

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 962 601**

51 Int. Cl.:

H02M 1/32 (2007.01)

H02M 7/483 (2007.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **06.06.2019** **PCT/EP2019/064860**

87 Fecha y número de publicación internacional: **10.12.2020** **WO20244768**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **06.06.2019** **E 19733962 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.08.2023** **EP 3959806**

54 Título: **Convertidor y procedimiento para operar el mismo**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la
traducción de la patente:
20.03.2024

73 Titular/es:

SIEMENS ENERGY GLOBAL GMBH & CO. KG
(100.0%)
Otto-Hahn-Ring 6
81739 München, DE

72 Inventor/es:

DELZENNE, MAXIME y
EBNER, GÜNTHER

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 962 601 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

Convertidor y procedimiento para operar el mismo

La presente invención hace referencia a un convertidor y a un procedimiento para operar el mismo.

En el documento publicado "Modular Multilevel Converter: An universal concept for HVDC-Networks and extended DC-Bus-Applications" (R. Marquardt, 2010 International Power Electronics Conference, páginas 502 a 507, 978-1-4244-5393-1/10, 2010 IEEE) se describe un convertidor eléctrico en forma de un convertidor multinivel que presenta un lado de tensión alterna al menos bifásico con al menos dos conexiones de tensión alterna, un lado de tensión continua y al menos dos circuitos en serie conectados de forma paralela, donde cada uno de los circuitos en serie respectivamente forma un ramal del convertidor, del convertidor, y está asociado a una de las conexiones de tensión alterna del lado de tensión alterna del convertidor.

Un convertidor multinivel con submódulos de otra clase se conoce por el documento publicado internacional WO 2015/036149 A1.

Por el documento "Indirect Thermal Control for Improved Reliability of Modular Multilevel Converter by Utilizing Circulating Current" de M. K. Bakhshizadeh et al, 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), IEEE, del 15 de marzo de 2015, páginas 2167-2173, XP032775226, se conoce un procedimiento de regulación que considera corrientes de circuito que circulan en un convertidor multinivel. En este caso se limita la amplitud de los ciclos de temperatura, lo cual mejora la seguridad frente a fallos del convertidor multinivel.

En la primera publicación de la solicitud CN 104 934 989 A se describe un compensador de potencia reactiva en una topología multinivel modular, donde igualmente se considera la influencia de corrientes de circuito.

El objeto de la presente invención consiste en proporcionar un procedimiento para operar un convertidor que ayude a evitar una sobrecarga térmica o un calentamiento excesivo del convertidor, de manera sencilla.

Dicho objeto, según la invención, se soluciona mediante un procedimiento y un convertidor con las características según la reivindicación 1 relativa al procedimiento y la reivindicación 14 relativa a la disposición. En las reivindicaciones dependientes se indican configuraciones ventajosas del procedimiento según la invención.

Conforme a ello, según la invención se prevé que un valor de carga que describe la carga térmica del convertidor se calcule en función de al menos tres valores de corriente, a saber, un valor de corriente de potencia activa que indica el componente de corriente de potencia activa de una corriente de fase que circula por una de las conexiones de tensión alterna, un valor de corriente de potencia reactiva que indica el componente de corriente de potencia reactiva de la corriente de fase que circula por la conexión de tensión alterna antes mencionada, y un valor de corriente de circuito que indica la magnitud de la corriente de circuito o de las corrientes de circuito que circulan entre los circuitos en serie, y que el control del convertidor tenga lugar al menos considerando también ese valor de carga.

Una ventaja esencial del procedimiento según la invención se basa en la determinación del valor de carga, que puede realizarse de manera muy sencilla, rápida y con un esfuerzo de cálculo reducido en base a las magnitudes o valores de medición empleados según la invención, pero que sin embargo permite realizar afirmaciones muy fiables sobre la carga térmica efectiva del convertidor. Al utilizar el valor de carga es posible un control del convertidor muy eficiente, en cuanto a los aspectos térmicos.

El valor de corriente de circuito preferentemente se determina determinando para cada uno de los circuitos en serie respectivamente la corriente de circuito que circula allí, por tanto, relacionada con el circuito en serie, determinando la corriente de circuito mayor, conforme al valor absoluto, relacionada con el circuito en serie, y considerando el valor absoluto o la amplitud de esa corriente de circuito mayor, relacionada con el circuito en serie, como el valor de corriente de circuito.

Las corrientes de circuito relacionadas con el circuito en serie preferentemente se calculan según

$$I_{ki}(t) = (I_{pi}(t) + I_{qi}(t))/2 + I_{dc}(t)/n - I_{ai}(t)$$

donde $I_{ki}(t)$ representa la corriente de circuito relacionada con el circuito en serie, que depende del tiempo t , en el n -ésimo circuito en serie, así como en el n -ésimo ramal del convertidor, $I_{pi}(t)$ representa la corriente de potencia activa que depende del tiempo t , que circula por la conexión de tensión alterna conectada al n -ésimo circuito en serie, así como al n -ésimo ramal del convertidor, $I_{qi}(t)$ representa la corriente de potencia reactiva que depende del tiempo t , que circula por la conexión de tensión alterna conectada al n -ésimo circuito en serie, así como al n -ésimo ramal del convertidor, $I_{dc}(t)$ representa la corriente continua que depende del tiempo t y que circula en el lado de tensión

continua, $I_{ai}(t)$ representa la corriente del ramal que depende del tiempo t , entre la conexión de tensión continua positiva del lado de tensión continua y la conexión de tensión alterna conectada al n -ésimo ramal del convertidor, y n representa el número de los circuitos en serie, así como ramales del convertidor.

- 5 Si se mide la corriente del ramal $I_{ai}(t)$ que depende del tiempo t , entre la conexión de tensión alterna conectada en el n -ésimo ramal del convertidor y la conexión de tensión continua negativa del lado de tensión continua, entonces las corrientes de circuito relacionadas con el circuito en serie preferentemente se calculan según

$$I_{ki}(t) = -(I_{pi}(t) + I_{qi}(t))/2 + I_{dc}(t)/n - I_{ai}(t)$$

El control del convertidor preferentemente tiene lugar de manera que el valor de carga sea inferior a un valor límite de carga predeterminado o que al menos no lo supere.

