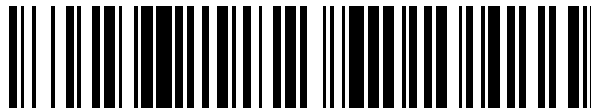


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 444 789**

51 Int. Cl.:

**H01F 6/06**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **02.07.2010 E 10168256 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.12.2013 EP 2402961**

54 Título: **Método de acondicionamiento de corriente, en particular en un limitador de corriente de falla**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**26.02.2014**

73 Titular/es:

**BRUKER HTS GMBH (100.0%)  
Ehrichstrasse 10  
63450 Hanau, DE**

72 Inventor/es:

**USOSKIN, ALEXANDER y  
KLEIN, HANS-UDO**

74 Agente/Representante:

**ISERN JARA, Nuria**

**ES 2 444 789 T3**

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

## DESCRIPCIÓN

Método de acondicionamiento de corriente, en particular en un limitador de corriente de falla.

La presente invención se refiere a un método de acondicionamiento de corriente, que comprende:

- 5       - transportar una corriente primaria a través de una bobina primaria;
- acoplar una bobina secundaria a la bobina primaria por medio del flujo magnético común, en donde la bobina primaria y la bobina secundaria están dispuestas coaxialmente, en donde la bobina secundaria comprende un superconductor susceptible de extinción, donde la extinción causa una transición del
- 10       superconductor desde un estado de superconducción de baja resistencia hasta un estado extinguido de alta resistencia,
- y en el estado de superconducción de baja resistencia de la bobina secundaria, guiar una fracción principal del flujo magnético común de la bobina primaria y de la bobina secundaria por el interior de un medio ferromagnético.

Se conoce un método de ese tipo a partir del documento DE 195 24 579 A1.

- 15       La presente invención se refiere a un método de acondicionamiento de corriente que puede ser empleado, en particular, en los campos de la generación, la transmisión y la distribución de energía para la protección de la red y de los equipos contra la corriente de falla.

- El acondicionamiento de corriente resulta necesario en la generación, transmisión y distribución de energía. El acondicionamiento de corriente considerado como limitación de corriente de las corrientes de falla (por ejemplo, corrientes cortocircuitadas) no sólo permite proteger equipos eléctricos contra sobrecorrientes, sino también aprovechar los equipos ya disponibles a un nivel más alto de potencia transportada.
- 20

- En general, se puede proporcionar acondicionamiento de corriente por medio de numerosos métodos, por ejemplo, usando métodos de saturación magnética (reactores de saturación), conmutación mecánica, conmutación electrónica (en base a conmutadores de estado sólido), etc. Los métodos de acondicionamiento de corriente desarrollados recientemente están basados en la transición de un superconductor desde un estado de baja resistencia (superconducción) a un estado de alta resistividad (extinguido), y permiten un acondicionamiento de corrientes elevadas a tensiones media y alta. Los métodos de acondicionamiento de corriente más económicos que usan la transición de un superconductor, en particular con respecto a pérdidas de potencia y a crio-consumo, están basados en un acoplamiento inductivo de una corriente de cortocircuito que va a ser acondicionada con un
- 25       superconductor. En la presente memoria, no se necesitan conductores de corriente que conectan áreas de temperatura ambiente con áreas de temperatura criogénica; el superconductor (típicamente, una bobina superconductora cortocircuitada) puede estar completamente encapsulado, con lo que el aislamiento térmico es simple y eficiente. Diversos métodos de acondicionamiento de corriente que tienen como objetivo la limitación de corrientes de falla han sido desarrollados en este último campo.
- 30

- 35       El documento JP 04 112 620 A divulga un método de acondicionamiento de corriente en el que una corriente de cortocircuito (corriente primaria) que va a ser acondicionada es transportada a través de una bobina primaria, y una bobina secundaria, dispuesta radialmente en el interior de la bobina primaria y realizada con un material superconductor, está acoplada a la primera bobina por medio de un flujo magnético común. Tanto en el estado de baja resistencia (superconducción) como en el estado de alta resistencia (extinguido) de la bobina secundaria, el flujo magnético común es guiado en el aire. El método permite solamente un pequeño efecto de acondicionamiento de corriente, y más específicamente, solamente un pequeño efecto de limitación de corriente.
- 40

- Un mejor grado de acondicionamiento de corriente fue alcanzado cuando el guiado del flujo magnético se realizó en el interior de un medio ferromagnético, en comparación con el método descrito en el documento DE 19 524 579. En este caso, la corriente de cortocircuito (corriente primaria) es transportada a través de una bobina primaria, y una bobina secundaria, dispuesta radialmente por fuera de la bobina primaria y construida con un material superconductor, está acoplada a la primera bobina a través de un flujo magnético común. Tanto en el estado de alta resistencia (extinguido) como en el estado de baja resistencia (superconducción) de la bobina secundaria, el flujo magnético común está guiado por el interior de un núcleo de transformador ferromagnético. Sin embargo, en el estado de alta resistencia de la bobina secundaria, este método de acondicionamiento de corriente introduce distorsiones armónicas graves en la corriente primaria; las distorsiones armónicas totales pueden exceder fácilmente del 20 al 30%. Estas distorsiones armónicas son una amenaza grave para la seguridad de las redes eléctricas y de los equipos eléctricos alimentados con la corriente primaria.
- 45
- 50

- El documento DE 196 28 358 C1 describe un limitador de corriente de falla de tipo AC con una bobina primaria y una bobina secundaria superconductora desplazada lateralmente, acoplada a través de un núcleo ferromagnético en forma de anillo. El núcleo tiene miembros transversales delgados que entran en saturación magnética cuando la
- 55

bobina secundaria se extingue. La bobina secundaria está completamente rellena con material ferromagnético.

### Objeto de la invención

El objeto de la presente invención consiste en proporcionar un método económico y eficiente de acondicionamiento de corriente que reduce las distorsiones armónicas.

### 5 Breve descripción de la invención

Este objeto se ha alcanzado, de acuerdo con la invención, mediante el método que aparece al principio, caracterizado por:

- 10 - cuando la bobina secundaria se extingue, conmutar el flujo magnético común de tal modo que una fracción principal del flujo magnético común es guiado por el exterior del medio ferromagnético en el estado extinguido de alta resistencia del superconductor, en el que una mayor parte de la sección transversal de la bobina primaria y una mayor parte de la sección transversal de la bobina secundaria no están rellenas con el medio ferromagnético.

