



19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 347 437**

51 Int. Cl.:  
**H01L 39/16** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **04735911 .2**

96 Fecha de presentación : **03.06.2004**

97 Número de publicación de la solicitud: **1652240**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **03.05.2006**

54 Título: **Limitador de corriente de defecto.**

30 Prioridad: **04.07.2003 GB 0315663**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**29.10.2010**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**29.10.2010**

73 Titular/es: **ROLLS-ROYCE plc.**  
**65 Buckingham Gate**  
**LONDON, SW1E 6AT, GB**

72 Inventor/es: **Sargent, Philip, Michael;**  
**Malkin, Peter y**  
**Simmers, Brian, Edward**

74 Agente: **Elzaburu Márquez, Alberto**

**ES 2 347 437 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

Limitador de corriente de defecto.

Las realizaciones de la presente invención se refieren a un limitador de corriente de defecto (FCL). De manera específica, se hace referencia a un FCL para una red de distribución eléctrica.

Las redes de distribución eléctrica se utilizan para transmitir corriente eléctrica desde una fuente hasta una carga. Si se produce un defecto eléctrico en este tipo de red, se generan grandes corrientes que pueden provocar daños en la carga. Los limitadores de corriente de defecto varían su impedancia cuando se produce un defecto y reducen la corriente.

Los materiales superconductores tienen un estado superconductor de baja impedancia y un estado normal de alta impedancia. Los mismos pueden utilizarse como elemento de impedancia variable en un limitador de corriente de defecto. Bajo condiciones de funcionamiento normales, el elemento superconductor presenta una impedancia aproximadamente nula y, por lo tanto, no se produce una caída de tensión a través del FCL. Cuando se produce un defecto y empieza a circular una corriente elevada, el elemento superconductor pasa de estado superconductor a estado normal, introduciendo impedancia en la red. En consecuencia, se produce una caída de tensión significativa a través del FCL.

Los superconductores de baja temperatura (LTS) tienen una temperatura de transición inferior a 23,2 K. La temperatura de transición ( $T_C$ ) es la temperatura por debajo de la cual es posible que el material sea superconductor. El material es superconductor cuando el campo magnético, la densidad de corriente y la temperatura aplicados están todos ellos por debajo de unos valores umbral que dependen del tipo de material. Es necesario utilizar helio líquido para enfriar un LTS por debajo de su temperatura de transición ( $T_C$ ), aunque resulta muy costoso y es un refrigerante ineficaz. Esto hace que la utilización del LTS sea cara en un FCL.

Los materiales superconductores de alta temperatura (HTS) basados en cerámica se desarrollaron en los años 80. Los materiales HTS pueden ser superconductores a temperaturas alcanzables mediante la utilización de nitrógeno líquido (77 K). El nitrógeno líquido es aproximadamente 20 veces más eficaz como refrigerante que el helio líquido y 10 veces más económico. No obstante, los materiales HTS son difíciles de fabricar, debido a su debilidad mecánica y a su naturaleza frágil.

El documento DE 199 04 822 C describe un dispositivo en el que se utiliza nitrógeno líquido para enfriar los cables de corriente de una carga, tal como un limitador de corriente. El nitrógeno se enfría en una máquina de refrigeración Joule-Thompson hasta una temperatura de 77 K y a continuación es conducido a lo largo de los cables de corriente en dirección contraria a la entrada de calor.

Por lo tanto, resultaría deseable disponer de un limitador de corriente de defecto superconductor que pueda utilizar nitrógeno líquido como refrigerante pero que tenga una resistencia mecánica superior a la de los materiales HTS.

Según la presente invención, se da a conocer un limitador de corriente de defecto que comprende: un nodo de entrada; un nodo de salida; un elemento de impedancia variable conectado entre el nodo de en-

trada y el nodo de salida; un sistema de refrigeración de ciclos múltiples, que comprende un primer ciclo de refrigerante en el que circula un primer refrigerante y al menos un ciclo de refrigerante adicional en el que circula un segundo refrigerante, siendo los ciclos de refrigerante ciclos cerrados y estando conectados térmicamente para refrigerar el elemento de impedancia variable, caracterizado porque el elemento de impedancia variable, que es un material superconductor con una temperatura de transición en el intervalo de 20 K a 60 K, está totalmente sumergido en el primer refrigerante y el primer ciclo de refrigerante está totalmente sumergido en el segundo refrigerante.

