

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 533 872**

51 Int. Cl.:

**H01L 39/14** (2006.01)

**H01B 12/06** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.01.2008 E 08728454 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.01.2015 EP 2122698**

54 Título: **Hilo de HTS**

30 Prioridad:

**09.02.2007 US 673281**

**20.03.2007 US 688827**

**20.03.2007 US 688802**

**20.03.2007 US 688809**

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

**15.04.2015**

73 Titular/es:

**AMERICAN SUPERCONDUCTOR CORPORATION  
(100.0%)**

**64 JACKSON ROAD  
DEVENS MA 01434, US**

72 Inventor/es:

**FOLTS, DOUGLAS C.;  
MAGUIRE, JAMES;  
YUAN, JIE y  
MALOZEMOFF, ALEXIS P.**

74 Agente/Representante:

**CARPINTERO LÓPEZ, Mario**

**ES 2 533 872 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

Hilo de HTS

**Campo de la invención**

5 La presente divulgación se refiere a dispositivos de HTS y, más en particular, a dispositivos de HTS configurados para funcionar como dispositivos de limitación de corriente de fallo.

**Antecedentes**

10 A medida que las demandas de energía eléctrica mundial continúan aumentando de forma significativa, las empresas de servicio público han luchado para cumplir con estas demandas crecientes desde un punto de vista de generación de potencia así como también desde un punto de vista de suministro de potencia. El suministro de potencia a los usuarios por medio de redes de transmisión y de distribución sigue siendo un desafío significativo para las empresas de servicio público, debido a la capacidad limitada de la infraestructura de transmisión y de distribución instalada existente, así como también al espacio disponible limitado para añadir a las líneas y cables de transmisión y de distribución convencionales adicionales. Esto es particularmente pertinente en las áreas urbanas y metropolitanas congestionadas, en las que es muy limitado el espacio existente disponible para expandir la capacidad.

15 Se están desarrollando cables de potencia flexibles y de gran longitud que usan hilo superconductor de alta temperatura (HTS) para aumentar la capacidad de potencia en las redes de transmisión y de distribución de potencia de servicio público, a la vez que se mantiene una planta relativamente pequeña para facilitar la instalación y se usa nitrógeno líquido, ambientalmente limpio, para el enfriamiento. Para la presente divulgación, se define un material de HTS como un superconductor con una temperatura crítica  $T_c$ , o por encima de, 30 Kelvin (menos 243 °C), el cual incluye materiales tales como tierras raras o itrio - bario - cobre - óxido (denominado YBCO en el presente documento); talio - bario - calcio - cobre - óxido; bismuto - estroncio - calcio - cobre - óxido (denominado BSCCO en el presente documento); mercurio - bario - calcio - cobre - óxido; y diboruro de magnesio. Se entiende que estas familias de composiciones incluyen sustituciones, adiciones e impurezas posibles, siempre que estas sustituciones, adiciones e impurezas no reduzcan la temperatura crítica por debajo de 30 K. Tales cables de HTS prevén que se proporcionen unas cantidades aumentadas de potencia de forma económica y fiable dentro de las áreas congestionadas de una red de potencia de servicio público, aliviando de esta manera la congestión y permitiendo que las empresas de servicio público aborden sus problemas de capacidad de transmisión y de distribución.

20 Un cable de potencia de HTS usa hilo de HTS como el conductor primario del cable (es decir, en lugar de los conductores tradicionales de cobre) para la transmisión y distribución de electricidad. El diseño de los cables de HTS da como resultado una impedancia serie significativamente menor, en su estado operativo superconductor, en comparación con las líneas aéreas y los cables subterráneos convencionales. En este punto, la impedancia serie de un cable o línea se refiere a la combinación de impedancia resistiva de los conductores que transportan la potencia, y la impedancia reactiva (inductiva) asociada con la arquitectura del cable o la línea aérea. Para la misma área en sección transversal del cable, el hilo de HTS permite de tres a cinco veces en la capacidad de transporte de potencia en comparación con los cables de corriente alterna (ca) convencionales; y un aumento de hasta diez veces en la capacidad de transporte de corriente en comparación con los cables de corriente continua (cc) convencionales.

25 Los cables de HTS pueden diseñarse con hilos de HTS devanados de forma helicoidal alrededor de un conformador corrugado continuamente flexible, o pueden tener múltiples hilos de HTS en una variedad de configuraciones apiladas y retorcidas. En todos estos casos, el cable puede ser continuamente flexible, de tal modo que puede devanarse de forma conveniente en un cilindro para su transporte y ser instalados con vueltas y curvas en un conducto o entre otros dispositivos de potencia. Los cables de HTS pueden diseñarse con un criógeno líquido en contacto con los hilos de HTS y que fluye a lo largo de la longitud del cable. El nitrógeno líquido es el criógeno líquido más común, a pesar de que se podrían usar hidrógeno líquido o neón líquido para materiales superconductor de menor temperatura tales como el diboruro de magnesio.

30 Además de los problemas de capacidad, otro problema significativo para las empresas de servicio público que resulta de la demanda creciente de potencia (y por lo tanto de los niveles aumentados de potencia que están siendo generados y transferidos a través de las redes de transmisión y de distribución) son las "corrientes de fallo" aumentadas que son el resultado de los "fallos". Los fallos, o fallas, pueden ser el resultado de fallos del dispositivo de red, de desastres naturales (por ejemplo, relámpagos), de desastres humanos (por ejemplo, un accidente automovilístico que rompe un polo de potencia), o cualquier otro problema de red que provoque un cortocircuito a tierra o de una fase de la red de servicio público a la otra fase. En general, dicho fallo aparece como una carga extremadamente grande que se materializa de forma instantánea en la red de servicio público. En respuesta a la aparición de esta carga, la red intenta suministrar una cantidad grande de corriente a la carga (es decir, el fallo). Cualquiera enlace dado en la red de una red eléctrica puede caracterizarse por una corriente de fallo máxima que fluirá en ausencia de medidas de limitación de corriente de fallo, durante el cortocircuito que precipita la condición de fallo máximo. Las corrientes de fallo también pueden ser tan grandes en las redes eléctricas de potencia grandes

que, sin unas medidas de limitación de corriente de fallo, la mayor parte del equipo eléctrico en la red eléctrica puede resultar dañado o destruido. La forma convencional de protección frente a las corrientes de fallo es abrir rápidamente los interruptores de circuito y detener por completo el flujo de corriente y de potencia.

Los circuitos de detección asociados con los interruptores de circuito supervisan la red para detectar la presencia de una situación de fallo (o de sobrecorriente). En un plazo de no más de unos pocos milisegundos de detección, las señales de activación desde los circuitos del detector pueden empezar a abrir los interruptores del circuito para evitar la destrucción de los diversos componentes de la red. Actualmente, la capacidad máxima de los dispositivos de interrupción de circuito existentes es de 80.000 A, y estos son solo para voltajes de nivel de transmisión. Muchas secciones de la red de servicio público construidas durante el siglo pasado fueron construidas con unos dispositivos de red capaces de soportar una corriente de fallo de solo 40.000 - 63.000 A. Desafortunadamente, con los niveles aumentados de generación y transmisión de potencia en las redes de servicio público, los niveles de corrientes de fallo están aumentando hasta el punto en el que superarán las capacidades de los dispositivos interruptores de circuito instalados en la actualidad o del estado de la técnica (es decir, ser mayores de 80.000 A) a los voltajes tanto de nivel de distribución como de transmisión. Aún a niveles de corrientes de fallo menores, los costes de actualizar los interruptores de circuito de un nivel a otro mayor en la totalidad de una red eléctrica pueden ser muy altos. Por consiguiente, las empresas de servicio público están buscando soluciones nuevas para abordar el nivel creciente de corrientes de fallo. En la mayoría de los casos, es deseable reducir las corrientes de fallo por lo menos en un 10 % para hacer una mejora significativa en el funcionamiento de una red eléctrica. Una de dichas soluciones en desarrollo es un dispositivo que se denomina limitador de corrientes de fallo (FCL) de HTS.

Un FCL de HTS es un dispositivo dedicado interconectado a una red de servicio público que reduce la amplitud de las corrientes de fallo a niveles que pueden gestionar los interruptores de circuito, ya instalados o actualmente disponibles, convencionales. Véase el documento *High-temperature superconductor fault current limiters* de Noe y M. Steurer, *Supercond. Sci. Technol.* 20 (2007) R15 - R29. Dichos FCL de HTS por lo general han sido configurados a partir de unos módulos rígidos cortos fabricados de barras sólidas o cilindros de material de HTS que tienen una resistencia muy alta cuando se llevan por encima de su corriente crítica superconductor hasta un estado resistivo. Desafortunadamente, tales FCL de HTS independientes son actualmente muy grandes y costosos. En las subestaciones en ambientes urbanos densos, en los que los cables de HTS son más necesarios, el espacio es particularmente valioso. Las empresas de servicio público también pueden usar inductores grandes, a pesar de que estos pueden provocar problemas de pérdidas adicionales, de regulación de voltaje y de estabilidad de la red eléctrica. Y, desafortunadamente, los limitadores de corriente pirotécnicos (por ejemplo, fusibles) necesitan una sustitución después de cada suceso de fallo. Adicionalmente, a pesar de que los nuevos FCL electrónicos de potencia están en desarrollo, existen cuestiones acerca de si pueden ser a prueba de fallos o si pueden extenderse de forma fiable a los niveles de voltaje de transmisión.

Para permitir que los cables de HTS sobrevivan al flujo de las corrientes de fallo, una cantidad significativa de cobre se introduce en conjunción con el hilo de HTS, pero esto aumenta el peso y el tamaño del cable. Véase *Development and Demonstration of a Long Length HTS Cable to Operate in the Long Island Power Authority Transmission Grid* de J. F. Maguire, F. Schmidt, S. Bratt, T. E. Welsh, J. Yuan, A. Allais y F. Hamber, que va a publicarse en *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*. Con frecuencia, el cobre llena el conformador central en el núcleo del cable de HTS alrededor del cual se devana el hilo de forma helicoidal, lo cual evita que el núcleo se use como un pasaje para el flujo de nitrógeno líquido. Como alternativa, en especial para cables multifásicos, los hilos de cobre se mezclan con los hilos de HTS dentro de las capas devanadas de forma helicoidal del cable. En presencia de una corriente de fallo grande que supera la corriente crítica de los hilos de HTS del cable, estos se enfrían o conmutan a un estado resistivo que puede calentarse a partir de pérdidas resistivas  $I^2R$  (en las que  $I$  es la corriente y  $R$  es la resistencia del cable). El cobre está diseñado para absorber y transportar la corriente de fallo para evitar que los hilos de HTS se sobrecalienten. La cantidad de cobre es tan grande que su resistencia total en el cable es pequeña, y por consiguiente, tiene un efecto insignificante en la reducción de la corriente de fallo.

En el programa europeo SUPERPOLI (Véase *SUPERPOLI fault-current limiters based on YBCO-coated stainless steel tapes* de Usoskin y col., *IEEE Trans on Applied Superconductivity*, Vol. 13; Nº 2, junio de 2003, páginas 1972 - 5; *Design performance of a superconducting power link* de Paasi y col., *IEEE Trans on Applied Superconductivity*, Vol. 11, Nº 1, marzo de 2001, páginas 1928 - 1931; *HTS Materials of AC current transport and fault current limitation* de Verhaege y col., *IEEE Trans on Applied Superconductivity*, Vol. 11, Nº 1, marzo de 2001, páginas 2503 - 2506; y la Patente de EE. UU. Nº 5.859.386, titulada "Superconductive electrical transmission line", se investigaron enlaces de potencia superconductor que también pueden limitar la corriente.

Siguiendo el enfoque típico, para los FCL independientes anteriores, este programa investigó las varillas o cilindros sólidos rígidos de material de HTS que formaron los módulos o barras colectoras para el enlace de potencia. Una longitud típica de un módulo o barra colectora fue de 50 cm a 2 metros. En un segundo enfoque, se usaron hilos conductores revestidos en los cuales el material YBCO se revistió sobre sustratos de acero inoxidable de alta resistencia. Se usó una capa de estabilizador de oro, a pesar de que esta se mantuvo muy delgada para mantener la resistencia por longitud tan alta como fuera posible. El hilo se devanó de forma helicoidal sobre un núcleo cilíndrico rígido, el cual formó otra opción para un módulo o barra colectora para el enlace de potencia. En respuesta a una corriente de fallo, ambos de estos módulos se conmutan a un estado muy sumamente resistivo para limitar la corriente. El concepto propuesto en el programa SUPERPOLI para crear un cable de longitud más larga fue el de

interconectar los módulos rígidos con interconexiones de cobre trenzadas flexibles. Véase la Patente de EE. UU. N° 5.859.386, titulada "*Superconductive electrical transmission line*". No se consideró la posibilidad de diseñar y fabricar un cable continuamente flexible de larga longitud con una funcionalidad de limitación de corriente de fallo usando unos hilos de menor resistencia y de mayor capacidad calorífica y, por lo tanto, un nivel inferior de calentamiento local. Tampoco se consideró la posibilidad de unos elementos de red eléctrica adicionales que pudieran optimizar la funcionalidad del enlace.

Es deseable mejorar la forma en la cual los cables de HTS gestionan las corrientes de fallo y proporcionar una alternativa mejorada para el uso de FCL independientes u otros dispositivos para limitar las corrientes de fallo, tales como módulos limitadores de corrientes de fallo de alta resistencia por longitud que forman los enlaces de potencia.

Un cable de potencia de HTS continuamente flexible de larga longitud práctico que incorpora la funcionalidad de limitación de corriente de fallo podría proporcionar beneficios mayores en el establecimiento de una alta capacidad, una planta baja y una transmisión y distribución de potencia ambientalmente limpia, a la vez que al mismo tiempo evitan la necesidad de dispositivos de limitación de corriente de fallo separados y costosos en subestaciones de servicio público apiñadas.

Un hilo superconductor con una capa de HTS y tiras estabilizadoras fabricadas de un metal de alta conductividad se divulga, por ejemplo, en el documento US 2006/0073979 A1

### **Sumario de la invención**

En una primera implementación de la presente divulgación, un hilo de HTS enfriado de forma criogénica incluye un estabilizador que tiene un espesor total en un intervalo de 200 - 600 micrómetros y una resistividad en un intervalo de 0,8 - 15,0 microhmios cm a aproximadamente 90 K. Una primera capa de HTS se acopla térmicamente a por lo menos una porción del estabilizador.

También se pueden incluir una o más de las siguientes características. El estabilizador puede incluir una primera capa de estabilizador y una segunda capa de estabilizador. La primera capa de estabilizador puede colocarse próxima a un primer lado de la primera capa de HTS y la segunda capa de estabilizador puede colocarse próxima a un segundo lado de la primera capa de HTS. Una segunda capa de HTS puede acoplarse térmicamente a por lo menos una porción del estabilizador. El estabilizador puede colocarse entre la primera y la segunda capas de HTS. Una segunda capa de HTS puede acoplarse térmicamente a por lo menos una porción del estabilizador.

El estabilizador puede incluir una primera capa de estabilizador, una segunda capa de estabilizador y una tercera capa de estabilizador. La primera capa de estabilizador puede colocarse próxima a un primer lado de la primera capa de HTS. La segunda capa de estabilizador puede colocarse próxima a un segundo lado de la primera capa de HTS y un primer lado de la segunda capa de HTS. La tercera capa de estabilizador puede colocarse próxima a un segundo lado de la segunda capa de HTS.

La primera capa de HTS puede tener un espesor menor de 5 micrómetros. La resistividad del estabilizador puede presentar un intervalo de 1,0 - 10,0 microhmios-cm a aproximadamente 90 K. La primera capa de HTS puede construirse de un material elegido de entre el grupo que consiste en: itrio o tierras raras - bario - cobre - óxido; talio - bario - calcio - cobre - óxido; bismuto - estroncio - calcio - cobre - óxido; mercurio - bario - calcio - cobre - óxido; y diboruro de magnesio.

El estabilizador puede construirse, por lo menos en parte, de un material de bronce. El material de bronce puede elegirse de entre el grupo que consiste en: bronce 210 (Cu al 95 % / Zn al 5 %), bronce 220 (Cu al 90 % / Zn al 10 %), bronce 230 (Cu al 85 % / Zn al 15 %), bronce 240 (Cu al 80 % / Zn al 20 %) y bronce 260 (Cu al 70 % / Zn al 30 %). Una capa de sustrato puede colocarse próxima a la capa de HTS. La capa de sustrato puede construirse de un material elegido de entre el grupo que consiste en: níquel - tungsteno; acero inoxidable y Hastelloy™.

Un encapsulante puede encapsular por lo menos una porción del hilo de HTS enfriado de forma criogénica. El encapsulante puede ser una capa de aislante escasamente conductora. El encapsulante puede construirse de un material elegido de entre el grupo que consiste en: polietileno; poliéster; polipropileno; epoxi; poli(metacrilato de metilo); poliimidas; politetrafluoroetileno y poliuretano. El encapsulante puede configurarse para tener una resistividad eléctrica neta en un intervalo de 0,0001 - 100 ohmios cm. El encapsulante puede incluir por lo menos una porción que experimenta un cambio de fase endotérmico en el intervalo de temperatura de 72 - 110 K. El encapsulante puede aplicarse al hilo de HTS mediante uno de: un procedimiento de enrollado, un procedimiento de extrusión, un procedimiento de inmersión, un procedimiento de chapado, un procedimiento de deposición de vapor y un procedimiento de pulverización. El encapsulante puede aplicarse al hilo de HTS mediante un procedimiento de múltiples pasadas. El encapsulante puede ser de un espesor de 25 - 300 µm. El encapsulante puede tener una superficie que potencia la transferencia de calor desde el encapsulante a un refrigerante líquido criogénico circundante.

En una segunda implementación de la presente divulgación, un cable de HTS enfriado de forma criogénica está configurado para incluirse dentro de una red eléctrica de servicio público que reduce una corriente de fallo máxima en por lo menos el 10 %. El cable de HTS enfriado de forma criogénica incluye una estructura de soporte de devanado continuamente flexible. Una o más capas conductoras del material superconductor se colocan en sentido

coaxial con respecto a la estructura de soporte de devanado flexible. Por lo menos una de las una o más capas conductoras incluye: un hilo de HTS que incluye: estabilizador que tiene un espesor total en un intervalo de 100 - 600 µm y una resistividad en un intervalo de 0,8 - 15,0 microohmios cm a aproximadamente 90 K y una primera capa de HTS térmicamente acoplada a por lo menos una porción del estabilizador.

