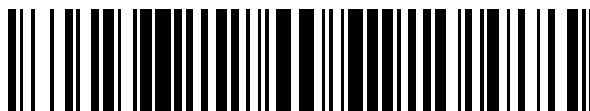


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 780 878**

51 Int. Cl.:

H01F 27/28 (2006.01)

H01F 27/32 (2006.01)

H01F 27/36 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **31.07.2015 E 15179227 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.01.2020 EP 3125260**

54 Título: **Transformador para un convertidor electrónico modular de potencia**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
27.08.2020

73 Titular/es:
ABB SCHWEIZ AG (100.0%)
Brown Boveri Strasse 6
5400 Baden, CH

72 Inventor/es:
GRADINGER, THOMAS;
KEARNEY, DANIEL y
DROFENIK, UWE

74 Agente/Representante:
ELZABURU, S.L.P

ES 2 780 878 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

Transformador para un convertidor electrónico modular de potencia

Campo de la invención

5 La invención pertenece al campo de los transformadores de energía eléctrica. En particular, se refiere a un transformador para un convertidor electrónico modular de potencia de acuerdo con el preámbulo de la reivindicación de patente independiente, y a un convertidor electrónico modular de potencia.

Antecedentes de la invención

10 Los transformadores de energía eléctrica, conocidos como transformadores electrónicos de potencia (PET, según sus siglas en inglés), permiten la conversión de voltaje y frecuencia con un beneficio adicional de proporcionar aislamiento galvánico. En los PET conocidos, a modo de ejemplo, la CC de entrada se invierte en CA primaria de frecuencia media de, por ejemplo, 10 kHz y alimentado a un lado primario de un transformador de frecuencia media (MFT, según sus siglas en inglés). Una CA secundaria de un lado secundario de dicho MFT se rectifica nuevamente para proporcionar una CC de salida, que generalmente tiene un voltaje más bajo. Opcionalmente, esta CC de salida puede convertirse de nuevo en CA, que preferiblemente tiene una frecuencia de salida de, por ejemplo, varios 10 Hz. Asimismo, la CC de entrada puede haberse obtenido de una fuente de CA por medio de un rectificador. En la Figura 1 se muestra una celda de convertidor 01 capaz de realizar esta tarea.

15 Los PET se utilizan frecuentemente, por ejemplo, en convertidores modulares para el suministro de energía eléctrica en vehículos eléctricos ferroviarios, por ejemplo trenes o tranvías. Los convertidores modulares comprenden una pluralidad de celdas de conversión de PET configuradas para producir a partir de un voltaje de entrada de CA un voltaje de salida de CC que, para aplicaciones de tracción, puede suministrarse a una unidad de accionamiento o unidad de motor de un vehículo eléctrico ferroviario, aunque también a instalaciones eléctricas integradas, las cuales han recibido recientemente una atención creciente. Por lo general, el voltaje de entrada de CA se suministra desde una línea, en particular desde un cable aéreo.

20 Los convertidores modulares ejemplares se describen, por ejemplo, en los documentos WO 2014/037406 A1, DE 102010044322 A1 y EP 820893 A2. Los convertidores descritos comprenden una pluralidad de celdas de convertidor, conectadas en serie en un lado primario o lado de línea del convertidor modular, y en paralelo en un lado secundario o lado de carga del convertidor modular. Cada celda del convertidor comprende un convertidor resonante de CC a CC como MFT, que está conectado a la línea a través de un convertidor primario de CA a CC. En el convertidor resonante de CC a CC, un convertidor de CC a CA en el lado primario está conectado a través de un transformador resonante con otro convertidor de CA a CC en el lado secundario, en particular en un lado del motor. Al conectar varias celdas de convertidor en serie en un lado y en paralelo en el otro lado, es posible construir convertidores con aislamiento galvánico, por ejemplo, de CC a CC, o de CC a CA, que pueden, en particular, ser capaces de elevar o bajar los voltajes hacia o desde un nivel superior al voltaje nominal de los conmutadores de semiconductores en los convertidores de CC a CA o de CA a CC. Debido a la frecuencia operativa relativamente alta del MFT (que puede estar entre 500 Hz y 50 kHz, y típicamente alrededor de, p.ej., 10 kHz; a diferencia de una frecuencia de salida que está típicamente entre 10 Hz y 100 Hz, típicamente al menos aproximadamente 50 Hz) el tamaño del MFT puede mantenerse pequeño. El MFT es un componente central en la celda del convertidor. El tamaño y el coste del MFT influyen directamente en el tamaño y el coste de la celda del convertidor y, por lo tanto, del PET. Los requisitos para un MFT son diferentes de los de los transformadores de electricidad típicos. Al lado del voltaje u_1 a través de un devanado primario y el voltaje u_2 a través de un devanado secundario del MFT, hay un voltaje u_3 de devanado secundario a primario; el u_3 es CC (si la celda del convertidor se usa en un convertidor de CC y sin inversor opcional) o CA de baja frecuencia. En el segundo caso, la frecuencia de u_3 es mucho más baja que la de u_1 y u_2 , por ejemplo, 50 Hz en comparación con 10 kHz. Si hay muchas celdas conectadas en serie en un lado, entonces la magnitud de u_3 es mucho más grande que la de u_1 y u_2 . En un convertidor modular ejemplar con $N=24$ celdas de convertidor conectadas en serie en el lado primario y en paralelo en el lado secundario de dicho convertidor modular, cuando un voltaje de entrada de $U_1 = 24$ kV es aplicado a su lado primario, por ejemplo; u_1 y u_2 normalmente pueden ser de aproximadamente 1 kV, mientras que u_3 puede ser también tan elevado como 24 kV. Como consecuencia, un aislamiento eléctrico entre el devanado primario y el secundario debe ser mucho más fuerte que un aislamiento dentro de un devanado, generalmente denominado como aislamiento entre espiras.

25 30 35 40 45 50 55 A modo ilustrativo, la Figura 2 muestra diagramas de circuitos para un convertidor electrónico modular de potencia básico de acuerdo con la técnica anterior, con $N=4$ celdas de convertidor 01 conectadas en serie entre un primer terminal principal 011 y un segundo terminal principal 012 en el lado primario y en paralelo entre un tercer terminal principal 021 y un cuarto terminal principal 022 en el lado secundario de dicho convertidor modular. Preferiblemente, se proporciona una pluralidad de conmutadores 031 y 032 para permitir la desconexión de celdas convertidoras individuales del convertidor modular bajo ciertas circunstancias, por ejemplo, para mantener estas celdas del convertidor como celdas de reserva, o para hacer funcionar el convertidor a niveles de voltaje y/o carga inferiores a los máximos permitidos. Para las celdas convertidoras individuales, los voltajes u_{31} , u_{32} , u_{33} y u_{34} , del devanado secundario al primario quedan tal como se indicó anteriormente, y pueden asumir valores grandes, lo cual, se aplica, en particular, a u_{34} .

Se sabe que es posible proporcionar un buen aislamiento a los transformadores sumergiéndolos en aceite o fundiendo el transformador en un material de aislamiento sólido o gelatinoso como, por ejemplo, gel de sílice. Si bien los transformadores de aceite están bien determinados y son bien conocidos, también lo son sus desventajas. Necesitan una contención hermética y casquillos de envoltura hermética. La calidad del aceite necesita ser supervisada, y este aceite constituye un riesgo con respecto al fuego. Fundir un transformador completamente en un material de aislamiento eléctrico sólido o gelatinoso, por otra parte, produce generalmente un problema de enfriamiento, ya que el calor solo se puede transferir por conducción y, por lo tanto, no de manera muy eficiente. Esto es una preocupación en particular para los MFT, ya que su densidad de potencia (y densidad de pérdida) es típica y relativamente alta, dado que sus frecuencias de funcionamiento habituales permiten un tamaño relativamente pequeño.

Si bien es relativamente sencillo diseñar un MFT de tipo seco que dependa del aire solo para el aislamiento (y para el enfriamiento por convección) las amplias distancias de separación $d_{\text{separación}}$ son necesarias para proporcionar suficiente aislamiento eléctrico, debido a la magnitud del voltaje u_3 . En particular, estas distancias de separación generalmente deben respetarse no solo entre el devanado primario, el cual en la configuración anterior representa un devanado de alto voltaje del MFT, y el devanado secundario, el cual en la configuración anterior representa un devanado de bajo voltaje, sino también entre el devanado de alto voltaje y el núcleo, puesto que el núcleo posee generalmente potencial de conexión a tierra. Esto conduce a un gran tamaño que es generalmente inaceptable para un MFT de tipo seco. En particular, el devanado de alto voltaje y el núcleo serán poco rentables por ser grandes y pesados. Por lo tanto, es ventajoso encerrar, en particular para fundir, el devanado de alto voltaje en un aislamiento sólido, típicamente hecho de un compuesto de resina epoxi y un material de relleno como, por ejemplo, harina de sílice. Preferiblemente, el devanado de bajo voltaje también está encerrado en un aislamiento sólido similar, separado. Como resultado, se forma un primer entrehierro entre el aislamiento sólido del devanado de alto voltaje y el devanado de bajo voltaje, en particular entre los aislamientos sólidos separados del devanado de alto voltaje y bajo voltaje. Dicho primer entrehierro permite una refrigeración eficiente similar a un sistema con aislamiento de aire puro. Sin embargo, en contraste con este último, las distancias de separación pueden mantenerse significativamente más pequeñas. Esto es posible, ya que la ruptura dieléctrica dentro del primer entrehierro es generalmente aceptable en caso de sobretensiones transitorias tales como, por ejemplo, las causadas por un impulso tipo rayo; mientras que el aislamiento sólido está dimensionado lo suficientemente fuerte como para soportar solo la sobretensión transitoria. Sin embargo, es importante que, durante el funcionamiento normal, un campo eléctrico en el primer entrehierro alrededor del devanado de alto voltaje sea lo suficientemente bajo como para evitar descargas parciales. Además, las consideraciones expuestas anteriormente se aplican no solo al primer entrehierro entre el devanado de bajo y alto voltaje, sino que, en el caso de un núcleo conectado a tierra, también se aplicarían a un segundo entrehierro entre el devanado de alto voltaje y el núcleo conectado a tierra.