15 La invención ha encontrado que incrementar la fracción del flujo magnético que es guiado por el exterior del medio electromagnético conduce a un rápido descenso de la distorsión armónica total (THD) cuando el superconductor extinguido de la bobina secundaria está en el estado resistivo alto (extinguido). Independientemente del material ferromagnético empleado, la caída de la THD ocurre cuando una fracción principal del flujo magnético común está fuera del medio ferromagnético. De ese modo, una conmutación (redistribución) de una porción compartida (porcentaje) del flujo magnético común desde el espacio interior hasta el exterior con respecto al medio ferromagnético en la extinción permite suprimir al menos parte de las distorsiones armónicas.

20 Obsérvese que según la invención, en el estado de baja resistencia (superconducción) del superconductor, una fracción principal del flujo magnético común es guiado por el interior de un medio ferromagnético, lo que garantiza un buen acoplamiento de la primera y la segunda bobinas durante el funcionamiento normal y principalmente durante la fase inicial de transición desde el modo operativo normal (estado de baja resistencia) hasta el estado de alta resistividad. De ese modo, el equipo para llevar a cabo el método de la invención puede ser mantenido de un modo relativamente corto. Además, el medio ferromagnético mejora también un efecto de limitación de corriente en el estado de alta resistencia (extinguido) del superconductor, creando una inductancia en la bobina primaria.

30 El flujo magnético común significa en este caso que las líneas de flujo magnético cerradas pasan a través tanto de la bobina primaria como de la bobina secundaria. Una fracción principal significa, en este caso, más de un 50%, con preferencia de al menos un 75% (aplicable tanto a la fracción de flujo por el interior del medio ferromagnético con anterioridad a la extinción, como a la fracción de flujo por fuera del medio ferromagnético tras la extinción; obsérvese que estas dos fracciones de flujo pueden ser independientes entre sí y tener típicamente valores diferentes). El flujo magnético puede ser calculado por integración de la densidad B de flujo magnético (que resulta de  $\mu_0 \cdot \mu \cdot H$ ) a través del área A. En este caso  $\mu_0$  y  $\mu$  indican la permeabilidad absoluta y la relativa, respectivamente.

35 En la presente memoria se considera que un medio es ferromagnético si la permeabilidad magnética relativa  $\mu$  (en el caso no saturado) es de 1,1 o mayor, con preferencia 100 o mayor (típicamente, la permeabilidad magnética relativa es del orden de 1000 o mayor, para el material de hierro común). Por fuera del medio ferromagnético, existe un medio no magnético tal como vacío, un gas (por ejemplo aire), un líquido no magnético (por ejemplo, nitrógeno líquido) o un sólido no magnético (por ejemplo latón, acero inoxidable no magnético, etc.), típicamente con una permeabilidad magnética relativa de entre 0,99 y 1,01.

40 La conmutación tras la extinción incluye un descenso de la porción (porcentaje) compartida del flujo magnético común que es guiado a través del medio ferromagnético típicamente en el menos un 25%, con preferencia al menos un 50%, más preferiblemente al menos un 75% (con respecto al flujo común total). En otras palabras, la porción (porcentaje) compartida del flujo magnético común que es guiado en un medio no magnético, se incrementa (obsérvese que el flujo magnético común total se incrementa con la extinción). Como resultado, tras la extinción, una fracción principal del flujo magnético común de la bobina principal y de la bobina secundaria, es guiada por el exterior del medio ferromagnético.

50 De acuerdo con la invención, una parte principal de la sección transversal de la bobina primaria y una parte principal de la sección transversal de la bobina secundaria no están rellenas de medio ferromagnético. Esto facilita la conmutación de fracciones sustanciales del flujo magnético común hasta el exterior del núcleo. En la presente memoria, una parte principal de la sección transversal es mayor del 50%, con preferencia del 75% o más; incluso es posible del 90% o más de acuerdo con la invención. El núcleo (ferro)-magnético ocupa típicamente entre el 2% y el 40%, con preferencia entre el 3% y el 30%, más preferiblemente entre el 5% y el 20% de la sección transversal de la bobina primaria y de la bobina secundaria. Obsérvese que los porcentajes con referencia a la sección transversal se aplican también típicamente a porcentajes de volúmenes del interior de las bobinas.

55 Además, la bobina principal y la bobina secundaria están dispuestas coaxialmente. En la presente memoria,

5 "coaxialmente" significa que las bobinas tienen una simetría de eje de rotación común (obsérvese que las bobinas pueden ser, aunque no necesariamente, de forma circular en sección transversal; las bobinas pueden ser de forma rectangular-cuadrada con un eje cuádruple); típicamente, una está situada en el interior de la otra (típicamente, con la bobina secundaria como bobina interior). Además, las bobinas están dispuestas preferiblemente sin desplazamiento axial (es decir, no una encima de la otra).

#### Variantes preferidas de la invención

Una variante ventajosa del método de la invención está caracterizada por:

- en el estado de baja resistencia de la bobina secundaria, no saturar el medio ferromagnético,
- 10 - y en el estado de alta resistencia de la bobina secundaria, saturar el medio ferromagnético. Al no saturar el medio ferromagnético en el estado de baja resistencia, se puede establecer un buen acoplamiento de la bobina primaria y la bobina secundaria. En la presente memoria, no saturado significa que el medio ferromagnético no se satura por término medio; posiblemente existan áreas muy pequeñas (por ejemplo, <1% en volumen) que puede estar saturadas debido a los efectos magnéticos locales (áreas de borde, esquinas, etc.). La saturación del medio ferromagnético en el estado de alta resistencia facilita la conmutación de una fracción sustancial del flujo común por fuera del medio ferromagnético tras la extinción.

15 En otra variante preferida, el flujo magnético total común en el estado de baja resistencia de la bobina secundaria ("flujo no equilibrado"), es más pequeño que el flujo magnético común guiado por fuera del medio ferromagnético en el estado de alta resistencia de la bobina secundaria. De ese modo, se puede alcanzar un buen efecto limitador de corriente con distorsiones armónicas reducidas.

20 Más preferida es una variante en la que la corriente primaria es:

- una corriente alterna,
- o una corriente alterna superpuesta con una corriente continua. Típicamente, la corriente alterna es de tipo seno. Tales corrientes primarias (corrientes de cortocircuito) pueden ser acondicionadas fácilmente por medio del método de la invención.