- 5 También se puede incluir una o más de las siguientes características. El estabilizador puede incluir una primera capa de estabilizador y una segunda capa de estabilizador. La primera capa de estabilizador puede colocarse próxima a un primer lado de la primera capa de HTS y la segunda capa de estabilizador puede colocarse próxima a un segundo lado de la primera capa de HTS. El hilo de HTS puede incluir una segunda capa de HTS térmicamente acoplada a por lo menos una porción del estabilizador. La primera capa de HTS puede tener un espesor de menos de 5 micrómetros. El espesor total del estabilizador puede presentar un intervalo de 200 - 500 micrómetros. La resistividad del estabilizador puede presentar un intervalo de 1,0 - 10,0 microohmios cm a aproximadamente 90 K.

- 10 La primera capa de HTS puede construirse de un material elegido de entre el grupo que consiste en: itrio o tierras raras - bario - cobre - óxido; talio - bario - calcio - cobre - óxido; bismuto - estroncio - calcio - cobre - óxido; mercurio - bario - calcio - cobre - óxido; y diboruro de magnesio. El estabilizador puede construirse, por lo menos en parte, de un material de bronce. El material de bronce puede elegirse de entre el grupo que consiste en: bronce 210 (Cu al 95 % / Zn al 5 %), bronce 220 (Cu al 90 % / Zn al 10 %), bronce 230 (Cu al 85 % / Zn al 15 %), bronce 240 (Cu al 80 % / Zn al 20 %) y bronce 260 (Cu al 70 % / Zn al 30 %). El hilo de HTS puede incluir una capa de sustrato colocada próxima a la capa de HTS. La capa de sustrato puede construirse de un material elegido de entre el grupo que consiste en: níquel - tungsteno; acero inoxidable y Hastelloy™.

- 20 El hilo de HTS puede incluir un encapsulante para encapsular por lo menos una porción del hilo de HTS. El encapsulante puede ser una capa de aislante escasamente conductora. El encapsulante, puede construirse de un material elegido de entre el grupo que consiste en: polietileno; poliéster; polipropileno; epoxi; poli(metacrilato de metilo); poliimidias; politetrafluoroetileno y poliuretano. El encapsulante puede configurarse para tener una resistividad eléctrica neta en un intervalo de 0,0001 - 100 ohmios cm. El encapsulante puede incluir por lo menos una porción que experimenta un cambio de fase endotérmico en el intervalo de temperatura de 72 - 110 K. El encapsulante puede tener un espesor de 25 - 300 µm.

La estructura de soporte de devanado flexible puede incluir un núcleo axial hueco. La estructura de soporte de devanado flexible puede incluir un tubo de acero inoxidable corrugado.

- 30 En una tercera implementación de la presente divulgación, un sistema de cable eléctrico superconductor está configurado para incluirse dentro de una red eléctrica de servicio público que reduce una corriente de fallo máxima en por lo menos el 10 %. El sistema de cable eléctrico superconductor incluye una fuente de voltaje y un cable de HTS enfriado de forma criogénica acoplado a la fuente de voltaje. El cable de HTS enfriado de forma criogénica incluye: una estructura de soporte de devanado flexible, y una o más capas conductoras de material superconductor, colocado en sentido coaxial con respecto a la estructura de soporte de devanado flexible. Por lo menos una de las una o más capas conductoras incluye un hilo de HTS que incluye un estabilizador que tiene un espesor total en un intervalo de 200 - 600 micrómetros y una resistividad en un intervalo de 0,8 - 15,0 microohmios cm a aproximadamente 90 K. Una primera capa de HTS se acopla térmicamente a por lo menos una porción del estabilizador.

- 40 También pueden incluirse una o más de las siguientes características. La estructura de soporte de devanado flexible puede incluir un núcleo axial hueco. La estructura de soporte de devanado flexible puede incluir un tubo de acero inoxidable corrugado. La fuente de voltaje puede incluir una subestación. Uno o más conjuntos de interruptor rápido pueden acoplarse en paralelo con el cable de HTS enfriado de forma criogénica. El estabilizador puede incluir: una primera capa de estabilizador y una segunda capa de estabilizador. La primera capa de estabilizador puede colocarse próxima a un primer lado de la primera capa de HTS y la segunda capa de estabilizador puede colocarse próxima a un segundo lado de la primera capa de HTS. La resistividad del estabilizador puede presentar un intervalo de 1,0 - 10,0 microohmios cm a aproximadamente 90 K. El estabilizador puede construirse, por lo menos en parte, de un material de bronce. El material de bronce puede elegirse de entre el grupo que consiste en: bronce 210 (Cu al 95 % / Zn al 5 %), bronce 220 (Cu al 90 % / Zn al 10 %), bronce 230 (Cu al 85 % / Zn al 15 %), bronce 240 (Cu al 80 % / Zn al 20 %) y bronce 260 (Cu al 70 % / Zn al 30 %).

- 50 El hilo de HTS puede incluir un encapsulante para encapsular por lo menos una porción del hilo de HTS. El encapsulante puede ser una capa de aislante escasamente conductora. El encapsulante puede construirse de un material elegido de entre el grupo que consiste en: polietileno; poliéster; polipropileno; epoxi; poli(metacrilato de metilo); poliimidias; politetrafluoroetileno y poliuretano. El encapsulante puede configurarse para tener una resistividad eléctrica neta en un intervalo de 0,0001 - 100 ohmios cm.

- 55 Los detalles de una o más implementaciones se exponen en los dibujos adjuntos y en la descripción en lo sucesivo. Otras características y ventajas se volverán evidentes a partir de la descripción, los dibujos y las reivindicaciones.

**Breve descripción de los dibujos**

- La figura 1 es un diagrama esquemático de un sistema de cable de HTS de núcleo de cobre instalado dentro de una red eléctrica de servicio público;
- 5 la figura 2 es una vista isométrica del cable de HTS de núcleo de cobre de la figura 1;
- la figura 3 es una vista isométrica de un cable de HTS de núcleo hueco;
- la figura 4 es un diagrama esquemático del cable de HTS de núcleo hueco de la figura 3 instalado dentro de una red eléctrica de servicio público;
- la figura 5A es una vista en sección transversal de un hilo de HTS;
- 10 la figura 5B es una vista en sección transversal de una realización alternativa del hilo de HTS;
- la figura 6 es un diagrama esquemático de una red eléctrica de servicio público;
- la figura 7 es un modelo del cable de HTS de núcleo hueco de la figura 3, instalado dentro de una red eléctrica de servicio público; y
- la figura 8 es un diagrama de flujo de un procedimiento para configurar el cable de HTS de núcleo hueco de la figura 3.
- 15 En los diversos dibujos, unos símbolos de referencia similares indican unos elementos similares.

**Descripción detallada de realizaciones a modo de ejemplo**

Visión de conjunto

Haciendo referencia a la figura 1, una porción de una red eléctrica de servicio público 10 puede incluir un cable superconductor de alta temperatura (HTS) 12. El cable de HTS 12 puede ser de cientos o miles de metros de longitud y puede proporcionar una trayectoria eléctrica de corriente relativamente alta / resistencia baja para la suministro de potencia eléctrica desde las estaciones de generación (que no se muestran) o importada de empresas de servicio público remotas (que no se muestran).

El área en sección transversal del cable de HTS 12 solo puede ser una fracción del área en sección transversal de un cable de núcleo de cobre convencional y puede tener la capacidad de transportar la misma cantidad de corriente eléctrica. Tal como se ha analizado en lo que antecede, dentro de la misma área en sección transversal, un cable de HTS puede proporcionar de tres a cinco veces la capacidad de transporte de corriente de un cable de ca convencional; y hasta diez veces la capacidad de transporte de corriente de un cable de cc convencional. A medida que madure la tecnología de HTS, estas proporciones pueden aumentarse.

Tal como se analiza en lo sucesivo con mayor detalle, el cable de HTS 12 incluye un hilo de HTS, el cual puede tener la capacidad de gestionar tanto como ciento cincuenta veces la corriente eléctrica de un hilo de cobre de unas dimensiones similares. Por consiguiente, usando una cantidad relativamente pequeña de hilo de HTS (en contraposición a una cantidad grande de conductores de cobre trenzados dentro del núcleo de un cable de ca tradicional), puede construirse un cable de potencia de HTS que tenga la capacidad de proporcionar de tres a cinco veces tanta potencia eléctrica como un cable de potencia de conductor de cobre tradicional de unas dimensiones equivalentes.

El cable de HTS 12 puede conectarse dentro de un segmento de red eléctrica de transmisión 14 que transporta voltajes a un nivel de, por ejemplo, 138 kV y se extiende desde el segmento de red eléctrica 14 al segmento de red eléctrica 16, el cual puede recibir este voltaje y transformarlo a un nivel inferior de, por ejemplo, 69 kV. Por ejemplo, el segmento de red eléctrica de transmisión 14 puede recibir potencia a 765 kV (por medio de la línea aérea o el cable 18) y puede incluir una subestación 20 de 138 kV. La subestación 20 de 138 kV puede incluir un transformador de 765 kV / 138 kV (que no se muestra) para reducir la potencia de 765 kV recibida en el cable 18 a 138 kV. Esta potencia "reducida" de 138 kV puede proporcionarse entonces por medio de, por ejemplo, un cable de HTS 12 al segmento de red eléctrica de transmisión 16. El segmento de red eléctrica de transmisión 16 puede incluir una subestación 24 de 69 kV, el cual puede incluir un transformador de 138 kV / 69 kV (que no se muestra) para reducir la potencia de 138 kV recibida por medio del cable de HTS 12 a una potencia de 69 kV, la cual puede distribuirse a, por ejemplo, los dispositivos 26, 28, 30, 32. Los ejemplos de los dispositivos 26, 28, 30, 32 pueden incluir, pero sin limitarse a, subestaciones de 34,5 kV.

Los niveles de voltaje que se han analizado en lo que antecede solo tienen fines ilustrativos y no se pretende que sean una limitación de la presente divulgación. Por consiguiente, la presente divulgación se puede aplicar de igual forma a diversos niveles de voltaje y de corriente en sistemas tanto de transmisión como de distribución. De forma similar, la presente divulgación se puede aplicar de igual forma a aplicaciones, que no son de servicio público, tales como la distribución de potencia industrial o la distribución de potencia de vehículos (por ejemplo, barcos, trenes, aviones y naves espaciales).

Uno o más interruptores de circuito 34, 36 pueden conectarse en, por ejemplo, cada extremo del cable de HTS 12 y pueden permitir que el cable de HTS 12 se desconecte rápidamente de la red eléctrica de servicio público 10. El sistema de gestión de fallos 38, puede proporcionar protección frente a sobrecorrientes para el cable de HTS 12 para asegurar que el cable de HTS 12 se mantenga a una temperatura que esté por debajo del punto en el cual el cable de HTS 12 pueda resultar dañado.

El sistema de gestión de fallos 38 puede proporcionar dicha protección frente a sobrecorrientes supervisando la corriente que fluye en el segmento de la red eléctrica de servicio público a la cual se acopla el cable de HTS 12. Por ejemplo, el sistema de gestión de fallos 38 puede detectar la corriente que pasa a través de la subestación 20 de 138 kV (usando, por ejemplo, el sensor de corriente 40) y puede controlar el funcionamiento de los interruptores 34, 36 en base, por lo menos en parte, a la señal provista por el sensor de corriente 40.

En el presente ejemplo, el cable de HTS 12 puede diseñarse para soportar una corriente de fallo tan alta como de 51 kA con una duración de 200 ms (es decir, 12 ciclos de potencia de 60 Hz). Los detalles del sistema de gestión de fallos 38 se describen en la Solicitud de Patente de EE. UU., en tramitación junto con la presente con N° de serie 11/459.167, la cual se presentó el 21 de julio de 2006, y se titula *Fault management of HTS power cable*. Por lo general, con el objeto de soportar este nivel de corriente de fallo, el cable de HTS puede contener una cantidad significativa de cobre, lo que puede ayudar a transportar la alta corriente de fallo y de esta manera proteger los hilos de HTS. El cobre está presente para proteger el cable de HTS, pero este no tiene efecto significativo alguno de limitación de corriente debido a su muy baja resistencia.

Haciendo referencia también a la figura 2, se muestra una realización típica de un cable de HTS 12 de núcleo de cobre monofásico que puede incluir un núcleo de cobre trenzado 100 rodeado en sucesión radial por la primera capa de HTS 102, la segunda capa de HTS 104, la capa de aislamiento dieléctrico de alto voltaje 106, la capa de protección de cobre 108, la capa de protección de HTS 110, el pasaje de refrigerante 112, la pared de criostato interior 114, el aislamiento térmico 116, el espacio de vacío 118, la pared de criostato exterior 120 y una cubierta de cable exterior 122. La capa de HTS 102 y la capa de HTS 104 también pueden denominarse como los "conductores de fase". Como alternativa, la capa de protección de cobre 108 puede colocarse en el exterior de la capa de protección de HTS 110. Durante el funcionamiento, un refrigerante o criógeno líquido (por ejemplo, nitrógeno líquido, que no se muestra) se puede suministrar desde una fuente de refrigerante externa (que no se muestra) y puede hacerse que circule en el interior y a lo largo de la longitud del pasaje de refrigerante 112. Todos los componentes del cable están diseñados de tal modo que permiten la flexibilidad del cable de HTS 12. Por ejemplo, el núcleo de cobre trenzado 100 (sobre el cual están devanadas la primera capa de HTS 102 y la segunda capa de HTS 104) es flexible. Por consiguiente, usando el núcleo de cobre trenzado flexible 100, se logra un cable de HTS 12 que es continuamente flexible a lo largo de su longitud. De forma opcional, puede usarse un conformador de metal corrugado para soportar los hilos de HTS devanados de forma helicoidal, proporcionando una flexibilidad continua a lo largo de la longitud del cable.

Adicionalmente / como alternativa, se pueden usar unas capas de HTS y de aislamiento coaxiales adicionales. Por ejemplo, se pueden usar más de dos capas de hilos de HTS para una única fase. Así mismo, se pueden usar tres grupos de capas de HTS separadas por unas capas de aislamiento (que no se muestran) para transportar la potencia trifásica. Un ejemplo de una disposición de cable de este tipo es la disposición de cable de HTS Triax, propuesta por Ultera (es decir, un proyecto conjunto de Southwire Company de Carrollton, GA y NKT Cables de Colonia, Alemania). Otras realizaciones del cable de HTS 12 pueden incluir, pero sin limitarse a: configuraciones dieléctricas calientes y / o frías; configuraciones monofásicas frente a multifásicas; y varias configuraciones de protección (por ejemplo, sin protección y protección basada en criostato).

El núcleo de cobre 100 y la capa de protección de cobre 108 pueden configurarse para transportar corrientes de fallo (por ejemplo, la corriente de fallo 124) que puede aparecer en el interior del cable 12. Por ejemplo, cuando aparece la corriente de fallo 124 en el interior del cable 12, la corriente dentro de las capas de HTS 102, 104 puede aumentarse de forma drástica hasta un nivel que supera el nivel de corriente crítica (es decir,  $I_c$ ) de las capas de HTS 102, 104, lo que puede provocar que las capas de HTS 102, 104 pierdan sus características superconductor (es decir, las capas de HTS 102, 104, pueden pasar a "normales"). Un valor típico para el nivel de corriente crítica  $I_c$  es de  $4.242 A_{pico}$  para un cable con un valor asignado de  $3000 A_{rms}$  (en el que  $A_{rms}$  se refiere a Amperios de valor eficaz de corriente).

El nivel de corriente crítica en los materiales de HTS puede depender de la elección del nivel de campo eléctrico. De forma convencional, el nivel de corriente crítica  $I_c$  se define como un nivel de campo eléctrico de 1 microvoltio / cm, a pesar de que también se usan valores inferiores. No obstante, los superconductores típicos exhiben una región de transición, entre la resistencia nula (es decir, la superconducción) y los estados completamente resistivos (es decir, que no son superconductores) como una función del nivel de corriente. Las pérdidas del conductor que resultan del funcionamiento en esta región de transición se encuentran por debajo de los del estado completamente resistivo. Por consiguiente, en la práctica, las porciones del conductor en el cable de HTS pueden cambiar al estado completamente resistivo a un nivel de corriente crítica que es un factor (" $f$ ") por el nivel de corriente crítica convencional  $I_c$  definido por el criterio de 1 microvoltio / cm. En hilos de línea serpenteantes con películas delgadas de YBCO, se determinó que este factor era de aproximadamente 2, si bien se observó que variaba en cierta medida con el tiempo. Véase *Switching behavior of YBCO thin film conductors in resistive fault current limiters* de H. P. Kraemer y col., *IEEE Trans on Applied Superconductivity*, vol. 13, N° 2, junio de 2003, páginas 2044 - 2047. Se espera que el factor  $f$  para los hilos de HTS con películas delgadas de YBCO similares se encuentre en un intervalo similar (por ejemplo, 1 - 4).

Por consiguiente, cuando se supera el producto del nivel de corriente crítica (tal como se ha definido en lo que antecede) y el factor  $f$ , la resistencia de las capas de HTS 102, 104, puede aumentarse de forma significativa y

puede volverse comparativamente alta (es decir, en comparación con el núcleo de cobre 100). Debido a que la corriente que pasa a través de una pluralidad de conductores paralelos se distribuye de forma inversa con respecto a la resistencia de los conductores individuales, la mayor parte de la corriente de fallo 124 puede desviarse al núcleo de cobre 100, el cual está conectado en paralelo con las capas de HTS 102, 104. Esta transmisión de corriente de fallo 124 a través del núcleo de cobre 100 puede continuar hasta que: la corriente de fallo 124 disminuye; o los interruptores de circuito adecuados (por ejemplo, los interruptores de circuito 34, 36) interrumpen la transmisión de la corriente de fallo 124 a través del cable de HTS 12.