Para obtener un transformador compacto, económico y de bajo peso, es preferible mantener las distancias de separación lo más pequeñas posible. Por lo tanto, las distancias de separación se eligen preferiblemente tan grandes como sea necesario para garantizar un funcionamiento libre de corona en condiciones normales, en particular bajo tensiones nominales de funcionamiento y, en particular, según lo especificado a través de una tensión nominal. Esto es necesario para evitar dañar las superficies de aislamiento sólido y su degradación a largo plazo.

Varios eventos de falla, como los causados en particular, por ejemplo, por impulsos tipo rayo, son pequeños durante la vida útil del transformador, y tales eventos de falla son de una duración relativamente corta. Por lo tanto, las descargas en el aire en caso de tales fallas pueden tolerarse, y el daño causado a la superficie del aislamiento sólido es pequeño. Sin embargo, el grosor del aislamiento sólido debe elegirse lo suficiente adecuado como para que el aislamiento sólido pueda resistir la sobretensión de falla completa por sí solo (es decir, con el aire descompuesto). Dado que la rigidez dieléctrica del aislamiento sólido con respecto a sobretensiones cortas es muy alta, este aislamiento sólido no necesita aún ser muy grueso. Los valores típicos para un voltaje de CC de 50 kV pueden ser una distancia de separación $d_{\text{separación}}$ de aproximadamente 60 mm, y/o un espesor de aislamiento sólido s_s de unos 6 mm.

Sin embargo, cada vez que se produce una descarga en el aire, como puede esperarse durante una sobretensión de falla, la carga eléctrica se deposita en una superficie del aislamiento sólido. La deposición de carga local crea un pico elevado de campo eléctrico que tensiona fuertemente el aislamiento sólido localmente, lo que lleva, concretamente, a una vida útil disminuida del transformador.

Un concepto de aislamiento que puede cumplir con los requisitos detallados anteriormente se ilustra en las Figura 3 y 4. La Figura 3 muestra esquemáticamente una vista en perspectiva de un transformador de acuerdo con la técnica anterior; la Figura 4 muestra esquemáticamente una vista en sección del transformador de la Figura 3. El transformador es de diseño tipo acorazado, y comprende un núcleo 10 que tiene una primera extremidad 11, una segunda extremidad 12 y una tercera extremidad 13 que se extienden en una primera dirección longitudinal 900. Un primer yugo 14 y un segundo yugo 15 se extienden en una segunda dirección longitudinal 901 entre y a través de la primera extremidad 11, la segunda extremidad 12 y la tercera extremidad 13, de modo que el primer yugo 14, el segundo yugo 15, la primera extremidad 11, y la segunda extremidad 12 definen y rodean una ventana central, que está separada en una primera subventana 101 y en una segunda subventana 102 por la tercera extremidad 13.

Se proporciona un bastidor 19 que comprende dos elementos de marco 191 dispuestos adyacentes al núcleo 10 en una dirección lateral 902, siendo dicha dirección lateral 902 perpendicular tanto a la primera dirección longitudinal 900

como a la segunda dirección longitudinal 901, y también denominada como dirección z. Los elementos de marco 191 se mantienen unidos por dos varillas 192 que, por ejemplo, se atornillan a los elementos de marco 191 por medio de tornillos dieléctricos 52.

5 Un primer devanado 20 sirve como un devanado de alto voltaje que rodea una porción central de la tercera extremidad 13. Para proporcionar un aislamiento sólido, dicho primer devanado 20 se moldea en material sintético que tiene una constante dieléctrica relativa $\epsilon_{r, \text{sintético}} > 1$, preferiblemente una resina epoxídica, de modo que dicha resina epoxídica forme una encapsulación 21 que encierra permanentemente dicho primer devanado 20. La encapsulación 21 y el primer devanado 20 representan una primera bobina 2. Una forma de la encapsulación 21 —y por lo tanto la primera bobina 2— corresponde, al menos esencialmente, a un cilindro hueco que se extiende entre una primera terminación 201 y una segunda terminación 202 de la primera bobina 2. La encapsulación comprende dos regiones planas 211 formadas en lados opuestos de su superficie externa, de modo que las regiones planas 211 se encuentran en dos planos paralelos, y cada una de las regiones planas 211 está situada distante del núcleo 10. Como es el caso en el transformador ejemplar mostrado en la Figura 3, cada una de las regiones planas 211 se forma preferiblemente en un engrosamiento de la encapsulación.

15 Un segundo devanado 30 formado en una bobina arrollada 31 y que sirve como un devanado secundario también rodea la misma porción central de la tercera extremidad 13 que el primer devanado, y está en sí mismo rodeado por el primer devanado 20, con un canal de enfriamiento 40 establecido entre una superficie interna de la encapsulación 21 y el segundo devanado 30. El segundo devanado 30 y la bobina arrollada 31 representan así una segunda bobina.

20 El segundo devanado 30 se mantiene en posición con respecto a la tercera extremidad 13 por la bobina arrollada 31, que descansa sobre el segundo yugo 15 cuando el transformador está orientado como se representa en la Figura 2. El segundo devanado 30 está firmemente enrollado sobre la bobina arrollada 31 entre una primera terminación 301 y una segunda terminación 302 de dicho segundo devanado 30, y posiblemente pegado o unido de otro modo por medio de un adhesivo. Preferiblemente, la bobina arrollada 31 se sujeta entre el primer yugo 14 y el segundo yugo 15 para mejorar la estabilidad mecánica.

25 Las placas dieléctricas 50 están unidas al bastidor 19 por medio de varillas dieléctricas 51, con dichas varillas que se extienden alejándose del bastidor 19 en la dirección lateral 902. Las placas dieléctricas se mantienen en posición mediante tuercas dieléctricas 52 enroscadas en roscas provistas en las varillas dieléctricas 51, que también se pueden usar para unir las varillas dieléctricas 51 a los elementos de marco 191. Esto permite un diseño mecánicamente sólido, evitando campos eléctricos elevados en las superficies de las placas, varillas y tuercas dieléctricas.

30 La primera bobina está unida a las placas dieléctricas 50 con cada una de las regiones planas 211 apoyadas contra una superficie de una de las placas dieléctricas 50, y está fijada preferiblemente por medio de tornillos dieléctricos y/o adhesivo.

35 Las placas dieléctricas 50 con varillas dieléctricas 51 unidas representan así una estructura de soporte para el primer devanado 20, permitiendo que dicha estructura de soporte mantenga el primer devanado 20 en una posición definida con respecto al núcleo 10, en particular la tercera extremidad 13, al tiempo que no se extiende en la ventana central, en particular sin extenderse en una región entre $z = -l/2$ y $z = +l/2$. En otras palabras, la estructura de soporte está confinada a una región exterior a la ventana central. Asimismo, la estructura de soporte no se extiende dentro del canal de enfriamiento 40 provisto entre el primer devanado 20 y el segundo devanado 30.

40 Como se puede ver, el uso de la estructura de soporte como se describe anteriormente permite respetar una distancia de separación suficiente $d_{\text{separación}}$ entre la encapsulación 21 que encierra el primer devanado 20 y el núcleo 10, preferiblemente con $d_{\text{separación}} > S_{\text{seguridad}} V_{\text{nominal}}/E_{\text{ruptura}}$ en donde E_{ruptura} es un voltaje de ruptura eléctrica, V_{nominal} un voltaje nominal para el funcionamiento normal del convertidor modular, y $S_{\text{seguridad}}$ un parámetro de seguridad para el cual $1,5 < S_{\text{seguridad}} < 5$ típicamente se mantiene, en particular con $S_{\text{seguridad}} = 1,875$ o $S_{\text{seguridad}} = 3,75$.

Se dan más detalles en la solicitud de patente europea: EP 15166445.5.

45 En los transformadores con aislamiento tal como se describió anteriormente, es decir, que comprende aislamiento sólido, así como distancias de separación en el aire, el aislamiento sólido y un aislamiento proporcionado por un tramo de aire según lo provisto por la distancia de separación en el aire pueden considerarse efectivamente conectados eléctricamente en serie. El voltaje u_s del devanado secundario hasta el primario, que se está aplicando efectivamente a dicho aislamiento, se divide entonces en un voltaje u_a sobre el tramo de aire y en voltaje u_s sobre el aislamiento sólido. Para el voltaje de CA, esta división es capacitiva, de acuerdo con las permitividades ϵ_a de aire y ϵ_s de aislamiento sólido. Dado que $\epsilon_a \approx 1$ y, en general, $\epsilon_s \approx 5$, un campo eléctrico debido al voltaje es en cierta medida expulsado del aislamiento sólido, un efecto que resulta bien conocido en el aislamiento sólido. Es importante destacar que los valores de permitividad son bastante conocidos y que varían solo moderadamente. Por ejemplo, ϵ_s puede variar entre 4 y 6 dependiendo del tipo exacto de sistema epoxi y la temperatura. En consecuencia, la división de voltaje capacitivo es bien predecible y el diseño es sólido bajo un funcionamiento con voltaje de CA. Esto se aplica, en particular, a sobretensiones transitorias durante fallas.

55 La situación para la CC es completamente diferente. El campo eléctrico es resistivo en lugar de capacitivo, y la división del voltaje se rige por las conductividades eléctricas con σ_a del aire y con σ_s del aislamiento sólido. Es un problema

5 bien conocido en el aislamiento de CC que las conductividades de todos los materiales de aislamiento son muy pequeñas, aunque no se sabe exactamente en qué medida son pequeñas. Cualquiera de las σ_a y σ_s posiblemente, dependiendo de las circunstancias, puede ser significativamente más pequeña que la otra. Por ejemplo, si el aire está muy limpio y libre de iones, uno puede esperar σ_a sea mucho más pequeña que σ_s . Si el aire contiene iones que pueden depositarse sobre las superficies sólidas, podría darse el caso contrario.

10 Cuando σ_a es mucho más pequeña que σ_s , sustancialmente todo el campo eléctrico se concentra en el aire, y u_s será casi cero. Sucede lo contrario si σ_s es mucho más pequeña que σ_a . Para obtener un diseño sólido en tales condiciones, tanto el aislamiento con aire como el de tipo sólido deben elegirse con el grosor suficiente para poder soportar todo el voltaje u_3 . Esto da como resultado un sobredimensionamiento significativo del aislamiento sólido o de la distancia de separación, o de ambos.