25 Una variante ventajosa está caracterizada por el hecho de disponer un refrigerante en el interior de la bobina primaria y de la bobina secundaria por fuera del medio ferromagnético.

30 Este refrigerante está destinado a refrigerar el superconductor (el cual puede comprender, en particular, material HTS con una temperatura crítica de 40 °K o más, con preferencia 85 °K o más). Típicamente, el espacio del interior de la bobina primaria y/o de la bobina secundaria está lleno sólo parcialmente de refrigerante. El refrigerante puede estar dispuesto en un recipiente tal como un criostato o un vaso dewar toroidal. Es posible disponer la bobina secundaria en el interior del recipiente. Los refrigerantes pueden ser LN<sub>2</sub> o LHe<sub>2</sub> o LNe<sub>2</sub>, por ejemplo. El recipiente puede permitir una construcción más compacta, y un tiempo operativo más largo entre rellenos. Se debe apreciar que pueden aplicarse otras formas para refrigerar la bobina secundaria, tal como usando refrigerantes por fuera de las bobinas y aplicando un acoplamiento térmico metálico a esos refrigerantes, o por enfriamiento directo (en particular, cuando se usan superconductores de alta temperatura).

40 Resulta preferida otra variante en la que, en el estado de alta resistencia de la bobina secundaria, la corriente secundaria inducida en la bobina secundaria tiene un módulo que es igual o mayor que 1/100, con preferencia igual o mayor que 1/50, del módulo de la corriente primaria multiplicado por el número de espiras de la bobina primaria. En este caso, la bobina secundaria puede contribuir adicionalmente al efecto de limitación/acondicionamiento de corriente debido a las pérdidas resistivas introducidas por la bobina secundaria. A pesar de una cierta supresión del flujo magnético común, el efecto total se mantiene considerablemente positivo.

También cae dentro del alcance de la presente invención un limitador de corriente de falla, en particular adecuado para llevar a cabo un método inventivo según se ha descrito anteriormente, que comprende:

- una bobina primaria,
- 45 - una bobina secundaria que comprende un superconductor susceptible de extinción, en el que la bobina primaria y la bobina secundaria están dispuestas coaxialmente, y
- un núcleo de un medio ferromagnético, que discurre a través de ambas bobina primaria y bobina secundaria, caracterizado porque el núcleo, la bobina primaria y la bobina secundaria son susceptibles de conmutar una fracción sustancial de un flujo magnético común de la bobina primaria y de la bobina secundaria desde el interior del núcleo hasta el exterior del núcleo cuando la bobina secundaria se extingue, en donde una parte principal de la sección transversal de la bobina primaria y una porción principal de la sección transversal de la bobina secundaria no están rellenas con medio ferromagnético. Mediante el limitador de corriente de falla de la invención, se pueden controlar corrientes altas a tensiones

5 medias y altas con poco esfuerzo, y no se introducen distorsiones armónicas en el estado de alta resistencia (extinguido). El núcleo, la bobina primaria (en particular, su geometría) y la bobina secundaria (en particular, su geometría), están diseñados de tal modo que la conmutación del flujo magnético común se logra cuando la bobina secundaria se extingue. Conmutar una fracción sustancial significa en la presente memoria que la fracción (el porcentaje) del flujo magnético común guiado en el interior del medio ferromagnético en el estado de superconducción de baja resistencia del superconductor es al menos un 25%, con preferencia al menos un 50%, más preferiblemente al menos un 75% con respecto al flujo magnético común total), más alto que en el estado extinguido de alta resistencia del superconductor.

10 También se prefiere una realización del limitador de corriente de falla de la invención en la que el núcleo tiene una forma cerrada. Esto reduce los campos de dispersión.

Alternativamente, en una realización también preferida, el núcleo es de forma abierta. La forma abierta requiere menos material ferromagnético.

En otra realización ventajosa, la bobina secundaria es una bobina cortocircuitada, de una sola espira. Una bobina secundaria de este tipo es particularmente simple de fabricar.

15 En un desarrollo adicional preferido de esta realización, la bobina cortocircuitada de una sola espira comprende una multitud de anillos que están acoplados entre sí. Usando una pluralidad de anillos, la corriente crítica absoluta en la bobina secundaria puede ser ajustada a un valor nominal. El acoplamiento se realiza a través de un flujo magnético común y/o galvánicamente (es decir, eléctricamente).

20 También se prefiere una realización en la que el limitador de corriente de falla comprende además una tercera bobina para mantener una detección de corrientes de Foucault, en particular en donde la tercera bobina es una bobina normalmente conductora, de una sola espira cortocircuitada. Esta bobina permite ajustar la corriente cortocircuitada o limitada a un valor nominal y de ese modo proporcionar una relación requerida de la corriente nominal respecto a la corriente acondicionada (factor de "acondicionamiento" o de "limitación"). Si la bobina es del tipo de una sola espira, resulta particularmente simple de fabricar. Obsérvese que la tercera bobina, que es del tipo de una sola espira, puede comprender una multitud de anillos que están acoplados entre sí, en particular acoplados a través de un flujo magnético común y/o galvánicamente (es decir, eléctricamente).

25 En otra realización ventajosa, la bobina secundaria comprende un superconductor de alta temperatura (HTS), con preferencia del tipo de un conductor recubierto. Así, los costes de refrigeración del superconductor de la segunda bobina pueden mantenerse bajos. La temperatura crítica  $T_c$  del superconductor de alta temperatura es típicamente superior a 40 °K, con preferencia superior a 85 °K. Como material HTS, se puede usar material YBCO.

30 También dentro del alcance de la presente invención está el uso de un limitador de corriente de falla de la invención según se ha descrito anteriormente de acuerdo con un método inventivo tal y como se ha descrito con anterioridad.

35 Se pueden deducir otras ventajas a partir de la descripción y de los dibujos que se incluyen. Las características mencionadas en lo que antecede y las que siguen, pueden ser usadas de acuerdo con la invención ya sea individualmente o ya sea colectivamente o ya sea en cualquier combinación. Las realizaciones mencionadas no deben ser entendidas como una enumeración exhaustiva sino que por el contrario tienen carácter ejemplar para la descripción de la invención.

#### Dibujos

La invención se muestra en los dibujos.