El elemento de impedancia variable del FCL puede estar dispuesto para pasar de un estado superconductor a un estado normal cuando la corriente en el nodo de entrada supera un umbral. En estado superconductor, la caída de tensión a través del FCL es mínima. En estado normal, la caída de tensión a través del FCL puede ser grande y la corriente suministrada por el nodo de salida es limitada.

Preferiblemente, el elemento de impedancia variable comprende un material superconductor metálico basado en boro, tal como diboruro de magnesio.

La utilización de diboruro de magnesio permite obtener varias ventajas. El mismo es un material superconductor que es fácil de fabricar y del cual es posible procesar fácilmente grandes cantidades. También puede ser conformado en varias formas físicas. Esto permite obtener flexibilidad al diseñar el FCL. El material consistente en diboruro de magnesio puede ser fabricado fácilmente en cualquier forma razonable que permita optimizar el diseño del FCL para cualquier aplicación específica. Además, el proceso de fabricación permite obtener muestras fiables, homogéneas y repetibles en comparación con la falta de consistencia de las muestras de material semiconductor de alta temperatura (HTS). Asimismo, el coste del material consistente en  $MgB_2$  es considerablemente inferior al de los materiales HTS, en términos de costes de materia prima (polvo) y de proceso, y es probable que permanezca de esa manera. El diboruro de magnesio tiene una conductividad térmica aproximadamente 20 veces superior a la de los materiales HTS. Esto permite obtener un enfriamiento rápido y uniforme del superconductor, haciendo que el mismo sea menos susceptible a daños por shock mecánico o térmico. El aumento de corriente debido a un defecto en la red de suministro eléctrico es grande, normalmente, de cientos a miles de amperios, aunque el diboruro de magnesio tiene la resistencia mecánica suficiente para soportar las muy considerables fuerzas electromagnéticas generadas al producirse un defecto.

El elemento de impedancia variable puede estar sumergido en un primer refrigerante, que tiene un intervalo de temperaturas de 5 K a 76 K. Por ejemplo, el primer refrigerante puede ser neón líquido y el segundo refrigerante puede ser nitrógeno líquido. Este diseño de FCL utiliza neón líquido en vez de helio líquido como refrigerante. El neón líquido tiene una capacidad de calor específico aproximadamente 40 veces superior a la del helio líquido.

El tiempo de enfriamiento del elemento de impedancia variable que consiste en diboruro de magnesio es rápido. El tiempo de enfriamiento es el tiempo necesario para que el material superconductor pase de estado superconductor a estado normal. Este tiempo de enfriamiento rápido permite obtener diversas ven-

tajas. El elemento de impedancia variable pasa rápidamente a imponer una carga en la red. Esto reduce las posibilidades de que la carga alimentada por la red de energía eléctrica sufra daños. Asimismo, se reduce el calor resistivo del elemento de impedancia variable, de modo que es necesario un menor enfriamiento.

El elemento de impedancia variable puede estar conectado eléctricamente en paralelo a una resistencia en derivación. Cuando la corriente en el elemento de impedancia variable supera un umbral, dicho elemento de impedancia variable pasa de un estado superconductor de baja impedancia a un estado normal de alta impedancia, provocando que la corriente circule a través de la resistencia en derivación. La resistencia en derivación puede transmitir su energía calorífica directamente al entorno.

La corriente umbral puede ser la corriente en el momento en el que se supera la densidad de corriente de transición del elemento superconductor. De manera alternativa, el elemento superconductor puede estar dispuesto o configurado de modo que el campo magnético aplicado exceda el campo magnético de transición cuando la corriente supera la corriente umbral.

La densidad de corriente de transición está en el intervalo de  $10^3$  a  $10^6$  A/cm<sup>2</sup> a la temperatura del neón líquido (27 K) y en campo inducido. La densidad de corriente de transición es una función de la calidad del material superconductor. Debido a que el límite superior de la densidad de corriente es alto, resulta posible que las dimensiones del elemento de impedancia variable sean pequeñas. Esto resulta ventajoso en aplicaciones en las que las limitaciones de espacio son importantes. Una aplicación de este tipo está en el campo de un sistema de propulsión eléctrico marino. En este tipo de sistema, resulta deseable que un FCL sea pequeño, ya que el espacio es escaso.

