



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

⑪ Número de publicación: **2 240 490**

⑤① Int. Cl.7: **H01B 12/06**

⑫

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

⑧⑥ Número de solicitud europea: **01958047 .1**

⑧⑥ Fecha de presentación : **02.08.2001**

⑧⑦ Número de publicación de la solicitud: **1309975**

⑧⑦ Fecha de publicación de la solicitud: **14.05.2003**

⑤④ Título: **Cable superconductor.**

③⑩ Prioridad: **14.08.2000 EP 00202854**
15.08.2000 US 225308 P

④⑤ Fecha de publicación de la mención BOPI:
16.10.2005

④⑤ Fecha de la publicación del folleto de la patente:
16.10.2005

⑦③ Titular/es: **Pirelli & C. S.p.A.**
Via Gaetano Negri, 10
20123 Milano, IT

⑦② Inventor/es: **Mele, Renata**

⑦④ Agente: **Ponti Sales, Adelaida**

ES 2 240 490 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).

ES 2 240 490 T3

DESCRIPCIÓN

Cable superconductor.

5 La presente invención se refiere en general a cables superconductores, es decir a cables proyectados para transportar corriente eléctrica en las condiciones llamadas de superconductividad, es decir en condiciones de resistencia eléctrica de casi cero en el régimen de transporte de corriente directa.

10 Más en particular, la invención se refiere a un procedimiento para reducir las pérdidas de corriente alterna (CA) en un elemento conductor de superconducción sujeto a un campo magnético externo y a través del cual fluye una corriente. Por otra parte, la invención se refiere a un elemento conductor superconductor. Por otra parte, la invención se refiere a un elemento de fase superconductor. Además, la invención se refiere a un cable superconductor dieléctrico caliente.

15 En la siguiente descripción y en las reivindicaciones adjuntas, la expresión “elemento conductor superconductor” se emplea para indicar la porción eléctricamente activa de un cable superconductor, que comprende un soporte y al menos una capa de material superconductor, destinado para transportar la corriente eléctrica de fase o, en el caso de corriente de tres fases, cada corriente de fase.

20 La expresión “elemento superconductor de fase” se emplea para indicar cada componente de un cable superconductor asociado con o de cada fase, que comprende un elemento conductor superconductor y los respectivos aislamientos eléctricos y térmicos.

25 La expresión “dieléctrico caliente” (DC) se emplea para indicar una estructura de capas coaxiales de un elemento superconductor de fase que comprende, esencialmente, un soporte tubular axial y al menos una capa que comprende material superconductor (es decir un elemento conductor superconductor), un criostato y un dieléctrico, en que un fluido, típicamente nitrógeno líquido, fluye dentro del elemento de soporte para enfriar el material superconductor por debajo de su temperatura crítica.

30 La expresión “material superconductor” se emplea para indicar un material, como por ejemplo aleaciones especiales de niobio-titanio, o cerámicas basadas en óxidos mezclados de cobre, bario e itrio (YBCO) o de gadolinio, samario u otras tierras raras (REBCO), o de bismuto, plomo, estroncio, calcio, cobre, talio y mercurio (BSCCO), una de cuyas fases tiene, bajo una cierta temperatura definida como temperatura crítica (T_c), una resistividad de casi cero, en el régimen de transporte de corriente directa.

35 El material superconductor comúnmente se utiliza en forma de cintas enrolladas alrededor de un elemento de soporte tubular. Son bien conocidas las cintas que contienen una película de material superconductor (YBCO o REBCO) soportado mediante una cinta de acero, opcionalmente revestida con una o más capas de óxido, y cintas donde filamentos de material superconductor (BSCCO) están incluidos en una matriz metálica. La presente descripción y 40 las reivindicaciones adjuntas se refieren a ambos tipos de cinta con la expresión “cintas que comprenden material superconductor”.

45 La expresión “corriente de transporte” se emplea para indicar una corriente que fluye en una cinta que comprende material superconductor, en un elemento conductor superconductor, en un elemento superconductor de fase, o en un cable superconductor, según las circunstancias.

En el campo de los cables superconductores, un problema particularmente importante es aquel de minimizar las pérdidas de CA.

50 Las pérdidas en un material superconductor son esencialmente de naturaleza histerética, debido a la disipación intrínseca del material superconductor causada por la penetración de un campo magnético dentro del material superconductor en sí.

55 Las pérdidas de naturaleza histerética se suman a las pérdidas debidas a corrientes en remolino, es decir a pérdidas óhmicas de las corrientes que son inducidos, mediante campos magnéticos variables, en las áreas metálicas del cable superconductor en general.

60 Un primer campo magnético que causa pérdidas es aquel generado mediante la corriente de transporte en sí. Este campo magnético comúnmente es referido como “auto-campo”.

Los campos magnéticos externos de particular interés para aplicaciones prácticas de cables superconductores son aquellos debidos a la presencia de otras fases en un cable de tres fases o polifásico.

65 La expresión “cable polifásico” se emplea para indicar un cable en donde la corriente de cada fase, en un sistema de corriente de fase única o de tres fases, se distribuye entre varios elementos superconductores de fase.

Otros campos magnéticos externos de particular interés aplicativo se deben a la presencia de un generador, un motor o un limitador de corriente próximo a un cable superconductor.

ES 2 240 490 T3

Para eliminar o reducir substancialmente las pérdidas debidas a campos magnéticos externos, se conocen bien los cables superconductores dieléctricos fríos (CD). En cada elemento superconductor de fase, estas clases de cables superconductores tienen al menos una capa de retorno que comprende material superconductor, coaxial a aquella destinada a transportar la corriente, y protegiendo a ésta última de los campos magnéticos externos. Dichos cables sin embargo tienen unos costes iniciales bastante altos debido a la cantidad prácticamente doble de material superconductor utilizado en comparación con los cables dieléctricos calientes.