15 El documento GB 1.156.369 describe un transformador de alto voltaje con un apantallado electrostático externo que tiene un revestimiento conductor conectado a tierra. El documento JP S59 207611 A describe un transformador de alto voltaje con superficies de la bobina cubiertas con capas conductoras que están conectadas a tierra. El documento EP 0 061 608 A1 describe un transformador de alto voltaje de tipo seco refrigerado por aire que tiene una pantalla dispuesta entre los devanados y el núcleo, con la pantalla hecha de un revestimiento conductor.

Es un objetivo de la invención proporcionar un transformador para un convertidor electrónico modular de potencia y un método para ensamblar dicho transformador que supere las desventajas descritas anteriormente y que, en particular, satisfaga la limitación con respecto al entrehierro como se discutió anteriormente.

20 Este objetivo se logra como se describe a continuación, en particular mediante un transformador para un convertidor modular de potencia según la reivindicación de patente independiente. Otras realizaciones ejemplares son evidentes a partir tanto de las reivindicaciones dependientes como de la siguiente descripción.

Compendio de la invención

Un transformador para un convertidor modular según la presente invención comprende las características definidas por la reivindicación 1.

25 Cuando se produce una descarga en el aire tal como se describe anteriormente, el problema de la deposición de carga eléctrica en una superficie de la encapsulación se mitiga, ya que la carga puede fluir de forma relativamente libre y, por lo tanto, puede distribuirse relativamente rápido sobre la encapsulación, lo que reduce significativamente la aparición de elevados picos de campo eléctrico.

30 Un transformador para un convertidor modular según la presente invención comprende un divisor de voltaje, que se proporciona en conexión eléctrica con el primer devanado y el revestimiento conductor, estando configurado dicho divisor de voltaje para establecer un valor absoluto de un potencial eléctrico $|V_{\text{revestimiento}}|$ en el revestimiento conductor por debajo de un valor absoluto de un potencial eléctrico $|V_{\text{devanado}}|$ en el primer devanado, es decir $|V_{\text{revestimiento}}| < |V_{\text{devanado}}|$.

35 Preferiblemente, una conductividad σ_c del revestimiento conductor de electricidad se elige lo suficientemente baja como para evitar la acumulación de corrientes parásitas no deseadas en dicho revestimiento conductor; pero lo suficientemente grande como para garantizar que se pueda establecer un potencial eléctrico homogéneo en el revestimiento después de un tiempo suficientemente corto, por ejemplo, dentro de un rango de tiempo entre un segundo y unos minutos.

40 Según una variante de la invención a la que se hace referencia en uno o más de los aspectos y/o variantes anteriores, y en relación con los diseños de transformadores generalmente referidos como tipo de núcleo, tanto la primera como la segunda extremidad se extienden desde el primer al segundo yugo y viceversa, y rodean la ventana central. La primera bobina se extiende entre una primera terminación y una segunda terminación de dicha primera bobina en una dirección axial generalmente en paralelo con la primera dirección longitudinal, como el primer devanado que rodea al menos una sección de la primera extremidad que representa una primera sección del núcleo.

45 Preferiblemente, el segundo devanado, que también se extiende entre una primera terminación y una segunda terminación de dicho segundo devanado en una dirección axial generalmente en paralelo con la primera dirección longitudinal, también rodea al menos una porción de la misma primera sección del núcleo como el primer devanado, con la primera bobina, y el primer devanado, que rodea el segundo devanado. El primer devanado puede entonces representar un devanado primario del transformador, y/o el segundo devanado un devanado secundario. Además, el devanado primario puede comprender un tercer devanado conectado en serie o en paralelo con el primer devanado, que puede en particular rodear al menos una sección de la segunda extremidad, y/o el devanado secundario puede comprender un cuarto devanado conectado en serie o en paralelo con el segundo devanado, que en particular también puede rodear al menos una sección de la segunda extremidad; en donde el tercer devanado puede, en particular, rodear al cuarto devanado. Alternativamente, el primer devanado puede representar un devanado secundario del transformador, y/o el segundo devanado un devanado primario. Además, el devanado primario puede comprender un tercer devanado conectado en serie o en paralelo con el segundo devanado, que en particular puede rodear al menos una sección de la segunda extremidad, y/o el devanado secundario puede comprender un cuarto devanado conectado

en serie o en paralelo con el primer devanado, que en particular también puede rodear al menos una sección de la segunda extremidad; en donde el tercer devanado puede, en particular, rodear al cuarto devanado.

5 Según una variante de la invención a la que se hace referencia en uno o más de los aspectos y/o variantes anteriores, y en relación con los diseños de transformadores generalmente denominados como "acorazados", la primera y la segunda extremidad se extienden entre el primer y el segundo yugo y viceversa, y rodean la ventana central. Una tercera extremidad se extiende entre el primer y el segundo yugo, en particular en la primera dirección longitudinal; y entre la primera y la segunda extremidad, de modo que la ventana central se divide en una primera subventana y una segunda subventana, preferiblemente con ambas subventanas que se extienden a través del núcleo en la dirección lateral. La primera bobina se extiende entre la primera terminación y la segunda terminación de dicha primera bobina en la dirección axial generalmente en paralelo con la primera dirección longitudinal, con el primer devanado que rodea al menos una sección de la tercera extremidad que representa una primera sección del núcleo del transformador de diseño tipo acorazado.

10 Preferiblemente, el segundo devanado, que también se extiende entre una primera terminación y una segunda terminación de dicho segundo devanado en una dirección axial generalmente en paralelo con la primera dirección longitudinal, también rodea al menos una porción de la misma primera sección del núcleo como el primer devanado, con el primer devanado, que rodea al segundo devanado. El primer devanado puede entonces representar un devanado primario del transformador, y/o el segundo devanado un devanado secundario. Alternativamente, el primer devanado puede representar un devanado secundario del transformador, y/o el segundo devanado un devanado primario.

20 Según una variante de la invención a la que se hace referencia en uno o más de los aspectos y/o variantes anteriores, el núcleo es generalmente un núcleo cerrado, es decir, no hay entrehierros presentes en ninguna de las extremidades o yugos, ni entre ningún par de extremidad y yugo, de modo que el flujo magnético que une los devanados primario y secundario viaja, al menos esencialmente, completamente dentro de un material de alta permeabilidad, en general un material ferromagnético o ferrimagnético, que constituye el núcleo, de modo que, al menos esencialmente, no se da pérdida de flujo magnético a través del aire.

Según una variante de la invención a la que se hace referencia en uno o más de los aspectos y/o variantes anteriores, el núcleo, en lugar de ser un núcleo cerrado, puede comprender un espacio lleno con un material de baja permeabilidad, en general aire o materiales sintéticos, en particular, plásticos.

30 Estos y otros aspectos de la invención se harán evidentes y se aclararán con referencia a las realizaciones descritas de aquí en adelante.

Breve descripción de los dibujos

El tema de la invención se explicará con más detalle en el siguiente texto con referencia a las realizaciones ejemplares que se ilustran en los dibujos adjuntos, de los cuales:

35 La Figura 1 muestra un diagrama de circuitos para una celda convertidora de un convertidor electrónico modular de potencia conocido de la técnica anterior.

La Figura 2 muestra un diagrama de circuitos para un convertidor electrónico modular de potencia de acuerdo con la técnica anterior.

La Figura 3 muestra esquemáticamente una vista en perspectiva de un transformador de acuerdo con la técnica anterior.

40 La Figura 4 muestra esquemáticamente una vista en sección del transformador de la Figura 3.

La Figura 5 muestra esquemáticamente una vista en sección de un transformador según la presente invención.

La Figura 6 muestra esquemáticamente una vista superior de un transformador según la presente invención.

La Figura 7 muestra un diagrama de circuitos para una primera realización de un convertidor electrónico modular de potencia según la presente invención.

45 La Figura 8 muestra un diagrama de circuitos para otra realización de un convertidor electrónico modular de potencia según la presente invención.

La Figura 9 muestra un diagrama de circuitos para otra realización de un convertidor electrónico modular de potencia según la presente invención.

50 En principio, los símbolos de referencia idénticos en las Figuras denotan elementos idénticos. Para una mejor legibilidad, se han omitido ciertos símbolos de referencia en ciertos dibujos o donde elementos de partes idénticas aparecen repetidos en un solo dibujo.

Descripción detallada de realizaciones ejemplares

La Figura 5 muestra una representación esquemática de una realización preferida de un transformador 1 según la presente invención. De acuerdo con otra realización, la encapsulación 21 está cubierta con un revestimiento conductor de electricidad 60. Preferiblemente, el revestimiento conductor de electricidad 60 puede, por ejemplo, haberse aplicado mediante pulverización, pintura o bien ser una lámina de material conductor.

Una conductividad superficial $\sigma_c \cdot d$ del revestimiento conductor de electricidad 60 que tiene un espesor d se elige preferiblemente de tal manera que $10^{-4} \Omega^{-1} < \sigma_c \cdot d < 10^{-3} \Omega^{-1}$; dando lugar a una resistividad superficial ρ/d entre 1 k Ω y 10 k Ω , donde ρ es una resistividad aparente de un material del revestimiento conductor de electricidad 60 en $\Omega \cdot m$, y d el espesor del revestimiento conductor de electricidad 60 en m.

Alternativamente o además de mantener así la conductividad superficial del revestimiento conductor de electricidad 60 razonablemente baja, se puede proporcionar una hendidura que se extiende en la primera dirección longitudinal 900, es decir, en una dirección axial del primer devanado 20, en el revestimiento conductor de electricidad 60. La hendidura en el revestimiento interrumpe una ruta de corriente circular, reduciendo así en gran medida las corrientes parásitas. Ventajosamente, los bordes ranurados pueden redondearse para reducir las concentraciones de campo en dichos bordes.