Para una mejor comprensión de la presente invención, a continuación se hará referencia a los dibujos que se acompañan, solamente a título de ejemplo, y en los que:

la figura 1 muestra un diagrama de circuito esquemático de un limitador de corriente de defecto según una realización de la presente invención;

la figura 2 muestra un diagrama esquemático de la transmisión de energía térmica del elemento de impedancia variable al entorno a través de un sistema de refrigeración de ciclos múltiples; y

la figura 3 muestra un limitador de corriente de defecto según una realización de la presente invención.

Las figuras muestran un limitador de corriente de defecto 10 que comprende: un nodo de entrada 11; un nodo de salida 12; un elemento de impedancia variable 13 conectado entre el nodo de entrada 11 y el nodo de salida 12; un sistema de refrigeración de ciclos múltiples 14, que comprende un primer ciclo de refrigerante 30 para refrigerar 18 el elemento de impedancia variable 13 y un segundo ciclo de refrigerante 32, conectado térmicamente 34 al primer ciclo de refrigerante 30, para enfriar el primer refrigerante 44, en el que el elemento de impedancia variable 13 comprende diboruro de magnesio.

De manera más específica, la figura 1 muestra un diagrama de circuito esquemático de un limitador de corriente de defecto 10 para limitar la corriente I 15 suministrada a una carga 16 cuando dicha corriente I supera un valor umbral. El limitador de corriente de defecto 10 comprende un elemento de impedancia variable 13, un nodo de entrada 11, un nodo de salida

12, un sistema de refrigeración de ciclos múltiples 14 y una resistencia en derivación 17. El elemento de impedancia variable 13 está conectado eléctricamente entre el nodo de entrada 11 y el nodo de salida 12. La resistencia 17 está conectada eléctricamente entre el nodo de entrada 11 y el nodo de salida 12; en paralelo al elemento de impedancia variable 13. La carga 16 está conectada eléctricamente al nodo de salida 12. El elemento de impedancia variable 13 está conectado térmicamente 18 al sistema de refrigeración de ciclos múltiples 14. El calor se transmite 18 del elemento de impedancia variable 13 al sistema de refrigeración de ciclos múltiples 14.

En funcionamiento normal, cuando la corriente I no ha sobrepasado un umbral debido a un defecto, el elemento de impedancia variable 13 actúa como un superconductor y tiene una impedancia prácticamente nula. La resistencia 17 tiene una resistencia (fija) elevada. Por lo tanto, la corriente I 15 (normalmente, de cientos de amperios) circula desde el nodo de entrada 11 hasta el nodo de salida 12 a través del elemento de impedancia variable 13 y es suministrada a la carga 16. La caída de tensión entre el nodo de entrada 11 y el nodo de salida 12 es mínima.

Si se produce un defecto que provoque que la corriente I 15 en el nodo de entrada 11 sobrepase un valor umbral (normalmente, de cientos de amperios), el elemento de impedancia variable 13 pasa de un estado superconductor de baja impedancia a un estado normal de alta impedancia. La energía térmica se transmite 18 del elemento de impedancia variable 13 al sistema de refrigeración de ciclos múltiples 14, reduciendo la probabilidad de que se produzcan daños en dicho elemento de impedancia variable 13 durante el shock térmico. Cuando el elemento de impedancia variable 13 pasa de un estado superconductor de baja impedancia a un estado normal de alta impedancia, la corriente I cambia su trayectoria y circula a través de la resistencia 17. La energía térmica generada en la resistencia 17 por la corriente se transmite al entorno. Por lo tanto, cuando se produce un defecto, el limitador de corriente de defecto 10 pasa de tener una impedancia baja (aproximadamente nula) a tener una impedancia alta, que es igual o similar a la de la resistencia de la resistencia 17. La resistencia 17 puede seleccionarse de modo que limite la corriente en el circuito a no más de 3 veces la corriente a plena carga (la corriente de funcionamiento máxima de la carga).