El sobrecalentamiento de los conductores de HTS en el cable de HTS 12 puede evitarse por dos de los beneficios provistos por el núcleo de cobre 100. En primer lugar, mediante la redirección de la corriente de fallo 124 (o por lo menos de una porción de la misma) de las capas de HTS 102, 104 al núcleo de cobre 100, el sobrecalentamiento de los conductores de HTS en el cable de HTS 12 pueden evitarse. Y en segundo lugar, la capacidad calorífica añadida del núcleo de cobre 100 reduce la subida de la temperatura en las capas de HTS 102 y 104. En el caso de que la corriente de fallo 124 (o por lo menos una porción de la misma) no se redirija desde las capas de HTS 102, 104 al núcleo de cobre 100, la corriente de fallo 124 puede calentar los conductores de HTS en el cable de HTS 12 de forma significativa debido a la alta resistencia de las capas de HTS 102, 104, lo cual puede dar como resultado la formación de "burbujas" gaseosas de nitrógeno líquido (es decir, debido a que el nitrógeno líquido se está convirtiendo de un estado líquido a un estado gaseoso en el interior del pasaje de refrigerante 112). Desafortunadamente, la formación de "burbujas" gaseosas de nitrógeno líquido puede reducir la resistencia dieléctrica de la capa de dieléctrico y puede dar como resultado una ruptura por voltaje y la destrucción del cable de HTS 12. Para configuraciones de cable dieléctrico calientes (que no se muestran), la corriente de fallo que no se redirige lejos de las capas de HTS 102, 104, simplemente puede sobrecalentar y destruir las capas de HTS 102, 104.

Los ejemplos de cable de HTS 12 pueden incluir, pero sin limitarse a, los cables de HTS comercializados por Nexans de París, Francia; Sumitomo Electric Industries, Ltd., de Osaka, Japón; y Ultera (es decir, un proyecto conjunto de Southwire Company de Carrollton, GA y NKT Cables de Colonia, Alemania).

A pesar de que el núcleo de cobre 100 redirige las corrientes de fallo (o porciones de las mismas) alrededor de las capas de HTS 102, 104, existen desventajas con el uso de un núcleo de cobre "interno" de este tipo. Por ejemplo, el núcleo de cobre 100 puede requerir que el cable de HTS 12 sea físicamente más largo y más pesado, lo cual puede dar como resultado un coste aumentado y una retención mayor de calor en el interior del cable de HTS 12. Por consiguiente, puede requerirse más refrigeración para compensar la retención de calor adicional, dando como resultado unos mayores costes de sistema y operativos en conjunto. Además, la capacidad calorífica aumentada del núcleo de cobre 100 y la resistencia térmica entre las capas de HTS 102, 104, y el refrigerante debido a la capa de dieléctrico pueden aumentar en gran medida los tiempos de recuperación debido a que la energía de una corriente de fallo aumenta la temperatura más allá del punto en el que puede mantenerse la superconducción en las capas de HTS 102, 104. Por ejemplo, en el caso de que la corriente de fallo se redirija a través del núcleo de cobre 100, que el sistema de refrigeración (que no se muestra) baje la temperatura del cable de HTS 12 hasta el intervalo de temperatura operativa adecuado (por ejemplo, 65 - 77 K) puede llevar varias horas. El tiempo requerido para enfriar el cable de HTS 12 dentro del intervalo operativo del cable, por lo general se denomina el "tiempo de recuperación" que, para las empresas de servicio público, puede requerirse que sea tan corto como sea posible (por ejemplo, de segundos). Como alternativa, puede usarse un limitador de corriente de fallo independiente con el cable de HTS 12 para limitar las corrientes de fallo; no obstante, esto tiene la desventaja de requerir la instalación de otra pieza grande y costosa de equipo eléctrico en la subestación conectada al cable de HTS 12.

Haciendo referencia a la figura 3, se muestra un cable de HTS de núcleo hueco flexible 150, de acuerdo con la presente divulgación. A pesar de que el cable de HTS 150 puede incluir diversos componentes del cable de HTS 12 de núcleo de cobre de la técnica anterior, el cable de HTS 150 no incluye un núcleo de cobre trenzado 100 (la figura 2), que fue sustituido con un núcleo hueco flexible (por ejemplo, un pasaje de refrigerante interior 152). Un ejemplo de un pasaje de refrigerante interior 152 puede incluir, pero sin limitarse a, un tubo de acero inoxidable corrugado flexible. También se retiran todas las capas protegidas de cobre. Un refrigerante (por ejemplo, nitrógeno líquido) puede fluir a través del pasaje de refrigerante interior 152.

De una forma similar a la del cable de HTS 12 de núcleo de cobre, el pasaje de refrigerante interior 152 puede rodearse en sucesión radial por la primera capa de HTS 102, la segunda capa de HTS 104 (por lo general devanada de forma helicoidal con la helicidad opuesta de la capa 102), la capa de aislamiento dieléctrico de alto voltaje 106, la capa de protección de HTS 110, el pasaje de refrigerante 112, la pared de criostato interior 114, el aislamiento térmico 116, el espacio de vacío 118, la pared de criostato exterior 120 y la cubierta de cable exterior 122. Durante el funcionamiento, un refrigerante (por ejemplo, nitrógeno líquido, que no se muestra) puede suministrarse desde una fuente de refrigerante externa (que no se muestra) y puede hacerse que recircule en el interior y a lo largo de la longitud del pasaje de refrigerante 112 y el pasaje de refrigerante interior 152. Se puede usar un refrigerante alternativo (por ejemplo, neón líquido o hidrógeno líquido) en el caso de materiales de temperatura de transición inferior, como el MgB<sub>2</sub>.



Al igual que en el caso del cable de HTS 12, todos los componentes del cable de HTS 150 están diseñados de tal modo que permiten una flexibilidad de forma continua a lo largo de la longitud del cable. Por ejemplo, y tal como se ha analizado en lo que antecede, el pasaje de refrigerante interior 152 (sobre el cual están devanadas la primera capa de HTS 102 y la segunda capa de HTS 104) es flexible. Por consiguiente, usando un pasaje de refrigerante interior flexible 152, se logra un cable de HTS 150 flexible.

Haciendo referencia también a la figura 4, la porción de red eléctrica de servicio público 10' puede incluir un cable de HTS 150 de larga longitud flexible. En el presente documento, larga longitud se define como mayor a 200 m. Este también puede incluir un cable convencional (es decir, un cable no superconductor, que no se muestra) conectado en paralelo con el cable de HTS 150. Un ejemplo del cable convencional puede incluir, pero sin limitarse a un cable de potencia de 500 kcmil, 138 kV, Shielded Triple Permasield (TPS) comercializado por The Kerite Company de Seymour, CT. El cable convencional puede ser un cable existente en una aplicación de adaptación en la que el cable de HTS 150 se está añadiendo para sustituir uno o más de los cables convencionales para, por ejemplo, aumentar la capacidad de potencia de una red eléctrica. Como alternativa, el cable convencional puede ser un cable convencional nuevo que se instala concurrentemente con el cable de HTS 150 y se interconecta con una barra de trabajo y unos interruptores de circuito adecuados.

Pueden incluirse un cable de HTS 150 y / o unos cables de HTS adicionales (que no se muestran) dentro de la trayectoria eléctrica superconductor 200, que puede incluir una porción de una red eléctrica de servicio público. Adicionalmente, la trayectoria eléctrica superconductor 200 puede incluir otros dispositivos de distribución de potencia superconductor, tales como barras (que no se muestran), transformadores (que no se muestran), limitadores de corriente de fallo (que no se muestran) y subestaciones (que no se muestran).

Un conjunto de interruptor rápido 202 puede acoplarse en serie con el cable de HTS 150. Un ejemplo de un conjunto de interruptor rápido 202 es un interruptor de circuito de potencia tipo PM de 138 kV fabricado por ABB Inc., de Greensburg, PA. El conjunto de interruptor rápido 202 (por ejemplo, un interruptor capaz de abrirse en 4 ciclos) puede controlarse mediante el sistema de gestión de fallos 38. Por ejemplo, al detectar la corriente de fallo 124 (la figura 3), el sistema de gestión de fallos 38 puede abrir el conjunto de interruptor rápido 202, dando como resultado que el cable de HTS 150 esté esencialmente aislado de la corriente de fallo 124. Para la potencia multifásica, se puede usar una pluralidad de conjuntos de interruptor rápido 202. Como alternativa, algunos conjuntos de interruptor rápido o interruptores de circuito están contruidos como un dispositivo trifásico único. El conjunto de interruptor rápido 202 puede cerrarse de nuevo después de un tiempo suficiente para permitir que el cable de HTS 150 recupere su estado superconductor. Si los interruptores de circuito de servicio público 34, 36, existentes conmutan lo bastante rápido para cumplir con los requisitos de calentamiento que se han analizado en lo que antecede, es posible que no se requiera el conjunto de interruptor rápido 202.

El cable convencional (que no se muestra) y / o los cables convencionales adicionales (que no se muestran) pueden incluirse dentro de una trayectoria eléctrica no superconductora, que puede incluir una porción de una red eléctrica de servicio público de potencia. Adicionalmente, la trayectoria eléctrica no superconductora puede incluir otros dispositivos de distribución de potencia, tales como barras (que no se muestran), transformadores (que no se muestran), limitadores de corriente de fallo (que no se muestran) y subestaciones (que no se muestran). La trayectoria eléctrica no superconductora puede mantenerse a una temperatura no criogénica (por ejemplo, una temperatura de por lo menos 273 K, la cual se corresponde con 0 °C). Por ejemplo, la trayectoria eléctrica no superconductora puede no enfriarse, y por consiguiente, puede adoptar la temperatura ambiente.

Tal como se analiza en lo sucesivo con mayor detalle, al retirar el núcleo de cobre 100 (la figura 2) y la capa de protección de cobre 108 (la figura 2) del interior del cable de HTS 150 de larga longitud flexible y controlar la impedancia del cable de HTS 150, el cable de HTS 150 puede ser físicamente menor, lo cual puede dar como resultado un coste de fabricación disminuido y una pérdida de calor más baja a partir del cable de HTS 150. Por consiguiente, el cable de HTS 150 puede requerir menos refrigeración (en comparación con el cable de HTS 12 de núcleo de cobre) y puede dar como resultado unos menores costes de sistema y operativos en conjunto. Adicionalmente, al retirar el cable de cobre 100 del interior del cable de HTS 150, pueden reducirse tanto la capacidad calorífica del cable de HTS 150 como la resistencia térmica entre las capas de HTS 102, 104, y el refrigerante, permitiendo de esta manera unos tiempos recuperación más rápidos en el caso de que una corriente de fallo 124 aumente la temperatura del cable de HTS 150 más allá del punto en el que la superconducción puede mantenerse en las capas de HTS 102, 104. Al retirar el núcleo de cobre 100 del interior del cable de HTS 150 de larga longitud flexible y controlar la impedancia del cable de HTS 150, se puede incorporar la funcionalidad de limitación de corriente de fallo directamente al cable de HTS 150, eliminando de esta manera la necesidad de un limitador de corriente de fallo independiente separado si se desea proteger el cable de HTS o el equipo de servicio público de corriente de aguas abajo frente a las corrientes de fallo.

#### Cable de HTS y limitadores de corriente de fallo

Haciendo referencia de nuevo a la figura 1, si una corriente de fallo dentro de una sección de red eléctrica 10 da lugar a que la corriente que fluye a través del cable de HTS 12 se eleve más allá de los límites de los interruptores de circuito convencionales 34, 36, se puede incorporar un dispositivo de FCL de HTS 42 (que se muestra en línea discontinua) o una tecnología de reactancia convencional (que no se muestra) dentro de la sección de red eléctrica

10 para limitar la amplitud de la corriente de fallo que fluye a través del cable de HTS 12 a un nivel que los interruptores de circuito convencionales 34, 36, pueden interrumpir. En condiciones normales, cuando los niveles de corriente nominal están fluyendo en la sección de red eléctrica 10, el dispositivo de FCL de HTS 42, el cual está conectado en serie con el flujo de potencia, puede diseñarse para introducir una impedancia muy baja dentro de la red eléctrica (en comparación con otras impedancias de red eléctrica). No obstante, cuando aparece una corriente de fallo en la sección de red eléctrica 10, la corriente provoca que el superconductor en el FCL de HTS 42 pase de forma instantánea a "normal" o no superconducción (es decir, resistivo) y esto añade una impedancia muy grande a la sección de red eléctrica 10. El FCL de HTS 42 puede diseñarse para limitar la corriente de fallo a un nivel previamente determinado que está dentro de la capacidad de interrupción de los interruptores de circuito convencionales 34, 36.

Se están desarrollando dispositivos de FCL de HTS independientes 42 por varias compañías, incluyendo American Superconductor Corporation (de Westboro, MA) en conjunción con Siemens AG (de Alemania). Desafortunadamente, añadir el dispositivo de FCL de HTS 42 a la sección de red eléctrica 10 puede ser costoso y puede requerir una cantidad significativa de espacio para acomodar el dispositivo 42, el cual puede ser difícil de acomodar, en especial en áreas urbanas. Se están desarrollando barras colectoras cortas o módulos con capacidad de limitación de corriente de fallo por diversas compañías, incluyendo Nexans (de Francia) y EHTS (de Alemania). A pesar de que las barras colectoras de limitación de corriente de fallo pueden tener determinadas aplicaciones, estas no proporcionan la alta capacidad, baja planta y flexibilidad solicitadas que se proporciona por los cables continuamente flexibles de larga longitud para las aplicaciones de transmisión y de distribución.

De acuerdo con la presente divulgación, un dispositivo de HTS, por ejemplo, un cable de HTS 150 de larga longitud continuamente flexible (la figura 3), cuando está diseñado de forma adecuada, se puede usar como un limitador de corriente de fallo en sí mismo sin la necesidad de incorporar un FCL de HTS separado, tal como un dispositivo de FCL de HTS 42 (la figura 1). Mediante el control de, por ejemplo, la impedancia de estado normal (resistiva) del cable de HTS 150, el propio cable de HTS puede usarse para obtener los efectos deseables (por ejemplo, atenuación de corrientes de fallo) de un dispositivo de FCL de HTS independiente típico (por ejemplo, el FCL de HTS 42) a la vez que se evitan los efectos no deseables (por ejemplo, coste y tamaño) del dispositivo de FCL de HTS independiente típico. En concreto, y tal como se analiza en lo sucesivo con mayor detalle, si la longitud del cable de HTS 150 es lo bastante larga y si el cable de HTS 150 se fabrica para exhibir unas características de impedancia deseadas, el cable de HTS 150 de larga longitud continuamente flexible por sí solo puede proporcionar una atenuación significativa de corrientes de fallo 124 (la figura 3) sin calentamiento hasta el punto de crear burbujas de gas en el criógeno líquido y riesgo de ruptura dieléctrica.

#### Visión de conjunto del cable de HTS de limitación de corriente de fallo (FCL) y diseño del cable de HTS para el cable de FCL

Tal como se analiza en lo sucesivo con mayor detalle, mediante el control de los diversos parámetros del cable de HTS 150 de larga longitud flexible (por ejemplo, la resistividad eléctrica y el espesor de estabilizador de los hilos de HTS en el interior del cable 150), se puede lograr un cable de HTS que, de forma simultánea: 1) proporciona la resistencia neta requerida para lograr una reducción significativa de la corriente de fallo en el cable, y 2) mantiene la subida de temperatura inducida por la corriente de fallo a través de todo el cable de HTS 150 a un nivel que está por debajo de un valor máximo que evita la formación de burbujas del refrigerante de nitrógeno líquido que circula en el interior del cable. Tal como se ha analizado en lo que antecede, la formación de "burbujas" de gas del nitrógeno líquido puede reducir la resistencia dieléctrica de la capa de dieléctrico del cable de HTS 150 y puede dar como resultado una ruptura por voltaje y la destrucción del cable de HTS 150.

La resistividad eléctrica, la cual también puede conocerse como resistencia eléctrica específica, es una medida de cómo de fuertemente se opone un material al flujo de la corriente eléctrica. En concreto, una resistividad eléctrica baja puede indicar un material que permite fácilmente el movimiento de la carga eléctrica. Una medida conveniente de la resistividad es el microohmio-cm.

Tal como se analiza en lo sucesivo con mayor detalle, la estructura del cable de HTS 150 y el diseño del hilo de HTS en el interior del cable de HTS 150 difieren fundamentalmente de los diseños que se han propuesto para los FCL de HTS independientes o las barras colectoras de limitación de corriente de fallo.

Haciendo referencia también a la figura 5, se muestra una vista en sección transversal de un hilo de HTS 250 usado para construir las capas de HTS 102, 104 del cable de HTS 150 de limitación de corriente de fallo. Esta arquitectura de hilos también puede denominarse una arquitectura de "cable revestido" debido a que una capa delgada del superconductor (es decir, una capa de HTS) se reviste sobre un sustrato con separación. Por lo general, la capa de HTS comprende el superconductor de YBCO, tal como se ha definido en lo que antecede, en particular la composición con  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  con posibles sustituciones de Y por elementos de tierras raras. Se debe comprender que la composición general puede diferir de esta composición debido a que en la capa puede haber presentes unas fases de impureza. También pueden usarse otros materiales de HTS en una arquitectura de conductor cubierto.

En el presente ejemplo, se muestra que el hilo de HTS 250 usado en las capas de HTS 102, 104 incluye dos capas de estabilizador 252, 253 y una capa de sustrato 254. Un ejemplo de la capa de sustrato 254 puede incluir, pero sin

limitarse a níquel - tungsteno, acero inoxidable y Hastelloy. Entre la capa de estabilizador 252 y la capa de sustrato 254 puede estar colocada una capa de separación 256, la capa de HTS 258 (por ejemplo, una capa de itrio - bario - cobre - óxido - YBCO), y una capa de cubierta 260. Un ejemplo de la capa de separación 256 es la combinación de itrio, itrio estabilizado con circonio y óxido de cerio ( $\text{CeO}_2$ ), y un ejemplo de la capa de cubierta 260 es la plata. Una capa de soldadura 262 (por ejemplo, una capa de SnPbAg) se puede usar para unir las capas de estabilizador 252 y 253 a la capa de cubierta 260 y la capa de sustrato 254.