Un divisor de voltaje resistivo 7 con resistores discretos primero y segundo que tienen resistencias R_1 y R_2 , respectivamente, y que comprende un puerto de entrada 71, un puerto de salida 72 correspondiente a un punto medio de dicho divisor de voltaje, y se proporciona un puerto de referencia 70, con el puerto de entrada 71 conectado al primer devanado 20, y el puerto de salida 72 conectado al revestimiento conductor 60. Los puertos pueden estar incorporados por terminales provistos para una fácil conectividad, en cuyo caso las conexiones pueden, por ejemplo, establecerse por cables, alambres o conductores similares. Alternativamente, las conexiones también pueden lograrse preferiblemente por medio de encolado, soldadura fuerte (o latonado), soldadura ordinaria u otros métodos de unión conocidos como tales, en particular cuando no se proporcionan terminales. Los voltajes u_a sobre el tramo de aire y u_s sobre la encapsulación se rigen por $u_a/R_1 = u_s/R_2$.

Los valores para R_1 y R_2 puede elegirse con alta precisión y, por lo tanto, el revestimiento conductor de electricidad 60 puede ajustarse a un potencial bien definido. Como consecuencia, las intensidades de campo eléctrico tanto en el tramo de aire como dentro del aislamiento sólido se vuelven bien definidas, de modo que ninguno de los dos necesita ser sobredimensionado.

Se observa que las muy bajas conductividades eléctricas σ_a de aire en el tramo de aire y la σ_s de la encapsulación también corresponden a resistencias R_a y R_s . Si se supone un área transversal efectiva A_a y A_s para el tramo de aire y la encapsulación 21, respectivamente, estas resistencias R_a y R_s se rigen por

$$R_a = \frac{s_a}{\sigma_a A_a}$$

y

$$R_s = \frac{s_s}{\sigma_s A_s}$$

Como R_a está efectivamente conectada en paralelo a R_1 y R_s , está efectivamente conectada en paralelo a R_2 , R_1 , y entonces es elegida ventajosamente pequeña en comparación con R_a , es decir, preferiblemente elegida para cumplir con $R_1 \ll R_a$ y R_2 es elegida ventajosamente pequeña en comparación con R_s , es decir, preferiblemente elegida para cumplir con $R_2 \ll R_s$. Por otra parte R_1 y R_2 no deben elegirse demasiado pequeñas, ya que esto causaría corrientes de fuga inaceptablemente altas y las pérdidas correspondientes. Dado que R_1 y R_2 son valores muy pequeños y adecuados para R_1 y R_2 , se pueden encontrar fácilmente. Según las simulaciones realizadas, se puede esperar un rendimiento particularmente bueno para $0,1 < R_1/R_a < 0,001$ y/o $0,1 < R_2/R_s < 0,001$. Tal elección de resistencias asegurará que una división de voltaje resistiva esté dominada por R_1 y R_2 en lugar de por R_s y R_a . Se ha hallado que los valores entre $10^9 \Omega$ y $10^{11} \Omega$ son prácticos para cada uno de R_1 y R_2 , en particular con $R_1 \approx 2,0 \cdot 10^{10} \Omega$ y $R_2 \approx 1,0 \cdot 10^{10} \Omega$.

La Figura 6 muestra una representación esquemática de una vista superior de otra realización preferida de un transformador según la presente invención. El primer resistor, en particular un elemento resistivo, preferiblemente formado a partir de un material con baja conductividad controlada, del primer resistor, está directamente conectado al revestimiento conductor de electricidad 60, con un aislamiento de resistor 22 contiguo al revestimiento conductor de electricidad 60. Preferiblemente, el aislamiento de resistor 22 comprende una pluralidad de aletas para aumentar una distancia de fuga. Además, el primer resistor está dispuesto preferiblemente en una región cerca del primer devanado 20 donde el campo eléctrico es comparativamente bajo. En particular, el primer resistor no está dispuesto en una región entre el devanado primario y el núcleo conectado a tierra, donde un campo eléctrico es relativamente alto, y en particular no se extiende dentro de la ventana central. Es más, el primer resistor está preferiblemente dispuesto de tal manera que no sobresalga más allá de una envoltura en forma de caja del mismo transformador, es decir, el

transformador sin el primer resistor. El primer resistor, por lo tanto, no contribuye a un tamaño total del transformador. Sin embargo, la distancia de separación disponible para el resistor es significativamente mayor que la distancia de separación entre el revestimiento conductor y el núcleo. Por lo tanto, el primer resistor puede cumplir con la normativa sobre aislamiento de aire que no se aplica al espacio entre el revestimiento conductor y el núcleo, como se trató anteriormente. Preferiblemente, el segundo resistor está incrustado en la encapsulación 21 que representa el aislamiento sólido y, por lo tanto, tampoco contribuye a un tamaño global del transformador.

Todos los demás aspectos de los transformadores ejemplares tal como se describen en las Figura 5 y 6 se realizan preferible y exactamente tal como se describió anteriormente con referencia a las Figura 3 y 4, en particular con símbolos de referencia idénticos que denotan e indican elementos idénticos (como también se especifica en la lista de símbolos de referencia que se presenta más adelante).

Conectar el primer resistor directamente al revestimiento conductor de electricidad 60 como se detalla anteriormente puede aliviar un problema de compensación que pueda ocurrir al usar resistores discretos: debido a que las corrientes transportadas por el divisor de voltaje son relativamente pequeñas, las secciones transversales de los conductores requeridos para conectar el divisor de voltaje también pueden ser relativamente pequeñas. Los conductores delgados, por ejemplo, que tengan secciones transversales cilíndricas con diámetro pequeño, no obstante, crean campos eléctricos relativamente grandes cerca de su superficie, en particular cuando se aplican voltajes relativamente altos sobre el divisor de voltaje, lo cual puede esperarse en las configuraciones tal como se trató anteriormente. En el aire, esto puede conducir a una descarga en corona. Si bien esto se puede contrarrestar fácilmente aumentando el diámetro, esto no resulta deseable debido a una mayor inversión de material, así como a los mayores requisitos de espacio.

En otra realización preferida de un transformador según la presente invención, en lugar de proporcionar un componente discreto para el segundo resistor tal como se describió anteriormente, se puede proporcionar una resistencia de valor apropiado aumentando deliberadamente la conductividad σ_s , por ejemplo, mediante la adición de partículas conductoras, preferiblemente partículas moderadamente conductoras, al aislamiento sólido que forma la encapsulación 21, obteniendo así una resistencia distribuida R_2' . Preferiblemente, una resistencia efectiva R_2' proporcionada así por el aislamiento sólido es ajustada de modo que sea significativamente menor que la resistencia R_a , es decir $R_2' \ll R_a$.

De manera similar, en otra realización preferida de un transformador según la presente invención, en lugar de proporcionar un componente discreto para el primer resistor tal como se describió anteriormente, se puede proporcionar una resistencia de valor apropiado aumentando deliberadamente la conductividad σ_a dentro del tramo de aire, por ejemplo, proporcionando medios para humedecer y/o ionizar dicho aire, obteniendo así una resistencia distribuida R_1' . Preferiblemente, una resistencia efectiva R_1' proporcionada por el tramo de aire es ajustada de modo que sea significativamente menor que la resistencia R_s es decir $R_1' \ll R_s$.

El empleo de una o más resistencias distribuidas como parte del divisor de voltaje también puede aliviar el problema de compensación que pueda ocurrir al usar resistores discretos: de manera similar a lo detallado anteriormente para conductores delgados, los elementos resistivos delgados, por ejemplo, que tienen secciones transversales cilíndricas con diámetro pequeño, también, crean campos eléctricos relativamente grandes cerca de su superficie, en particular cuando se aplican voltajes relativamente altos. En el aire, esto puede conducir a una descarga en corona. Si bien esto se puede contrarrestar fácilmente al proporcionar un aislante efectivo, esto puede no resultar deseado debido a una inversión en material adicional, así como al aumento de los requisitos de espacio.

Como un ejemplo que no forma parte de la presente invención, el divisor de voltaje es un divisor de voltaje capacitivo, que comprende en particular una primera capacitancia C_1 entre el puerto de salida 72 y el puerto de referencia 70 y una segunda capacitancia C_2 entre el puerto de entrada 71 y el puerto de salida 72. Para una frecuencia de funcionamiento ω del MFT, se dan impedancias Z_1 y Z_2 , con valores absolutos $|Z_1| = (\omega \cdot C_1)^{-1}$ y $|Z_2| = (\omega \cdot C_2)^{-1}$, respectivamente, para lo cual se aplican las mismas consideraciones detalladas anteriormente para los valores de R_1 y R_2 .

Como un ejemplo que no forma parte de la presente invención, el divisor de voltaje es un divisor de voltaje inductivo, que comprende en particular una primera inductancia L_1 entre el puerto de salida 72 y el puerto de referencia 70 y una segunda inductancia L_2 entre el puerto de entrada 71 y el puerto de salida 72. Para la frecuencia de funcionamiento ω del MFT, se dan impedancias Z_1 y Z_2 , con valores absolutos $|Z_1| = \omega \cdot L_1$ y $|Z_2| = \omega \cdot L_2$, respectivamente, para lo cual se aplican las mismas consideraciones detalladas anteriormente para los valores de R_1 y R_2 .

La Figura 7 muestra un diagrama de circuitos para un convertidor electrónico modular de potencia básico de acuerdo con una realización preferida de la presente invención, en un ejemplo con $N=4$ celdas de convertidor 01 conectadas en serie entre el primer terminal principal 011 y el segundo terminal principal 012 en el lado primario y en paralelo entre el tercer terminal principal 021 y el cuarto terminal principal 022 en el lado secundario de dicho convertidor modular. Preferiblemente, se proporciona una pluralidad de conmutadores 031 y 032 para permitir la desconexión de celdas convertidoras individuales del convertidor modular tem bajo ciertas circunstancias. Cada celda convertidora individual contiene un transformador 1 como se detalla anteriormente, con un revestimiento conductor 60 provisto en la encapsulación 21 que se proporciona como aislamiento sólido del primer devanado 20 según la invención. Un divisor

de voltaje resistivo está formado por resistencias R_1 y R_2 , con su puerto de entrada 71 conectado al primer devanado, su puerto de salida 72 conectado al revestimiento conductor y su puerto de referencia 70 conectado a tierra.