El elemento de impedancia variable 13 no permite obtener la impedancia del FCL 10 cuando se produce un defecto, la resistencia 17 sí que lo permite, y su energía térmica se transmite directamente al entorno. El tiempo de enfriamiento del elemento de impedancia variable 13 es bajo. Esto permite que el mismo cambie rápidamente entre el estado superconductor de baja impedancia y el estado normal de alta impedancia.

El limitador de corriente de defecto mostrado en la figura 1 tiene el elemento de impedancia variable 13 y la resistencia 17 conectados en paralelo, en la trayectoria de la corriente que va a la carga 16. En una realización alternativa, un inductor principal está conectado entre los nodos de entrada y salida, en la trayectoria de la corriente, y el elemento de impedancia variable 13 y la resistencia 17 conectados en paralelo están conectados en serie con un inductor secundario conectado magnéticamente al inductor principal. Cuando la corriente a través del inductor

principal aumenta, la corriente inducida en el inductor secundario aumenta. Este circuito secundario puede cambiar el estado del elemento de impedancia variable y limitar la corriente que circula a través del inductor principal.

La figura 2 muestra un elemento de impedancia variable 13 conectado térmicamente a un sistema de refrigeración de ciclos múltiples 14, de modo que el calor procedente del elemento de impedancia variable 13 se transmite al entorno 37. El sistema de refrigeración de ciclos múltiples 14 comprende un primer ciclo de refrigerante 30, un segundo ciclo de refrigerante 32, una primera conexión térmica 34 y una segunda conexión térmica 38. En el primer ciclo de refrigerante 30 circula un primer refrigerante, y está separado físicamente del segundo ciclo de refrigerante 32 por la primera conexión térmica 34. En el segundo ciclo de refrigerante 32 circula un segundo refrigerante, y está separado físicamente del entorno 37 por la segunda conexión térmica 38. El primer ciclo de refrigerante 30 y el segundo ciclo de refrigerante 32 son ciclos cerrados, no abiertos al entorno 37.

La energía térmica se transmite 18 del elemento de impedancia variable 13 al primer ciclo de refrigerante 30. Posteriormente, la energía térmica se transmite del primer ciclo de refrigerante 30 al segundo ciclo de refrigerante 32 a través de la primera conexión térmica 34. Finalmente, la energía térmica se transmite 36 del segundo ciclo de refrigerante 32 al entorno 37 a través de una segunda conexión térmica 38. La transmisión de energía térmica resultante se indica mediante la flecha 39. Por lo tanto, la energía térmica se transfiere del elemento de impedancia variable 13 al entorno 37 a través de 2 ciclos de refrigerante cerrados. Aunque el diagrama muestra la utilización de dos ciclos cerrados, es posible utilizar más de dos ciclos cerrados conectados en serie.

La figura 3 muestra un limitador de corriente de defecto 10 que comprende un nodo de entrada 11, un nodo de salida 12, un elemento de impedancia variable 13 conectado entre el nodo de entrada 11 y el nodo de salida 12, y un sistema de refrigeración de ciclos múltiples 14 que comprende un primer refrigerante 44 para enfriar el elemento de impedancia variable 13 y un segundo refrigerante 46 para enfriar el primer refrigerante 44, en el que el elemento de impedancia variable 13 comprende material superconductor con una temperatura de transición en el intervalo de 20 K a 60 K y el segundo refrigerante 46 es nitrógeno líquido, de modo que la impedancia eléctrica del elemento de impedancia variable 13 varía cuando la corriente eléctrica 15 suministrada al nodo de entrada 11 supera un umbral, provocando la transición de dicho elemento de impedancia variable 13 de un estado superconductor a un estado normal.

De manera más detallada, en la figura 3, el limitador de corriente de defecto 10 comprende un nodo de entrada 11, un nodo de salida 12, un elemento de impedancia variable 13, una resistencia fija 17, una primera interconexión 42, una segunda interconexión 43 y un sistema de refrigeración de ciclos múltiples 14. El sistema de refrigeración de ciclos múltiples 14 comprende un primer recipiente cerrado 48 que aloja un primer refrigerante 44, un segundo recipiente cerrado 49 que aloja el primer recipiente cerrado, sumergido en un baño de un segundo refrigerante 46, y un intercambiador de calor 41.