En cables dieléctricos superconductores calientes, a los que esta invención se refiere espacialmente, sin embargo, el material superconductor para transportar la corriente no está protegido.

El efecto del acoplamiento magnético entre las fases de un cable superconductor dieléctrico caliente de tres fases en las pérdidas en un elemento conductor superconductor a través del cual fluye una corriente de transporte se han estudiado en el documento de J.O. Willis *et al.*, "Single and Multi-Phase AC Losses in HTS Prototype Power Transmission Conductors", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, Volumen 9, Junio 1999, página 778.

Los resultados, allí indicados, de las mediciones llevadas a cabo señalan que las pérdidas en la configuración de tres fases, es decir las pérdidas totales en presencia de una corriente de transporte y del campo magnético creado mediante la corriente de las otras dos fases, fluyendo en conductores resistivos, es mayor que la suma de las pérdidas debidas al transporte sólo de corriente de transporte (configuración de fase única) y las pérdidas debidas a la única corriente en los conductores de las otras fases (configuración de dos fases), o, brevemente, que las pérdidas de CA tienen una naturaleza no lineal.

Según este documento, por otra parte, las pérdidas en la configuración de fase única decrecen con el incremento de la corriente crítica del elemento conductor superconductor.

La expresión "(densidad de) corriente crítica" se emplea para indicar la (densidad de) corriente que genera en los extremos de un elemento conductor superconductor un campo eléctrico igual a 1 mV/cm.

En el artículo de K.H. Müller, "Self-field hysteresis loss in periodically arranged superconducting tapes"; Physica C 289, páginas 123-130, 1997, un cálculo analítico de la distribución del campo magnético, de la distribución de corriente y de las pérdidas de auto-campo en dos configuraciones de bandas superconductoras a través de las que se presentan flujos de corriente de transporte.

Las configuraciones estudiadas se presentan como un modelo idealizado de la disposición de cintas que comprenden material superconductor en elementos conductores superconductores en cables superconductores.

Más en particular, se estudia la configuración pila en z, es decir una serie infinita de bandas colocadas con las caras anchas adyacentes y espaciadas y la configuración fila en x, es decir una serie infinita de de bandas colocadas con las caras estrechas adyacentes y espaciadas.

Dicho documento concluye que las pérdidas de AC de auto-campo por banda decrecen con la disminución del espacio entre las bandas y son mínimas con un espacio de cero.

A este respecto, el solicitante observa que un espacio de cero es una condición ideal, difícil de poner en práctica. De hecho, por razones tecnológicas, en la producción mecánica de elementos conductores superconductores es extremadamente difícil enrollar las cintas superconductoras con continuidad. Por otra parte, en el caso de cintas metálicas/multifilamento, como se describe con mayor detalle a continuación en la presente descripción, aún reduciendo a cero la distancia entre las cintas, aún perdura un espacio (del orden de aproximadamente 0,6 mm) entre el material superconductor de cintas adyacentes, debido a la presencia de un área de borde de la matriz metálica que está libre de filamentos superconductores.

El solicitante ha encontrado que un incremento en el espacio entre el material superconductor de cintas adyacentes tiene el efecto de reducir las pérdidas totales de CA en presencia de una corriente de transporte y de un campo magnético externo, en particular debido al acoplamiento magnético entre los elementos de fase en un cable dieléctrico superconductor caliente de tres fases.

Aparte de reducir las pérdidas, el espaciado de las cintas superconductoras según la presente invención tiene la ventaja adicional de facilitar la producción mecánica del elemento superconductor de fase.

En un primer aspecto, la invención se refiere a un procedimiento para reducir las pérdidas de CA en un elemento conductor superconductor sometido a un campo magnético exterior y a través del cual fluye corriente, que comprende las etapas de: (a) proporcionar un elemento de soporte substancialmente tubular, (b) disponer una pluralidad de cintas que comprenden material superconductor en al menos una capa alrededor del elemento de soporte, en el cual cintas adyacentes de cada capa se mantienen a una distancia mutua tal que el espacio entre el material superconductor de cintas adyacentes no es menor que un valor mínimo predeterminado.

En la práctica de la presente invención, el valor del espacio entre el material superconductor de cintas adyacentes

ES 2 240 490 T3

se elige teniendo en cuenta los requerimientos opuestos de maximizarlo para reducir las pérdidas de CA y de minimizarlo para incrementar la cantidad de corriente de transporte, con la misma geometría del elemento conductor superconductor.

5 Preferentemente, el valor mínimo predeterminado es de 1,2 milímetros.

Más preferentemente, el valor mínimo del espacio es 1,4 milímetros, aún más preferentemente es de 2 milímetros.

10 En un segundo aspecto, la invención se refiere a un elemento conductor superconductor, que comprende al menos una capa de cintas que comprenden material superconductor alrededor de un elemento de soporte substancialmente tubular, estando las cintas de cada capa mutuamente separadas, caracterizado por el hecho de que las cintas de cada capa están a una distancia mutua tal que el espacio entre el material superconductor de cintas adyacentes no es menor a 1,2 milímetros.

15 Preferentemente, las cintas que comprenden un material superconductor se colocan en un número de capas de entre 2 y 10.

20 Entre cintas adyacentes puede colocarse una capa de material adecuada para facilitar el deslizamiento de las capas de cintas, por ejemplo papel de carbón o TYVEK™.

El espacio entre el material superconductor de los diferentes pares de cintas adyacentes puede ser constante.

Alternativamente, el espacio entre el material superconductor de cintas adyacentes puede variar de una capa a otra.

25 Preferentemente, las cintas que comprenden material superconductor de cada capa se enrollan en forma helicoidal alrededor del elemento de soporte, en un ángulo de enrollado predeterminado respectivo - con respecto a la dirección longitudinal del elemento de soporte - preferentemente entre 5° y 50°, más preferentemente entre 8° y 40°. Esta medida permite una reducción en cualquier posible estrés mecánico de las mismas capas.