La Figura 8 muestra diagramas de circuitos para un convertidor electrónico modular de potencia básico según otra realización preferida de la presente invención, con $N=4$ celdas de convertidor 01 conectadas en serie entre el primer terminal principal 011 y el segundo terminal principal 012 en el lado primario y en paralelo entre el tercer terminal principal 021 y el cuarto terminal principal 022 en el lado secundario de dicho convertidor modular. Preferiblemente, se proporciona una pluralidad de conmutadores 031 y 032 para permitir la desconexión de celdas convertidoras individuales del convertidor modular tem bajo ciertas circunstancias. Cada celda convertidora individual contiene un transformador 1 como se detalla anteriormente, con un revestimiento conductor 60 provisto en la encapsulación 21 que se proporciona como aislamiento sólido del primer devanado 20 según la invención. Un divisor de voltaje resistivo está formado por resistencias R_1 y R_2 , con su puerto de salida 72 conectado al revestimiento conductor 60, y su puerto de referencia 70 conectado a tierra. A diferencia de la realización anterior, el puerto de entrada del divisor de voltaje 71 está conectado a un puerto de entrada del convertidor de CC a CA de la celda del convertidor respectiva. Esto permite una flexibilidad de diseño adicional, en particular en configuraciones donde el divisor de voltaje no está físicamente integrado con el transformador.

La Figura 9 muestra diagramas de circuitos para un convertidor electrónico modular de potencia básico según otra realización preferida de la presente invención, en un ejemplo con $N=4$ celdas de convertidor 01 conectadas en serie entre el primer terminal principal 011 y el segundo terminal principal 012 en el lado primario y en paralelo entre el tercer terminal principal 021 y el cuarto terminal principal 022 en el lado secundario de dicho convertidor modular. Preferiblemente, se proporciona una pluralidad de conmutadores 031 y 032 para permitir la desconexión de celdas convertidoras individuales del convertidor modular tem bajo ciertas circunstancias. Cada celda convertidora individual contiene un transformador 1 como se detalla anteriormente, con un revestimiento conductor 60 provisto en la encapsulación 21 que se proporciona como aislamiento sólido del primer devanado 20 según la invención. Un divisor de voltaje resistivo está formado por resistencias R_1 y R_2 , con su puerto de entrada 71 conectado al primer devanado y su puerto de salida 72 conectado al revestimiento conductor 60; a diferencia de las realizaciones anteriores, el puerto de referencia 70 del divisor de voltaje de la cuarta celda del convertidor está conectado al primer devanado de la tercera celda del convertidor, el puerto de referencia del divisor de voltaje de la tercera celda del convertidor al primer devanado de la segunda celda del convertidor, el puerto de referencia del divisor de voltaje de la segunda celda del convertidor al primer devanado de la primera celda del convertidor y, finalmente, el puerto de referencia del divisor de voltaje de la primera celda del convertidor está conectado a tierra. Este esquema de conexión para los divisores de voltaje reduce significativamente el voltaje sobre cada uno de los divisores de voltaje, en general por un factor igual a un número de celdas de convertidor activas, es decir, N ; siempre que todas las celdas estén activas, lo que a su vez mitiga el problema de elevados campos eléctricos que puedan darse en una vecindad de resistencias que puedan formar parte del divisor de voltaje.

Si bien la invención se ha ilustrado y descrito en detalle en los dibujos y la descripción anterior, dichas ilustración y descripción deben considerarse ilustrativas o ejemplares y no restrictivas; la invención no se limita a las realizaciones descritas. Los expertos en la técnica y con la puesta en práctica de la invención reivindicada pueden comprender y realizar otras variaciones de las realizaciones descritas, y a partir de un estudio de los dibujos, su descripción y las reivindicaciones adjuntas. En las reivindicaciones, el término "que comprende" no excluye otros elementos o pasos, y el artículo indefinido "un" o "uno" no excluye una pluralidad. El mero hecho de que ciertas medidas se mencionen en reivindicaciones dependientes mutuamente diferentes no indica que una combinación de estas medidas no pueda utilizarse ventajosamente. Cualquier signo de referencia en las reivindicaciones no debe interpretarse como limitante del alcance.

Se supone que a lo largo de este documento, a menos que se indique explícitamente lo contrario, una declaración $a \approx b$ implica que $|a-b|/(|a|+|b|) < 1/10$, preferiblemente $|a-b|/(|a|+|b|) < 1/100$, en donde a y b pueden representar cualquier variable y/o cantidad física o matemática descrita definida, y/o mencionada, en cualquier parte de este documento, o de otra manera conocida por un experto en la técnica. Además, una declaración de que a es al menos aproximadamente igual o al menos aproximadamente idéntica a b implica que $a \approx b$, preferiblemente $a = b$. Además, se supone que, a menos que se indique lo contrario, una declaración $a \gg b$ implica que $a > 5b$, preferiblemente $a > 100b$; y una declaración $a \ll b$ implica que $5a < b$, preferiblemente $100a < b$.

Debe observarse que el término "que comprende" no excluye otras características, en particular elementos o pasos, y que el artículo indefinido "un" o "uno" no excluye el plural. También se pueden combinar elementos descritos en asociación con diferentes realizaciones. También debe tenerse en cuenta que los signos de referencia en las reivindicaciones no deberán interpretarse como limitantes del alcance de las reivindicaciones.

El término "conexión" se utiliza para referirse a una conexión conductora de la electricidad como se denota comúnmente por una línea de conexión en un esquema de circuitos eléctricos, y formada, en particular, por una conexión de cable, una barra colectora o una línea de conducción de una placa de circuito eléctrico en una implementación física del circuito. Cuando se hace referencia a dos elementos del circuito como conectados entre sí, esto indica que existe una conexión como la definida anteriormente entre los dos, sin ningún elemento adicional, en particular sin resistores, condensadores o inductores discretos, interpuestos.

Los expertos en la técnica apreciarán que la presente invención puede realizarse en otras formas específicas sin apartarse de las características esenciales de la misma. Por lo tanto, las realizaciones descritas actualmente se consideran ilustrativas y no restrictivas en ninguno de los aspectos. El alcance de la invención está indicado por las reivindicaciones adjuntas.

5 **Lista de símbolos de referencia**

01	celda de convertidor (convertidora)
011	primer terminal principal
012	segundo terminal principal
021	tercer terminal principal
022	cuarto terminal principal
1	transformador
10	núcleo
101	primera subventana
102	segunda subventana
11	primera extremidad
12	segunda extremidad
13	tercera extremidad
14	primer yugo
15	segundo yugo
19	bastidor
191	elementos de marco
192	varilla
2	primera bobina
20	primer devanado
201	primera terminación de la primera bobina
202	segunda terminación de la primera bobina
21	encapsulamiento
211	regiones planas
22	aislamiento de resistor
30	segundo devanado
301	primera terminación del segundo devanado
302	segunda terminación del segundo devanado
31	Bobina arrollada
40	canal de enfriamiento
50	placa dieléctrica
51	varilla dieléctrica
52	tornillo dieléctrico
70	puerto de referencia del divisor de voltaje
71	puerto de entrada del divisor de voltaje
72	puerto de salida del divisor de voltaje
81	quinto terminal principal

82	sexto terminal principal
83	séptimo terminal principal
84	octavo terminal principal
900	primera dirección longitudinal
901	segunda dirección longitudinal
902	dirección lateral

REIVINDICACIONES

1. Un transformador (1) para un convertidor modular que comprende
- a) un núcleo (10);
- b) una primera bobina (2), comprendiendo dicha primera bobina
- 5 i) un primer devanado (20), en particular un devanado de alto voltaje, que rodea una primera sección del núcleo,
- ii) una encapsulación (21) hecha de material sólido, eléctricamente aislante y que encierra dicho primer devanado;
- c) un segundo devanado (30), en particular un devanado de bajo voltaje, que rodea la primera o segunda sección del núcleo;
- 10 d) un revestimiento conductor de electricidad (60) formado en al menos una porción de una superficie externa de la encapsulación, **caracterizado por que**
- e) se proporciona un divisor de voltaje en conexión eléctrica con el primer devanado (20) y el revestimiento conductor de electricidad (60), estando dicho divisor de voltaje configurado para establecer un valor absoluto de un potencial eléctrico $|V_{\text{revestimiento}}|$ en el revestimiento conductor por debajo de un valor absoluto de un potencial eléctrico $|V_{\text{devanado}}|$ en el primer devanado, es decir $|V_{\text{revestimiento}}| < |V_{\text{devanado}}|$ y por que el divisor de voltaje es un divisor de voltaje resistivo que comprende
- 15 f) una primera resistencia (R_1) provista entre el primer devanado (20) y el revestimiento conductor de electricidad (60), y
- g) una segunda resistencia (R_2) provista entre el revestimiento conductor de electricidad (60) y una conexión de referencia, preferiblemente una conexión a tierra.
- 20 2. El transformador (1) según la reivindicación 1, además **caracterizado por que**
- a) el divisor de voltaje comprende un puerto de entrada (71), en particular un terminal de entrada, un puerto de salida (72), en particular un terminal de salida y un puerto de referencia (70), en particular un terminal de referencia;
- b) el puerto de entrada del divisor de voltaje (71) está conectado al primer devanado (20);
- c) el puerto de salida del divisor de voltaje (72) está conectado al revestimiento conductor de electricidad (60).
- 25 3. El transformador (1) según la reivindicación 2, además **caracterizado por que** el puerto de referencia del divisor de voltaje está conectado al potencial de tierra.
4. El transformador (1) según una de las reivindicaciones 1 a 3, además **caracterizado por que** la primera y/o segunda resistencia están constituidas por resistores discretos, preferiblemente resistores óhmicos.
- 30 5. El transformador (1) según una de las reivindicaciones 1 a 4, además **caracterizado por que** la primera resistencia está constituida por un elemento resistivo, con un aislamiento de resistor (22) formado en dicho elemento resistivo, con dicho aislamiento de resistor (22) situado contiguo al revestimiento conductor de electricidad (60).
6. El transformador (1) según una de las reivindicaciones 1 a 3, además **caracterizado por que** la segunda resistencia es proporcionada por la encapsulación (21), en donde dicha encapsulación (21) está formada por un material eléctricamente aislante que tiene una conductividad eléctrica de $\sigma_s > 10^{-5}$ S/m, preferiblemente $\sigma_s > 5,0 \cdot 10^{-4}$ S/m, lo más preferiblemente $\sigma_s > 5,0 \cdot 10^{-3}$ S/m.
- 35 7. El transformador (1) según una de las reivindicaciones anteriores, en donde el revestimiento conductor de electricidad (60) tiene una resistividad superficial ρ/d entre 0,5 k Ω y 50 k Ω , preferiblemente entre 1 k Ω y 10 k Ω .
8. El transformador (1) según una de las reivindicaciones anteriores, en donde se proporciona una hendidura que se extiende en una primera dirección longitudinal (900) en el revestimiento conductor de electricidad (60), correspondiendo dicha primera dirección longitudinal (900) a una dirección axial del primer devanado (20).
- 40 9. Un convertidor electrónico modular de potencia que comprende,
- a) un primer terminal principal (011), un segundo terminal principal (012), un tercer terminal principal (021) y un cuarto terminal principal (022),
- b) una pluralidad de celdas de convertidor con

i) un primer subconjunto de celdas de convertidor, con dicho primer subconjunto que comprende preferiblemente todas las celdas de convertidor de la pluralidad de celdas de convertidor, que puede conectarse eléctricamente en serie entre el primer terminal principal (011) y el segundo terminal principal (012) de dicho convertidor modular,