La primera interconexión 42 conecta eléctrica-

mente un extremo del elemento de impedancia variable al nodo de entrada 11 y la segunda interconexión 43 conecta el otro extremo del elemento de impedancia variable al nodo de salida 12. La resistencia 17 está conectada entre el nodo de entrada y el nodo de salida, en paralelo a la combinación en serie de la primera interconexión 42, el elemento de impedancia variable 13 y la segunda interconexión 43.

El elemento de impedancia variable 13 está sumergido en el primer refrigerante 44, dentro del primer recipiente cerrado 48. El elemento de impedancia variable 13 está conectado físicamente a la primera interconexión 42 y a la segunda interconexión 43 en la pared del primer recipiente. La primera y la segunda interconexiones 42 y 43 pasan a través del segundo refrigerante 46 antes de emerger a través de la pared del segundo recipiente cerrado 49, donde las mismas están conectadas eléctricamente a los extremos opuestos de la resistencia 17. Por lo tanto, el elemento de impedancia variable 13 está totalmente sumergido en el primer refrigerante 13 y la resistencia 17 está dispuesta exteriormente con respecto al sistema de refrigeración de ciclos múltiples 14.

El primer refrigerante 44 está separado físicamente del segundo refrigerante 46 por una primera conexión térmica 34 (no mostrada) en el intercambiador de calor 41, y se mueve por convección para formar un primer ciclo de refrigerante 30. El segundo refrigerante está separado físicamente de la atmósfera 37 por una segunda conexión térmica 38 (no mostrada), también en el intercambiador de calor 41, y se mueve por convección para formar el segundo ciclo de refrigerante 32. El intercambio de calor transmite la energía térmica del primer ciclo de refrigerante 30 al segundo ciclo de refrigerante 32, y luego al entorno 37.

El segundo recipiente cerrado 49 es un criostato y el primer recipiente cerrado 48 es un contenedor de vidrio.

En una realización preferida, el elemento de impedancia variable es un elemento superconductor de diboruro de magnesio. El diboruro de magnesio ( $MgB_2$ ) es fácil de fabricar y puede ser producido en cualquier cantidad y forma. Es menos susceptible al shock térmico y mecánico que un HTS. Tiene una  $T_C$  de aproximadamente 39 K. El primer refrigerante es neón líquido (~27 K) y el segundo refrigerante es nitrógeno líquido (~77 K). La densidad de corriente de transición ( $J_C$ ) está en el intervalo de  $10^3$  a  $10^6$  A/cm<sup>2</sup> a temperaturas del neón líquido (27 K) y en campo inducido.

Las partes de la primera y la segunda interconexiones que pasan a través del segundo refrigerante pueden estar formadas por un superconductor de alta temperatura (HTS). Un HTS tiene una conductividad térmica baja, pero tiene una conductividad eléctrica alta en estado superconductor. Por lo tanto, la utilización de un HTS como parte de las interconexiones reduce el trabajo necesario para enfriar el primer refrigerante 44 y, de este modo, permite que el limitador de corriente de defecto 10 tenga un tamaño inferior. Las interconexiones de HTS están configuradas de modo que el elemento de impedancia variable 13 pasa de un estado superconductor de baja impedancia a un estado normal de alta impedancia con una corriente umbral que no cambia el estado de dichas interconexiones superconductoras de HTS 42, 43.

La sección transversal del elemento de impedancia variable y la densidad de corriente de transición

del material superconductor determinan la corriente umbral con la que dicho elemento de impedancia variable cambia del estado de baja impedancia al estado de alta impedancia. Por lo tanto, es posible utilizar elementos de impedancia 13 con secciones transversales diferentes para distintas corrientes umbral. La longitud del elemento de impedancia variable 13 se selecciona de modo que su impedancia en estado de alta impedancia sea mucho mayor que la de la resistencia 17. Esto minimiza el calentamiento por resistencia del primer refrigerante 44. La configuración de serpentina o curvada de la figura 3 resulta adecuada para un elemento de impedancia variable de este tipo que cambia con la corriente.

Es posible crear una extrema variedad de tiempos de enfriamiento, ya que el diboruro de magnesio puede ser fabricado en una amplia variedad de formas, pudiendo configurarse la propagación del enfriamiento de manera que se produzca según la longitud o la sección de un conductor. La configuración en serpentina o curvada de la figura 3 permite la activación de múltiples puntos de inicio de enfriamiento en partes del elemento de impedancia variable superconductor que están cercanas térmicamente pero lejanas eléctricamente.