30 El espacio en cada capa puede en este caso elegirse, a partir de los rangos de valores que se especifican con anterioridad, en una forma tal de minimizar la diferencia en corriente crítica entre las diferentes capas de cintas que comprenden material superconductor.

35 Las cintas que comprenden material superconductor de al menos dos cintas adyacentes están enrolladas en forma helicoidal en direcciones opuestas.

40 En una primera realización, las cintas que comprenden material semiconductor son de tipo matriz metálica/multifilamento, tal como se obtienen mediante el proceso bien conocido de "polvo-en-tubo" y como se explica con mayor detalle a continuación.

En este caso, pueden utilizarse convenientemente como filamentos de material superconductor aquellos definidos con anterioridad con las iniciales BSCCO.

45 Preferentemente, el material superconductor es el óxido mezclado llamado BSCCO-2223 o Bi-2223.

La matriz metálica está preferentemente realizada de plata, oro o aleaciones adecuadas de los mismos con otros metales.

50 Las cintas pueden además revestirse parcial o totalmente con una capa de metal, preferentemente de acero o una aleación de cobre-berilio.

55 En una realización alternativa, las cintas comprenden un material superconductor en forma de una película, por ejemplo aquellas definidas con anterioridad con las iniciales YBCO o REBCO. Estas, por ejemplo, se preparan como se describe en la patente US 5.741.377 de Martin Marietta Co.

En un tercer aspecto, la invención se refiere a un elemento dieléctrico de fase caliente superconductor que comprende un elemento conductor superconductor como se ha descrito con anterioridad, un criostato coaxialmente externo al mismo, y un dieléctrico coaxialmente externo al criostato.

60 Preferentemente, el elemento de fase superconductor de la invención se refrigera mediante un fluido refrigerante adecuadamente presurizado o poco refrigerado, para asegurar el intercambio de calor necesario para su operación y para garantizar que se mantiene una temperatura adecuada por debajo de la temperatura crítica del material superconductor, aún para un elemento de fase de una gran longitud.

65 Durante su flujo, de hecho, el líquido refrigerante está simultáneamente sometido a un calentamiento progresivo, como resultado del calor liberado como consecuencia de las pérdidas de los diversos componentes, y a una pérdida progresiva en la presión, debida a pérdidas hidráulicas mientras fluye a través del elemento de fase y al flujo más o menos turbulento del fluido en sí.

ES 2 240 490 T3

Preferentemente, el material superconductor es del tipo llamado de alta temperatura (T_c en el orden de aproximadamente 100K) y se enfría hasta una temperatura de entre aproximadamente 63K y 90K.

5 Dicho enfriamiento preferentemente se logra utilizando nitrógeno líquido como líquido refrigerante, a una presión de trabajo de entre 5 y 25 bar.

Preferentemente, el líquido refrigerante circula dentro del elemento de soporte substancialmente tubular.

10 En un cuarto aspecto, la invención se refiere a un cable dieléctrico superconductor caliente que comprende al menos un elemento superconductor de fase como se ha descrito.

Preferentemente, dicho cable superconductor es un cable de tres fases.

15 Características y ventajas adicionales de la presente invención serán más claras a partir de la siguiente descripción detallada de una realización del mismo, dada a continuación con referencia a los dibujos adjuntos. En los dibujos:

- La Figura 1 muestra una vista en perspectiva en sección transversal parcial de un cable superconductor dieléctrico caliente de tres fases, según una realización de la presente invención.

20 - La Figura 2 muestra una vista en perspectiva, en una escala aumentada y en sección transversal parcial, de un elemento conductor superconductor del cable de la Figura 1.

- La Figura 3 muestra, en una escala todavía más aumentada, una sección transversal parcial en forma de diagrama a través del elemento conductor superconductor de la Figura 2; y

25 - Las Figuras 4 y 5 muestran los resultados de mediciones experimentales.

30 Con referencia a la Figura 1, un cable superconductor dieléctrico caliente de tres fases 1 según la presente invención comprende un núcleo superconductor, globalmente indicado mediante 2, que comprende una pluralidad de elementos superconductores de fase 3, indicados mediante 3a, 3b, 3c, alojados, preferentemente en forma libre, dentro de una funda contenedora tubular 11, por ejemplo de un material metálico, tal como acero, cobre, aluminio o similar.

35 La funda contenedora tubular 11 está preferentemente formada a partir de una cinta enrollada en forma tubular y soldada longitudinalmente, o a partir de un tubo extrusionado o similar. Siempre que las demandas de flexibilidad del cable así lo requieran, ésta puede ser corrugada.

40 Cada uno de los elementos de fase 3 comprende un elemento conductor superconductor 31 que comprende un elemento de soporte substancialmente tubular 4 y, coaxialmente al mismo, al menos una capa 5 que comprende material superconductor (descrito en detalle a continuación).

Cada uno de los elementos de fase 3 comprende además, coaxialmente externo al elemento conductor superconductor 31: un criostato hecho de un primer tubo corrugado 6, un aislante térmico 7 y un segundo tubo corrugado 8; un dieléctrico 9; una funda metálica 10; y espaciadores 10'.

45 El criostato 6-8, que tiene el propósito de minimizar la dispersión térmica exterior, comprende un aislante térmico 7 formado, por ejemplo, por una pluralidad de capas superpuestas, y al menos una vaina de protección.

50 Un criostato, bien conocido en la técnica, se describe por ejemplo en un artículo de N. Nelly *et al.*, Proc. Of IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, Dist. Conference, New Orleans, Abril 1999.

Más en particular, el aislante térmico 7 está, por ejemplo, hecho de varias cintas de superficie metalizada (por ejemplo, algunas decenas) hechas de una resina de poliéster, conocida en la técnica como "súper aislante térmico", enrollado flojamente, posiblemente con la ayuda de espaciadores interpuestos (no mostrados).