Además de la configuración de hilo que se ha descrito en lo que antecede, se considera que están incluidas dentro del alcance de la presente divulgación otras configuraciones de hilos. Por ejemplo, se puede usar una capa de estabilizador única. Como alternativa, una segunda capa de HTS (con sus capas de separación y de cubierta, que no se muestran) puede encontrarse entre la segunda capa de estabilizador 253 y el lado inferior del sustrato 254. De forma opcional, el hilo de HTS puede consistir en dos capas de estabilizador colocadas sobre el exterior del hilo de HTS, con dos sustratos (cada uno con una capa de separación, una capa de HTS y una capa de cubierta) separadas por una tercera capa de estabilizador colocada entre las dos capas de sustrato. Se puede usar una capa de soldadura para facilitar cualquiera de las uniones requeridas (excepto posiblemente entre la capa de sustrato 254, la capa de separación 256, la capa de HTS 258 y la capa de cubierta 260):

Haciendo referencia también a la figura 5B, se muestra el hilo de HTS 250', que es una realización alternativa del hilo de HTS 250. El hilo 250' puede incluir una segunda capa de sustrato 280 colocada entre la segunda capa de estabilizador 253 y la tercera capa de estabilizador 282. Colocada entre la capa de estabilizador 253 (y / o la capa de estabilizador 282) y la capa de sustrato 280 puede estar una capa de separación, una capa de HTS (por ejemplo, una capa de itrio - bario - cobre - óxido - YBCO), una capa de cubierta y una capa de soldadura.

#### Capa de estabilizador del hilo de HTS

El hilo de HTS funciona de forma más eficaz y económica como un limitador de corriente de fallo si la capacidad calorífica del hilo de HTS es alta y la resistividad eléctrica del hilo de HTS está a un nivel óptimo. La capa de estabilizador 252 puede ser esencial para lograr estas propiedades. Son ejemplos de aleaciones que pueden estar particularmente bien adaptadas para la capa de estabilizador 252 los bronce de aleación baja (por ejemplo, Cu - Zn), con, por ejemplo, Zn en un intervalo del 3 al 40 % por peso, así como también posiblemente otras aleaciones de bronce basadas en, por ejemplo, el sistema de aleación de Cu - Sn. Las aleaciones con unas resistividades en un intervalo de 0,8 - 15 microhmios cm en el intervalo de temperatura de 77 - 110 K pueden ser óptimas. Aleaciones de bronce particulares pueden incluir, pero sin limitarse a, bronce 210 (Cu al 95 % / Zn al 5 %), bronce 220 (Cu al 90 % / Zn al 10 %), bronce 230 (Cu al 85 % / Zn al 15 %), bronce 240 (Cu al 80 % / Zn al 20 %) y bronce 260 (Cu al 70 % / Zn al 30 %). Otras aleaciones basadas en cobre pueden incluir, por ejemplo, las series Monel (Cu - Ni), las cuales también pueden proporcionar el intervalo de resistividades que se ha descrito en lo que antecede. Las aleaciones Cu - Ni u otras con una transición magnética en el intervalo de 70 - 110 K se pueden usar y pueden tener la ventaja adicional de un pico de calor específico alto en este intervalo de temperatura. No obstante, se debe tener cuidado con estas aleaciones para reducir al mínimo las pérdidas de ca al reducir al mínimo la coercitividad.

Con el objeto de proporcionar la flexibilidad adecuada en el cableado, la capa de estabilizador 252, 253 puede estar en un estado templado suave, por ejemplo, de  $\frac{1}{2}$  o  $\frac{1}{4}$  de dureza. El espesor total típico de las capas de estabilizador 252, 253 de un hilo de HTS determinado puede estar en un intervalo de 100 - 600 micrómetros, más preferentemente en un intervalo de 200 - 500 micrómetros. Si los hilos se vuelven demasiado delgados y rígidos, puede volverse difícil su trenzado en el devanado helicoidal de un cable continuamente flexible. La conductividad térmica de la capa de estabilizador 252, 253 puede ser mayor que 0,1 W / cm K en el intervalo de temperatura de 77 - 110 K para mitigar el sobrecalentamiento de la capa de HTS (por ejemplo, las capas de HTS 102, 104) durante las primeras etapas de un fallo y para proporcionar una recuperación lo bastante rápida. La capa de estabilizador 252, 253 puede aplicarse mediante, por ejemplo, laminación de soldadura o unión adhesiva. Adicionalmente, la capa de estabilizador 252, 253 también pueden aplicarse mediante un procedimiento de revestimiento tal como inmersión, chapado, deposición de vapor, electrodeposición, deposición o pulverización de fase líquida metal-orgánica, así como un metal o material compuesto.

#### Encapsulantes para el hilo de HTS

Se puede proporcionar calor específico adicional añadiendo de forma opcional una capa de "aislante" escasamente conductora depositada o enrollada alrededor del hilo de HTS estabilizado para encapsularlo. Esta capa de aislante escasamente conductora puede denominarse como el encapsulante 264. El encapsulante 264 puede formar una capa impermeable a los líquidos de un coeficiente de transferencia de calor generalmente limitado para retardar la introducción de calor dentro del refrigerante líquido circundante (por ejemplo, nitrógeno líquido), permitiendo de esta manera que la temperatura del hilo de HTS se equilibre térmicamente, es decir, se vuelva más uniforme a través de su sección transversal y de esta manera reduzca al mínimo la aparición de puntos calientes y la formación de burbujas de gas en el refrigerante líquido. La superficie del hilo de HTS también se puede optimizar (por ejemplo, con características superficiales y química superficial) para inhibir el comienzo de la formación de burbujas o la ebullición del refrigerante líquido.

El encapsulante 264 puede ser un polímero (por ejemplo, polietileno, poliéster, polipropileno, epoxi, poli(metacrilato de metilo), poliimidaz, politetrafluoroetileno y poliuretano) que incluye materiales eléctricamente aislantes comunes. El espesor del encapsulante 264 puede seleccionarse para equilibrar la necesidad de enfriar el cable de HTS mediante la transferencia de calor dentro del refrigerante líquido circundante y la necesidad de aumentar al máximo la temperatura del hilo de HTS sin formar burbujas de gas dentro del refrigerante líquido circundante. Un intervalo de espesor general para el encapsulante 264 es de 25 - 300 micrómetros, y un intervalo de espesor deseable para el encapsulante 264 es de 50 - 150 micrómetros.

En una forma preferida, el encapsulante 264 también puede ser un conductor eléctricamente débil, posiblemente a través de la adición de partículas conductoras tales como polvo de metal, de grafito o de carbono, o puede seleccionarse a partir de algunos de los polímeros parcialmente eléctricamente conductores. La resistividad eléctrica neta del encapsulante 264 puede estar en un intervalo de 0,0001 - 100 ohmios cm. A pesar de que puede que esta conductividad eléctrica modesta no reduzca de forma significativa la resistencia de limitación de corriente de fallo del hilo de HTS en su estado resistivo o normal, esta conductividad puede asegurar que los hilos de HTS en el cable de HTS permanezcan a un potencial igual en cada sección transversal y permiten que se comparta la corriente entre los diferentes hilos de HTS en el cable de HTS 150. Mantener un potencial igual es importante en el caso de impulsos progresivos de corriente que, de lo contrario, pueden producir unas diferencias de potencial inducidas de forma inductiva entre los hilos de HTS, conduciendo a una ruptura dieléctrica y al posible daño de los hilos de HTS. De forma opcional, el encapsulante 264 puede ser un metal de alta resistividad o un material semiconductor con una resistencia dentro de este intervalo, o un esmalte, vidrio o material de óxido cristalino, el cual también puede contener materiales que potencian la conductividad eléctrica.

La superficie exterior del encapsulante 264 puede revestirse con un material que disminuye el coeficiente de transferencia de calor entre el encapsulante 264 y el refrigerante líquido circundante (por ejemplo, nitrógeno líquido). Como alternativa, la superficie del encapsulante 264 puede texturizarse para potenciar el coeficiente de transferencia de calor entre el encapsulante 264 y el refrigerante líquido circundante (por ejemplo, nitrógeno líquido). Adicionalmente, la superficie del encapsulante 264 puede revestirse con, por ejemplo, partículas de metal de conductividad superior o fibras de metal salientes de tal modo que inhiben la nucleación mediante la disipación rápida de calor hacia fuera dentro al refrigerante líquido circundante. No obstante, cualquiera de tales tratamientos superficiales también debe evitar disminuir la resistencia dieléctrica en el estado líquido.

El encapsulante 264 puede aplicarse usando varios procedimientos de enrollado / revestimiento, incluyendo, por ejemplo, enfoques de múltiples pasadas que reducen estadísticamente la incidencia de las perforaciones en comparación con los enfoques de única pasada. Como alternativa, el encapsulante 264 puede aplicarse mediante un procedimiento de revestimiento tal como inmersión, extrusión, chapado, deposición de vapor o pulverización.

El encapsulante 264 puede aplicarse mientras que el hilo de HTS se encuentra en tensión axial, de hasta, por ejemplo, unas deformaciones elásticas en el cable de un 0,3 % (por ejemplo, del orden de 100 megapascasles), colocando de esta manera al encapsulante 264 en un estado comprimido al terminar el procedimiento de aplicación, y reduciendo la probabilidad de perforaciones en el encapsulante 264. Por consiguiente, una vez que se ha completado, el encapsulante 264 puede comprimirse en sentido axial, mientras que el hilo de HTS dentro del encapsulante 264 se tensa en sentido axial (en comparación con sus estados iniciales).

Si el encapsulante 264 se aplica usando un procedimiento de enrollado, se puede aplicar un revestimiento de impregnación adicional (por ejemplo, un polímero, una pintura o un barniz, que no se muestran) para penetrar en cualesquiera orificios / aberturas en el encapsulante 264 dentro de las capas enrolladas con un material impermeable, formando de esta manera un encapsulante herméticamente sellado. Como alternativa, un encapsulante enrollado puede hacerse hermético mediante un procedimiento de laminado o compresión (por ejemplo, con prensado isostático) que sella los orificios / aberturas a los que se ha hecho referencia en lo que antecede. Es importante evitar los orificios o aberturas debido a que el criógeno líquido que penetra hacia las capas de estabilizador metálico del hilo puede iniciar la nucleación de formación de burbujas de gas y la ebullición durante un fallo.

Otra clase de encapsulantes o estabilizadores son los materiales que experimentan una transición de fase endotérmica, tal como la transición de fase de estructura de cristal o de fusión. Se prefiere el uso de un material que experimente dicho cambio de fase endotérmico a alguna temperatura por encima de la temperatura operativa del hilo de HTS (pero por debajo de la temperatura admisible máxima del hilo de HTS). Un ejemplo de un cambio de fase endotérmico es la fusión de, por ejemplo, materiales orgánicos o inorgánicos de baja temperatura de fusión, que se pueden añadir: al encapsulante 264 como partículas incrustadas discretas en un material de refuerzo compuesto; tales como geles / pinturas que se pueden aplicar a la superficie / interfases del encapsulante 264; o de forma selectiva a determinadas regiones del encapsulante 264 (por ejemplo, bordes, cortes longitudinales o en las regiones de conductos internos). Los cambios de fase endotérmicos también pueden incluir, por ejemplo, determinados cambios de fases intermetálicos, cambios de fases de ordenación u otras transiciones de fases de segundo orden. Por ejemplo, el material seleccionado para el encapsulante 264 puede fundirse en el intervalo de temperatura de -160 °C hasta -70 °C, con el material en ebullición por encima de aproximadamente -50 °C (con un punto de ebullición preferentemente por encima de la temperatura ambiente), de tal modo que la aplicación del encapsulante 264 se hace de una forma comparativamente fácil y económica en el estado líquido o compuesto (es

decir, como una pintura, un revestimiento de película, una emulsión o un gel).

#### Resumen de los criterios de diseño de hilo y cable

Los criterios de diseño del hilo de HTS que se han descrito en lo que antecede (es decir, con una capa de estabilizador más gruesa, unos valores intermedios de resistividad, y encapsulantes) difieren fundamentalmente de los criterios para los cables de HTS protegidos frente a corrientes de fallo anteriores, los cuales usan un hilo de HTS de primera generación, y un material compuesto de filamentos múltiples con una matriz de plata de alta conductividad ( $< 0,5$  microhmios-cm en el intervalo de temperatura de 77 K). En tales cables de HTS protegidos frente a corrientes de fallo anteriores, el fin fue usar un material de una conductividad tan alta como fuera posible en el hilo de HTS o en la estructura de cable de HTS, incluyendo grandes cantidades de cobre en el cable. El diseño de hilo de HTS para su uso en los cables de FCL también difiere fundamentalmente de los criterios de diseño para los FCL independientes en las barras colectoras SUPERPOLI, en los cuales se usaron materiales de muy alta resistividad y cualquier capa de estabilizador se mantiene tan delgada como sea posible para asegurar una alta resistencia en una corta longitud de módulo. En concreto, para los FCL independientes o las barras colectoras SUPERPOLI, o bien se usan superconductores voluminosos (los cuales pueden tener una resistividad de 100 microhmios-cm en el intervalo de temperatura de 90 - 110 K cuando estos se enfrían a su estado resistivo normal) o bien se usan hilos conductores revestidos, con sustratos de alta resistencia como acero inoxidable. Estos sustratos pueden tener unas resistividades de más de 20 microhmios-cm, y en algunos casos, tan altas como 70 microhmios-cm, en el intervalo de temperatura de 77 K.

#### Funcionamiento en una red eléctrica de servicio público

Haciendo referencia también a la figura 6, se muestra el funcionamiento del cable de HTS de limitación de corriente de fallo 150 dentro del contexto de la red eléctrica de servicio público. En el presente ejemplo particular, se muestra que la red eléctrica de servicio público 300 incluye una barra 302 de 765 kV, una barra 304 de 69 kV y una barra 306 de 34,5 kV. Además, se muestra que la red eléctrica de servicio público 300 incluye tres subestaciones 20, 308, 310 de 138 kV, cada una de las cuales proporciona potencia a la barra 304 de 69 kV a través de tres subestaciones 24, 312, 314 de 69 kV. Las tres subestaciones 316, 318, 320 de 34,5 kV pueden proporcionar potencia desde la barra 304 de 69 kV a la barra 306 de 34,5 kV. El cable de HTS de limitación de corriente de fallo 150 se muestra acoplado entre las subestaciones 20 y 24.

Cuando está presente una corriente de fallo (por ejemplo, la corriente de fallo 124) dentro de la red eléctrica de servicio público 300, las diversas componentes de corriente 322, 324, 326, 328, 330, 332 (es decir, la porción de la corriente de fallo 124 que pasa a través del cable de HTS 150) pueden fluir desde todas las subestaciones interconectadas a través de todas las trayectorias disponibles para alimentar la corriente de fallo 124, la cual puede aparecer como una carga muy grande colocada sobre la red eléctrica de servicio público 300. Cuando se calculan las componentes de corriente que se pueden lograr durante una condición de fallo, la corriente de fallo 124 puede modelarse como un cortocircuito a tierra.

Haciendo referencia también a las figuras 7 y 8, cuando se determina con cuánta corriente de fallo contribuye una subestación particular (por ejemplo, la subestación 20), por ejemplo, la corriente de fallo 124, el voltaje de generación de circuito abierto puede modelarse como la fuente de voltaje ideal 350. Adicionalmente, la impedancia de aguas arriba (es decir, la impedancia observada al mirar aguas arriba desde el cable de HTS 150) puede combinarse con las impedancias de transformador (es decir, de la subestación 20) y representarse como una impedancia de fuente 352. La impedancia en este contexto puede ser una cantidad vectorial compleja que consiste en una componente real y una componente reactiva. Matemáticamente, la impedancia ( $Z$ ) es igual a  $R + jX$ , en la que  $R$  es la componente real (es decir, resistiva) y  $X$  es la componente reactiva (es decir, inductiva / capacitiva). En el presente ejemplo, la componente reactiva es una impedancia inductiva e igual a  $j\omega L$ , en la que  $\omega = 2\pi f$  y  $f$  es la frecuencia del flujo de corriente (por ejemplo, 60 Hz en América del Norte).

El cable de HTS 150 se muestra terminado en la tierra 354 debido a que, tal como se ha analizado en lo que antecede, la corriente de fallo 124 se modela como un cortocircuito a tierra. Se puede usar la Ley de Ohm para determinar el nivel esperado de corriente de fallo (es decir, la componente de corriente 332) provisto por la subestación 20. Usando este enfoque con respecto a las otras subestaciones dentro de la red eléctrica 300, se pueden calcular las contribuciones de corriente de fallo generales (es decir, el valor de, por ejemplo, las corrientes de fallo 322, 324, 326, 328, 330) y puede determinarse la componente de corriente de fallo que se espera que pase a través del cable de HTS 150 (es decir, la componente de corriente 332). Desafortunadamente, la componente de corriente 332 puede estar por encima del nivel que los interruptores de circuito 34, 36 tienen la capacidad de gestionar. Por consiguiente, el cable de HTS 150 puede diseñarse para limitar esta componente de corriente de fallo 332, por lo demás esperada, a un nivel previamente determinado inferior, que los interruptores de circuito 34, 36 tengan la capacidad de gestionar.

Otra aplicación importante del cable de HTS de limitación de corriente de fallo está en las aplicaciones que establecen conexiones de barras dentro de, o de forma más importante, interconexiones entre conexiones de barras en diferentes subestaciones, tal como se muestra mediante las líneas 304 y 306 en la figura 6. Estas interconexiones permiten compartir la potencia entre diferentes subestaciones o diferentes transformadores dentro

de las subestaciones dependiendo de los requisitos de carga de la red eléctrica, a la vez que al mismo tiempo, mantienen el control de las corrientes de fallo que de otra manera podrían desarrollarse al realizar dichas conexiones.