40 La Figura 1a muestra esquemáticamente una realización de un limitador de corriente de falla de la invención, para llevar a cabo el método de la invención, en un estado de baja resistencia (superconducción) de la bobina secundaria;

La Figura 1b muestra el limitador de corriente de falla de la Figura 1a, en un estado de alta resistencia (extinguido) de la bobina secundaria;

45 La Figura 2 muestra un diagrama que ilustra las distorsiones armónicas totales calculadas como una función de la fracción del flujo magnético común guiado por fuera del medio ferromagnético en un limitador de corriente de falla comparable con el mostrado en la Figura 1b;

50 La Figura 3 muestra un diagrama que ilustra la tensión y la corriente calculada en la bobina primaria de un limitador de corriente de falla comparable al mostrado en la Figura 1b como una función del tiempo, en el estado de alta resistencia (extinguido) de la bobina secundaria, para diferentes fracciones del flujo magnético común guiado por fuera de un medio ferromagnético;

Las Figuras 4a, 4b muestran secciones transversales esquemáticas de otra realización de un limitador de corriente de falla de la invención, con un núcleo cerrado;

Las Figuras 5a, 5b muestran secciones transversales esquemáticas de otra realización de un limitador de corriente de falla de la invención, con un núcleo abierto.

La Figura 1a ilustra un limitador de corriente de falla 20, que puede ser usado para llevar a cabo el método de acondicionamiento de corriente de la invención.

5 El limitador de corriente de falla 20 comprende una bobina 2 primaria que lleva (transporta) una corriente primaria (o corriente de cortocircuito) 1, una bobina 3 secundaria que lleva (es decir, transporta) una segunda corriente 4, y un núcleo 5 de un medio 5a ferromagnético.

10 La bobina 2 primaria comprende, en la presente memoria, una pluralidad de espiras (se han ilustrado cinco espiras en la Figura 1a), mientras que la bobina 3 secundaria es de tipo cortocircuitado, de una sola espira. La bobina 3 secundaria comprende un superconductor extinguido de tal modo que la corriente secundaria 4 puede circular en la bobina 3 secundaria por una trayectoria de corriente superconductor de un estado de baja resistencia (ilustrado en la Figura 1a), o por una trayectoria de corriente conductora normal es un estado de alta resistencia (extinguido). Para enfriar la bobina secundaria hasta (o por debajo de) la temperatura crítica  $T_c$  del superconductor, la bobina 3 secundaria está dispuesta típicamente en un recipiente lleno de un fluido criogénico, por ejemplo nitrógeno líquido (no representado en la presente memoria, por motivos de simplificación).

15 La bobina 3 secundaria (o su corriente 4 secundaria, respectivamente), está acoplada inductivamente a la bobina 2 primaria (o a su corriente 1 primaria, respectivamente) a través de una parte común del flujo magnético ("flujo magnético común"), según las líneas discontinuas de flujo. La corriente 1 primaria provoca la densidad de flujo magnético tanto en el interior como en el exterior de la bobina 2 primaria. La parte del flujo magnético que está tanto en el interior de la bobina 2 primaria como en el interior de la bobina 3 secundaria, se considera la parte común. La bobina 2 primaria y la bobina 3 secundaria están dispuestas coaxialmente, con el eje correspondiente discurriendo verticalmente en la Figura 1a.

20 El núcleo 5 está construido con un medio (un material) ferromagnético, típicamente de hierro, con preferencia de hierro dulce, y puede estar magnéticamente cerrado o abierto (en la Figura 1a, el núcleo se muestra truncado). El espacio restante alrededor del núcleo 5 y en el interior de la bobina 3 secundaria, se rellena con un medio no magnético, en el presente caso con aire. En el ejemplo ilustrado, el núcleo 5 ocupa aproximadamente un 5% de la sección transversal (perpendicular al eje vertical) de la bobina 3 secundaria.

25 En funcionamiento normal (ilustrado en la Figura 1a), cuando la corriente 1 primaria (corriente de cortocircuito) está por debajo de un umbral que provoca una extinción en el superconductor de la bobina 3 secundaria (es decir, cuando el superconductor está en estado de superconducción de baja resistencia), el superconductor apantalla (blinda) el volumen 10 interno de la bobina 3 secundaria. Entonces, solamente penetra poco flujo magnético en este volumen 10 interno (véanse las líneas de flujo discontinuas). Una fracción 8 principal (en este caso, alrededor de un 90%) de este flujo magnético penetrante (flujo magnético común) es guiada por el interior del medio 5a ferromagnético, es decir, a través del núcleo 5 ferromagnético, el cual está magnéticamente no saturado en este régimen y por lo tanto puede presentar una permeabilidad relativamente alta (por ejemplo, desde 100 a 4000, o incluso más). Una fracción menor 7 (en este caso, alrededor de un 10%) del flujo magnético común es guiada por fuera del medio 5a ferromagnético. El flujo magnético penetrante en ese estado, que provoca inductancia de fugas, se estima como bastante pequeño (en comparación con el flujo magnético penetrante en el estado no apantallado, véase lo que sigue). Una cierta parte de la inductancia de fugas se origina a partir del flujo magnético 9 que se produce entre la bobina 2 primaria y la bobina 3 secundaria. La suma de los flujos 7, 8 se denomina a veces "flujo no equilibrado".

30 En funcionamiento de corriente de falla (ilustrado en la Figura 1b), la corriente 1 primaria (corriente de cortocircuito) provoca una corriente 4 secundaria en la bobina 3 secundaria que supera el umbral de extinción (es decir, el superconductor salta al estado de resistencia elevada). Como resultado, el superconductor no apantalla (blinda) ya más el volumen 10 interno de la bobina 3 secundaria frente al flujo magnético (o al menos, no de forma completa). El flujo magnético empieza a penetrar significativamente en este volumen 10 interno (véanse las líneas de flujo discontinuas) y provoca una redistribución (o, en otras palabras, una re-conmutación) de fracciones de flujo: una fracción 17 principal (en este caso, alrededor de un 70%) del flujo magnético penetrante es guiado ahora por fuera del medio 5a ferromagnético, mientras que una fracción menor 18 del flujo (en este caso, alrededor de un 30%) es guiado todavía por el interior del medio 5a ferromagnético. El medio 5a ferromagnético se satura bajo estas condiciones.