- 10 Según la invención, el valor de carga que varía en el tiempo se determina según

$$I_{th} = \sqrt{\frac{1}{a} \cdot (I_p^2 + I_q^2) + (k_1 \cdot I_p \cdot f(\frac{V_{conv}}{V_{dc}}) + k_2 \cdot I_k)}$$

- 15 donde I_p representa el valor de corriente de potencia activa antes mencionado y se forma mediante el valor absoluto o la amplitud del componente de corriente de potencia activa de la corriente de fase que circula por la conexión de tensión alterna, I_q representa el valor de corriente de potencia reactiva antes mencionado y se forma mediante el valor absoluto o la amplitud del componente de corriente de potencia reactiva de la corriente de fase que circula por la conexión de tensión alterna, V_{conv} representa el valor absoluto o la amplitud de la tensión en la conexión de tensión alterna, V_{dc} representa el valor absoluto o la amplitud de la tensión continua en el lado de tensión continua, $f(\frac{V_{conv}}{V_{dc}})$ representa una función predeterminada de un cociente del valor absoluto o de la amplitud de la tensión en la conexión de tensión alterna y de la tensión continua en el lado de tensión continua, I_k representa el valor de corriente de circuito y se forma mediante el valor absoluto o la amplitud de la mayor corriente de circuito relacionada con el circuito en serie, y a , k_1 y k_2 son constantes predeterminadas.
- 20

El valor límite de carga, de manera ventajosa, puede determinarse utilizando una integral referida al valor de carga, en particular según

$$I_{th\max} = f(\int I_{th}(t)^2 dt)$$

- 25 donde $I_{th}(t)$ representa el valor de carga en el tiempo t y f representa una función predeterminada de la integral formada mediante el cuadrado del valor de carga.

También es ventajoso que el valor límite de carga se reduzca cuando la temperatura del convertidor alcance o supere una temperatura máxima predeterminada.

- 30 En una primera variante del procedimiento considerada como especialmente ventajosa se prevé que el control del convertidor, en el caso de que el valor de carga alcance o supere el valor límite de carga predeterminado, incorpore primero la reducción objetivo de la corriente de potencia activa.

- En la primera variante del procedimiento se considera especialmente ventajoso que el control del convertidor, en el caso de que el valor de carga alcance o supere el valor límite de carga predeterminado, tenga lugar o tenga lugar primero de manera que el valor de corriente de potencia activa no supere un valor de corriente máximo de potencia activa predeterminado, donde el valor de corriente máximo de potencia activa se determina mediante la siguiente ecuación condicional:
- 35

$$I_{th\max} = \sqrt{\frac{1}{a} \cdot (I_{p\max}^2 + I_q^2) + (k_1 \cdot I_{p\max} \cdot f(\frac{V_{conv}}{V_{dc}}) + k_2 \cdot I_k)}$$

donde $I_{th\max}$ representa el valor límite de carga predeterminado e $I_{p\max}$ representa el valor de corriente máximo de potencia activa.

De manera alternativa o adicional, el valor de corriente máximo de potencia activa puede determinarse según

$$I_{p \max} = \sqrt{\frac{2 I_{th \max}^2 - I_q^2}{1 + 2(k_1 \cdot V_{conv} / V_{dc})^2}} - \frac{2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot |I_k| \cdot (V_{conv} / V_{dc})}{1 + 2(k_1 \cdot V_{conv} / V_{dc})^2}$$

donde $I_{th \max}$ representa el valor límite de carga predeterminado e $I_{p \max}$ representa el valor de corriente máximo de potencia activa.

- 5 En el caso de que en el marco del control I_{th} aún alcance o supere el valor límite de carga predeterminado $I_{th \max}$, aunque el valor de corriente máximo de potencia activa $I_{p \max}$ y, con ello, el valor de corriente de potencia activa I_p ya hayan sido reducidos a cero o hayan llegado a cero, entonces a continuación preferentemente el valor de corriente máximo de potencia reactiva $I_{q \max}$ y, con ello, el valor de corriente de potencia reactiva I_q , se reduce según

$$I_{q \max} = \sqrt{2 \cdot I_{th \max}^2 - 2 \cdot (k_2 \cdot I_k)^2}$$

- 10 En una segunda variante del procedimiento considerada como especialmente ventajosa se prevé que el control del convertidor, en el caso de que el valor de carga alcance o supere el valor límite de carga predeterminado, incorpore primero la reducción objetivo de la corriente de potencia reactiva.

- 15 En la segunda variante del procedimiento se considera especialmente ventajoso que el control del convertidor tenga lugar o tenga lugar primero de manera que el valor de corriente de potencia reactiva sea inferior a un valor de corriente máximo de potencia reactiva que depende del valor carga o que al menos no lo supere, donde el valor de corriente máximo de potencia reactiva se determina mediante la siguiente ecuación condicional:

$$I_{th \max} = \sqrt{\frac{1}{a} \cdot (I_p^2 + I_{q \max}^2) + (k_1 \cdot I_p \cdot f(\frac{V_{conv}}{V_{dc}}) + k_2 \cdot I_k)}$$

- 20 donde $I_{th \max}$ representa el valor límite de carga predeterminado e $I_{q \max}$ representa el valor de corriente máximo de potencia reactiva.

De manera alternativa o adicional, el valor de corriente máximo de potencia reactiva puede determinarse según

$$I_{q \max} = \sqrt{2 \cdot I_{th \max}^2 - I_p^2 - 2 \cdot (k_1 \cdot I_p \cdot \frac{V_{conv}}{V_{dc}} + k_2 \cdot I_k)^2}$$

donde $I_{th \max}$ representa el valor límite de carga predeterminado e $I_{q \max}$ representa el valor de corriente máximo de potencia reactiva.

- 25 En el caso de que en el marco del control I_{th} aún alcance o supere el valor límite de carga predeterminado $I_{th \max}$, aunque el valor de corriente máximo de potencia reactiva $I_{q \max}$ y, con ello, el valor de corriente de potencia reactiva I_q ya hayan sido reducidos a cero, o hayan llegado a cero, entonces a continuación preferentemente el valor de corriente máximo de potencia activa $I_{p \max}$ y, con ello, el valor de corriente de potencia activa I_p , se reduce según

$$I_{p \max} = \sqrt{\frac{2 I_{th \max}^2}{1 + 2(k_1 \cdot V_{conv} / V_{dc})^2}} - \frac{2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot |I_k| \cdot (V_{conv} / V_{dc})}{1 + 2(k_1 \cdot V_{conv} / V_{dc})^2}$$

- 30 La invención además hace referencia a un convertidor eléctrico que presenta un lado de tensión alterna al menos bifásico con al menos dos conexiones de tensión alterna, un lado de tensión continua y al menos dos circuitos en serie conectados de forma paralela, donde cada uno de los circuitos en serie respectivamente forma un ramal del convertidor, del convertidor, y está asociado a una de las conexiones de tensión alterna del lado de tensión alterna del convertidor, y donde entre al menos dos circuitos en serie conectados de forma paralela pueden circular una o

más corrientes de circuito. Un convertidor de esa clase se conoce por el documento publicado antes mencionado "Modular Multilevel Converter: An universal concept for HVDC-Networks and extended DC-Bus-Applications" (R. Marquardt, 2010 International Power Electronics Conference, páginas 502 a 507, 978-1-4244-5393-1/10, 2010 IEEE).

5 Según la invención, el convertidor presenta las características de la reivindicación independiente relativa a la disposición. Entre otras cosas, se prevé que el convertidor presente un dispositivo de control que calcule un valor de carga que describa la carga térmica del convertidor en función de al menos tres valores de corriente, a saber, un valor de corriente de potencia activa que indica el componente de corriente de potencia activa de una corriente de fase que circula por una de las conexiones de tensión alterna, un valor de corriente de potencia reactiva que indica el componente de corriente de potencia reactiva de la corriente de fase que circula por la conexión de tensión alterna antes mencionada, y un valor de corriente de circuito que indica la magnitud de la corriente de circuito o de las corrientes de circuito que circulan entre los circuitos en serie, y que el dispositivo de control realice el control del convertidor al menos considerando también ese valor de carga.