Diseño del cable de HTS de limitación de corriente de fallo

5 Cuando se diseña el cable de HTS 150 de limitación de corriente de fallo, se pueden configurar una o más características de diseño del cable de HTS 150, de tal modo que cualquier aumento de temperatura ( $\Delta T$ ) que ocurre en el interior del cable de HTS 150 durante una corriente de fallo está a un nivel que está por debajo de una subida de temperatura máxima (es decir,  $\Delta T_{m\acute{a}x}$ ), debido a que superar la  $\Delta T_{m\acute{a}x}$  puede dar como resultado la formación de burbujas de nitrógeno gaseoso. Tal como se ha analizado en lo que antecede, la creación de burbujas de nitrógeno gaseoso puede reducir la resistencia dieléctrica de la capa de dieléctrico y puede dar como resultado una ruptura por voltaje y el daño del cable de HTS 150. Al mismo tiempo, el cable de HTS 150 puede diseñarse para ser adecuadamente largo (es decir, por encima de una longitud mínima) para proporcionar una resistencia adecuada para limitar la corriente de fallo cuando el hilo de HTS en el interior del cable de HTS 150 se lleva a su estado normal (es decir, resistivo).

15 Por consiguiente, cuando se diseña el cable de HTS 150, puede hacerse una determinación 400 que se corresponde con la temperatura operativa admisible máxima para, por ejemplo, el cable de HTS 150. Para un cable de HTS enfriado por nitrógeno líquido con una presión de 15 bares (1 bar =  $1.013 \times 10^5$  Pa), la temperatura operativa máxima admisible está cerca de los 110 K (es decir, el punto de ebullición del nitrógeno líquido a 15 bares). Por consiguiente, para el nitrógeno líquido que se subenfía a una temperatura de 72 K, la  $\Delta T_{m\acute{a}x}$  es de 38 K, o para proporcionar un cierto margen de diseño, se elige que la  $\Delta T_{m\acute{a}x}$  esté en 30 K. Estos son unos valores típicos para cables de HTS prácticos, si bien las subidas de presiones y temperatura pueden variar dependiendo de diseños específicos.

25 Tal como se ha analizado en lo que antecede, todos los cables (tanto convencionales como de HTS) atenúan la corriente de fallo hasta un cierto grado determinado debido a que todos los cables tienen impedancias reales y reactivas. No obstante, un cable de HTS protegido frente a corriente de fallo típico con cantidades grandes de cobre tiene una impedancia resistiva muy baja aún cuando el hilo de HTS se enfría a su estado normal. Por consiguiente, la reducción de la corriente de fallo máxima debido a la resistencia del hilo de HTS enfriado es muy pequeña, posiblemente del 1 % o menor, y mucho menos que un nivel mínimo del 10 % para proporcionar una mejora significativa en el funcionamiento de una red eléctrica de servicio público. Adicionalmente, y tal como se ha analizado en lo que antecede, las componentes de impedancia real y (en menor medida) reactiva en los cables de HTS (por ejemplo, el cable de HTS 150) se pueden aumentar en varios ordenes de magnitud cuando la corriente que pasa a través del cable de HTS 150 supera un nivel de corriente crítica (tal como se ha definido en lo que antecede). Por consiguiente, si está diseñado de forma adecuada para excluir el cobre y optimizar la resistencia del hilo con su estabilizador, el cable de HTS 150 puede funcionar como un dispositivo de limitación de corriente de fallo y puede atenuar una corriente de fallo, hasta un nivel por debajo de varias veces la corriente crítica superconductor, proporcionando de esta manera una reducción mayor que el 10 % al máximo nivel de corriente de fallo. En particular, el cable de HTS 150 puede diseñarse para limitar la corriente de fallo a un valor del factor  $f$  (definido en lo que antecede) por la corriente crítica.

40 Todas las demostraciones de cable de HTS de la técnica anterior significativas hasta la fecha han incluido una cantidad significativa de cobre a la temperatura criogénica del superconductor y en la inmediata proximidad del superconductor. Por consiguiente, en el caso de una corriente de fallo que supera el nivel de corriente crítica, la mayor parte de la corriente de fallo se conduce en el cobre, se aumenta la capacidad calorífica del cable de HTS de la técnica anterior, y se limita la subida de temperatura en el interior del cable de HTS de la técnica anterior. A pesar de que esto protege al cable de HTS de la técnica anterior frente al daño, esta estructura reduce muy poco la amplitud de la corriente de falla debido a la gran cantidad de cobre de baja resistencia y de alta conductividad.

45 Con respecto al cable de HTS 150, se usa el cobre de alta conductividad (y / u otros metales de alta conductividad) se retiran y un hilo de HTS (tal como se ha descrito en lo que antecede) que tiene un estabilizador comparativamente grueso (por ejemplo, un espesor total de 100 - 600 micrómetros, o preferentemente de 200 - 500 micrómetros) que tiene una resistividad comparativamente alta (de 0,8 - 15 microohmios-cm, o preferentemente de 1 - 10 microohmios-cm). La longitud del cable de HTS 150 debe ser lo bastante larga (por ejemplo, por lo general mayor que 200 m) de tal modo que la resistencia total del cable de HTS estabilizado enfriado 150 es lo bastante larga para reducir la corriente de fallo máxima a aproximadamente un factor  $f$  por la corriente crítica.

55 El uso de un hilo conductor de HTS revestido 250 (tal como se ha descrito en lo que antecede y se ilustra en la figura 5) es fundamental para la capacidad de lograr este resultado deseado a la vez que, al mismo tiempo, se proporciona un cable de HTS de alta capacidad y flexible 150. La capa de HTS 258 debe ser comparativamente delgada, y debe incluir una capa de estabilizador comparativamente gruesa 252, 253 (es decir, por lo general más gruesa que la capa de HTS 258 y la capa de sustrato 254). Esta capa de HTS 258 debe tener una alta capacidad de transporte de corriente (por ejemplo, mayor que un megaamperio por centímetro cuadrado a una temperatura de 77 K). Una corriente crítica típica por unidad de anchura de hilo  $I_{c,w}$  a la temperatura operativa es de 350 A / cm de anchura, si bien los valores para diferentes hilos de diferentes laboratorios y fabricantes comerciales pueden variar

60

de 100 A / cm de anchura a 1000 A / cm de anchura. Entonces, cuando el hilo de HTS 250 cambia a un estado resistivo, la resistencia del hilo de HTS 250 debe ser comparativamente alta, dando como resultado que casi toda la corriente se transfiera a la capa de estabilizador 252, 253. El hilo de HTS 150 debe ser lo bastante flexible para permitir el devanado helicoidal en el interior del cable de HTS 150. En la práctica, el requisito de flexibilidad puede limitar el espesor total de las capas de estabilizador combinadas 252, 253 a aproximadamente 600 micrómetros.

Para fines ilustrativos, supóngase que la subestación 20 es una subestación trifásica de 13,8 kV. Por consiguiente, el voltaje de línea a tierra provisto por la subestación 20 es de 7,97 kV. Adicionalmente, supóngase que el valor ilimitado de la componente de corriente de fallo 332 es de 40 kA y supóngase una proporción de impedancia de fuente  $X/R$  de 5 (es decir, un valor típico). Por consiguiente, pueden determinarse 402 que los valores de impedancia real ( $R_s$ ) y reactiva ( $X_s$ ) de la impedancia de fuente 352 son  $0,039 + j 0,195 \Omega$ , de la siguiente manera:  $40 \text{ kA} = 7,97 \text{ kV} / (R_s^2 + X_s^2)^{1/2}$  y  $X_s / R_s = 5$ . Para este cálculo y los subsiguientes, el sistema trifásico de un voltaje de línea a línea dado ( $V_{LL}$ ) se modela como un modelo monofásico equivalente usando el voltaje de línea a tierra ( $V_{LG}$ ) en el que  $V_{LL} = V_{LG} * (3)^{1/2}$ .

Para el presente ejemplo, se supone adicionalmente que el cable de HTS 150 es de 1.200 metros de longitud ( $L_{\text{cable}}$ ) y tiene un valor asignado 3.000 A rms o 3000  $A_{\text{rms}}$  (es decir,  $I_{\text{asignada}}$  en Amperios de valor eficaz). Tal como se ha analizado en lo que antecede, el pasaje de refrigerante interior 152 del cable de HTS 150 puede rodearse en sucesión radial por la primera capa de HTS 102 y la segunda capa de HTS 104. Debido a que los hilos de la primera capa de HTS 102 y la segunda capa de HTS 104 se enrollan de forma helicoidal alrededor del pasaje de refrigerante interior 152, la longitud real de los hilos de HTS individuales (por ejemplo, el hilo de HTS 250) incluidos dentro de las capas de HTS 102, 104, son más largos que la longitud del cable de HTS 150. Para el presente ejemplo, se supone un factor de espiral de 1,08, en el que la longitud real de los hilos de HTS es del 8,00 % más larga que la longitud del cable de HTS 150.

Adicionalmente, se supone que, para el presente ejemplo, el cable de HTS 150 está diseñado para pasar a normal a 1,6 veces  $I_{\text{asignada}}$ . Este factor puede denominarse factor de corriente de disparo  $f_{tc}$ . En consecuencia, el cable de HTS 150 puede diseñarse para exhibir características superconductor hasta 4.800  $A_{\text{rms}}$ . La corriente crítica del cable es, entonces, de  $4800 \times 1,414 = 6787 \text{ A}$  en su temperatura operativa.

Se pueden configurar numerosos parámetros de diseño 404 cuando se construye el cable de HTS 150, los ejemplos de los cuales pueden incluir, pero sin limitarse a: anchura de hilo de HTS ( $W$ ); corriente crítica por unidad de anchura ( $I_{c,w}$ ); factor de corriente de disparo  $f_{tc}$  factor  $f$  (véase en lo sucesivo); resistividad de estabilizador o material compuesto ( $\rho$ ); espesor de estabilizador o material compuesto ( $t$ ); calor específico de conductor ( $C$ ); duración de corriente de fallo ( $\tau$ ); recuento de hilos en cada fase ( $N$ ); e inductancia de cable ( $X$ ). La corriente crítica de cable de HTS total puede ser  $I_{c,w} WN$ . Al configurar 404 estos parámetros de diseño, la impedancia del cable de HTS 150 se puede ajustar 406 y/o el cable de HTS 150 puede configurarse para atenuar una corriente de fallo a través del cable de HTS reduciéndola hasta la corriente crítica de cable total por el factor  $f$ , el cual, para las condiciones de red eléctrica típicas es mucho mayor que el 10 % de la corriente de fallo máxima original.

Anchura de hilo de HTS ( $W$ ): Este parámetro de diseño se refiere a la anchura de los hilos de HTS individuales (por ejemplo, el hilo de HTS 250) que se usan dentro de las capas de HTS 102, 104. Para el presente ejemplo, se supone una anchura de hilo de HTS ( $W$ ) de 0,44, como la que está disponible comercialmente de American Superconductor (344 superconductores). Esta anchura se determina principalmente por los requisitos mecánicos del devanado de forma helicoidal de los hilos de HTS alrededor del conformador flexible de un cable de potencia.

**Corriente crítica por unidad de anchura ( $I_{c,w}$ ):** Este parámetro de diseño se refiere al nivel de corriente máximo que se puede lograr por los hilos de HTS individuales por anchura del conductor con forma de cinta en el criterio del campo eléctrico convencional que se ha analizado en lo que antecede. Para el presente ejemplo, se supone una corriente crítica por unidad de anchura ( $I_{c,w}$ ) de 350 Amperios por cm de anchura (es decir, A / cm de anchura) a la temperatura operativa. Este parámetro está determinado en gran medida por las características asignadas requeridas del cable y la necesidad de reducir al mínimo el número ( $N$ ) de hilos de HTS usados para fabricar el cable de HTS.

**Factor de corriente de disparo  $f_{tc}$ .** Tal como se ha analizado en lo que antecede, un requisito de diseño de servicio público típica es  $f_{tc} = 1,6$ .

**Factor  $f$  ( $f$ ).** Este parámetro de diseño, propuesto primero por Kraemer y col. (véase *Switching behavior of YBCO thin film conductors in resistive fault current limiters* de H. P. Kraemer y col., *IEEE Trans on Applied Superconductivity*, vol. 13, N° 2, junio de 2003, páginas 2044 - 2047) se refiere a la proporción entre la corriente cuando las capas de HTS 102, 104 pasan a completamente normales o resistivas y la corriente crítica. Tal como se ha analizado en lo que antecede y en el presente ejemplo, el cable de HTS 150 pasa a normal a 4.800  $A_{\text{rms}}$  (o un pico de aproximadamente 6.790 A). Multiplicando este valor de pico (es decir, 6.790 A) por el factor  $f$ , se puede determinar el valor al cual el cable de HTS 150 es completamente normal (es decir, no superconductor). Una primera determinación realizada para las películas delgadas de YBCO por Siemens (Véase *Switching behavior of YBCO thin film conductors in resistive fault current limiters* de H. P. Kraemer y col., *IEEE Trans on Applied Superconductivity*, Vol. 13, N° 2, junio de 2003, páginas 2044 - 2047) produjo un valor de factor  $f$  de aproximadamente 2. Se espera que

este factor  $f$  esté en el mismo intervalo para los hilos conductores revestidos con YBCO (por ejemplo, un intervalo de 1 a 4). Para este ejemplo y los subsiguientes, se supone un factor  $f$  de 2, siguiendo el resultado de Siemens. Por consiguiente y para el ejemplo que se ha descrito en lo que antecede, se estima que el cable de HTS 150 será completamente normal (es decir, no superconductor) a aproximadamente 6.790 Amperios por 2 (es decir, el factor  $f$ ) o 13.580 Amperios. Por consiguiente, con un cable configurado de forma adecuada 408 (véase en lo sucesivo), una corriente de fallo de 40.000  $A_{rms}$  (56.600  $A_{pico}$ ) puede limitarse a 13.580  $A_{pico}$ . Esto representa una reducción de la corriente de fallo en un 76 %, significativamente más grande que el nivel mínimo del 10 % necesario para una mejora operativa útil de una red eléctrica eléctrica.

**Resistividad ( $\rho$ ):** Este parámetro de diseño (el cual también puede conocerse como resistencia eléctrica específica) es una medida de cómo de fuertemente se opone un material al flujo de la corriente eléctrica. Por lo general, la resistividad ( $\rho$ ) es una función de la temperatura y puede expresarse como  $\rho_{xx}$ , en la que "xx" define la temperatura para la cual se calculó la resistividad. Para el presente ejemplo, se supone una resistividad ( $\rho_{90}$ ) de 4,0 microhmios-cm a una temperatura de 90 K, y por simplicidad, se supone en las estimaciones en lo sucesivo que la dependencia con la temperatura en el intervalo desde 70 hasta 110 K puede ignorarse. Una resistividad de este tipo puede encontrarse en, por ejemplo, el bronce. Puede hacerse que la concentración de cinc varíe para controlar la resistividad, con unas resistividades mayores en las aleaciones con más cinc. Muchas otras aleaciones pueden mostrar unas variaciones de resistividad similares con la composición de la aleación; por lo tanto existen múltiples opciones para el material estabilizador.

**Espesor de estabilizador ( $t$ ):** Este parámetro de diseño se refiere al espesor de la capa de estabilizador 252 incluida en el interior del hilo de HTS 250. Para el presente ejemplo, se supone que el espesor total del estabilizador ( $t$ ) es de aproximadamente 350 micrómetros. Para ser más precisos, el hilo de HTS, que comprende una capa de sustrato, una capa superconductor, una capa de cubierta, una capa de soldadura, una capa de estabilizador y un encapsulante, puede ser un material compuesto de múltiples capas y puede estar caracterizado por la resistividad de material compuesto neta y el espesor del hilo de HTS. Debido a que la capa de estabilizador es la porción dominante del hilo, la resistividad del material compuesto de múltiples capas puede estar cerca de la resistividad de la capa de estabilizador. No obstante, por simplicidad en las estimaciones en lo sucesivo, se supone que, en su estado enfriado, la corriente fluye principalmente en la capa de estabilizador. Refinamientos adicionales de este tipo pueden ser evidentes para los expertos en la materia.

**Calor específico por volumen ( $C$ ):** Este parámetro de diseño se refiere al calor específico por volumen del hilo de HTS de material compuesto, que incluye la capa de sustrato, la capa de HTS, la capa de cubierta, la capa de soldadura y la capa de estabilizador. Para los materiales típicos usados en el hilo de HTS,  $C$  está cerca de 2 julios /  $cm^3 K$  para una temperatura de aproximadamente 77 K. Por simplicidad, se supone este valor a través de todo el intervalo de temperatura de 70 - 110 K, aun cuando  $C$  puede variar en un 10 - 20 % en este intervalo para determinados materiales. Si el hilo de HTS incluye un encapsulante escasamente conductor, el encapsulante puede incrementar el calor específico del hilo después de varios segundos, cuando la difusión de calor puede equilibrar térmicamente el hilo, llevándolo a una temperatura constante. Como una aproximación simple para el cálculo de subida de temperatura en lo sucesivo, se puede aproximar el efecto del encapsulante suponiendo que el calor específico del material compuesto se aumenta por un factor  $1 + (C_i t_i / C_t)$ , en el que el subíndice  $i$  se refiere al encapsulante. En la mayoría de los casos, la capacidad calorífica del encapsulante en el intervalo de temperatura de 77 K también es de aproximadamente 2 julios /  $cm^3 K$ , y por lo tanto, para un encapsulante tan delgado como el hilo de material compuesto, este factor es de 2.

**Duración de corriente de fallo ( $\tau$ ):** Este parámetro de diseño se refiere al tiempo antes de que el conjunto de interruptor rápido 202 o los interruptores de circuito 34, 36 desconecten el cable de HTS 150 de la porción de la red eléctrica 10'. Es deseable hacer que este tiempo sea tan corto como sea posible para reducir al mínimo la energía depositada en forma de calor en el cable y, de esta manera, reducir al mínimo la subida del calor. Los interruptores más rápidos actualmente disponibles comercialmente, junto con su sistema de circuitos de detección, se abren en cuatro ciclos (es decir, 67 ms). Por lo tanto, se considera que la duración de corriente de fallo es de 67 ms. Si, en el futuro se cuenta con interruptores aún más rápidos, será deseable usar estos.