55 Además, el cable 1 comprende un circuito de enfriado para la circulación de un fluido de enfriamiento adecuado para enfriar el material superconductor a una temperatura adecuada por debajo de su temperatura crítica. En el cable de la Figura 1, dicho material superconductor es preferentemente del tipo de alta temperatura, es decir que tiene una temperatura crítica T_c en el orden de aproximadamente 110K.

60 El circuito de enfriado antes mencionado comprende medios adecuados de bombeo, bien conocidos de por sí y por lo tanto no mostrados, destinados a suministrar un fluido refrigerante adecuado, por ejemplo nitrógeno líquido, a una temperatura típicamente entre 65 y 90K, dentro de los elementos de soporte substancialmente tubulares 4 de cada uno de los elementos conductores superconductores 31, como se indica mediante las flechas RF.

65 En el caso que el dieléctrico 9 sea del tipo impregnado, la funda contenedora tubular 11 puede rellenarse con gas o aceite 12 a una presión, por ejemplo, de 13,8 bares, para lubricar e incrementar el rendimiento del dieléctrico 9.

ES 2 240 490 T3

La funda contenedora tubular 11 además está preferentemente revestida con una vaina externa 13, por ejemplo hecha de polietileno.

5 La Figura 2 muestra el elemento conductor superconductor 31, en perspectiva y no a escala, donde el elemento de soporte 4 está esquematizado.

10 Las capas 14 y 15, al igual que cualquier otra capa superconductora que pueda estar presente, están preferentemente separadas mediante una capa 16 de un material adecuado para promover el deslizamiento entre las capas, por ejemplo papel de carbón o TYVEK™.

10 Cada capa superconductora 14, 15 está a su vez hecha de una pluralidad de cintas 17 enrolladas en forma helicoidal según un ángulo respectivo de enrollado α, β . Los ángulos de enrollado de cada capa superconductor puede variar como se ha descrito con anterioridad.

15 Las direcciones de enrollado y los ángulos de las cintas 17 de las diferentes capas pueden ser iguales o diferentes, pero preferentemente se proporcionan al menos dos capas adyacentes que comprenden cintas enrolladas en direcciones opuestas, como capas superconductoras 14, 15 mostradas en la Figura 2.

20 Las cintas 17 de la misma capa superconductora están recíprocamente separadas. Esta distancia se ha indicado mediante D para las cintas 17 de la capa superconductora 14 y mediante D' para las cintas 17 de la capa superconductora 15.

25 Para no ser afectada por el ángulo de enrollado de las cintas 17, la distancia D (y D') se indica en la dirección transversal de las mismas cintas, es decir sobre la circunferencia C₂ ilustrada, que forma junta con la circunferencia C₁ ilustrada, perpendicular al eje A-A del elemento de fase, un ángulo α igual al ángulo de enrollado de las cintas 17.

La distancia entre cintas adyacentes puede ser constante o variar de una capa a la otra.

30 La Figura 3 muestra una sección transversal diagramático del elemento conductor superconductor 31, tomada a lo largo de una porción de circunferencia C₂ en la Figura 2. La porción de circunferencia se ilustra como rectilínea en virtud de la alta relación entre el tamaño transversal (ancho W) de cada cinta 17a-17e y el radio de curvatura del elemento de soporte 4. En la Figura 3, también se indica el grosor T de las cintas.

35 Preferentemente, el grosor T es mucho menor que el ancho W, es decir que las cintas 17 que comprenden material superconductor tienen una relación de aspecto alto.

El ancho de las cintas 17 de cada capa 14, 15 puede, además, ser la misma o diferente.

40 Las cintas 17a-17b de la realización mostrada en la Figura 3 son de tipo matriz metálica/multifilamento, obtenidas mediante el proceso conocido como "polvo-en-tubo" (PIT). Este proceso esencialmente implica presionar un precursor en polvo del material superconductor, por ejemplo el material BSCCO antes mencionado, en un tubo hecho de plata, aleación de plata u otro metal noble. El tubo se deforma subsecuentemente mediante delinado o enrollado y se trata térmicamente para convertir el precursor en polvo en el material superconductor.

45 La sección resultante, que puede verse en la Figura 3, aparece como substancialmente rectangular y comprende una "matriz" metálica 18, en cuya porción interna se concentra el material superconductor 19 en forma de una pluralidad de filamentos de una sección transversal substancialmente rectangular y distribuidos en una forma substancialmente irregular.

50 Las cintas hechas de esta manera, en la cual el material superconductor es el material BSCCO antes mencionado y la matriz metálica es de plata o de aleaciones de la misma, son bien conocidas en la técnica como cintas BSCCO/Ag.

55 Como puede apreciarse, en las áreas laterales de las cintas 17 se forman dos bordes 18a, 18b formados de una matriz metálica substancialmente libre de filamentos superconductores 19.

El material superconductor 19 de dos cintas adyacentes 17, por ejemplo de las cintas 17a, 17b mostradas, están por lo tanto espaciadas mediante un espacio indicado mediante G, mayor que la distancia D antes mencionada.

60 Las cintas 17 pueden, además, estar parcial o totalmente revestidas con una capa metálica (no mostrada), por ejemplo de acero o de una aleación de cobre-berilio.

Consideraciones similares se aplican para un material superconductor de tipo YBCO o REBCO, como se ha definido con anterioridad.

65 Con referencia a lo que se ha descrito con anterioridad, se proporcionan algunos ejemplos a continuación, a modo de indicación no limitante, adecuados para ilustrar el comportamiento de las pérdidas de CA en una realización de un elemento conductor superconductor según la invención y de un elemento conductor superconductor según la técnica anterior.

ES 2 240 490 T3

Ejemplo 1

Según una realización de la invención, se realizó un prototipo de elemento conductor superconductor.

5 El elemento conductor superconductor comprende un soporte tubular que tiene un diámetro de 30,2 milímetros, sobre el cual se enrollaron a mano cintas BSCCO-2223/Ag, proporcionadas por la American Superconductor Corporation, Westborough, MA, U.S.A. en 4 capas.