35 En el ejemplo ilustrado, la fracción del flujo magnético común guiada por el interior del medio 5a ferromagnético ha caído desde alrededor de un 90% hasta alrededor de un 30% (con respecto al flujo común total respectivo) tras la extinción, lo que significa que una fracción de alrededor del  $(90-30) \% = 60\%$  del flujo magnético común ha sido conmutada desde el interior del medio 5a ferromagnético hasta el exterior del medio 5a ferromagnético.

40 Típicamente, la fracción principal 17 del flujo magnético que aparece cuando el superconductor extinguido está en estado de alta resistencia excede en términos absolutos al flujo no equilibrado (suma de las fracciones 7 y 8 de flujo) que aparece cuando el superconductor extinguido está en estado de baja resistencia.

Debido al incremento significativo del flujo magnético absoluto total (suma de flujos 17 y 18, en comparación con la suma de flujos 7 y 8), la inductancia de la bobina 2 primaria se incrementa, lo que da como resultado un incremento de la impedancia a la que está sometida la corriente 1 primaria. Así, la corriente 1 primaria (corriente de cortocircuito) empieza a estar acondicionada. Además, se induce una corriente 4 secundaria sustancial en la bobina 3 secundaria cuando el superconductor extinguido está en estado de resistencia elevada, lo que contribuye adicionalmente a la impedancia de la bobina 2 primaria; esta corriente 4 está basada principalmente en la conductividad de la derivación conectada al superconductor extinguido.

Cuando el medio 5a ferromagnético resulta magnéticamente saturado, la permeabilidad se hace sustancialmente dependiente del tiempo/campo. Esto puede provocar no linealidades durante un ciclo seno de la tensión alimentada a la bobina 2 primaria, lo que puede dar eventualmente como resultado la generación de armónicos y, finalmente, una distorsión armónica total significativa de la onda seno de la corriente 1 primaria.

La TDH se define más habitualmente como la relación de la suma de potencias de todas las frecuencias armónicas por encima de la frecuencia fundamental respecto a la potencia de la frecuencia fundamental:

$$THD = \frac{\sum \text{potencias armónicas}}{\text{potencia frecuencia fundamental}} = \frac{P_2 + P_3 + P_4 + \dots + P_n}{P_1}$$

Mediante la invención, se puede mantener la THD en un nivel suficientemente bajo cuando se realiza la re-conmutación de fracciones de flujo de una manera apropiada. Con la re-conmutación de fracciones de flujo de la invención, se limita la contribución del flujo magnético común guiado en el interior de un medio ferromagnético en el estado de alta resistencia del superconductor, cuando el medio ferromagnético está típicamente saturado. De ese modo, las no linealidades introducidas por el medio ferromagnético saturado, quedan también limitadas. En su caso, el flujo magnético común se origina en mayor grado desde el exterior del medio ferromagnético, es decir, desde un medio no magnético, donde no está deteriorado por los efectos de la no linealidad. De ese modo, ocurren menos distorsiones armónicas en la corriente primaria durante el funcionamiento de corriente de falla. Así, las redes y los equipos eléctricos conectados a la bobina primaria se enfrentan a menos picos de frecuencia elevada, los cuales son particularmente peligrosos incluso a intensidades de corriente relativamente bajas.

La **Figura 2** ilustra los valores de distorsión armónica total (THD) de la corriente primaria en un limitador de corriente de falla (comparable al mostrado en las Figuras 1a, 1b), con diferentes fracciones *fr* del flujo magnético común guiadas por fuera del medio magnético en un estado de alta resistencia del superconductor de la bobina secundaria. A partir del diagrama se puede apreciar que en el ejemplo, la THD cae cuando la fracción *fr* del flujo magnético guiada por fuera del medio magnético es de aproximadamente el 65% o superior. En el ejemplo calculado y confirmado experimentalmente, se eligió una tensión de onda seno con  $U_0 = 5000$  V y una frecuencia de 50 Hz para la bobina primaria con  $N = 40$  espiras, una longitud de 0,5 m y un radio de 20 cm, además de una resistencia en serie de la bobina primaria correspondiente a 0,2 ohmios, además de un núcleo de hierro circular hecho de acero de transformador dopado con Si. Se encontró que las corrientes de Foucault en el interior del núcleo de hierro eran despreciables en ambos regímenes de operación normal y en modo de acondicionamiento de corriente.

La **Figura 3** ilustra la tensión *V* (que es de forma seno, línea discontinua) en la bobina primaria, y la corriente *A* primaria resultante en la bobina primaria como una función del tiempo *t*, en el estado de alta resistencia de la bobina secundaria, para un limitador de corriente de falla comparable al mostrado en la Figura 1a, con una fracción *fr* del flujo magnético común guiado por fuera del medio magnético de 0% (línea continua en negra) y un 90% (línea continua delgada), ambas en unidades arbitrarias (a.u.). La corriente *A* está en ambos casos desplazada en fase aproximadamente 1/4 de un período de repetición en comparación con la tensión *V*. La corriente para *fr* = 0% presenta una progresión plana en las regiones en torno al cruce por cero, lo que es una indicación de graves distorsiones armónicas. La corriente para *fr* = 90% no muestra ninguna progresión plana en los cruces por cero, sino que está por encima del período de repetición completo de tipo seno con muy buena aproximación, lo que indica que no existen distorsiones armónicas significativas.

La **Figura 4a** ilustra una sección transversal vertical a través de una realización de un limitador 20 de corriente de falla de la invención, que comprende un núcleo 5 cerrado, a modo de anillo, de un material 5a ferromagnético. El núcleo 5 discurre centralmente a través de una bobina 2 primaria que tiene ocho espiras, y que está dispuesta coaxialmente con una bobina 3 secundaria de tipo cortocircuitado, de una sola espira, en donde esta última está situada en un recipiente 21 lleno de un fluido criogénico. La **Figura 4b** muestra una sección transversal horizontal por la línea B a través del limitador de corriente de falla de la Figura 4a. Alrededor del 20% del área de la sección transversal de la bobina 3 secundaria está ocupada por el núcleo 5.

La **Figura 5a** ilustra una sección transversal vertical a través de una realización de un limitador 20 de corriente de falla de la invención similar a la mostrada en la Figura 4a, pero con un núcleo 5 abierto, a modo de polo. Además, según puede apreciarse en la **Figura 5b** que muestra una sección transversal horizontal por la línea B de la Figura 5a, el limitador de corriente de falla es de forma oblonga en el plano horizontal.