5 ii) un segundo subconjunto de celdas de convertidor, con dicho segundo subconjunto que comprende preferiblemente todas las celdas de convertidor de la pluralidad de celdas convertidoras, que puede conectarse eléctricamente en paralelo entre el tercer terminal principal (021) y el cuarto terminal principal (022) de dicho convertidor modular;

caracterizado por que

10 c) una pluralidad de, preferiblemente todas, las celdas de convertidor del primer o segundo subconjunto que comprende un transformador (1) según una de las reivindicaciones 1 a 8.

10. El convertidor modular según la reivindicación 11, además **caracterizado por que** el primer subconjunto comprende N celdas de convertidor, cada una de las cuales comprende

a) un transformador (1) según una de las reivindicaciones 1 a 8,

b) un quinto, sexto, séptimo y octavo terminal principal, en donde

15 i) el quinto terminal principal de la primera celda del convertidor del primer subconjunto está conectado al primer terminal principal (011) del convertidor electrónico modular de potencia,

ii) el sexto terminal principal de la N -ésima celda del convertidor del primer subconjunto está conectado al segundo terminal principal (012) del convertidor electrónico modular de potencia, y

20 iii) para $n = 2, \dots, N$, el sexto terminal principal de la $(n-1)$ -ésima celda de convertidor está conectado al quinto terminal principal de la (n) -ésima celda convertidora

c) para $n = 2, \dots, N$, el terminal de referencia del divisor de voltaje (70) para el transformador de la n -ésima celda del convertidor está conectado a la capa conductora del transformador para la $(n-1)$ -ésima celda del convertidor,

d) el terminal de referencia del divisor de voltaje (70) del transformador de la primera celda del convertidor está conectado al potencial de tierra.