10 Más en particular, había cintas 15, 17, 17 y 14 enrolladas en forma helicoidal en ángulos de enrollado de $-29,5^\circ$, -13° , 13° y 38° , respectivamente desde la capa más interior hasta la capa más exterior.

15 Las cintas utilizadas, del tipo comercializado como "Wide", tenían un ancho de $4,1 \pm 0,1$ mm y un grosor de la matriz de plata de 0,215 mm, y estaba revestido en las caras principales con una hoja de acero, hasta un grosor total de 0,32 mm.

La distancia entre cintas adyacentes de cada capa, medida como se definió con anterioridad, fue de 1,4 mm. Dicha distancia, considerando el tamaño transversal de los bordes metálicos de la matriz de plata, corresponde a un espacio entre el material superconductor de cintas adyacentes, como se ha definido antes, de 2 milímetros.

20 El valor promedio de la corriente crítica por cinta, medida en cada cinta, fue de 95,5 A. La corriente crítica total calculada como el producto entre el número de cintas y la corriente crítica por cinta fue de aproximadamente 6000 A. La corriente crítica total medida resultó ser 4750 ± 100 A, con una degradación respecto al valor calculado ($\Delta I_c / I_c$) de -21%.

25 La distribución de corriente resulta ser uniforme entre las capas.

Las mediciones de pérdidas de CA se llevaron a cabo utilizando un calorímetro de diferencia de temperatura en la forma descrita en el documento de J.O. Willis *et al*, al cual se hace referencia para todos los detalles.

30 Las mediciones de pérdidas en la configuración de tres fases se ha llevado a cabo como se describe en la publicación antes mencionada. En particular, se hizo fluir la corriente en la fase comprendida del elemento conductor superconductor y también en las otras dos fases comprendidas de elementos conductores normales (resistivos).

35 Las Figuras 4 y 5 muestran gráficamente los resultados de las mediciones. La Figura 4 muestra los patrones de las pérdidas totales dentro del elemento conductor superconductor como una función del valor de la media cuadrática de la corriente de transporte en el elemento conductor superconductor, mientras que la Figura 5 muestra los patrones de las pérdidas por unidad de longitud de la cinta que comprende material superconductor como una función del valor de la media cuadrática de la corriente de transporte por cinta.

40 Más en particular, las líneas 41 y 51 ilustran los valores medidos y las curvas aproximadas de las pérdidas en la configuración de tres fases, a una temperatura de 76K y una frecuencia de 60Hz.

Ejemplo 2

45 Comparación

Con el propósito de comparar las pérdidas de CA, se realizó un elemento conductor superconductor, que comprendía un soporte tubular con un diámetro de 30,2 mm, sobre el cual 86 cintas BSCCO-2223/Ag, proporcionadas por la American Superconductor Corporation, Westborough, MA, U.S.A., se enrollaron, a mano y en cuatro capas. Había 50 cintas 20, 23, 23 y 20, enrolladas en forma helicoidal en ángulos de enrollado iguales a aquellos del Ejemplo 1.

55 La distancia entre cintas adyacentes de cada capa, medida perpendicularmente a la dimensión longitudinal de las cintas, fue de 0,1 mm. Dicha distancia, considerando el tamaño transversal del borde metálico de la matriz de plata, corresponde a un espacio, como se definió con anterioridad, de 0,7 mm.

Las cintas utilizadas tienen un ancho de $4,0 \pm 0,1$ mm y un grosor de la matriz de plata de 0,205 mm y se revistieron en las caras principales con una hoja de acero, hasta un grosor total de 0,32 mm.

60 El valor promedio de la corriente crítica por cinta, extrapolada a partir de las mediciones de la muestra, fue de 76,5 A. La corriente crítica calculada total fue de aproximadamente 6600 A. La corriente crítica total medida resultó ser de 5400 ± 500 A, con una degradación respecto al valor calculado de -18%.

La distribución de corriente resultó ser uniforme entre las capas.

65 También para este elemento conductor superconductor, se llevaron a cabo mediciones de pérdidas de CA utilizando el calorímetro de diferencia térmica en la configuración de tres fases como se describe en el Ejemplo 1.

ES 2 240 490 T3

En las Figuras 4 y 5, las líneas 42 y 52 ilustran los valores medidos y las curvas aproximadas de las pérdidas en la configuración de tres fases, a una temperatura de 76K y una frecuencia de 60 Hz.

La Tabla I a continuación resume los parámetros de los dos prototipos de los Ejemplos 1 y 2.

TABLA I

PARAMETRO	Ejemplo 1 (Invención)	Ejemplo 2 (Comparación)
Diámetro del elemento de soporte (mm)	30,2	30,2
Ángulos de enrollado	-29,5° /-13° /13° /38°	-29,5° /-13° /13° /38°
Número de capas	4	4
I_c total medido (A) $\Delta I_c/I_c$	4750±100 -21%	5400±500 -18%
Ancho de cinta (mm) / grosor (mm)	4,1/0,32	4,0/0,32
Número de cintas: total y por capa	63 15/17/17/14	86 20/23/23/20
I_c promedio por cinta (A)	95,5	76,5
I_c Calculado total (A)	6000	6600
Distancia entre cintas (mm)	1,4	0,1
Espacio (mm)	2	0,7

Teniendo en cuenta que los parámetros considerados esenciales para evaluar las pérdidas de CA son los siguientes: diámetro del elemento de soporte, ángulos de enrollado de las capas, corriente crítica total medida y grosor de las capas, puede verse que los elementos conductores superconductores de la Tabla I muestran características que, para los propósitos antes mencionados, son substancialmente similares.

Estas difieren notablemente en la distancia entre las cintas y, por lo tanto, en el espacio entre el material superconductor de cintas adyacentes. Por otra parte también difieren, en un grado menor, en los valores de corriente crítica. En particular, aún a pesar que la corriente crítica por cinta del elemento según la invención es ligeramente más alta, su corriente crítica total, tanto la medida como la calculada, fue ligeramente menor.