En una realización alternativa, el elemento de impedancia variable puede estar configurado de modo que esté sujeto a un campo magnético que aumenta a medida que aumenta la corriente a través de dicho elemento de impedancia variable. Es posible utilizar el propio campo magnético que aumenta o la combinación del campo magnético que aumenta y la corriente eléctrica que aumenta para cambiar el elemento de impedancia variable 13 de un estado de baja impedancia a un estado de alta impedancia. Por ejemplo, el elemento de impedancia variable puede estar configurado como un solenoide.

El efecto que la densidad del flujo magnético tiene

en  $J_C$  depende del proceso de producción y de los aditivos (un aumento de la densidad del flujo magnético de campo inducido a 0,3 T puede ser insignificante o reducir  $J_C$  en un factor de hasta 50).

El material consistente en diboruro de magnesio puede ser fabricado fácilmente en cualquier forma razonable que permita optimizar el diseño del FCL para cualquier aplicación específica. Además, el proceso de fabricación permite obtener muestras fiables, homogéneas y repetibles en comparación con la falta de consistencia de las muestras de material semiconductor de alta temperatura (HTS). Asimismo, el coste del material consistente en  $MgB_2$  es considerablemente inferior al de los materiales HTS, en términos de costes de materia prima (polvo) y de proceso, y es probable que permanezca de esa manera.

Aunque anteriormente se han descrito realizaciones de la presente invención haciendo referencia a diversos ejemplos, debe entenderse que es posible llevar a cabo modificaciones de los ejemplos mostrados sin apartarse del alcance de la invención reivindicada. Por ejemplo, el sistema de refrigeración de ciclos múltiples 14 puede tener uno o más ciclos de refrigerante intermedios situados entre el primer ciclo de refrigerante 30 y el segundo ciclo de refrigerante 32. Asimismo, no es necesario utilizar diboruro de magnesio como elemento superconductor del elemento de impedancia variable 13. También pueden resultar adecuados otros materiales superconductores con propiedades similares en lo que se refiere a sus temperaturas de transición/densidades de corriente/densidades de flujo magnético y tiempos de enfriamiento. Los materiales superconductores que pueden ser descritos como "materiales basados en boruro-superconductores metálicos con un enlace metálico convencional y una conductividad eléctrica sustanciales en estado no superconductor" también pueden resultar adecuados para su utilización.

## REIVINDICACIONES

1. Limitador de corriente de defecto (10) que comprende:

un nodo de entrada (11);

un nodo de salida (12);

un elemento de impedancia variable (13) conectado entre el nodo de entrada (11) y el nodo de salida (12);

un sistema de refrigeración de ciclos múltiples (14) que comprende un primer ciclo de refrigerante (30) en el que circula un primer refrigerante y al menos un ciclo de refrigerante adicional (32) en el que circula un segundo refrigerante, siendo los ciclos de refrigerante (30 y 32) ciclos cerrados y estando conectados térmicamente para refrigerar el elemento de impedancia variable (13), **caracterizado** porque el elemento de impedancia variable, que es un material superconductor con una temperatura de transición en el intervalo de 20 K a 60 K, está totalmente sumergido en el primer refrigerante y el primer ciclo de refrigerante está totalmente sumergido en el segundo refrigerante.

2. Limitador de corriente de defecto (10) según la reivindicación 1, **caracterizado** porque el elemento de impedancia variable (13) comprende un material superconductor metálico basado en boruro.

3. Limitador de corriente de defecto (10) según la reivindicación 2, **caracterizado** porque el elemento de impedancia variable (13) está hecho de diboruro de magnesio.

4. Limitador de corriente de defecto (10) según las reivindicaciones 1-3, **caracterizado** porque el primer refrigerante está en el intervalo de temperaturas de 5 K a 76 K.

5. Limitador de corriente de defecto (10) según la reivindicación 4, **caracterizado** porque el primer refrigerante es neón líquido.