25

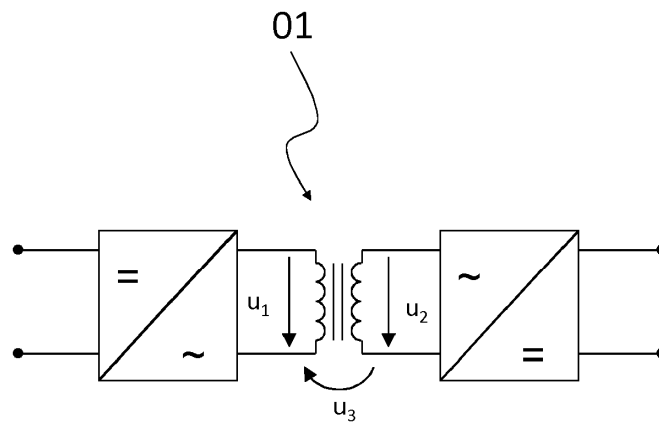


Fig. 1

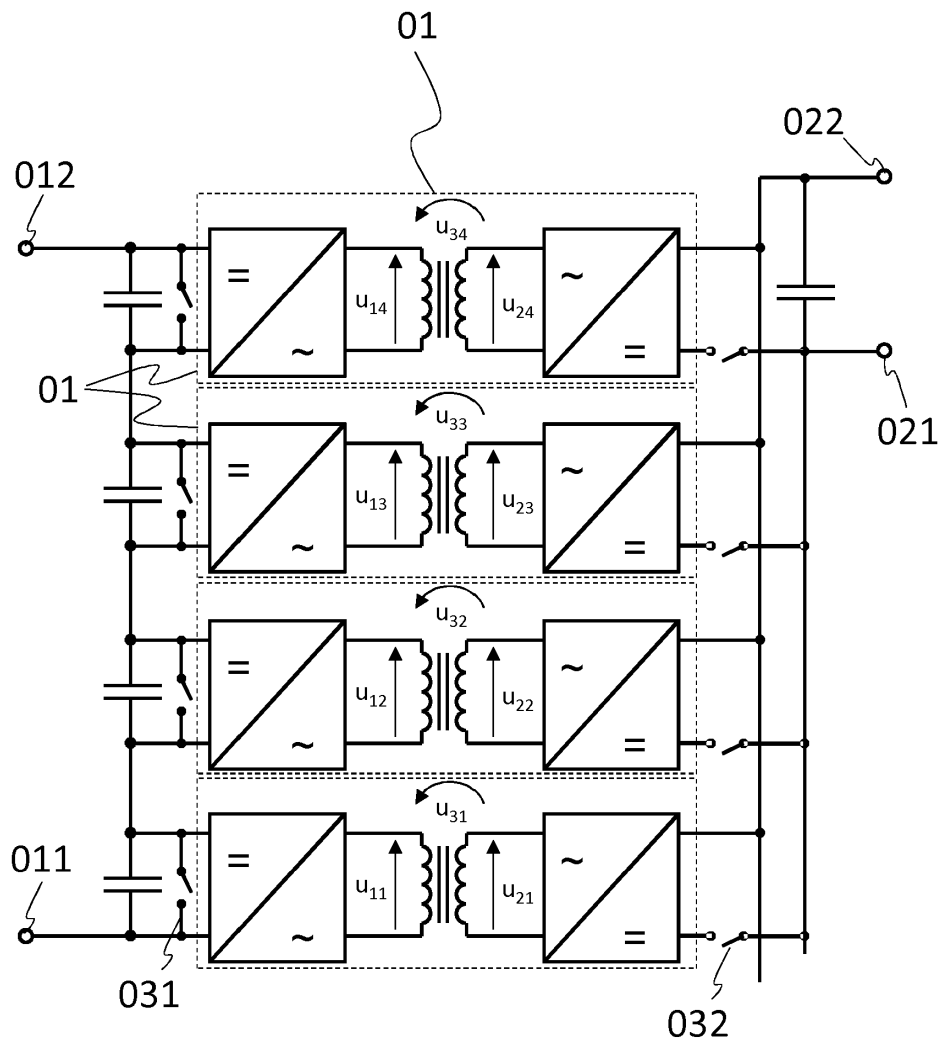


Fig. 2

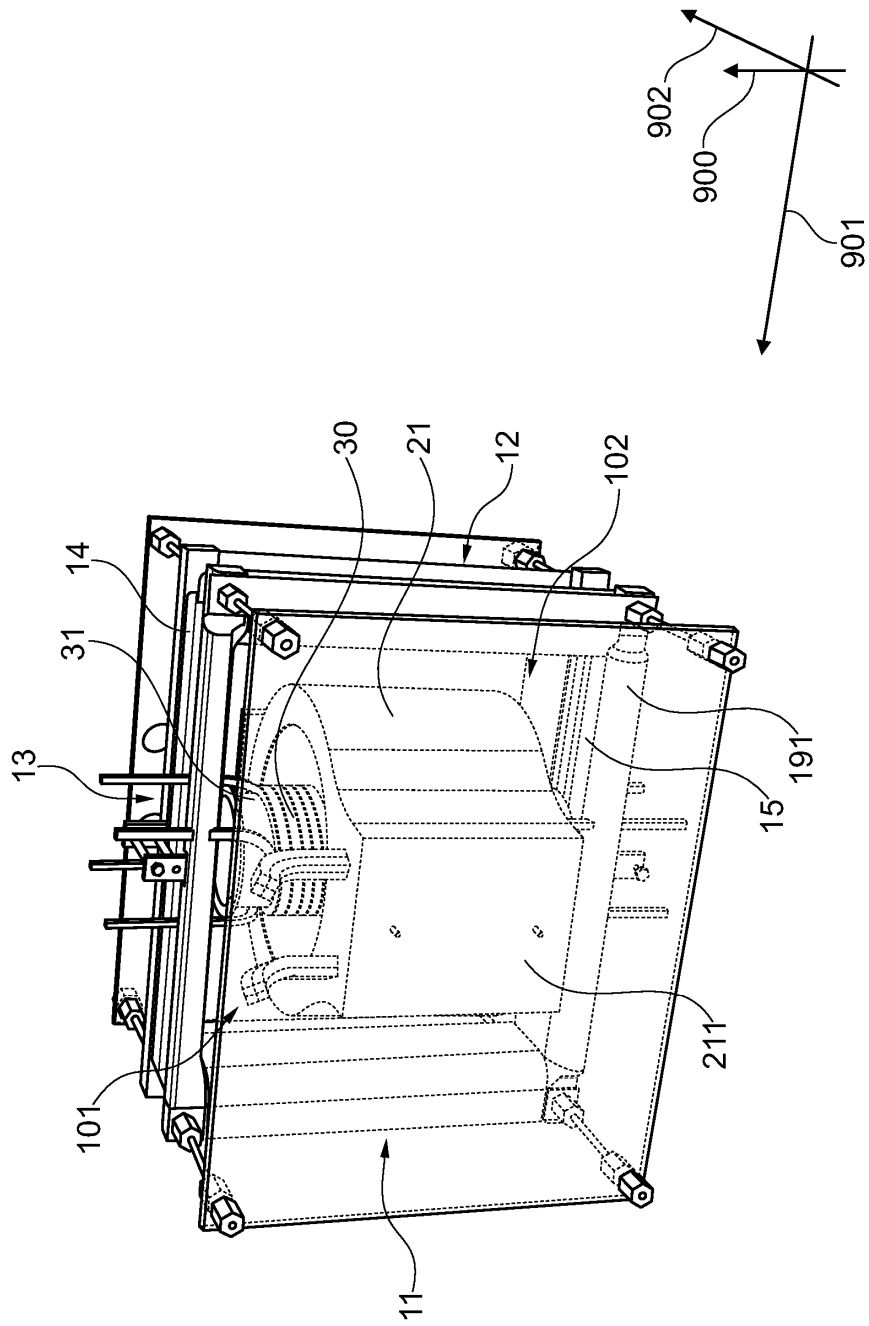


Fig. 3

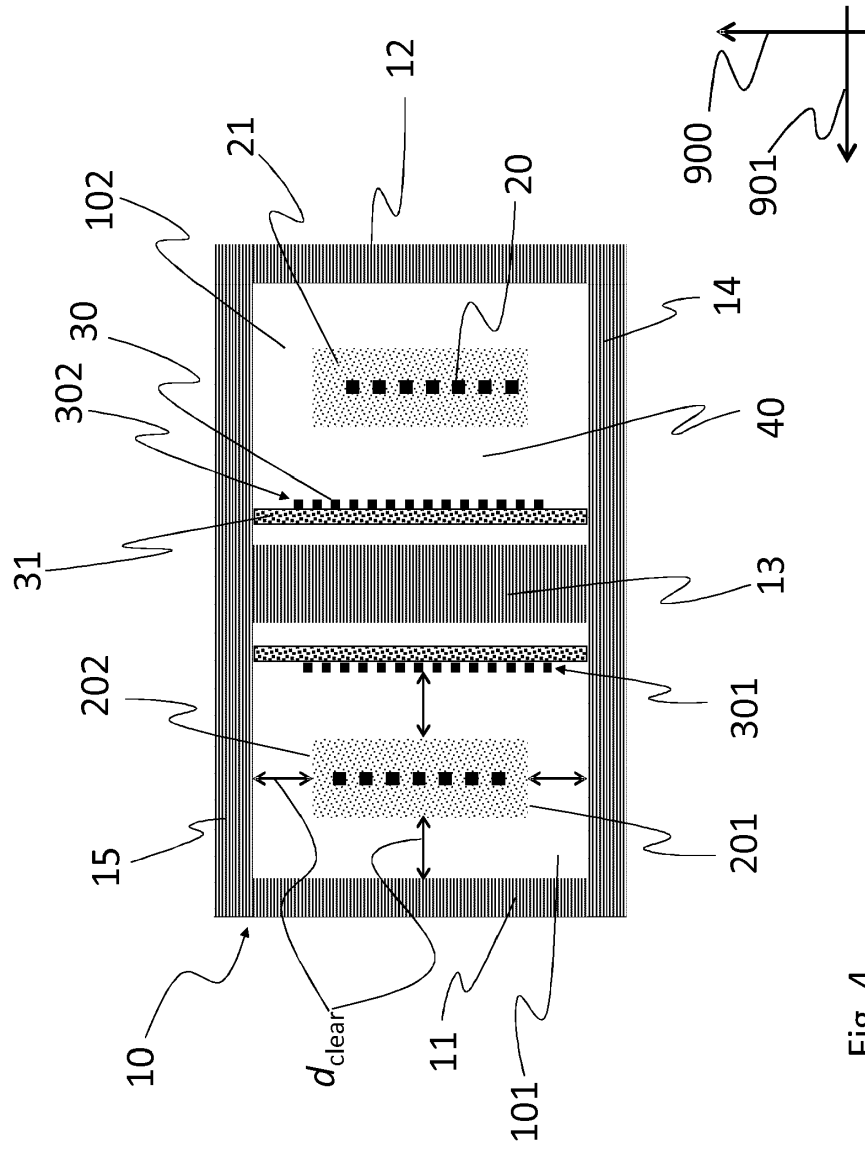


Fig. 4

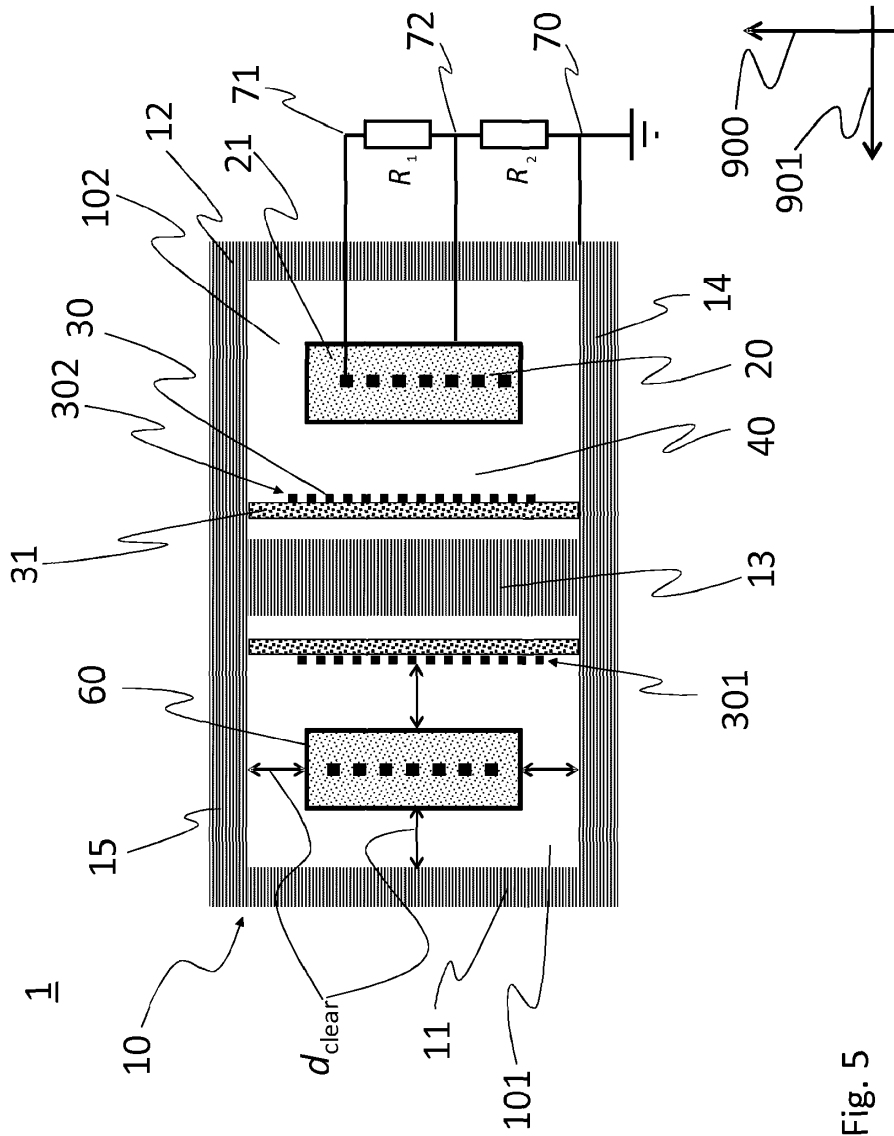