**Recuento de hilos ( $N$ ):** Este parámetro se refiere al número total de hilos incluidos dentro del conductor de fase de cada fase del cable de HTS. Por lo general, estos están dispuestos en dos capas de HTS (por ejemplo, las capas de HTS 102, 104) y se devanan de forma helicoidal con las dos capas teniendo un sentido de devanado (es decir, helicidad) opuesto. Para un cable con un valor asignado de 3.000  $A_{rms}$  con una corriente crítica por anchura de 350 A / cm de anchura a la temperatura operativa, un factor de corriente pasante de 1,6 y una anchura de hilo de 0,44 cm; el recuento de conductores requerido  $N$  es de 44.

**Reactancia ( $X$ ):** Este parámetro de diseño se refiere a la inductancia por unidad de longitud, determinada por la cantidad de flujo magnético producido para una corriente eléctrica determinada por unidad de longitud. Para el presente ejemplo, se supone una inductancia ( $X$ ) de 0,017 mH / km, la cual es característica del cable Triax que se describe en lo sucesivo en su estado superconductor.

Debido a que la subestación 20 (en el presente ejemplo) es una subestación trifásica de 13,8 kV, el cable de HTS 150 puede ser un cable Triax (por ejemplo, la disposición de cable de HTS Triax propuesta por Ultera, (la cual es un



proyecto conjunto de Southwire Company de Carrollton, GA y NKT Cables de Colonia, Alemania). Cada una de las fases consiste en dos capas de devanados helicoidales, y todas están configuradas en sentido coaxial y separadas por material dieléctrico. Será necesario que se retiren los trenzados de cobre en los presentes cables Triax de Ultera y será necesario que se usen los hilos que se han descrito en lo que antecede para modificar el cable Triax para dar un cable de FCL.

La componente resistiva de impedancia (Z) del cable de HTS 150 en su estado enfriado  $R_{hts \text{ (enfriado)}}$ , que se muestra en la figura 7, puede calcularse de la siguiente manera con los parámetros provistos en lo que antecede.

$$R_{hts \text{ (enfriado)}} = \frac{(\rho_{90})(L)}{(t)(W)(N)}$$

$$R_{hts \text{ (enfriado)}} = \frac{(4,0 \mu\Omega \text{ cm})(1,08 \times 120.000 \text{ cm})}{((0,0350 \text{ cm})(0,44 \text{ cm})(44))}$$

$$R_{hts \text{ (enfriado)}} = 0,765 \Omega$$

La impedancia inductiva del cable es despreciable en comparación con esta impedancia resistiva relativamente grande. Dado un valor de especificaciones técnicas de 0,017 mH / km para un cable típico, se puede calcular una inductancia equivalente  $L_{hts}$  como 0,017 mH / km \* 1,2 km = 0,0204 mH. La impedancia reactiva  $X = j\omega L$ , en la que  $\omega = 2\pi f$  y  $f$  es la frecuencia del flujo de corriente (por ejemplo, 60 Hz en América del norte) lo cual da como resultado en  $X_{hts} = 0,00769 \Omega$ , el cual es 100 veces menor que  $R_{hts \text{ (enfriado)}}$ .

Usando la Ley de Ohm y el circuito equivalente que se ilustra en la figura 7, con la impedancia de fuente  $0,039 + j 0,195 \Omega$  tal como se ha provisto en lo que antecede, puede calcularse que la caída de voltaje ( $V_{cable}$ ) a través de una fase del cable de HTS 150 usando las leyes de Kirchhoff convencionales es de 7.348  $V_{rms}$ . La correspondiente corriente de rms ( $I_{cable}$ ) 356 que pasa a través del cable de HTS 150 es  $V_{rms} / R_{hts \text{ (enfriado)}} = 9.604 A_{rms}$ , la cual se corresponde con una corriente pico de  $9604 \times 1,414$  o 13.580 A. Por consiguiente, la componente de corriente 332 se redujo de 40.000  $A_{rms}$  a 9.604  $A_{rms}$  (es decir, una reducción del 76,0 %).

Tal como se ha analizado en lo que antecede, la subida de temperatura ( $\Delta T$ ) que ocurre en el interior del cable de HTS 150 durante una corriente de fallo debe mantenerse a un nivel que esté por debajo de una subida de temperatura máxima (es decir,  $\Delta T_{m\acute{a}x}$ ), debido a que superar la  $\Delta T_{m\acute{a}x}$  puede dar como resultado la formación de burbujas de nitrógeno gaseoso.

Cuando se determina la temperatura operativa real del cable de HTS 150, la subida de temperatura ( $\Delta T$ ) lograda por el cable de HTS 150 puede determinarse a partir de un cálculo adiabático simple, igualando el calor generado  $\rho_{90} J^2 \tau$ , (en la que la densidad de corriente rms  $J$  en el hilo superconductor enfriado es  $I_{cable} / WNt = f I_{c,w} / \sqrt{2} t$ ) con el calor absorbido  $C \Delta T$ . A partir de esta relación, se puede calcular la  $\Delta T$  de la siguiente manera, usando los parámetros provistos en lo que antecede:

$$\Delta T = \frac{(\rho_{90})(I_{cable}^2)(\tau)}{((W)(N)(t))^2(C)}$$

$$\Delta T = \frac{(0.000004\Omega\text{cm})(9604 \text{ A})^2(0,067 \text{ s})}{((0,44\text{cm})(44)(0,035\text{cm}))^2 (2 \text{ Julios} / \text{cm}^3 \text{K})}$$

$$\Delta T = 26,9 \text{ K}$$

Por consiguiente, debido a que la subida de temperatura ( $\Delta T$ ) lograda por el cable de HTS 150 es menor que la subida de temperatura admisible máxima ( $\Delta T_{m\acute{a}x}$ ), no se formarán burbujas de nitrógeno gaseoso, la resistencia dieléctrica de la capa de dieléctrico no se reducirá, y el cable de HTS 150 no presentará riesgo de ruptura dieléctrica que conduzca a un daño permanente para el cable. En concreto, para un cable de HTS con una presión de 15 bares, el punto de ebullición del nitrógeno líquido es de 110 K. Por consiguiente, para un cable que opera con nitrógeno líquido que está subenfriado a 72 K, una subida de temperatura ( $\Delta T$ ) de 26,9 K da como resultado una temperatura operativa real de 98,9 K, la cual es una temperatura operativa segura en comparación 412 con el punto de ebullición de 110 K del nitrógeno líquido.

Al examinar la ecuación anterior, se vuelve evidente que el aumento en los valores en el denominador reduce la subida de la temperatura ( $\Delta T$ ), mientras que el aumento de los valores en el numerador, aumenta la subida de temperatura ( $\Delta T$ ). Por consiguiente, un aumento en la duración de corriente de fallo ( $\tau$ ) y / o la resistividad ( $\rho_{90}$ ) puede dar como resultado un aumento en la subida de temperatura ( $\Delta T$ ). A la inversa, un aumento en el espesor de estabilizador ( $t$ ) o el calor específico ( $C$ ) puede dar como resultado una disminución en la subida de temperatura ( $\Delta T$ ). La anchura de hilo  $W$  y el número de hilos  $N$  ya están determinados por los requisitos prácticos del trenzado de cables y las características asignadas del cable, junto con la corriente crítica por anchura del cable.

Al mismo tiempo, la longitud del hilo de HTS en el cable debe ser lo bastante larga para lograr la resistencia requerida. Debido a que a) la corriente de limitación máxima es el factor  $f$  por la corriente crítica del hilo por anchura  $I_{c,w}$  por la anchura total de todos los cables  $WN$ , y b) la resistencia es  $\rho L / WNt$ ; la longitud mínima del hilo en el cable de HTS 150 es de:

$$L_{\min} = (V_{\text{pico}}(t) / (f)(I_{c,w})(\rho)) \quad \text{[Ecuación 1]}$$

Con los valores anteriores,

$$L_{\min} = (1,414 \times 7348 \text{ V})(0,035 \text{ cm}) / (2)(350 \text{ A / cm})(0,000004 \text{ } \Omega \text{ cm}).$$

$$L_{\min} = 1.350 \text{ m}$$

Teniendo en cuenta el factor de espiral de 1,08, esta longitud se corresponde con la longitud de cable de 1200 m, supuesta originalmente. Se debe observar que, para unas longitudes más largas, la subida de temperatura máxima ( $\Delta T$ ) en cualquier parte en el cable permanecerá al nivel calculado en lo que antecede siempre que la corriente esté limitada a  $f I_{c,w} WN$ . En el presente caso, solo las porciones del hilo de HTS se enfriarán, de la forma que se muestra por Siemens (véase *Switching behavior of YBCO thin film conductors in resistive fault current limiters* de H. P. Kraemer y col., *IEEE Trans on Applied Superconductivity*, vol. 13, Nº 2, junio de 2003, página 2044 - 2047), y la corriente limitada permanece al nivel  $f I_{c,w} WN$ . No obstante, para longitudes más cortas, la resistencia de los hilos de HTS en el estado enfriado disminuirá y la corriente se aumentará para un voltaje determinado de acuerdo con  $I = V / R_{\text{hts, enfriado}}$ . Esto puede conducir a un mayor calentamiento y subida de temperatura aumentada de acuerdo con la ecuación para  $\Delta T$  provista en lo que antecede. Por consiguiente, la longitud del cable debe ser mayor que la calculada en lo que antecede (es decir, 1.300 metros).

Se debe observar que la subida de temperatura también puede calcularse de la siguiente forma:

$$\Delta T = \rho (f I_{c,w} / t)^2 \tau / 2C \quad \text{[Ecuación 2]}$$

A partir de estas últimas dos ecuaciones, denominadas como Ecuaciones 1 y 2, se puede observar que, si se desea disminuir la mínima longitud de hilo y de cable aumentando la resistividad  $\rho$  o la densidad de corriente crítica  $I_{c,w}$  o disminuyendo el espesor de estabilizador  $t$ , se aumentará la subida de temperatura  $\Delta T$ . Como alternativa, un aumento en la capacidad calorífica a través del uso de un encapsulante puede disminuir la subida de temperatura. Por ejemplo, duplicar la capacidad calorífica puede permitir la misma subida de temperatura con el doble de resistividad, y esto puede reducir la longitud del cable mínima en un factor de dos. Se debe observar que estas ecuaciones no dependen de la anchura de hilo  $W$  o el número de hilos  $N$  excepto hasta donde se determina por las características asignadas operativas del cable y la corriente crítica por anchura  $I_{c,w}$  o el hilo de HTS.

La conclusión de este análisis de diseño de cable es que, para aplicaciones en las cuales toda la corriente de fallo fluye a través del cable de HTS 150, la longitud mínima para un cable de HTS de FCL está en un intervalo de un kilómetro para los sistemas de distribución de clase 13,8 kV. Esto se puede reducir adicionalmente a través de, por ejemplo, el uso de una capacidad calorífica más alta tal como se ha descrito en lo que antecede. Las longitudes mínimas para otros voltajes y parámetros se pueden calcular por los expertos en la materia a partir de las ecuaciones provistas o a partir de un análisis más completo, teniendo en cuenta las dependencias con la temperatura de todos los parámetros.

No obstante, si se proporciona una impedancia paralela directamente a través del cable 150 (por ejemplo, desde el interruptor 34 hasta el interruptor 36 en la figura 4), el voltaje en el cable 150 puede reducirse de forma significativa. Por ejemplo, se considera que una impedancia de fuente es de  $0,2 \text{ } \Omega$  (inductiva) en un sistema de 13,8 kV, lo que se corresponde con una corriente de fallo monofásica de  $40 \text{ kA}_{\text{rms}}$  en una red eléctrica de 13,8  $\text{kV}_{\text{rms}}$  con un voltaje monofásico de  $8 \text{ kV}_{\text{rms}}$ . Una impedancia inductiva convencional de  $0,046 \text{ } \Omega$  en paralelo con el cable de HTS 150 puede reducir el voltaje en el cable 150 a  $1500 \text{ V}_{\text{rms}}$  y proporcionar una corriente de fallo de  $32,5 \text{ kA}$ . Con este voltaje reducido y los parámetros anteriores (incluyendo un aumento por un factor de dos en la capacidad calorífica usando el encapsulante 264, figura 5), la fórmula de longitud crítica conduce a una longitud de cable mínima de aproximadamente 100 m. Por lo tanto, los cables de FCL pueden diseñarse para redes eléctricas de 13,8 kV con unas longitudes tan cortas como de 100 m, siempre que se puedan usar impedancias paralelas.

Para cables de longitud más larga, la resistividad puede disminuirse, y disminuirse la subida de temperatura de forma correspondiente. Esto puede tener la ventaja de reducir el tiempo de recuperación para que el cable regrese a su temperatura operativa original. Por ejemplo, para un cable de 4,8 km de largo, la resistividad en el ejemplo

anterior puede reducirse a 1 microohmio-cm, y la subida de temperatura puede reducirse de 26,9 K (sin encapsulante 264, figura 5) a 6,7 K.

5 En el futuro, pueden estar disponibles unos conjuntos de interruptor más rápidos. En el presente caso, la duración de fallo  $\tau$  puede disminuirse y puede permitirse una resistividad más grande. Por ejemplo, con una duración de fallo de 27 ms, la resistividad puede aumentarse a 10 microohmios-cm, y la longitud mínima del cable puede disminuirse (sin encapsulante) por un factor de 2,5 (10 microohmios-cm dividido entre 4 microohmios-cm).

10 Por consiguiente, el concepto de un cable de FCL que se divulga en el presente caso puede practicarse con unas resistividades que varían de 1 a 10 microohmios, y con algún ajuste adicional en los parámetros considerados en lo que antecede, este intervalo podría extenderse a de 0,8 a 15 microohmios-cm. No obstante, la baja resistividad a 77 K del cobre (0,2 microohmios-cm) o la alta resistividad del acero inoxidable (50 microohmios-cm) están fuera del intervalo para el cable de FCL de larga longitud continuamente flexible práctico.

15 Son posibles unas variaciones correspondientes en los parámetros del espesor de estabilizador  $t$  e  $I_{c,w}$ , a pesar de que, en ambos casos, estos pueden estar limitados por los requisitos del cableado (es decir, el estabilizador no puede hacerse demasiado delgado para evitar hacer el hilo de HTS demasiado rígido para el cable) y por la necesidad de cumplir con las características asignadas de corriente de servicio público.

20 Para voltajes del nivel de transmisión tales como 138 kV, una longitud mínima puede estimarse incluyendo un encapsulante que aumente la capacidad calorífica por un factor de 2 y un aumento en la resistividad de 4 a 8 microohmios cm. De acuerdo con la fórmula de longitud (que se ha descrito en lo que antecede), el aumento de diez veces en el voltaje en comparación con los sistemas de distribución de clase 13,8 kV, en conjunción con el aumento de dos veces en la resistividad, comporta una longitud mínima de  $(10 / 2) \times 1,2$  km o de 6 km. Para los cables de nivel de transmisión, tales longitudes son comunes, mostrando que, en el presente caso, también es posible el diseño del cable de FCL.

25 Otra realización de la presente divulgación es un cable de HTS que incluye más de un tipo de hilo de HTS, por ejemplo, hilo basado en el material de HTS BSCCO (bismuto - estroncio - calcio - cobre - óxido) e hilo basado en el material de HTS YBCO (tierras raras o itrio - bario - cobre - óxido). Diferentes materiales superconductores pueden tener diferentes características de transición del estado superconductor al normal. Por ejemplo, el YBCO tiene una transición mucho más abrupta que el BSCCO, lo que lo hace más eficaz en una aplicación de FCL, aún cuando ambos materiales se han usado en el pasado (por ejemplo, en el programa SUPERPOLI) para demostrar las características de FCL. En la presente realización, un cable de HTS fabricado a partir de hilos de BSCCO puede diseñarse y operarse para actuar como un cable de limitación de corriente de fallo mediante la adición de una sección adecuadamente larga de un cable superconductor fabricado a partir de hilo conductor cubierto por YBCO. Esto se puede lograr mediante empalme en la sección de YBCO del cable diseñado para el funcionamiento de FCL. En condiciones operativas normales, ambas secciones son superconductoras.

35 Se ha descrito un número de implementaciones. No obstante, se comprenderá que se pueden realizar diversas modificaciones. Por consiguiente, otras implementaciones están dentro del alcance de las siguientes reivindicaciones.

**REIVINDICACIONES**

1. Un hilo de HTS enfriado de forma criogénica, que comprende:
  - un estabilizador que tiene un espesor total en un intervalo de 200 - 600 micrómetros y una resistividad en un intervalo de 0,8 - 15,0 microohmios cm a aproximadamente 90 K; y
  - una primera capa de HTS térmicamente acoplada a por lo menos una porción del estabilizador.
2. El hilo de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 1, en el que el estabilizador incluye:
  - una primera capa de estabilizador y una segunda capa de estabilizador;
  - en el que la primera capa de estabilizador es colocada próxima a un primer lado de la primera capa de HTS y la segunda capa de estabilizador es colocada próxima a un segundo lado de la primera capa de HTS.
3. El hilo de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 1, que además comprende:
  - una segunda capa de HTS térmicamente acoplada a por lo menos una porción del estabilizador;
  - en el que el estabilizador es colocado entre la primera y la segunda capas de HTS.
4. El hilo de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 1, que además comprende:
  - una segunda capa de HTS térmicamente acoplada a por lo menos una porción del estabilizador,
  - en el que el estabilizador incluye:
    - una primera capa de estabilizador, una segunda capa de estabilizador y una tercera capa de estabilizador;
    - en el que la primera capa de estabilizador es colocada próxima a un primer lado de la primera capa de HTS, la segunda capa de estabilizador es colocada próxima a un segundo lado de la primera capa de HTS y un primer lado de la segunda capa de HTS, y la tercera capa de estabilizador es colocada próxima a un segundo lado de la segunda capa de HTS.
5. El hilo de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 1, en el que la primera capa de HTS tiene un espesor de menos de 5 micrómetros.
6. El hilo de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 1, en el que la resistividad del estabilizador presenta un intervalo de 1,0 - 10,0 microohmios a aproximadamente 90 K.
7. El hilo de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 1, en el que la primera capa de HTS está construida de un material elegido de entre el grupo que consiste en: itrio o tierras raras - bario - cobre - óxido; talio - bario - calcio - cobre - óxido; bismuto - estroncio - calcio - cobre - óxido; mercurio - bario - calcio - cobre - óxido; y diboruro de magnesio.
8. El hilo de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 1, en el que el estabilizador está construido, por lo menos en parte, de un material de bronce.
9. El hilo de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 8, en el que el material de bronce es elegido de entre el grupo que consiste en: bronce 210 (Cu al 95 % / Zn al 5 %), bronce 220 (Cu al 90 % / Zn al 10 %), bronce 230 (Cu al 85 % / Zn al 15 %), bronce 240 (Cu al 80 % / Zn al 20 %) y bronce 260 (Cu al 70 % / Zn al 30 %).
10. El hilo de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 1, que además comprende:
  - una capa de sustrato colocada próxima a la primera capa de HTS.
11. El hilo de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 1, en el que la capa de sustrato está construida de un material elegido de entre el grupo que consiste en: níquel - tungsteno, acero inoxidable y Hastelloy™.
12. El hilo de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 1, que además comprende:
  - un encapsulante para encapsular por lo menos una porción del hilo de HTS enfriado por criógeno.
13. El hilo de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 12, en el que el encapsulante es una capa de aislante escasamente conductora.
14. El hilo de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 12, en el que el encapsulante está construido de un material elegido de entre el grupo que consiste en: polietileno; poliéster; polipropileno; epoxi; poli(metacrilato de metilo); poliimidás; politetrafluoroetileno y poliuretano.
15. El hilo de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 12, en el que el encapsulante está configurado para tener una resistividad eléctrica neta en el intervalo de 0,0001 - 100 ohmios cm.