15 Con respecto a las ventajas del convertidor según la invención, y con respecto a configuraciones ventajosas del convertidor según la invención, se remite a las explicaciones anteriores relacionadas con el procedimiento según la invención.

A continuación, la invención se explica en detalle mediante ejemplos de ejecución; en donde de forma ilustrativa, muestran:

Figura 1 un ejemplo de ejecución de un convertidor según la invención,

20 Figura 2 un primer ejemplo de ejecución de un submódulo adecuado para el convertidor según la figura 1,

Figura 3 un segundo ejemplo de ejecución de un submódulo adecuado para el convertidor según la figura 1, y

Figura 4 un diagrama de bloques de una disposición a modo de ejemplo de componentes con los que puede calcularse el valor de carga I_{th} .

25 Para una mayor claridad, en las figuras se utilizan siempre los mismos símbolos de referencia para los componentes idénticos o comparables.

La figura 1 muestra un ejemplo de ejecución de un convertidor 10 modular trifásico, cuyo modo de trabajo es definido por un dispositivo de control 20.

30 El convertidor 10 puede tratarse de cualquier convertidor, por ejemplo de un convertidor multinivel, independientemente de su utilización; por ejemplo, por tanto, puede tratarse de un convertidor en el área de la tecnología de corriente continua de alta tensión (HVDC), el área de las turbinas eólicas o el área de la ingeniería ferroviaria.

El convertidor 10 comprende conexiones de tensión alterna $W1$, $W2$ y $W3$ para la alimentación o la extracción de corriente alterna en forma de corrientes de fase que respectivamente comprenden o pueden comprender una corriente de potencia activa $I_{p1}(t)$, $I_{p2}(t)$ y $I_{p3}(t)$, así como una corriente de potencia reactiva $I_{q1}(t)$, $I_{q2}(t)$ y $I_{q3}(t)$.

35 Además, el convertidor 10 puede estar provisto de un lado de tensión continua $G10$ que comprende dos conexiones de tensión continua $G10a$ y $G10b$, mediante las que puede suministrarse o extraerse corriente continua I_{dc} .

40 El convertidor 10 según la figura 1 presenta tres circuitos en serie $RES1$, $RES2$ y $RES3$ conectados en serie, cuyas conexiones externas $R11$, $R21$ y $R31$ están conectadas a la conexión de tensión continua $G10a$. Las conexiones externas $R12$, $R22$ y $R32$ están conectadas a la conexión de tensión continua $G10b$ del lado de tensión continua $G10$. Expresado de otro modo, por tanto, las conexiones externas de los tres circuitos en serie $RES1$, $RES2$ y $RES3$ forman el lado de tensión continua $G10$ del convertidor 10.

45 En el ejemplo de ejecución según la figura 1, cada uno de los tres circuitos en serie $RES1$, $RES2$ y $RES3$ respectivamente está formado por dos módulos de convertidor KM que respectivamente se componen de tres o más submódulos TM conectados en serie y de una inductancia L . Respectivamente entre dos módulos de convertidor KM - aquí respectivamente entre dos inductancias L - se encuentra una conexión intermedia ZW , que conforme al potencial se encuentra entre los tres submódulos superiores en la figura 1 y los tres submódulos inferiores en la figura 1, y que forma una de las tres conexiones de tensión alterna $W1$, $W2$ y $W3$ del convertidor 10. Los submódulos TM son activados por el dispositivo de control 20.

Los submódulos TM pueden ser módulos de medio puente como se muestra en la figura 2, o módulos de puente completo como se muestra en la figura 3.

La figura 2 muestra un ejemplo de ejecución de un módulo de medio puente que puede utilizarse como uno de los submódulos TM según la figura 1. El submódulo TM comprende dos interruptores S1 y S2 que respectivamente están formados por un transistor y por un diodo libre conectado de forma paralela, y un condensador C.

La figura 3 muestra un ejemplo de ejecución de un módulo de puente completo que puede utilizarse como uno de los submódulos TM según la figura 1. El submódulo TM comprende cuatro interruptores S1 a S4 que respectivamente están formados por un transistor y por un diodo libre conectado de forma paralela, y un condensador C.

El dispositivo de control 20 según la figura 1 procura evitar una sobrecarga térmica del convertidor 10. Con esa finalidad, el dispositivo de control 20 forma un valor de carga I_{th} que describe la carga térmica del convertidor 10, que calcula en función de al menos tres valores de corriente.

A continuación, en el marco de ejemplos de ejecución se explica cómo puede determinarse el valor de carga I_{th} y cómo puede utilizarse posteriormente. En este caso, a modo de ejemplo, se parte de un convertidor trifásico 10, como se muestra en la figura 1; las siguientes explicaciones se aplican para dos o más convertidores trifásicos 10, de modo correspondiente.

El dispositivo de control 20 del convertidor 10, para realizar las etapas del procedimiento descritas a continuación, en particular etapas de cálculo, comprende un dispositivo de cálculo 21 y una memoria 22. En la memoria 22 está almacenado un módulo de programa de control SPM que al ser ejecutado por el dispositivo de cálculo 21 dispone la realización de las etapas del procedimiento y de cálculo descritas en detalle a continuación; los valores de medición en base a los que se realizan las etapas del procedimiento y de cálculo provienen de sensores que no se muestran para lograr una mayor claridad, y que están conectados al dispositivo de control 20.

En primer lugar, el dispositivo de control 20 determina las corrientes de circuito relacionadas con el circuito en serie, que circulan en el convertidor 10, por ejemplo según

$$I_{k1}(t) = (I_{p1}(t) + I_{q1}(t))/2 + I_{dc}(t)/3 - I_{a1}(t)$$

$$I_{k2}(t) = (I_{p2}(t) + I_{q2}(t))/2 + I_{dc}(t)/3 - I_{a2}(t)$$

$$I_{k3}(t) = (I_{p3}(t) + I_{q3}(t))/2 + I_{dc}(t)/3 - I_{a3}(t)$$

donde $I_{k1}(t)$ representa la corriente de circuito que depende del tiempo t , relacionada con el circuito en serie, en el primer circuito en serie RES1, $I_{k2}(t)$ representa la corriente de circuito que depende del tiempo t , relacionada con el circuito en serie, en el segundo circuito en serie RES2, y $I_{k3}(t)$ representa la corriente de circuito que depende del tiempo t , relacionada con el circuito en serie, en el tercer circuito en serie RES3. $I_{p1}(t)$, $I_{p2}(t)$ e $I_{p3}(t)$ representan las corrientes de potencia activa que dependen del tiempo t , que circulan por las conexiones de tensión alterna W1, W2 y W3. $I_{q1}(t)$, $I_{q2}(t)$ e $I_{q3}(t)$ representan las corrientes de potencia reactiva que dependen del tiempo t , que circulan por las conexiones de tensión alterna W1, W2 y W3. $I_{dc}(t)$ representa la corriente continua que depende del tiempo t y que circula en el lado de tensión continua G10. $I_{a1}(t)$, $I_{a2}(t)$ y $I_{a3}(t)$ representan las corrientes del ramal que dependen del tiempo t , que circulan entre la conexión de tensión continua positiva G10a del lado de tensión continua G10 y las conexiones de tensión alterna W1, W2 y W3.