A partir de un análisis de los trazados de las Figuras 4 y 5 puede apreciarse que las pérdidas en la configuración de tres fases del elemento del Ejemplo 1, con un espacio mayor, se vuelven notablemente menores que aquellas del elemento del Ejemplo 2, con un espacio menor.

La pequeña diferencia en la corriente crítica total no cuenta para este comportamiento de las pérdidas, como podría como mucho tener el efecto de incrementar las pérdidas en la muestra del Ejemplo 1 respecto a aquella de la muestra del Ejemplo 2. De hecho es bien conocido que el componente de pérdida de CA debido a auto campo disminuye con el incremento de la corriente crítica total - ver, por ejemplo, el citado documento de J. O. Willis *et al.*, que también indica que las pérdidas en la configuración de tres fases depende sólo levemente de la corriente crítica total.

Este comportamiento de las pérdidas de CA en la configuración de tres fases por lo tanto debe atribuirse al cambio en el espacio, volviéndose las pérdidas inversamente relacionadas al mismo, en contraste con lo sugerido por la teoría desarrollada en el citado artículo de K. H. Muller.

En virtud del rendimiento notablemente superior del elemento conductor superconductor con un espacio mayor (Ejemplo 1) en la configuración de tres fases, dicho elemento conductor superconductor según la invención puede utilizarse ventajosamente en varias configuraciones de un cable superconductor.

ES 2 240 490 T3

De hecho, las condiciones de medición en la configuración de tres fases seguidas en los Ejemplos pueden compararse no sólo a las condiciones de trabajo de cada elemento de fase superconductor en un cable de tres fases, sino también a las condiciones de trabajo en un cable de fase única sometido a campos magnéticos externos, tales como por ejemplo un cable de fase única ubicado cerca de un generador, un motor, un limitador de corriente, etc.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

ES 2 240 490 T3

REIVINDICACIONES

- 5 1. Procedimiento para reducir las pérdidas de CA en un elemento conductor superconductor (31) sometido a un campo magnético externo y a través del cual fluye corriente, que comprende las etapas de:
- (a) proporcionar un elemento de soporte substancialmente tubular (4),
- (b) disponer una cantidad de cintas (17) que comprenden material superconductor en al menos una capa (5; 14, 15) alrededor del elemento de soporte (4), donde las cintas (17) de cada capa se mantienen a una distancia mutua tal (D) que el espacio (G) entre el material superconductor (19) de cintas adyacentes (17a, 17b) no es menor que el valor mínimo predeterminado.
- 10
2. Procedimiento según la reivindicación 1, **caracterizado** por el hecho de que el valor mínimo predeterminado es 1,2 milímetros.
- 15
3. Procedimiento según la reivindicación 2, **caracterizado** por el hecho de que el valor mínimo predeterminado es 1,4 milímetros.
4. Procedimiento según la reivindicación 3, **caracterizado** por el hecho de que el valor mínimo predeterminado es 2 milímetros.
- 20
5. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado** por el hecho de que las cintas (17) que comprenden material superconductor se disponen en un número de capas de entre 2 y 10.
- 25
6. Procedimiento según la reivindicación 5, **caracterizado** por el hecho de que la etapa (b) de disposición de las cintas (17) se lleva a cabo mediante el enrollado en forma helicoidal de las cintas (17) de cada capa (14, 15) alrededor del elemento de soporte (4), siendo las cintas (17) de al menos dos capas adyacentes (14, 15) enrolladas en direcciones opuestas.
- 30
7. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado** por el hecho de que las cintas (17) que comprenden material superconductor son de tipo matriz metálica/multifilamento.
8. Procedimiento según la reivindicación 7, **caracterizado** por el hecho de que el material superconductor es de tipo BSCCO.
- 35
9. Elemento conductor superconductor (31), que comprende al menos una capa (5; 14, 15) de cintas (17) que comprenden material superconductor dispuesto alrededor de un elemento de soporte substancialmente tubular (4), estando las cintas (17) de cada capa (5; 14, 15) mutuamente espaciadas, **caracterizado** por el hecho de que las cintas (17) tienen una distancia mutua tal (D, D') que el espacio (G) entre el material superconductor (19) de cintas adyacentes (17a, 17b) no es menor a 1,2 milímetros.
- 40
10. Elemento conductor superconductor (31) según la reivindicación 9, **caracterizado** por el hecho de que el espacio (G) tiene un valor mínimo predeterminado de 1,4 milímetros.
- 45
11. Elemento conductor superconductor según la reivindicación 10, **caracterizado** por el hecho de que el espacio (G) tiene un valor mínimo predeterminado de 2 milímetros.
12. Elemento conductor superconductor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado** por el hecho de que comprende de 2 a 10 capas (14, 15) de cintas (17) que comprenden material superconductor.
- 50
13. Elemento conductor superconductor según la reivindicación 12, **caracterizado** por el hecho de que las cintas (17) de cada capa (14, 15) están enrolladas de forma helicoidal alrededor del elemento de soporte (4), estando las cintas (17) de al menos dos capas adyacente (14, 15) enrolladas en direcciones opuestas.
- 55
14. Elemento conductor superconductor según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 13, **caracterizado** por el hecho de que las cintas (17) que comprenden material superconductor son del tipo matriz metálica/multifilamento.
15. Elemento conductor superconductor según la reivindicación 14, **caracterizado** por el hecho de que el material superconductor es del tipo BSCCO.
- 60
16. Elemento dieléctrico caliente superconductor de fase (3a, 3b, 3c) que comprende un elemento conductor superconductor (31) según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 15.
17. Cable dieléctrico superconductor caliente (1) que comprende al menos un elemento superconductor de fase (3a, 3b, 3c) según la reivindicación 16.
- 65
18. Cable superconductor (1), según la reivindicación 17, **caracterizado** por el hecho de que es un cable de tres fases.