16. El hilo de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 12, en el que el encapsulante incluye por lo menos una porción que experimenta un cambio de fase endotérmico en el intervalo de temperatura de 72 - 110 K.
17. El hilo de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 12, en el que el encapsulante es aplicado al hilo de HTS mediante uno de: un procedimiento de enrollado, un procedimiento de extrusión, un procedimiento de inmersión, un procedimiento de chapado, un procedimiento de deposición de vapor y un procedimiento de pulverización.
18. El hilo de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 12, en el que el encapsulante es aplicado al hilo de HTS mediante un procedimiento de múltiples pasadas.
19. El hilo de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 12, en el que el encapsulante tiene un espesor de 25 - 300  $\mu\text{m}$ .
20. El hilo de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 12, en el que el encapsulante tiene una superficie que potencia la transferencia de calor desde el encapsulante a un refrigerante líquido criogénico circundante.
21. Un cable de HTS enfriado de forma criogénica, configurado para ser incluido dentro de una red eléctrica de servicio público que reduce una corriente de fallo máxima en por lo menos el 10 %, comprendiendo el cable de HTS enfriado de forma criogénica:
- una estructura de soporte de devanado continuamente flexible; y
  - una o más capas conductoras de material superconductor, colocadas en sentido coaxial con respecto a la estructura de soporte de devanado flexible, en el que por lo menos una de las una o más capas conductoras incluye:
    - un hilo de HTS que incluye:
      - un estabilizador que tiene un espesor total en un intervalo de 100 - 600 micrómetros y una resistividad en un intervalo de 0,8 - 15,0 microhmios cm a aproximadamente 90 K; y
      - una primera capa de HTS térmicamente acoplada a por lo menos una porción del estabilizador.
22. El cable de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 21, en el que el estabilizador incluye:
- una primera capa de estabilizador y una segunda capa de estabilizador;
  - en el que la primera capa de estabilizador está colocada próxima a un primer lado de la primera capa de HTS y la segunda capa de estabilizador está colocada próxima a un segundo lado de la primera capa de HTS.
23. El cable de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 21, en el que el hilo de HTS incluye:
- una segunda capa de HTS térmicamente acoplada a por lo menos una porción del estabilizador.
24. El cable de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 21, en el que la primera capa de HTS tiene un espesor de menos de 5 micrómetros.
25. El cable de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 21, en el que el espesor total del estabilizador presenta un intervalo de 200 - 500 micrómetros.
26. El cable de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 21, en el que la resistividad del estabilizador presenta un intervalo de 1,0 - 10,0 microhmios cm a aproximadamente 90 K.
27. El cable de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 21, en el que la primera capa de HTS está construida de un material elegido de entre el grupo que consiste en itrio o tierras raras - bario - cobre - óxido; talio - bario - calcio - cobre - óxido; bismuto - estroncio - calcio - cobre - óxido; mercurio - bario - calcio - cobre - óxido; y diboruro de magnesio.
28. El cable de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 21, en el que el estabilizador está construido, por lo menos en parte, de un material de bronce.
29. El cable de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 21, en el que el material de bronce se elige de entre el grupo que consiste en: bronce 210 (Cu al 95 % / Zn al 5 %), bronce 220 (Cu al 90 % / Zn al 10 %), bronce 230 (Cu al 85 % / Zn al 15 %), bronce 240 (Cu al 80 % / Zn al 20 %) y bronce 260 (Cu al 70 % / Zn al 30 %).
30. El cable de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 21, en el que el hilo de HTS incluye:
- una capa de sustrato colocada próxima a la primera capa de HTS.
31. El cable de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 21, en el que la capa de sustrato está construida de un material elegido de entre el grupo que consiste en: níquel - tungsteno, acero inoxidable y

Hastelloy™.

32. El cable de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 21, en el que el hilo de HTS incluye:  
un encapsulante para encapsular por lo menos una porción del hilo de HTS.
- 5 33. El cable de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 32, en el que el encapsulante es una capa de aislante escasamente conductora.
34. El cable de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 32, en el que el encapsulante está construido de un material elegido de entre el grupo que consiste en: polietileno; poliéster; polipropileno; epoxi; poli(metacrilato de metilo); poliimidaz; politetrafluoroetileno y poliuretano.
- 10 35. El cable de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 32, en el que el encapsulante está configurado para tener una resistividad eléctrica neta en el intervalo de 0,0001 - 100 ohmios cm.
36. El cable de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 31, en el que el encapsulante incluye por lo menos una porción que experimenta un cambio de fase endotérmico en el intervalo de temperatura de 72 - 110 K.
37. El cable de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 31, en el que el encapsulante tiene un espesor de 25 - 300 micrómetros.
- 15 38. El cable de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 32, en el que la estructura de soporte de devanado flexible incluye un núcleo axial hueco.
39. El cable de HTS enfriado de forma criogénica de la reivindicación 32, en el que la estructura de soporte de devanado flexible incluye un tubo de acero inoxidable corrugado.
- 20 40. Un sistema de cable eléctrico superconductor configurado para ser incluido dentro de una red eléctrica de servicio público que reduce una corriente de fallo máxima en por lo menos el 10 %, comprendiendo el sistema de cable eléctrico superconductor:  
una fuente de voltaje; y  
un cable de HTS enfriado de forma criogénica acoplado a la fuente de voltaje, incluyendo el cable de HTS enfriado de forma criogénica:
- 25 una estructura de soporte de devanado flexible, y  
una o más capas conductoras de material superconductor, colocadas en sentido coaxial con respecto a la estructura de soporte de devanado flexible, en el que por lo menos una de las una o más capas conductoras incluye:  
un hilo de HTS que incluye:
- 30 un estabilizador que tiene un espesor total en un intervalo de 200 - 600 micrómetros y una resistividad en un intervalo de 0,8 - 15,0 microohmios cm a aproximadamente 90 K; y  
una primera capa de HTS térmicamente acoplada a por lo menos una porción del estabilizador.
41. El sistema de cable eléctrico superconductor de la reivindicación 40, en el que la estructura de soporte de devanado flexible incluye un núcleo axial hueco.
- 35 42. El sistema de cable eléctrico superconductor de la reivindicación 40, en el que la estructura de soporte de devanado flexible incluye un tubo de acero inoxidable corrugado.
43. El sistema de cable eléctrico superconductor de la reivindicación 40, en el que la fuente de voltaje incluye una subestación.
44. El sistema de cable eléctrico superconductor de la reivindicación 40, que además comprende:
- 40 uno o más conjuntos de interruptor rápido acoplados en paralelo con el cable de HTS enfriado de forma criogénica.
45. El sistema de cable eléctrico superconductor de la reivindicación 40, en el que el estabilizador incluye:  
una primera capa de estabilizador y una segunda capa de estabilizador;  
en el que la primera capa de estabilizador está colocada próxima a un primer lado de la primera capa de HTS y  
45 la segunda capa de estabilizador está colocada próxima a un segundo lado de la primera capa de HTS.
46. El sistema de cable eléctrico superconductor de la reivindicación 40, en el que la resistividad del estabilizador presenta un intervalo de 1,0 - 10,0 microohmios cm a aproximadamente 90 K.

47. El sistema de cable eléctrico superconductor de la reivindicación 40, en el que el estabilizador está construido, por lo menos en parte, de un material de bronce.

5 48. El sistema de cable eléctrico superconductor de la reivindicación 47, en el que el material de bronce se elige de entre el grupo que consiste en: bronce 210 (Cu al 95 % / Zn al 5 %), bronce 220 (Cu al 90 % / Zn al 10 %), bronce 230 (Cu al 85 % / Zn al 15 %), bronce 240 (Cu al 80 % / Zn al 20 %) y bronce 260 (Cu al 70 % f Zn al 30 %).

49. El sistema de cable eléctrico superconductor de la reivindicación 40, en el que el hilo de HTS incluye:

un encapsulante para encapsular por lo menos una porción del hilo de HTS.

50. El sistema de cable eléctrico superconductor de la reivindicación 49, en el que el encapsulante es una capa de aislante escasamente conductora.

10 51. El sistema de cable eléctrico superconductor de la reivindicación 49, en el que el encapsulante está construido de un material elegido de entre el grupo que consiste en: polietileno; poliéster; polipropileno; epoxi; poli(metacrilato de metilo); poliimidias; politetrafluoroetileno y poliuretano.

52. El sistema de cable eléctrico superconductor de la reivindicación 49, en el que el encapsulante está configurado para tener una resistividad eléctrica neta en un intervalo de 0,0001 - 100 ohmios cm.

15

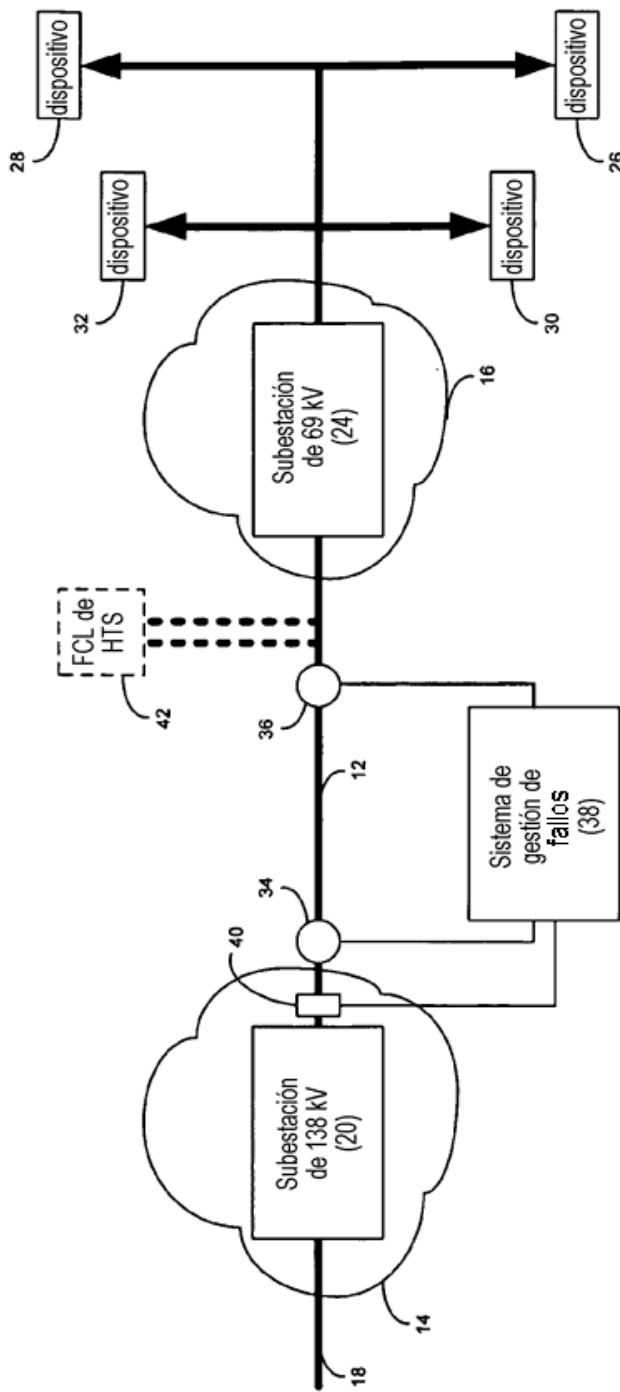


FIG. 1



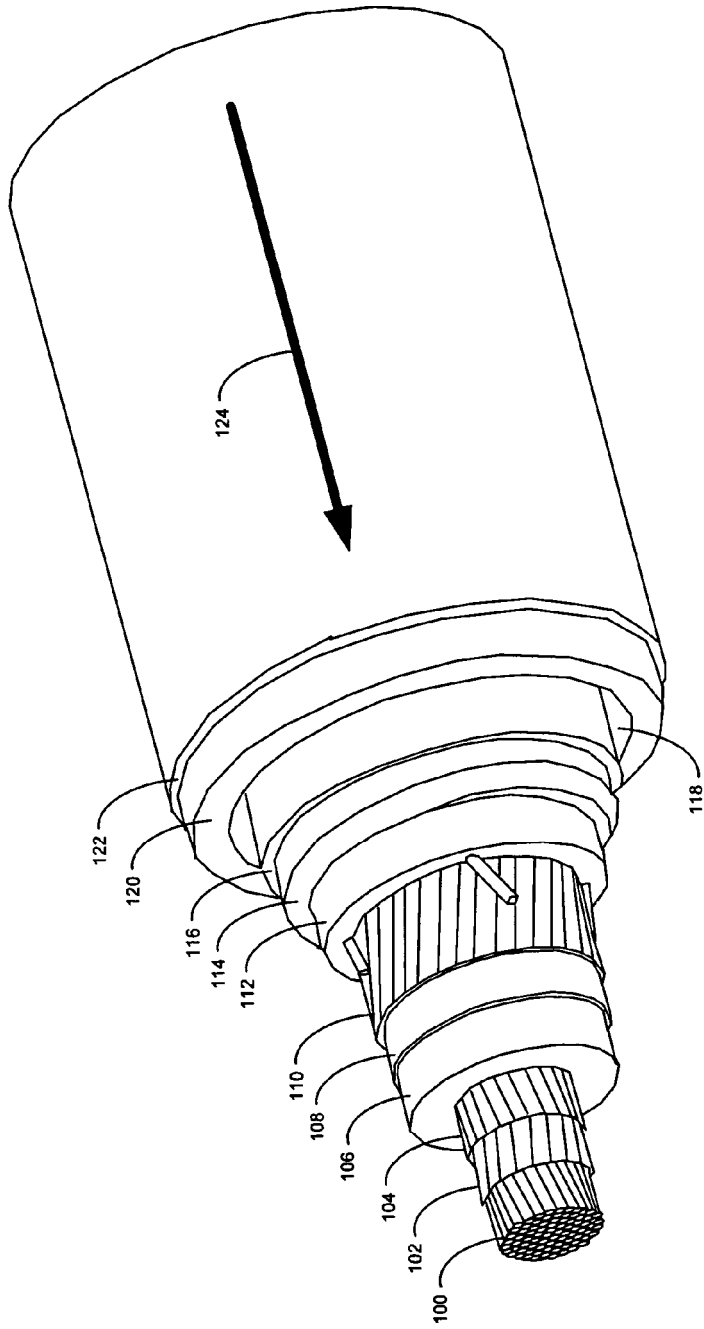


FIG. 2

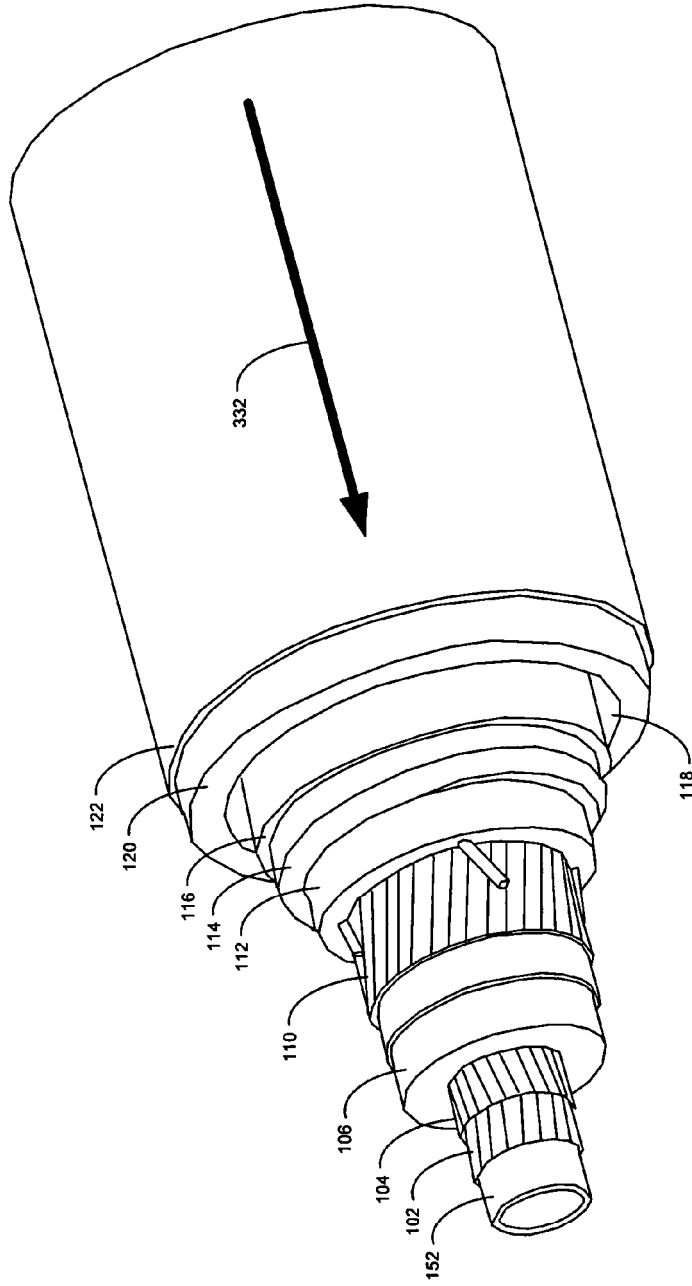


FIG. 3

10'