Si se miden las corrientes del ramal entre las conexiones de tensión alterna W1, W2, así como W3, y la conexión de tensión continua negativa G10b del lado de tensión continua, entonces las corrientes de circuito relacionadas con el circuito en serie preferentemente se calculan del siguiente modo:

$$I_{k1}(t) = -(I_{p1}(t) + I_{q1}(t))/2 + I_{dc}(t)/3 - I_{a1}(t)$$

$$I_{k2}(t) = -(I_{p2}(t) + I_{q2}(t))/2 + I_{dc}(t)/3 - I_{a2}(t)$$

$$I_{k3}(t) = -(I_{p3}(t) + I_{q3}(t))/2 + I_{dc}(t)/3 - I_{a3}(t)$$

El dispositivo de control 20, de las corrientes de circuito $I_{k1}(t)$, $I_{k2}(t)$ y $I_{k3}(t)$ relacionadas con el circuito en serie, selecciona la corriente de circuito mayor en cuanto al valor absoluto, relacionada con el circuito en serie, y considera a continuación el valor absoluto o la amplitud de esa corriente de circuito mayor en cuanto al valor absoluto como el así llamado valor de corriente de circuito I_k para el control posterior.

- 5 En base al valor de corriente de circuito I_k , el dispositivo de control 20 determina a continuación el valor de carga I_{th} , preferentemente según

$$I_{th} = \sqrt{\frac{1}{a} \cdot (I_p^2 + I_q^2) + (k_1 \cdot I_p \cdot f(\frac{V_{conv}}{V_{dc}}) + k_2 \cdot I_k)}$$

- 10 donde I_p representa un valor de corriente de potencia activa que se forma mediante el valor absoluto o la amplitud de una de las corrientes de potencia activa $I_{p1}(t)$, $I_{p2}(t)$ o $I_{p3}(t)$. En general, las corrientes de fase que circulan por las conexiones de tensión alterna $W1$, $W2$ y $W3$, en cuanto al valor absoluto y a la amplitud, serán iguales o muy similares, de manera que cada una de las corrientes de fase en las conexiones de tensión alterna $W1$, $W2$ o $W3$ puede seleccionarse para formar el valor de corriente de potencia activa I_p , por ejemplo la corriente de fase por la conexión de tensión alterna $W1$.

- 15 Si las corrientes de fase en las conexiones de tensión alterna $W1$, $W2$ o $W3$ se diferencian más allá de un grado predeterminado, entonces los valores absolutos o las amplitudes de las corrientes de potencia activa $I_{p1}(t)$, $I_{p2}(t)$ y $I_{p3}(t)$ también se promedian y el valor medio se utiliza posteriormente como el valor de corriente de potencia activa I_p .

- 20 I_q , en la fórmula anterior, representa un valor de corriente de potencia reactiva que se forma mediante el valor absoluto o la amplitud del componente de corriente de potencia reactiva de aquella corriente de fase que también se empleó para la determinación del valor de corriente de potencia activa. Si el valor de corriente de potencia activa se formó mediante el promedio de los valores absolutos o las amplitudes de los componentes de corriente de potencia activa $I_{p1}(t)$, $I_{p2}(t)$ y $I_{p3}(t)$, entonces el valor de corriente de potencia reactiva de manera preferente se forma igualmente mediante un promedio, a saber, mediante el promedio de los valores absolutos o las amplitudes de los componentes de corriente de potencia reactiva $I_{q1}(t)$, $I_{q2}(t)$ y $I_{q3}(t)$.

- 25 V_{conv} , en la última fórmula mencionada, representa el valor absoluto o la amplitud de la tensión en la conexión de tensión alterna $W1$, $W2$ o $W3$ seleccionada, o un valor medio formado en base a ello; V_{dc} representa el valor

- absoluto o la amplitud de la tensión continua en el lado de tensión continua G10. $f(\frac{V_{conv}}{V_{dc}})$ en la última fórmula mencionada, representa una función predeterminada de un cociente del valor absoluto o de la amplitud de la tensión en la conexión de tensión alterna $W1$, $W2$, así como $W3$, y de la tensión continua U_{dc} en el lado de tensión continua G30.

- 30 I_k , en la última fórmula mencionada, representa el valor de corriente de circuito que se forma mediante el valor absoluto o la amplitud de la corriente de circuito mayor, relacionada con el circuito en serie, del modo ya antes descrito.

Los signos de la fórmula a, k_1 y k_2 son constantes predeterminadas. La constante a preferentemente es igual a 2.

- 35 Las constantes k_1 y k_2 preferentemente se determinan mediante mediciones de prueba en las que el valor de carga I_{th} se compara con la carga térmica efectiva del convertidor 10 (por ejemplo mediante mediciones de temperatura), y sus resultados de comparación proporcionan valores para las constantes k_1 y k_2 , adecuados para el funcionamiento posterior del convertidor.

La función $f(\frac{V_{conv}}{V_{dc}})$ preferentemente es:

$$f(\frac{V_{conv}}{V_{dc}}) = \frac{V_{conv}}{V_{dc}}$$

- 40 La figura 4 muestra un diagrama de bloques de una disposición 400 a modo de ejemplo, de componentes con los que puede calcularse el valor de carga I_{th} , del modo descrito. La disposición 400 comprende tres elevadores al

cuadrado 410, un multiplicador 420, dos divisores 430, un formador del valor máximo 440, dos sumadores 450, un formador de raíz cuadrada 460 y dos escaladores 470 (multiplicador con una constante k1, así como k2).

Si el valor de carga lth alcanza o supera un valor límite de carga predeterminado lthmax, entonces en variantes de control o de regulación preferentes puede tener lugar una reducción objetivo de la corriente de potencia activa o de la corriente de potencia reactiva.