Fig. 5

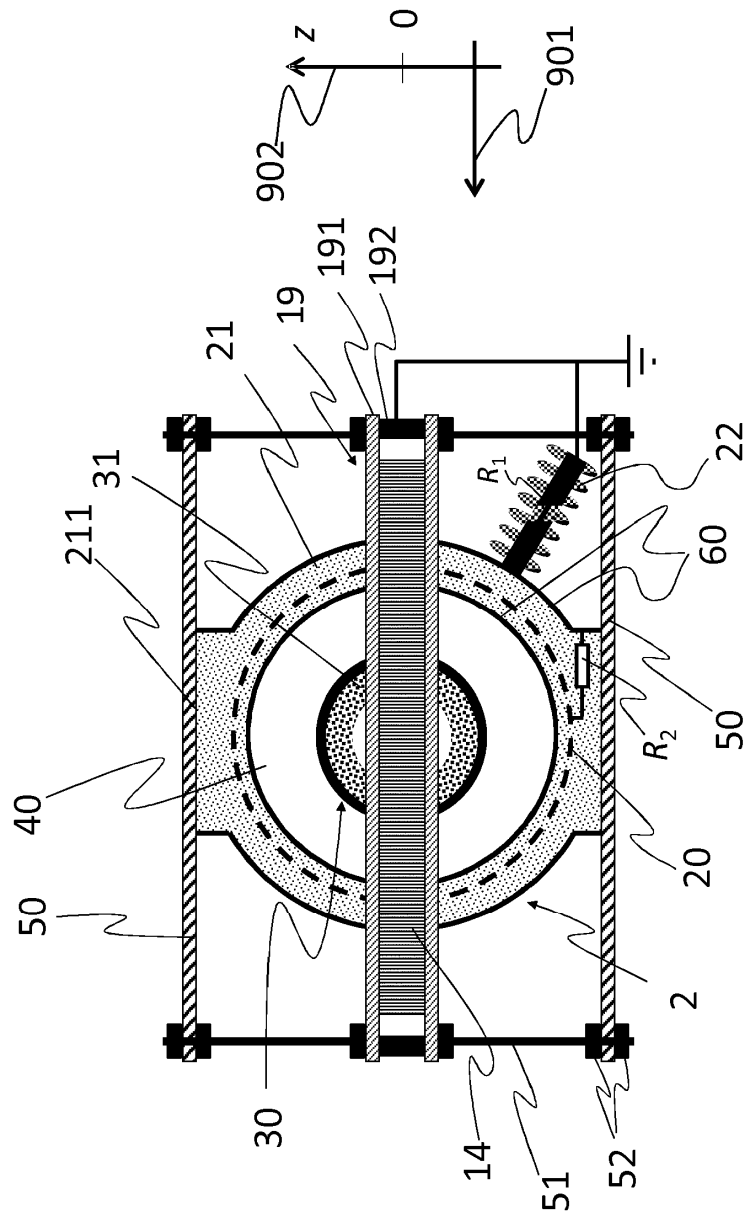


Fig. 6

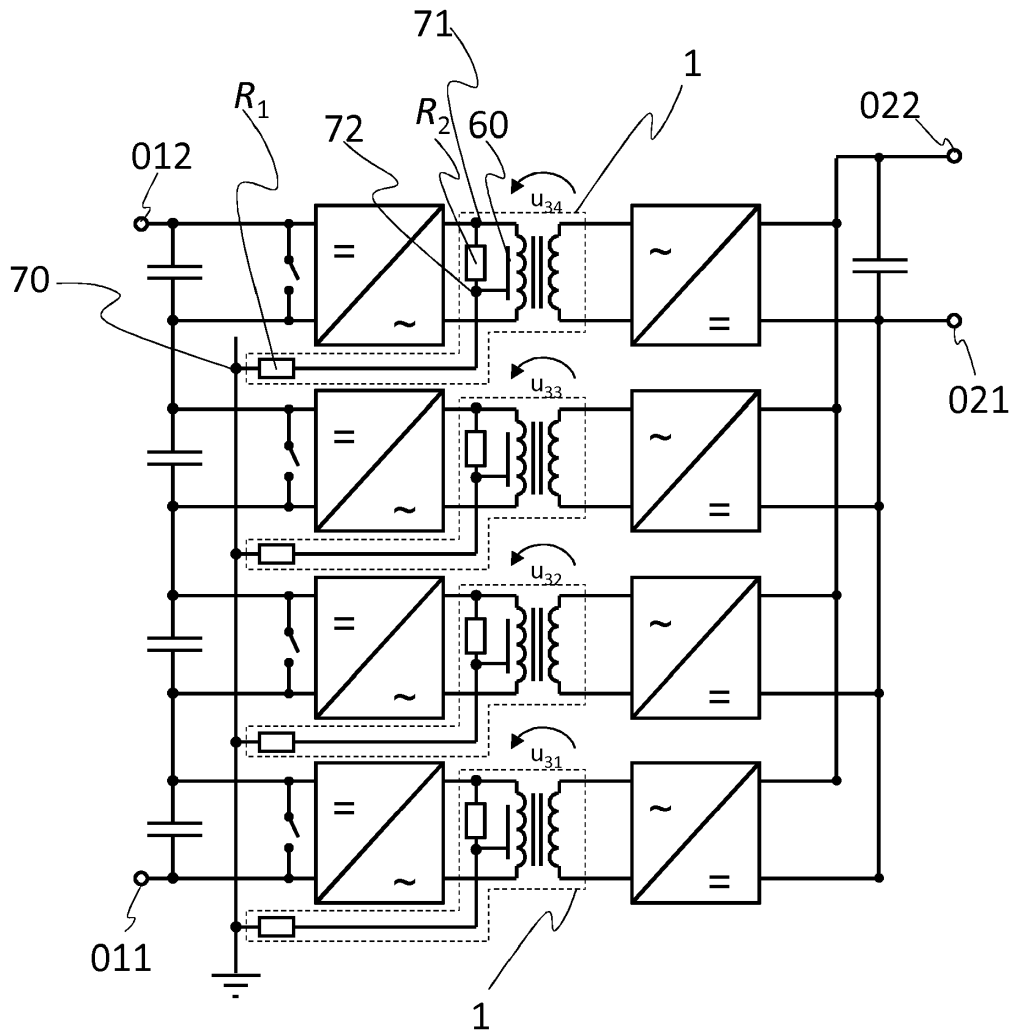


Fig. 7

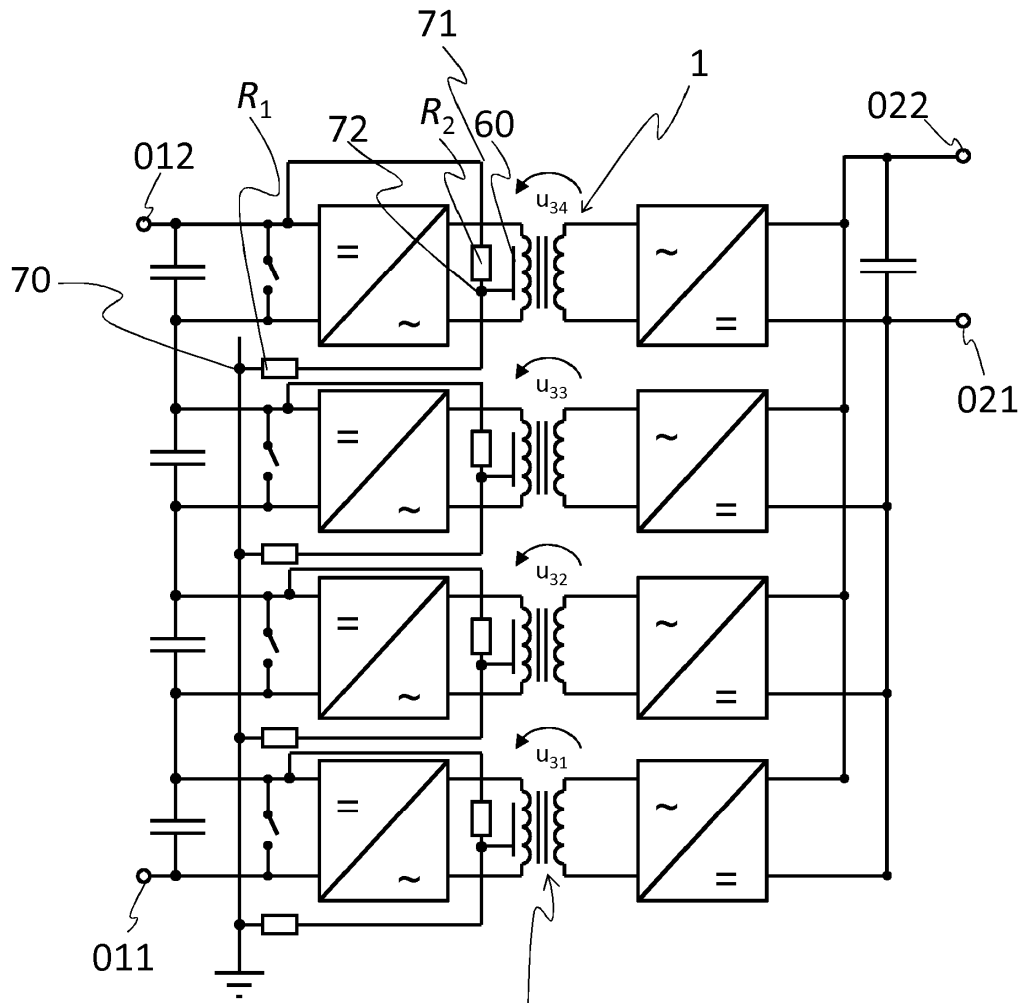


Fig. 8

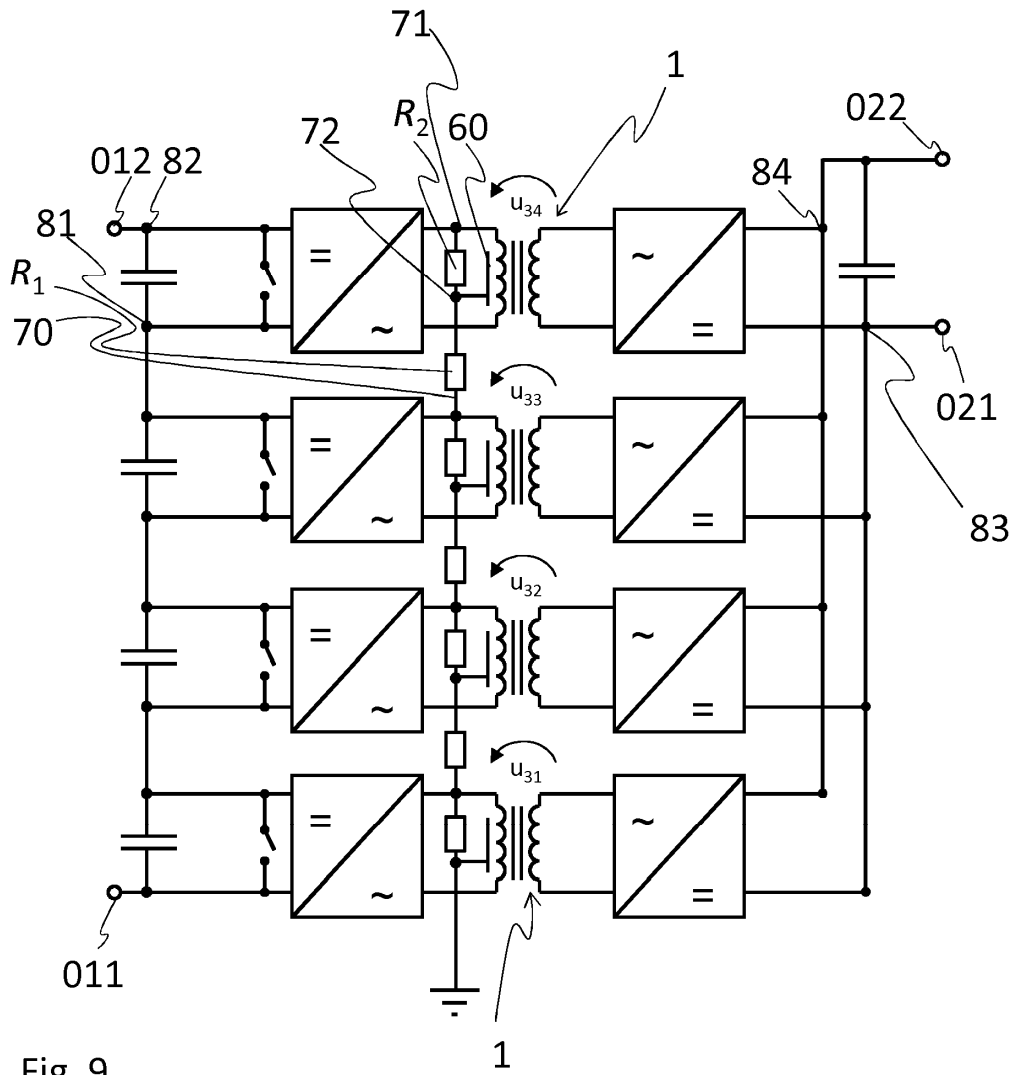


Fig. 9