6. Limitador de corriente de defecto (10) según cualquiera de las reivindicaciones 1-5, **caracterizado** porque el elemento de impedancia variable (13) está configurado de modo que cuando la corriente eléctrica (15) suministrada al nodo de entrada (11) supera un umbral, la densidad de corriente en el elemento de impedancia variable (13) supera una densidad de corriente de transición y el elemento de impedancia variable (13) pasa de un estado superconductor de baja impedancia a un estado normal de alta impedancia.

7. Limitador de corriente de defecto (10) según la reivindicación 6, **caracterizado** porque la densidad

de corriente de transición está en el intervalo de  $10^3$  a  $10^6$  A/cm<sup>2</sup> a 27 K.

8. Limitador de corriente de defecto según cualquiera de las reivindicaciones 1-7, **caracterizado** porque el elemento de impedancia variable (13) está configurado de modo que cuando la densidad de flujo magnético en el elemento de impedancia variable (13) supera una densidad de flujo magnético de transición el elemento de impedancia variable (13) pasa de un estado superconductor de baja impedancia a un estado normal de alta impedancia.

9. Limitador de corriente de defecto (10) según cualquiera de las reivindicaciones 1-8, **caracterizado** porque al menos una interconexión superconductora de alta temperatura (42, 43) está conectada en serie con el primer elemento de impedancia variable (13).

10. Limitador de corriente de defecto según la reivindicación 9, **caracterizado** porque una primera (42) y una segunda (43) interconexiones superconductoras de alta temperatura conectan el elemento de impedancia variable del limitador de corriente de defecto.

11. Limitador de corriente de defecto (10) según la reivindicación 9 ó 10, en el que las interconexiones superconductoras de alta temperatura (42, 43) están sumergidas en un refrigerante de la segunda parte de refrigerante (49).

12. Limitador de corriente de defecto según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado** porque el refrigerante de la segunda parte de refrigerante (49) es nitrógeno líquido.

13. Limitador de corriente de defecto (10) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado** porque una resistencia (17) está conectada eléctricamente en paralelo al elemento de impedancia variable (13).

14. Limitador de corriente de defecto según la reivindicación 13, **caracterizado** porque la resistencia (17) está situada fuera del sistema de refrigeración de ciclos múltiples (14) y el elemento de impedancia variable (13) está situado dentro del sistema de refrigeración de ciclos múltiples (14).

15. Limitador de corriente de defecto (10) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado** porque el elemento de impedancia variable (13) está dispuesto en una configuración resistiva.

16. Limitador de corriente de defecto (10) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado** porque el elemento de impedancia variable (13) está dispuesto en una configuración inductiva.

55

60

65

Fig.1.

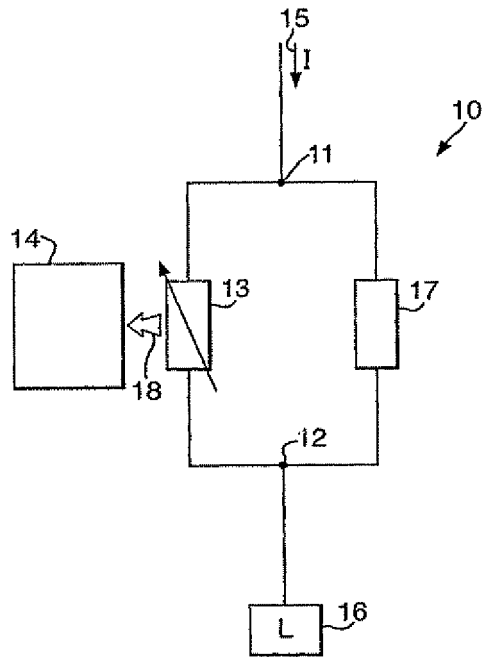


Fig.2.

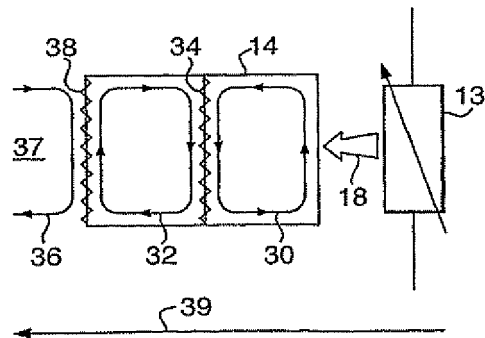


Fig.3.