**REIVINDICACIONES**

1.- Un método de acondicionamiento de corriente, que comprende:

- transportar una corriente (1) primaria a través de una bobina (2) primaria;

5 - acoplar una bobina (3) secundaria a la bobina (2) primaria por medio de un flujo magnético común, en donde la bobina (2) primaria y la bobina (3) secundaria están dispuestas coaxialmente, y en donde la bobina (3) secundaria comprende un superconductor susceptible de extinción, donde la extinción provoca una transición del superconductor desde un estado de superconducción de baja resistencia a un estado extinguido de alta resistencia;

10 - y en el estado de superconducción de baja resistencia de la bobina (3) secundaria, guiar una fracción principal (8) del flujo magnético común de la bobina (2) primaria y de la bobina (3) secundaria por el interior de un medio (5a) ferromagnético,

**caracterizado porque,**

15 - cuando la bobina (3) secundaria se extingue, conmutar el flujo magnético común de tal modo que una fracción principal (17) del flujo magnético común sea guiada por fuera del medio (5a) ferromagnético en el estado extinguido de alta resistencia del superconductor,

en el que una parte principal de la sección transversal de la bobina (2) primaria y una parte principal de la sección transversal de la bobina (3) secundaria no están rellenas de medio (5a) ferromagnético.

2.- Método de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque:**

- 20 - en el estado de baja resistencia de la bobina (3) secundaria, no saturar el medio (5a) ferromagnético,
- y en el estado de alta resistencia de la bobina (3) secundaria, saturar el medio (5a) ferromagnético.

3.- Método de acuerdo con la reivindicación 1 ó 2, **caracterizado porque** el flujo magnético común total en el estado de baja resistencia de la bobina (3) secundaria es más pequeño que el flujo magnético común guiado por fuera del medio (5a) ferromagnético en el estado de alta resistencia de la bobina (3) secundaria.

25 4.- Método de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** la corriente (1) primaria es:

- una corriente alterna,
- o una corriente alterna superpuesta a una corriente continua.

5.- Método de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** se dispone un refrigerante en el interior de la bobina (2) primaria y/o de la bobina (3) secundaria por fuera del medio (5a) ferromagnético.

30 6.- Limitador (20) de corriente de falla para llevar a cabo el método según una de las reivindicaciones anteriores, que comprende:

- una bobina (2) primaria,
- una bobina (3) secundaria que comprende un superconductor susceptible de extinción, en el que la bobina (2) primaria y la bobina (3) secundaria están dispuestas coaxialmente, y

35 - un núcleo (5) de un medio (5a) ferromagnético, que discurre a través tanto de la bobina (2) primaria como de la bobina (3) secundaria,

**caracterizado porque,**

40 - el núcleo (5), la bobina (2) primaria y la bobina (3) secundaria están capacitados para la conmutación de una fracción sustancial de un flujo magnético común de la bobina (2) primaria y de la bobina (3) secundaria desde el interior del núcleo (5) hasta el exterior del núcleo (5) cuando la bobina (3) secundaria se extingue, en el que una parte principal de la sección transversal de la bobina (2) primaria y una parte principal de la sección transversal de la bobina (3) secundaria no están llenas de medio (5a) ferromagnético.

7.- Limitador (20) de corriente de falla de acuerdo con la reivindicación 6, **caracterizado porque** el núcleo (5) es de forma cerrada.

45 8.- Limitador (20) de corriente de falla de acuerdo con la reivindicación 6, **caracterizado porque** el núcleo (5) es de forma abierta.



9.- Limitador (20) de corriente de falla de acuerdo con una de las reivindicaciones 6 a 8, **caracterizado porque la bobina (3) secundaria es una bobina cortocircuitada, de una sola espira.**

10.- Limitador (20) de corriente de falla de acuerdo con la reivindicación 9, **caracterizado porque la bobina cortocircuitada de una sola espira comprende una multitud de anillos que están acoplados entre sí.**

5 11.- Limitador (20) de corriente de falla de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 6 a 10, **caracterizado porque la bobina (3) secundaria comprende un superconductor de alta temperatura, con preferencia del tipo de un conductor recubierto.**

12.- Uso de un limitador (20) de corriente de falla de acuerdo con una de las reivindicaciones 6 a 11 en un método de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 5.I