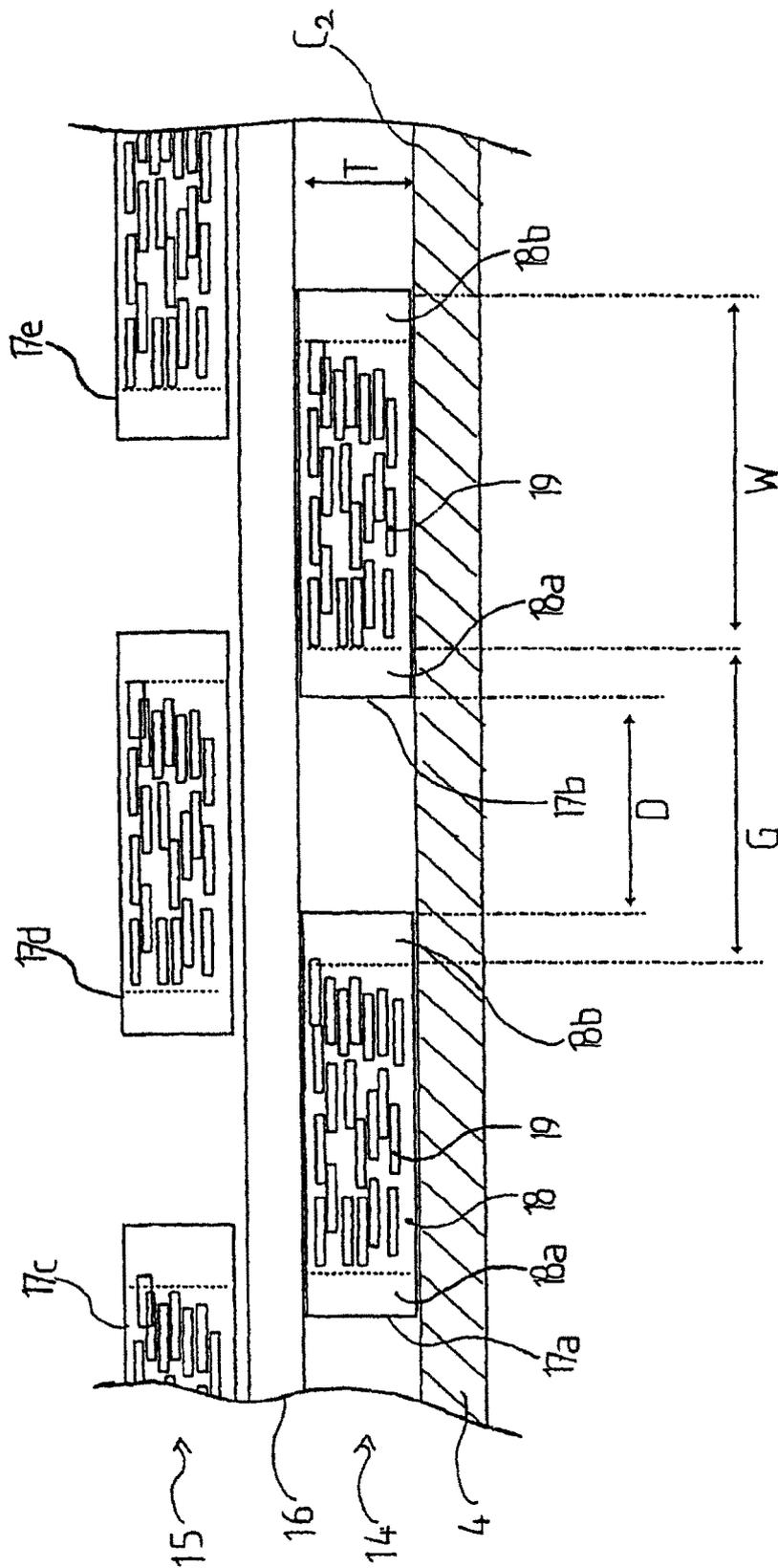


Fig. 3

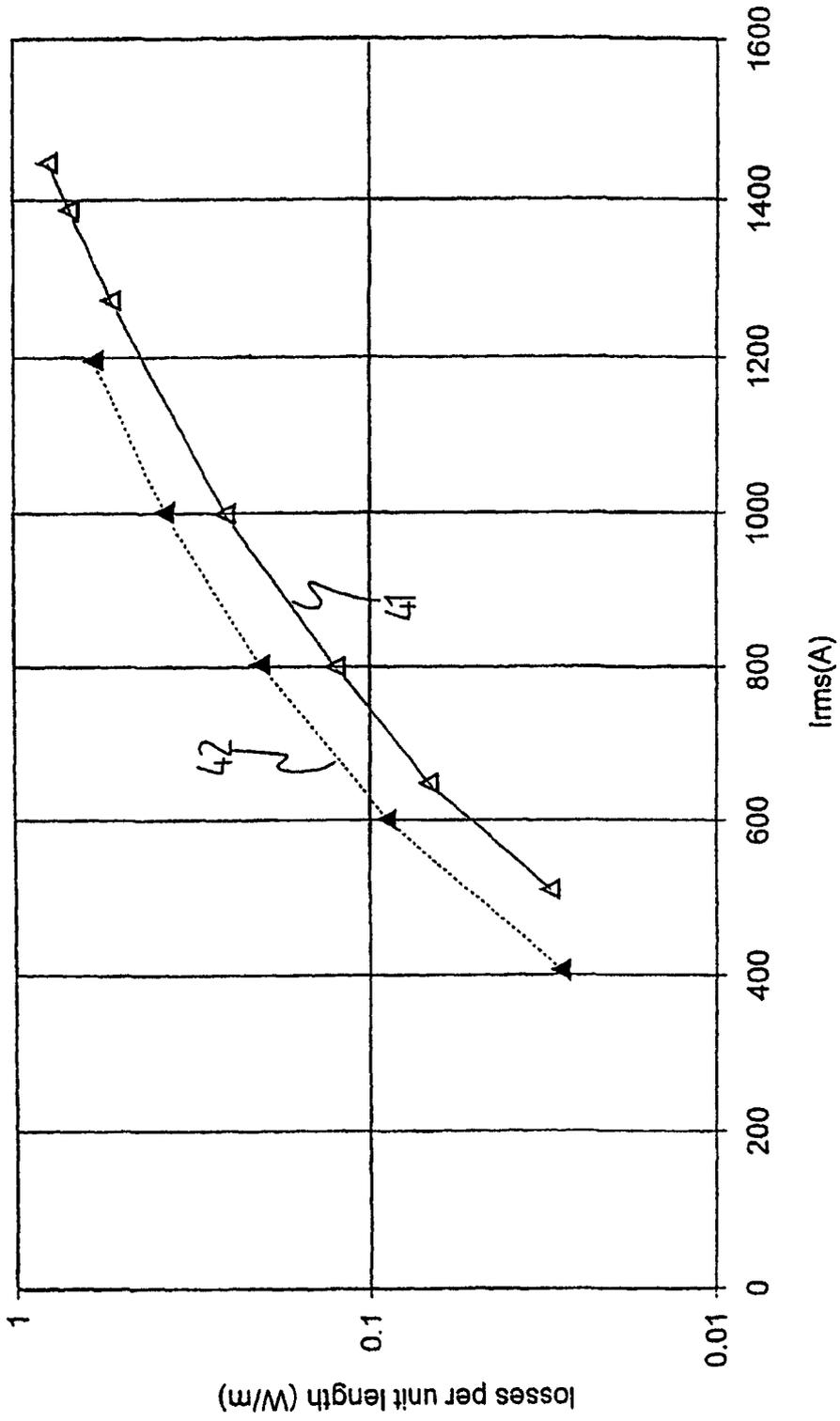