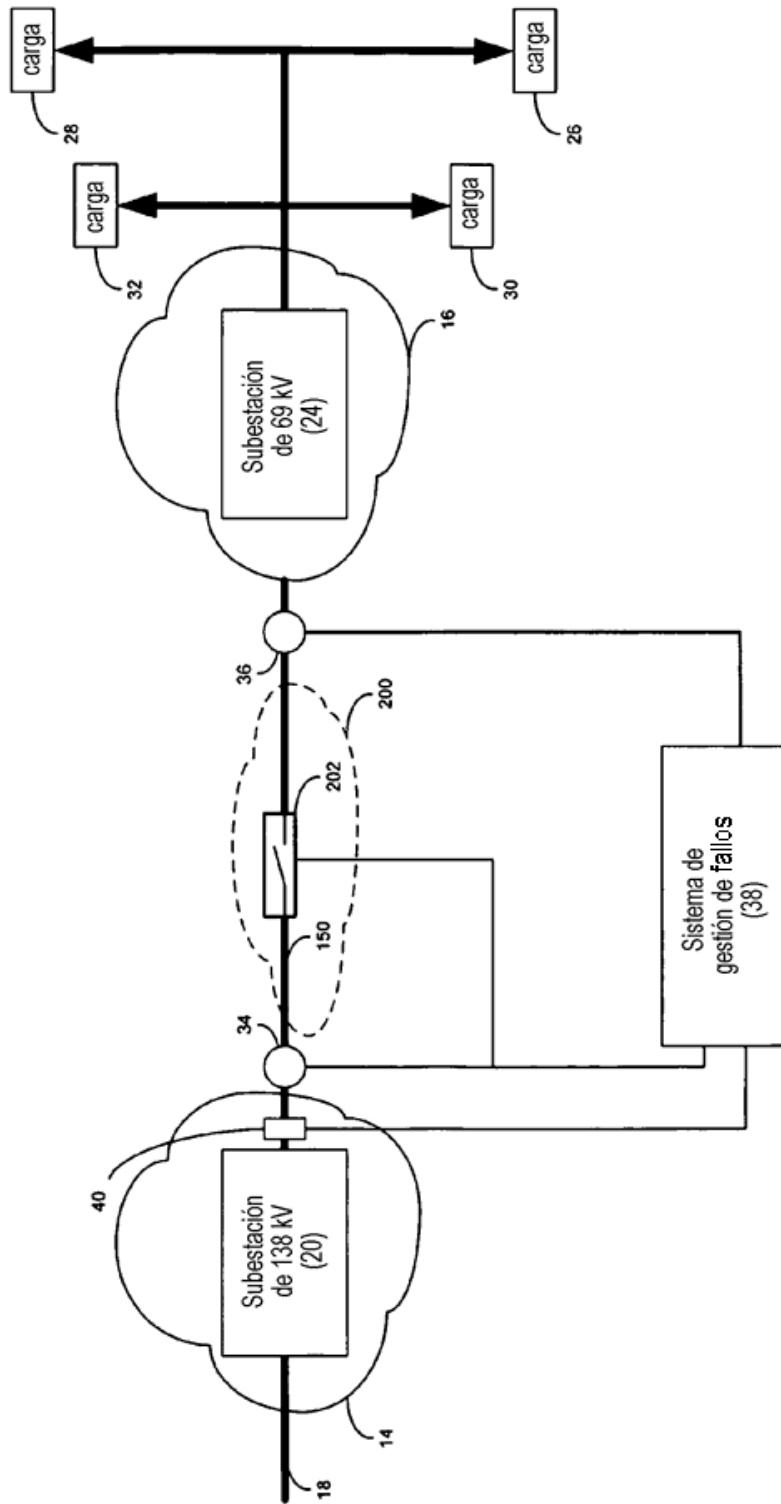


FIG. 4

250

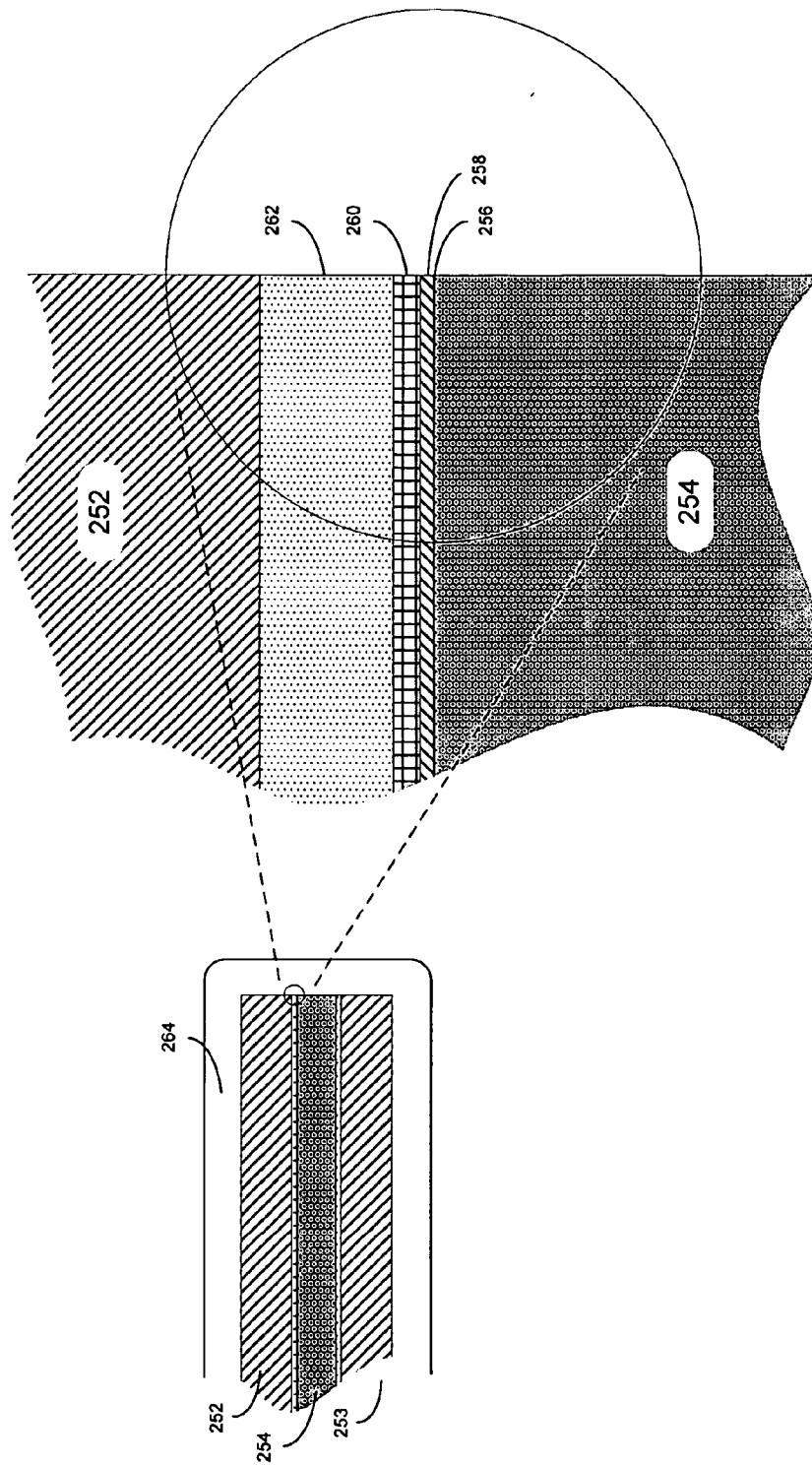


FIG. 5A

250

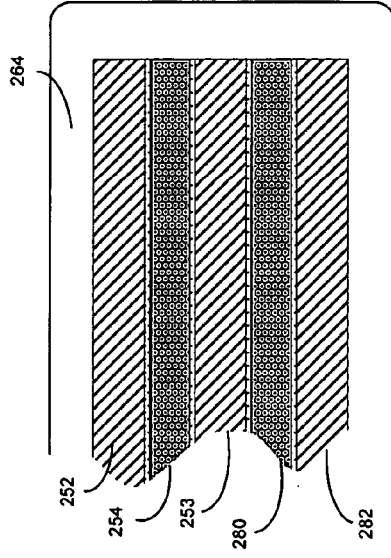


FIG. 5B

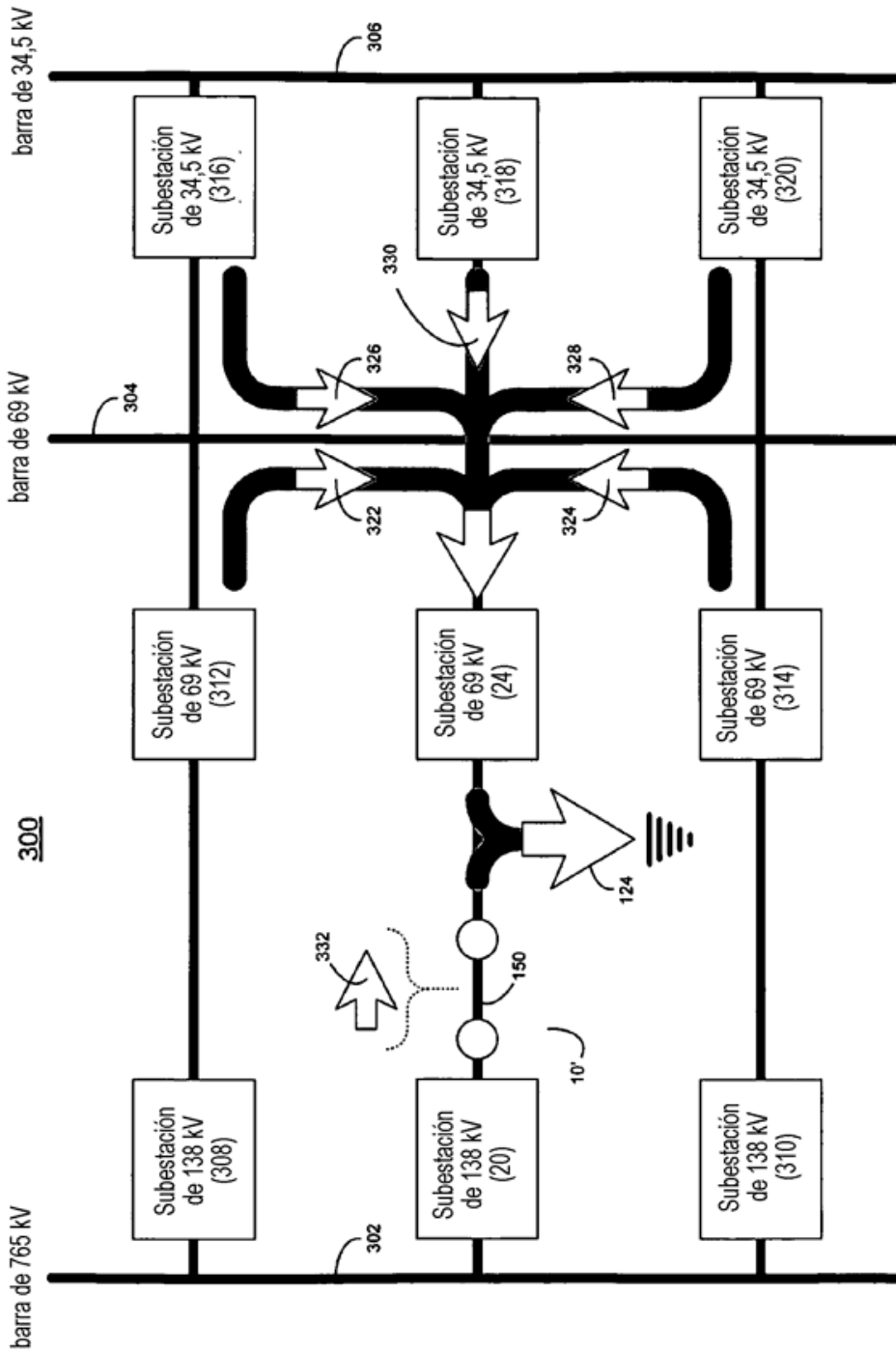


FIG. 6

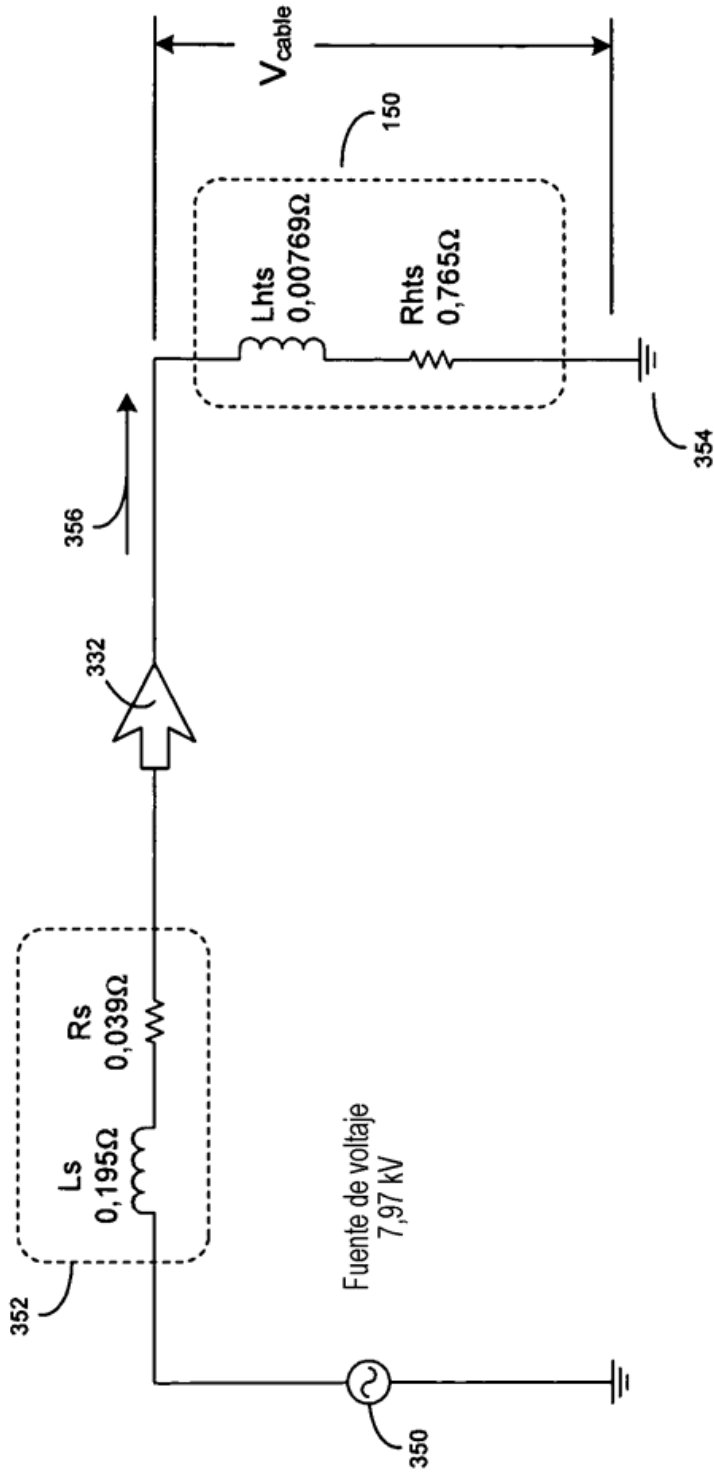


FIG. 7

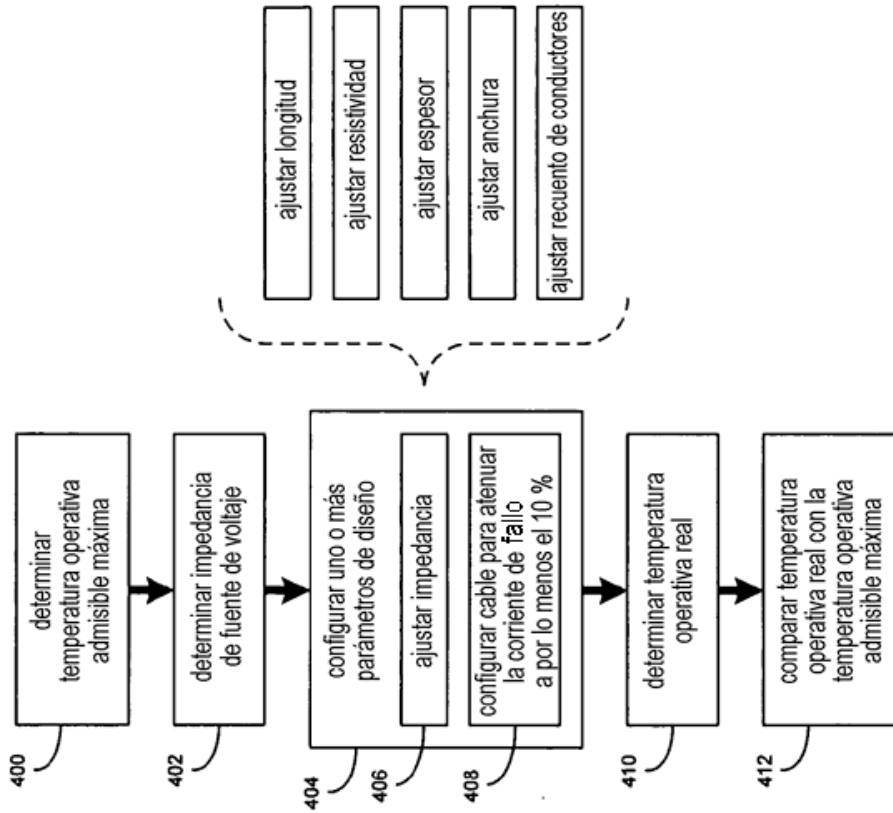


FIG. 8