10

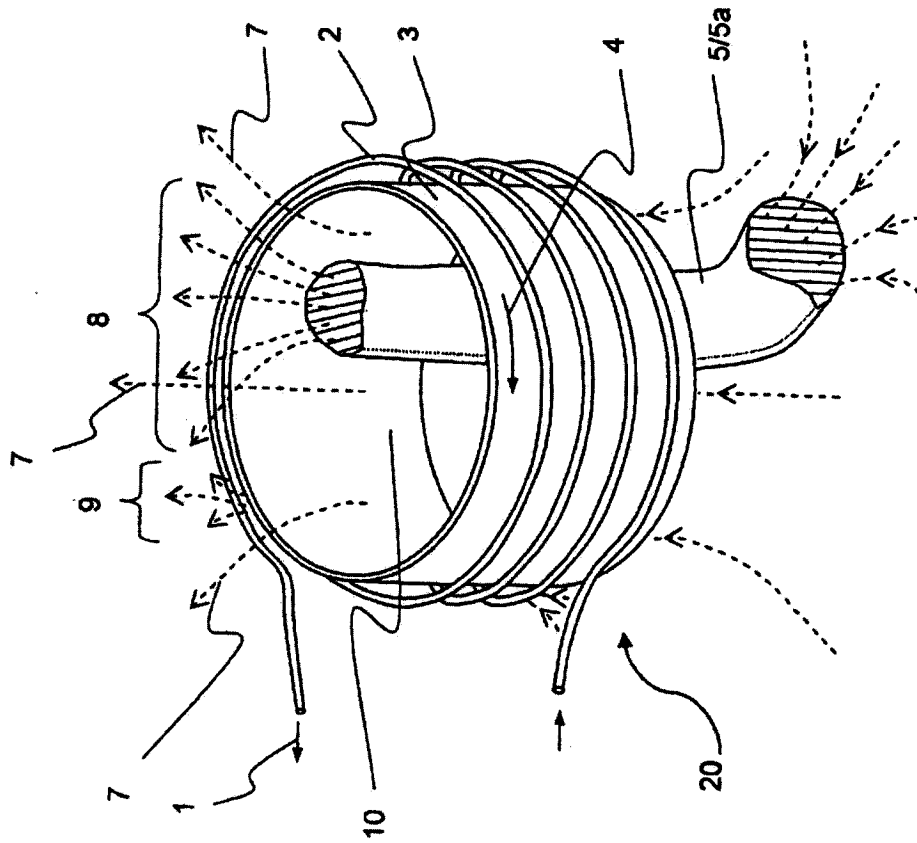


Fig. 1a

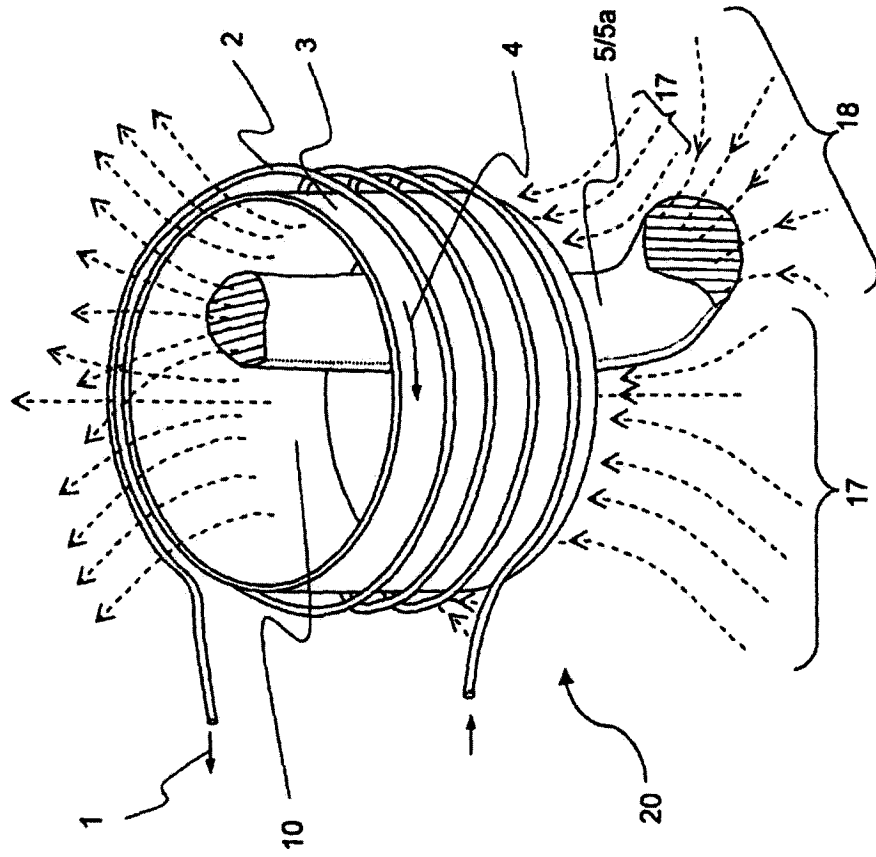


Fig. 1b

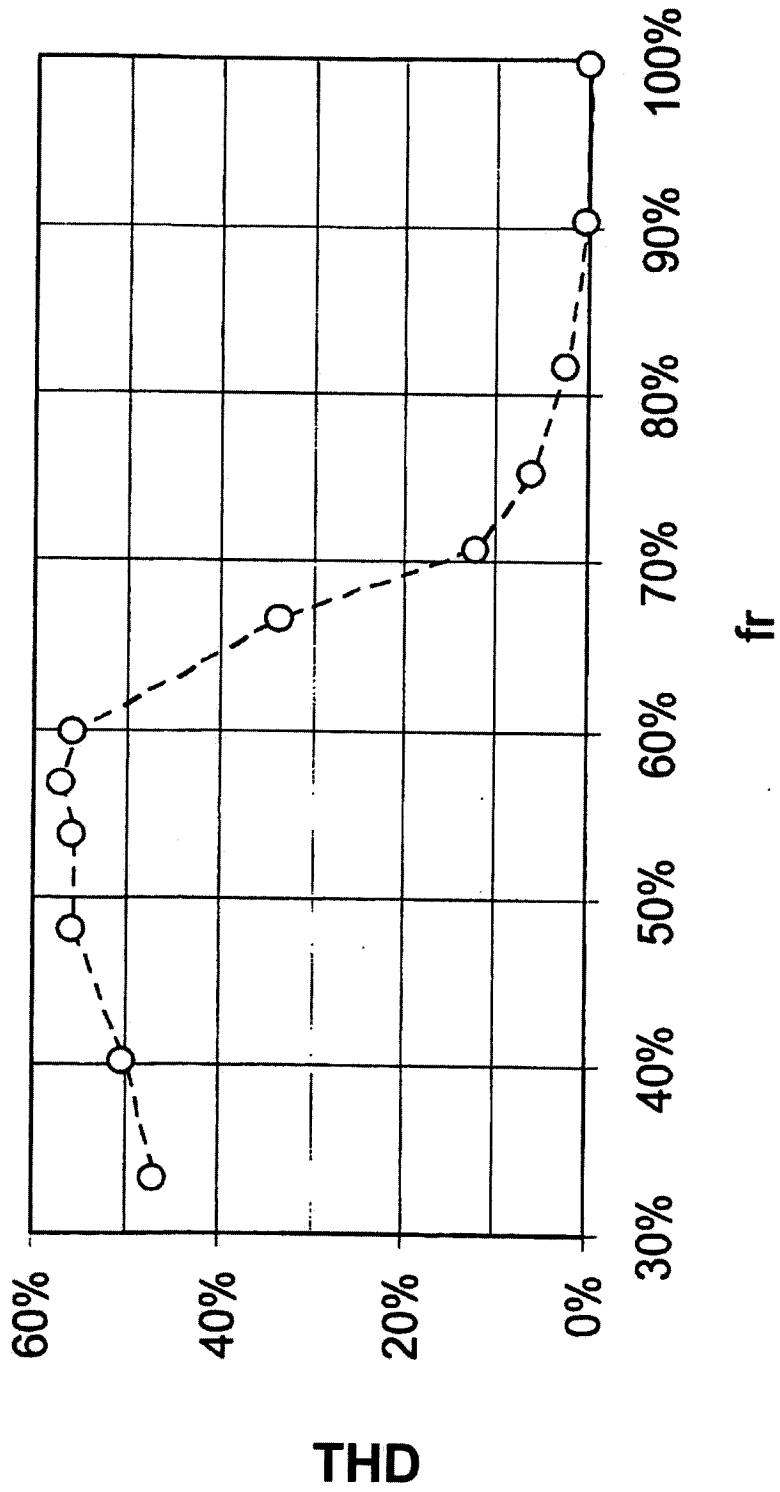


Fig. 2

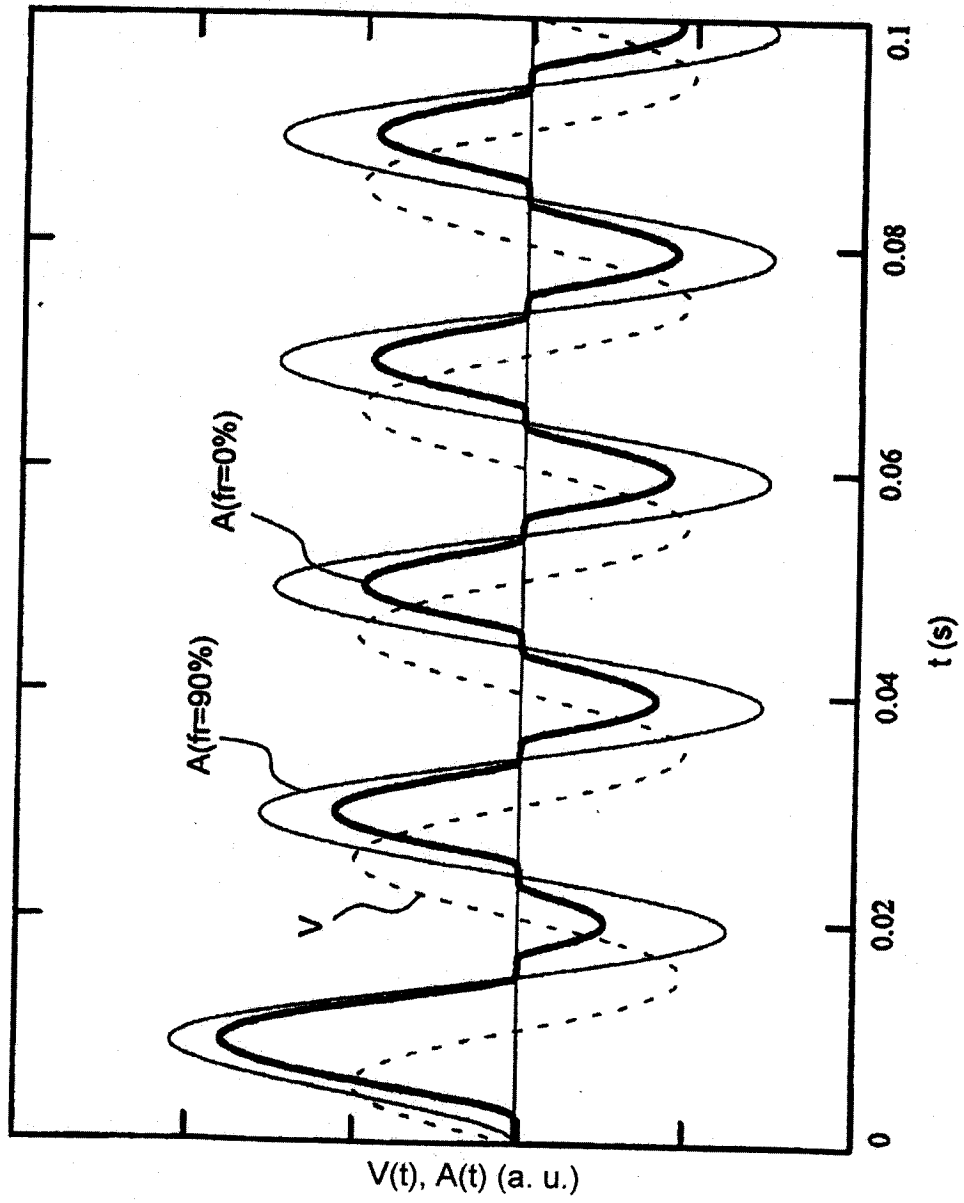


Fig. 3