Fig. 4

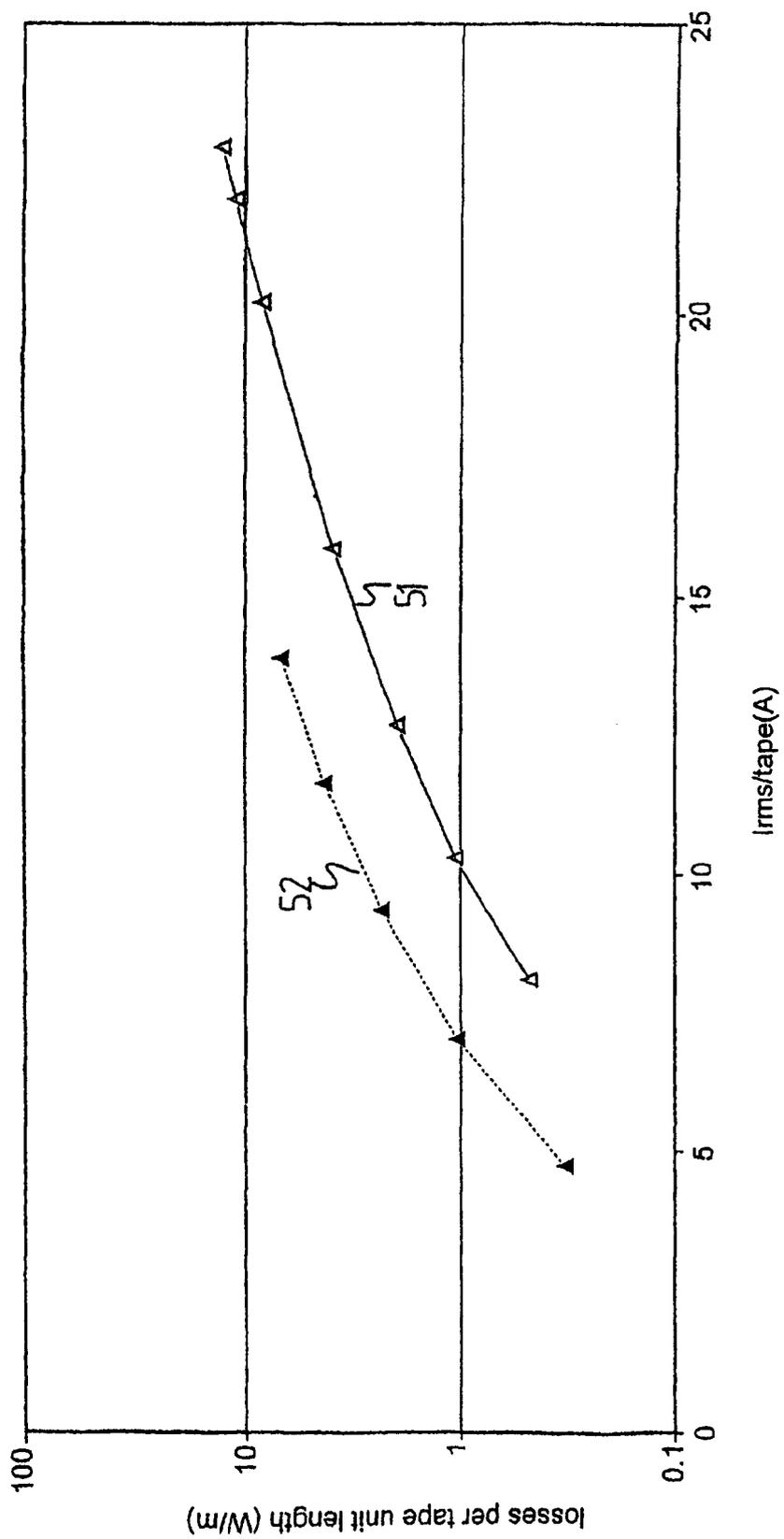


Fig. 5