En el caso de que el valor de carga lth alcance o supere el valor límite de carga predeterminado lthmax, si debe tener lugar primero una reducción objetivo de la corriente de potencia activa, entonces el dispositivo de control 20, preferentemente mediante una activación adecuada de los submódulos TM, debe procurar que el valor de corriente de potencia activa lp no supere un valor de corriente máximo de potencia activa predeterminado lpmx. Ese valor de corriente máximo de potencia activa lpmx preferentemente se determina de forma numérica mediante la siguiente ecuación condicional:

$$lth\ max = \sqrt{\frac{1}{a} \cdot (lp\ max^2 + lq^2) + (k1 \cdot lp\ max \cdot f(\frac{Vconv}{Vdc}) + k2 \cdot Ik)}$$

De manera alternativa, el dispositivo de control 20 puede determinar el valor de corriente máxima de potencia activa mediante el cálculo de la siguiente ecuación:

$$lp\ max = \sqrt{\frac{2lth\ max^2 - lq^2}{1 + 2(k1 \cdot Vconv/Vdc)^2} - \frac{2 \cdot k1 \cdot k2 \cdot |Ik| \cdot (Vconv/Vdc)}{1 + 2(k1 \cdot Vconv/Vdc)^2}}$$

En el caso de que en el marco del control lth aún alcance o supere el valor límite de carga predeterminado lthmax, aunque el valor de corriente máximo de potencia activa lpmx y, con ello, el valor de corriente de potencia activa lp ya hayan sido reducidos a cero, y hayan llegado a cero, entonces a continuación preferentemente el valor de corriente máximo de potencia reactiva lqmax y, con ello, el valor de corriente de potencia reactiva lq, se reduce según

$$lq\ max = \sqrt{2 \cdot lth\ max^2 - 2 \cdot (k2 \cdot Ik)^2}$$

En el caso de que el valor de carga lth alcance o supere el valor límite de carga predeterminado lthmax, si debe tener lugar primero una reducción objetivo de la corriente de potencia reactiva, entonces el dispositivo de control 20, preferentemente mediante una activación adecuada de los submódulos TM, debe procurar que el valor de corriente de potencia reactiva lq sea inferior a un valor de corriente máximo de potencia reactiva lqmax o que al menos no lo supere. Ese valor de corriente máximo de potencia reactiva lqmax preferentemente se determina mediante la siguiente ecuación condicional:

$$lth\ max = \sqrt{\frac{1}{a} \cdot (lp^2 + lq\ max^2) + (k1 \cdot lp \cdot f(\frac{Vconv}{Vdc}) + k2 \cdot Ik)}$$

De manera alternativa, el dispositivo de control 20 puede determinar el valor de corriente máxima de potencia reactiva lqmax mediante el cálculo de la siguiente ecuación:

$$lq\ max = \sqrt{2 \cdot lth\ max^2 - lp^2 - 2 \cdot (k1 \cdot lp \cdot \frac{Vconv}{Vdc} + k2 \cdot Ik)^2}$$

En el caso de que en el marco del control lth aún alcance o supere el valor límite de carga predeterminado lthmax, aunque el valor de corriente máximo de potencia reactiva lqmax y, con ello, el valor de corriente de potencia reactiva lq ya hayan sido reducidos a cero, y hayan llegado a cero, entonces a continuación preferentemente el valor de corriente máximo de potencia activa lpmx y, con ello, el valor de corriente de potencia activa lp, se reduce según

$$I_{p\max} = \sqrt{\frac{2I_{th\max}^2}{1 + 2(k_1 \cdot V_{conv}/V_{dc})^2} - \frac{2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot |I_k| \cdot (V_{conv}/V_{dc})}{1 + 2(k_1 \cdot V_{conv}/V_{dc})^2}}$$

El valor límite de carga $I_{th\max}$ antes mencionado preferentemente se determina utilizando el valor de carga I_{th} que varía en el tiempo, así como se adapta al mismo, a saber, preferentemente mediante una función que depende de una integral. $I_{th\max}$ preferentemente se calcula según:

$$I_{th\max} = f\left(\int I_{th}(t)^2 dt\right),$$

5

en particular según

$$I_{th\max}(t) = f\left(\int_{-T}^t I_{th}(t)^2 dt\right)$$

donde $I_{th}(t)$ representa el valor de carga en el tiempo t y f representa una función predeterminada de la integral formada mediante el cuadrado del valor de carga. La duración de integración T puede ser un valor fijo que

10

La función f preferentemente es del siguiente modo:

$$f(x) = I_1 + (I_2 - I_1) \cdot \max\left(0, \min\left(1, 1 - \frac{1}{K} \cdot (x - I_1^2 T)\right)\right)$$

donde I_1 , I_2 y k son constantes predeterminadas. I_1 describe la carga máxima que es admisible de forma permanente para el convertidor; I_2 describe la carga máxima, que brevemente es admisible para el convertidor. k es homogénea (proporcional) con respecto a $I_2 t$, y corresponde a la carga máxima I_2 durante un intervalo de tiempo predefinido (por ejemplo de la duración de integración T).

15

En una variante simplificada, el valor límite de carga $I_{th\max}$ se calcula según

$$I_{th\max}(t) = f\left(\int_{-T}^t I_{th}(t)^2 dt\right) = \int_{-T}^t I_{th}(t)^2 dt$$

También es ventajoso que el valor límite de carga $I_{th\max}$ se reduzca cuando la temperatura del convertidor 10 alcance o supere una temperatura máxima predeterminada $T_{\max}$.

20

Si bien la invención fue ilustrada y descrita en detalle mediante ejemplos de ejecución preferentes, la invención no está limitada por los ejemplos descritos, y el experto puede deducir de éstos otras variaciones, sin abandonar el alcance de protección de la invención de acuerdo con las siguientes reivindicaciones.

Lista de símbolos de referencia

25

10 Convertidor

20 Dispositivo de control

21 Dispositivo de cálculo

22 Memoria

400 Disposición

30

410 Elevador al cuadrado

420 Multiplicador

- 430 Divisor
- 440 Formador del valor máximo
- 450 Sumador
- 460 Formador de raíz cuadrada
- 5 470 Escalador
- a Constante
- C Condensador
- G10 Lado de tensión continua
- 10 G10a Conexión de tensión continua
- G10b Conexión de tensión continua
- la1 Corriente del ramal
- la2 Corriente del ramal
- la3 Corriente del ramal
- 15 Idc Corriente continua
- Ik Valor de corriente de circuito
- Ik1 Corriente de circuito
- Ik2 Corriente de circuito
- Ik3 Corriente de circuito
- 20 Ip Valor de potencia activa
- Ip1(t) Corriente de potencia activa
- Ip2(t) Corriente de potencia activa
- Ip3(t) Corriente de potencia activa
- Ipmax Valor de corriente máximo de potencia activa
- 25 Iq1(t) Corriente de potencia reactiva
- Iq2(t) Corriente de potencia reactiva
- Iq3(t) Corriente de potencia reactiva
- Iqmax Valor de corriente máximo de potencia reactiva
- Ith Valor de carga
- 30 Ithmax Valor límite de carga
- k1 Constante

	k2 Constante
	KM Módulo de convertidor
	L Inductancia
	R11 Conexión
5	R12 Conexión
	R21 Conexión
	R22 Conexión
	R31 Conexión
	R32 Conexión
10	RES1 Circuito en serie
	RES2 Circuito en serie
	RES3 Circuito en serie
	S1 Interruptor
	S2 Interruptor
15	S3 Interruptor
	S4 Interruptor
	SPM Módulo de programa de control
	t Tiempo
	TM Submódulo
20	Udc Tensión continua
	Vconv Valor absoluto o amplitud de la tensión en la conexión de tensión alterna
	Vdc Valor absoluto o amplitud de la tensión continua
	W1 Conexión de tensión alterna
	W2 Conexión de tensión alterna
25	W3 Conexión de tensión alterna
	ZW Conexión intermedia