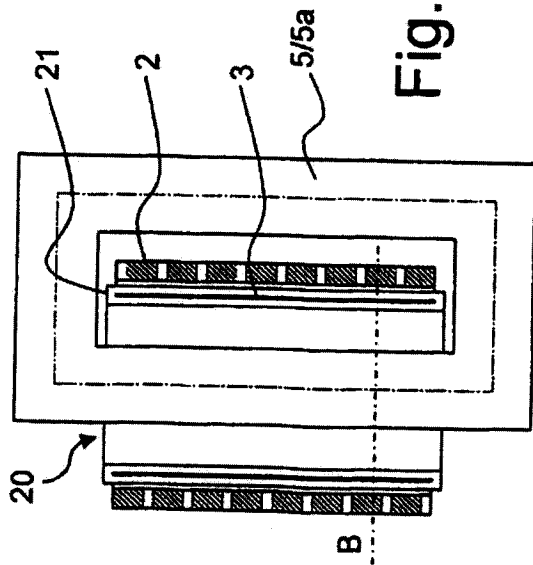


Fig. 4a

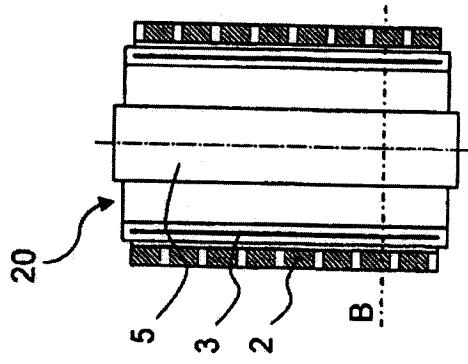


Fig. 5a

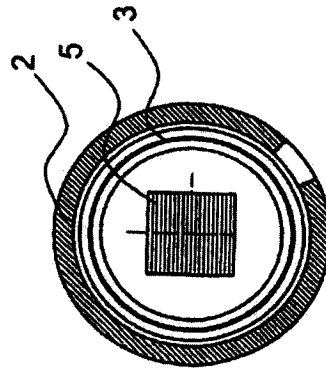


Fig. 4b

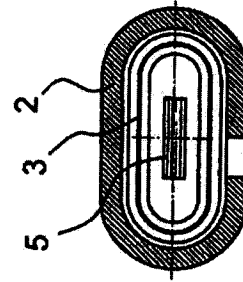


Fig. 5b