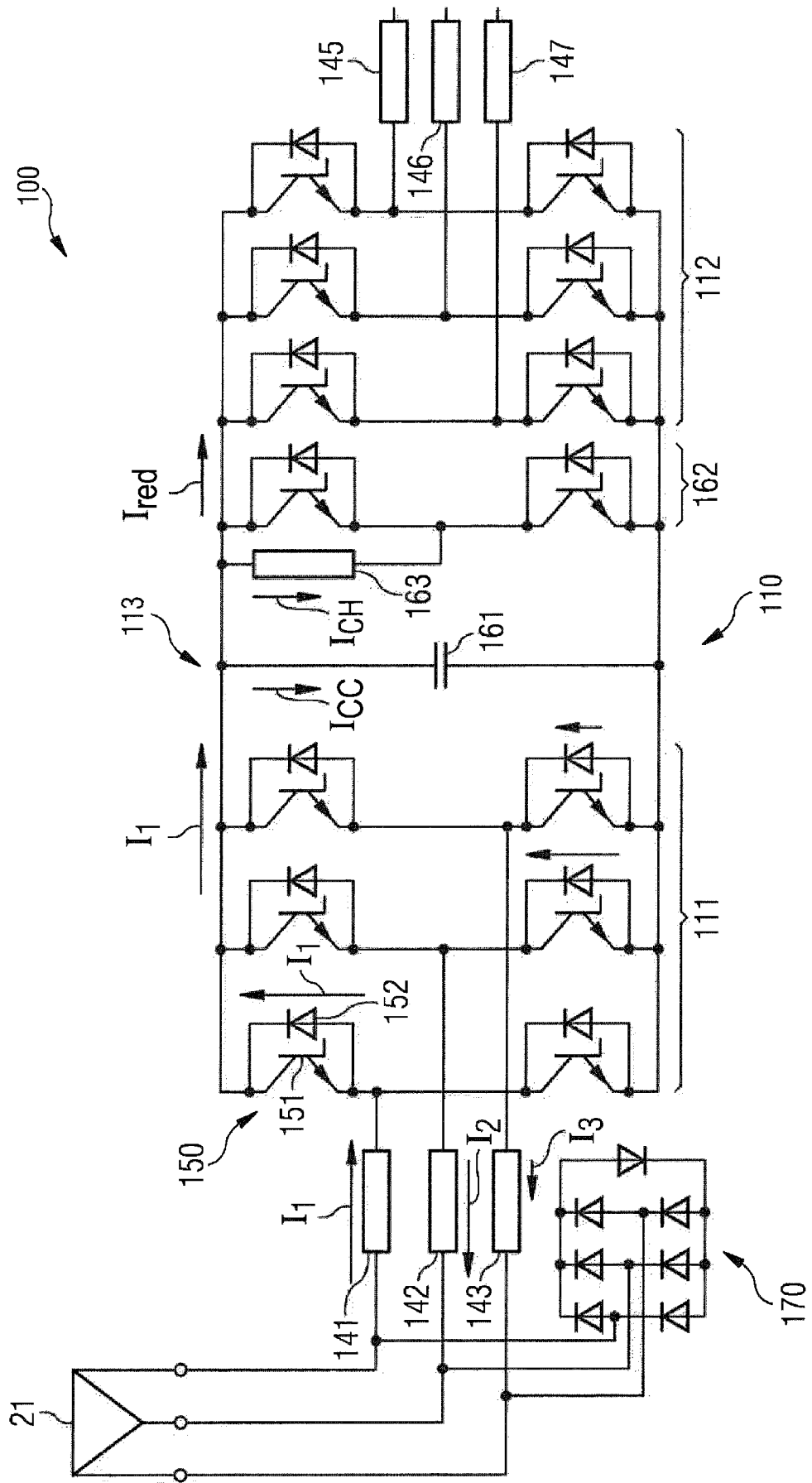


Figura 5

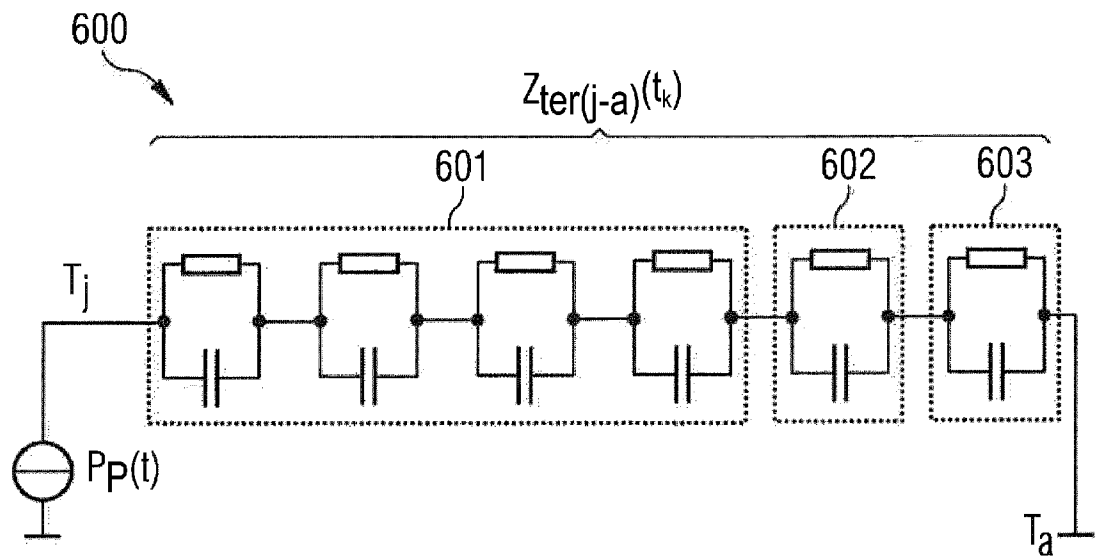


Figura 6