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para operar un convertidor eléctrico (10) que presenta un lado de tensión alterna al menos bifásico con al menos dos conexiones de tensión alterna (W1, W2, W3), un lado de tensión continua (G10) y al menos dos circuitos en serie (RES1, RES2, RES3) conectados de forma paralela,

5 - donde cada uno de los circuitos en serie (RES1, RES2, RES3) respectivamente forma un ramal del convertidor, del convertidor (10), y está asociado a una de las conexiones de tensión alterna (W1, W2, W3) del lado de tensión alterna del convertidor (10), y

- donde entre al menos dos circuitos en serie (RES1, RES2, RES3) conectados de forma paralela pueden circular una o más corrientes de circuito, donde

10 - un valor de carga que describe la carga térmica del convertidor (10) se calcula en función de al menos tres valores de corriente, a saber

- un valor de corriente de potencia activa que indica el componente de corriente de potencia activa de una corriente de fase que circula por una de las conexiones de tensión alterna (W1, W2, W3),

15 - un valor de corriente de potencia reactiva que indica el componente de corriente de potencia reactiva de la corriente de fase que circula por la conexión de tensión alterna (W1, W2, W3) antes mencionada, y

- un valor de corriente de circuito que indica la magnitud de la corriente de circuito o de las corrientes de circuito que circulan entre los circuitos en serie (RES1, RES2, RES3), y

- el control del convertidor (10) tiene lugar al menos considerando también ese valor de carga,

caracterizado porque

20 el valor de carga que varía en el tiempo se determina según

$$I_{th} = \sqrt{\frac{1}{a} \cdot (I_p^2 + I_q^2) + (k_1 \cdot I_p \cdot f(\frac{V_{conv}}{V_{dc}}) + k_2 \cdot I_k)}$$

donde

25 - I_p representa el valor de corriente de potencia activa antes mencionado y se forma mediante el valor absoluto o la amplitud del componente de corriente de potencia activa de la corriente de fase que circula por la conexión de tensión alterna (W1, W2, W3),

- I_q representa el valor de corriente de potencia reactiva antes mencionado y se forma mediante el valor absoluto o la amplitud del componente de corriente de potencia reactiva de la corriente de fase que circula por la conexión de tensión alterna (W1, W2, W3),

30 - V_{conv} representa el valor absoluto o la amplitud de la tensión en la conexión de tensión alterna (W1, W2, W3),

- V_{dc} representa el valor absoluto o la amplitud de la tensión continua en el lado de tensión continua (G10),

- $f(\frac{V_{conv}}{V_{dc}})$ representa una función predeterminada de un cociente del valor absoluto o de la amplitud de la tensión en la conexión de tensión alterna (W1, W2, W3) y de la tensión continua en el lado de tensión continua (G10),

35 - I_k representa el valor de corriente de circuito y se forma mediante el valor absoluto o la amplitud de la mayor corriente de circuito relacionada con el circuito en serie, y

- a, k_1 y k_2 son constantes predeterminadas.

2. Procedimiento según la reivindicación 1,

caracterizado porque,

el valor de corriente de circuito se determina determinando para cada uno de los circuitos en serie (RES1, RES2, RES3) respectivamente la corriente de circuito que circula allí, por tanto, relacionada con el circuito en serie, determinando la corriente de circuito mayor, conforme al valor absoluto, relacionada con el circuito en serie, y considerando la el valor absoluto o la amplitud de esa corriente de circuito mayor, relacionada con el circuito en serie, como el valor de corriente de circuito.

3. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,

caracterizado porque

las corrientes de circuito relacionadas con el circuito en serie se calculan según

$$I_{ki}(t) = (I_{pi}(t) + I_{qi}(t))/2 + I_{dc}(t)/n - I_{ai}(t)$$

en el caso de que corrientes del ramal circulen entre la conexión de tensión continua positiva del lado de tensión continua y las conexiones de tensión alterna,

donde

- $I_{ki}(t)$ representa la corriente de circuito relacionada con el circuito en serie, que depende del tiempo t , en el n -ésimo circuito en serie (RES1, RES2, RES3), así como en el n -ésimo ramal del convertidor,

- $I_{pi}(t)$ representa la corriente de potencia activa que depende del tiempo t , que circula por la conexión de tensión alterna (W1, W2, W3) conectada al n -ésimo circuito en serie (RES1, RES2, RES3), así como al n -ésimo ramal del convertidor,

- $I_{qi}(t)$ representa la corriente de potencia reactiva que depende del tiempo t , que circula por la conexión de tensión alterna (W1, W2, W3) conectada al n -ésimo circuito en serie (RES1, RES2, RES3), así como al n -ésimo ramal del convertidor,

- $I_{dc}(t)$ representa la corriente continua que depende del tiempo t y que circula en el lado de tensión continua (G10),

- $I_{ai}(t)$ representa la corriente del ramal que depende del tiempo t , entre la conexión de tensión continua positiva del lado de tensión continua (G10) y la conexión de tensión alterna (W1, W2, W3) conectada al n -ésimo ramal del convertidor, y

- n representa el número de los circuitos en serie (RES1, RES2, RES3), así como ramales del convertidor.

4. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,

caracterizado porque

las corrientes de circuito relacionadas con el circuito en serie se calculan según

$$I_{ki}(t) = -(I_{pi}(t) + I_{qi}(t))/2 + I_{dc}(t)/n - I_{ai}(t)$$

en el caso de que corrientes del ramal circulen entre las conexiones de tensión alterna y la conexión de tensión continua negativa del lado de tensión continua,

donde

- $I_{ki}(t)$ representa la corriente de circuito relacionada con el circuito en serie en el n -ésimo circuito en serie (RES1, RES2, RES3), así como en el n -ésimo ramal del convertidor,

- $I_{pi}(t)$ representa la corriente de potencia activa que depende del tiempo t , que circula por la conexión de tensión alterna ($W1$, $W2$, $W3$) conectada al n -ésimo circuito en serie ($RES1$, $RES2$, $RES3$), así como al n -ésimo ramal del convertidor,

5 - $I_{qi}(t)$ representa la corriente de potencia reactiva que depende del tiempo t , que circula por la conexión de tensión alterna ($W1$, $W2$, $W3$) conectada al n -ésimo circuito en serie ($RES1$, $RES2$, $RES3$), así como al n -ésimo ramal del convertidor,

- $I_{dc}(t)$ representa la corriente continua que depende del tiempo t y que circula en el lado de tensión continua ($G10$),

10 - $I_{ai}(t)$ representa la corriente del ramal que depende del tiempo t , que circula entre la conexión de tensión alterna ($W1$, $W2$, $W3$) conectada en el n -ésimo ramal del convertidor y en la conexión de tensión continua negativa del lado de tensión continua ($G10$), y

- n representa el número de los circuitos en serie ($RES1$, $RES2$, $RES3$), así como ramales del convertidor.

5. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,

caracterizado porque

15 el control del convertidor (10) tiene lugar de manera que el valor de carga sea inferior a un valor límite de carga predeterminado o que al menos que no lo supere.

6. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,

caracterizado porque

20 el valor límite de carga se determina utilizando una integral relacionada con el valor de carga, en particular según

$$I_{lh\max} = f\left(\int I_{lh}(t)^2 dt\right)$$

donde $I_{lh}(t)$ representa el valor de carga en el tiempo t y f representa una función predeterminada de la integral formada mediante el cuadrado del valor de carga.

7. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,

25 caracterizado porque

el valor límite de carga se reduce cuando la temperatura del convertidor (10) alcanza o supera una temperatura máxima predeterminada.

8. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,

caracterizado porque

30 el control del convertidor (10), en el caso de que el valor de carga alcance o supere el valor límite de carga predeterminado, incorpora la reducción objetivo de la corriente de potencia activa.

9. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,

caracterizado porque

35 el control del convertidor (10), en el caso de que el valor de carga alcance o supere el valor límite de carga predeterminado, tiene lugar de manera que el valor de corriente de potencia activa no supere un valor de corriente máximo de potencia activa predeterminado, donde el valor de corriente máximo de potencia activa se determina mediante la siguiente ecuación condicional:

$$I_{th\max} = \sqrt{\frac{1}{a} \cdot (I_{p\max}^2 + I_q^2) + (k_1 \cdot I_{p\max} \cdot f(\frac{V_{conv}}{V_{dc}}) + k_2 \cdot I_k)}$$

donde $I_{th\max}$ representa el valor límite de carga predeterminado e $I_{p\max}$ representa el valor de corriente máximo de potencia activa.

10. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,

5 caracterizado porque

el control del convertidor (10), en el caso de que el valor de carga alcance o supere el valor límite de carga predeterminado, tiene lugar de manera que el valor de corriente de potencia activa no supere un valor de corriente máximo de potencia activa predeterminado,

donde el valor de corriente máximo de potencia activa se determina según

$$I_{p\max} = \sqrt{\frac{2I_{th\max}^2 - I_q^2}{1 + 2(k_1 \cdot V_{conv}/V_{dc})^2}} - \frac{2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \{I_k\} \cdot (V_{conv}/V_{dc})}{1 + 2(k_1 \cdot V_{conv}/V_{dc})^2}$$

donde $I_{th\max}$ representa el valor límite de carga predeterminado e $I_{p\max}$ representa el valor de corriente máximo de potencia activa.

11. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 8,

caracterizado porque

15 el control del convertidor (10), en el caso de que el valor de carga alcance o supere el valor límite de carga predeterminado, incorpora la reducción objetivo de la corriente de potencia reactiva.

12. Procedimiento según la reivindicación 11,

caracterizado porque

20 el control del convertidor (10) tiene lugar de manera que el valor de corriente de potencia reactiva sea inferior a un valor de corriente máximo de potencia reactiva que depende del valor de carga o que al menos no lo supere, donde el valor de corriente máximo de potencia reactiva se determina mediante la siguiente ecuación condicional:

$$I_{th\max} = \sqrt{\frac{1}{a} \cdot (I_p^2 + I_{q\max}^2) + (k_1 \cdot I_p \cdot f(\frac{V_{conv}}{V_{dc}}) + k_2 \cdot I_k)}$$

donde $I_{th\max}$ representa el valor límite de carga predeterminado e $I_{q\max}$ representa el valor de corriente máximo de potencia reactiva.

25 13. Procedimiento según una de las reivindicaciones 11 a 12,

caracterizado porque

30 el control del convertidor (10), en el caso de que el valor de carga alcance o supere el valor límite de carga predeterminado, tiene lugar de manera que el valor de corriente de potencia reactiva no supere un valor de corriente máximo de potencia reactiva predeterminado, donde el valor de corriente máximo de potencia reactiva se determina según

$$I_{q\max} = \sqrt{2 \cdot I_{th\max}^2 - I_p^2 - 2 \cdot (k_1 \cdot I_p \cdot \frac{V_{conv}}{V_{dc}} + k_2 \cdot I_k)^2}$$

donde I_{thmax} representa el valor límite de carga predeterminado e I_{qmax} representa el valor de corriente máximo de potencia reactiva.

14. Convertidor eléctrico (10) que presenta un lado de tensión alterna al menos bifásico con al menos dos conexiones de tensión alterna (W1, W2, W3), un lado de tensión continua (G10) y al menos dos circuitos en serie (RES1, RES2, RES3) conectados de forma paralela,

- donde cada uno de los circuitos en serie (RES1, RES2, RES3) respectivamente forma un ramal del convertidor, del convertidor (10), y está asociado a una de las conexiones de tensión alterna (W1, W2, W3) del lado de tensión alterna del convertidor (10), y

- donde entre al menos dos circuitos en serie (RES1, RES2, RES3) conectados de forma paralela pueden circular una o más corrientes de circuito, y donde

- el convertidor (10) presenta un dispositivo de control (20) que calcula un valor de carga que describe la carga térmica del convertidor (10), en función de al menos tres valores de corriente, a saber,

- un valor de corriente de potencia activa que indica el componente de corriente de potencia activa de una corriente de fase que circula por una de las conexiones de tensión alterna (W1, W2, W3),

- un valor de corriente de potencia reactiva que indica el componente de corriente de potencia reactiva de la corriente de fase que circula por la conexión de tensión alterna (W1, W2, W3) antes mencionada, y

- un valor de corriente de circuito que indica la magnitud de la corriente de circuito o de las corrientes de circuito que circulan entre los circuitos en serie (RES1, RES2, RES3), y

- el dispositivo de control (20) realiza el control del convertidor (10) al menos considerando también ese valor de carga,

caracterizado porque

el dispositivo de control calcula el valor de carga que varía en el tiempo, según

$$I_{th} = \sqrt{\frac{1}{a} \cdot (I_p^2 + I_q^2) + (k_1 \cdot I_p \cdot f(\frac{V_{conv}}{V_{dc}}) + k_2 \cdot I_k)}$$

donde

- I_p representa el valor de corriente de potencia activa antes mencionado y se forma mediante el valor absoluto o la amplitud del componente de corriente de potencia activa de la corriente de fase que circula por la conexión de tensión alterna (W1, W2, W3),

- I_q representa el valor de corriente de potencia reactiva antes mencionado y se forma mediante el valor absoluto o la amplitud del componente de corriente de potencia reactiva de la corriente de fase que circula por la conexión de tensión alterna (W1, W2, W3),

- V_{conv} representa el valor absoluto o la amplitud de la tensión en la conexión de tensión alterna (W1, W2, W3),

- V_{dc} representa el valor absoluto o la amplitud de la tensión continua en el lado de tensión continua (G10),

- $f(\frac{V_{conv}}{V_{dc}})$ representa una función predeterminada de un cociente del valor absoluto o de la amplitud de la tensión en la conexión de tensión alterna (W1, W2, W3) y de la tensión continua en el lado de tensión continua (G10),

- I_k representa el valor de corriente de circuito y se forma mediante el valor absoluto o la amplitud de la mayor corriente de circuito relacionada con el circuito en serie, y

- a , k_1 y k_2 son constantes predeterminadas.

FIG 1

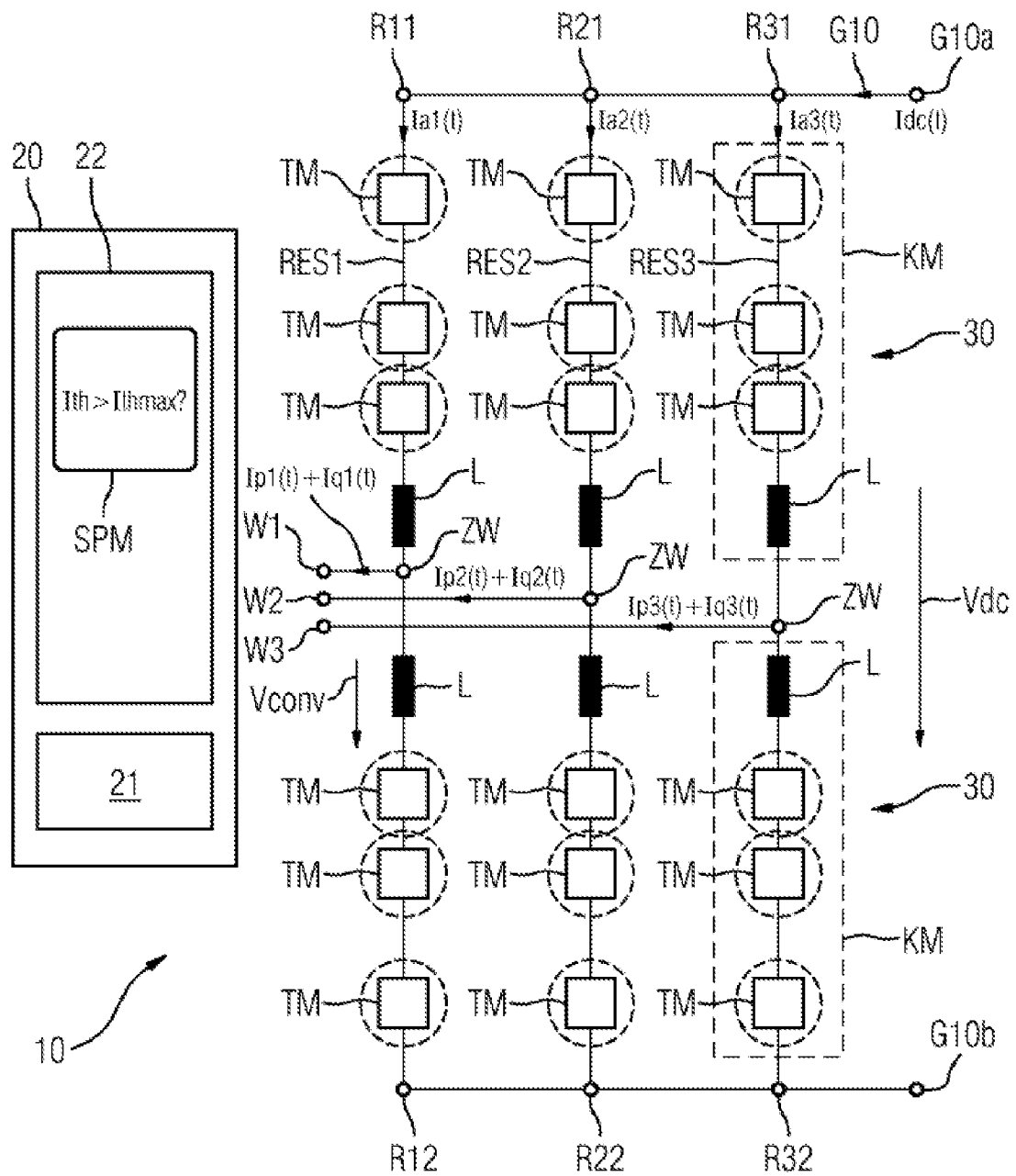


FIG 2

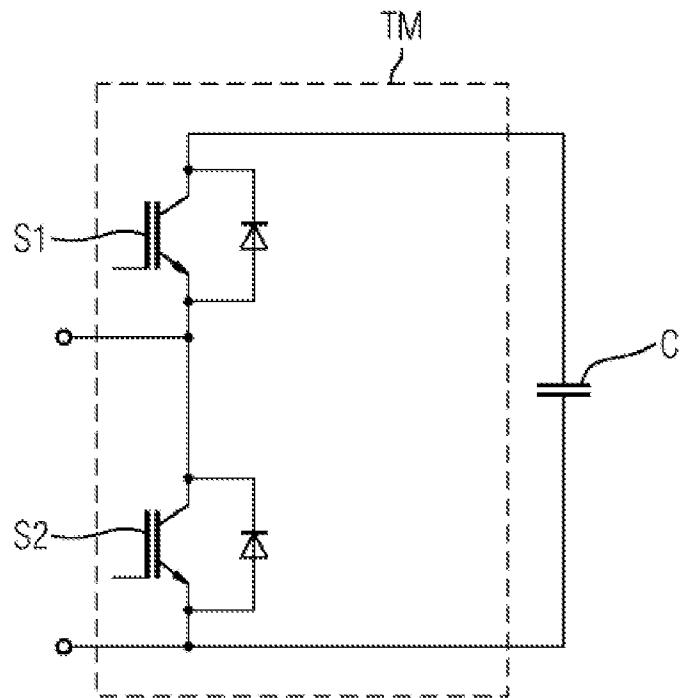


FIG 3

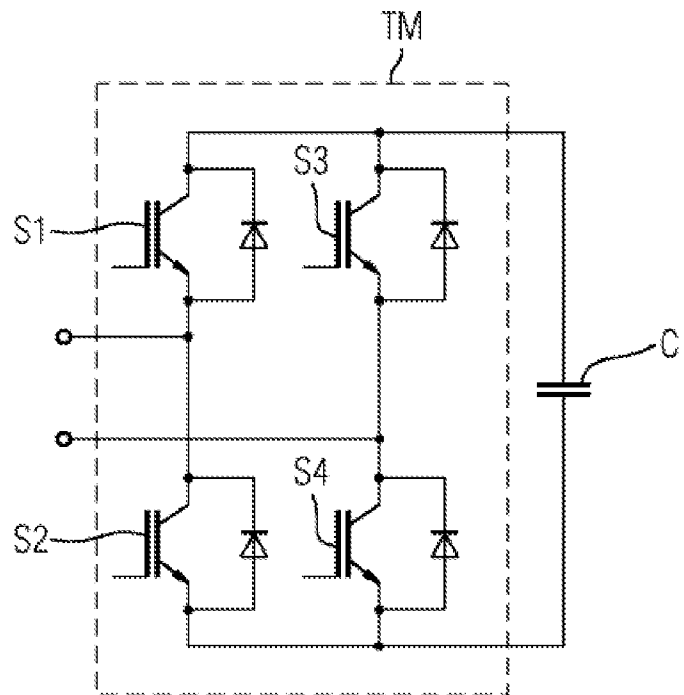


FIG 4

