

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 541 685**

51 Int. Cl.:

H02H 7/00

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.07.2006 E 06787946 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.05.2015 EP 1911136**

54 Título: **Gestión de fallos de cable de alimentación HTS**

30 Prioridad:

29.07.2005 US 703855 P

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

23.07.2015

73 Titular/es:

**AMERICAN SUPERCONDUCTOR CORPORATION
(50.0%)**

**Two Technology Drive
Westborough, MA 01581-1727, US y
NEXANS (50.0%)**

72 Inventor/es:

**YUAN, JIE;
MAGUIRE, JAMES F.;
ALLAIS, ARNAUD y
SCHMIDT, FRANK**

74 Agente/Representante:

VEIGA SERRANO, Mikel

ES 2 541 685 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

Gestión de fallos de cable de alimentación HTS

5 **Solicitud relacionada**

Según la 35 U.S.C §119 (e)(1), la presente solicitud reivindica el beneficio de la solicitud provisional de Estados Unidos anterior 60/703.855, presentada el 29 de julio de 2005.

10 **Derechos del gobierno**

La presente invención se ha realizado con el apoyo del gobierno de Estados Unidos según el contrato N°: DE-FC36-03G013032. El Gobierno puede tener ciertos derechos en la invención objeto.

15 **Estado de la técnica**

Los problemas en una red de suministro eléctrico, o "fallos", (tales como defectos de dispositivos de red) pueden influir en cómo se distribuye la corriente eléctrica a través de la red. En particular, los fallos tienden a drenar energía desde las fuentes de alimentación, dejando menos energía para la distribución a través de otras áreas de la red y para la recuperación de las "caídas" de tensión resultantes del fallo.

Cuando se produce un fallo en una red de suministro eléctrico, se experimentan depresiones de tensión momentáneas, lo que puede dar como resultado un colapso de tensión o una inestabilidad de tensión en la red.

25 En general, un fallo de este tipo aparece como una carga extremadamente grande que se materializa de manera instantánea en la red de suministro eléctrico. En respuesta a la aparición de esta carga, la red intenta suministrar una gran cantidad de corriente a la carga (es decir, el fallo). Los circuitos de detección asociados con los disyuntores de circuito de la red detectan inmediatamente la situación de sobrecorriente (al cabo de unos pocos milisegundos). Se envían señales de activación desde los circuitos de detección a los relés de protección que inician la apertura del
30 circuito. La naturaleza mecánica de los relés requiere, en general, de 3 a 6 ciclos (es decir, hasta 100 milisegundos) para la apertura. Cuando se abren los disyuntores, se resuelve el fallo.

Se están desarrollando cables de alimentación que usan alambre superconductor de alta temperatura (HTS) para aumentar la capacidad de alimentación en las redes de suministro eléctrico a la vez que mantienen un tamaño relativamente pequeño. Entre otras ventajas, los cables de alimentación HTS son mucho más fáciles de colocar, incluso en áreas urbanas densas y antiguas. Tales cables HTS también permiten que puedan bombearse mayores cantidades de corriente eléctrica de manera económica y fiable en áreas congestionadas de una red de suministro eléctrico y transferirse precisamente donde se necesita aliviar la congestión. Un cable de alimentación HTS usa alambre HTS en el núcleo del cable en lugar de cobre para la transmisión y la distribución de electricidad. El diseño
40 de los cables HTS da como resultado una impedancia significativamente menor en comparación con las líneas y los cables convencionales. El uso de alambre HTS permite un aumento de tres a cinco veces en la capacidad de transporte de corriente en comparación con los cables convencionales de corriente alterna (CA), y hasta diez veces más flujo de corriente eléctrica que a través de los cables convencionales de corriente continua (CC).

45 Los cables de alimentación HTS se comportan de manera diferente que los cables superconductores no convencionales ante las corrientes de fallo. En primer lugar, un cable de alimentación HTS de dieléctrico frío requiere que el líquido refrigerante permanezca en un estado sub-enfriado durante un fallo general o múltiples fallos pasantes. Esto es necesario para mantener la resistencia dieléctrica entre el núcleo del cable de alta tensión y el blindaje, que está en potencial de tierra. Cualquier formación de burbujas en el interior del dieléctrico amenazará las propiedades dieléctricas del aislamiento. En segundo lugar, el cable debe desconectarse siguiendo los fallos
50 generales con el fin de dar tiempo suficiente para que los conductores HTS se enfrien de vuelta al intervalo de temperatura de funcionamiento. Como resultado, los sistemas de protección de fallos de cable convencionales no son adecuados para su uso con cables de alimentación HTS.

55 **Objeto de la invención**

En un aspecto general de la invención, un método para proporcionar protección a un cable eléctrico superconductor localizado en una red de suministro eléctrico incluye las siguientes etapas. Se detecta una corriente de fallo en el cable eléctrico superconductor. Se determina la energía total acumulada disipada (o almacenada) en el cable
60 eléctrico superconductor de la corriente de fallo y al menos una corriente de fallo anterior durante un periodo de tiempo predeterminado. Se determina si debe desconectarse el cable eléctrico superconductor de la red de suministro eléctrico basándose en dicha energía total acumulada disipada (o almacenada).

Las realizaciones de este aspecto de la invención pueden incluir una o más de las siguientes características. La etapa de detección incluye determinar la magnitud de la corriente de fallo I_j y una duración de tiempo de la corriente de fallo t_{dj} en el cable eléctrico superconductor. El método incluye, además, determinar si la corriente de fallo I_j

supera un nivel de corriente umbral predeterminado y, si lo hace, desconectar el cable eléctrico superconductor de la red de suministro eléctrico durante un periodo de tiempo basándose en el nivel de la corriente de fallo I_i .

El periodo de tiempo está basado en la geometría del cable eléctrico superconductor y el sistema de refrigeración asociado. Por ejemplo, la geometría del cable eléctrico superconductor incluye una pluralidad de capas y el periodo de tiempo está basado en A_j es el área de sección transversal de la capa j , k_j es la conductividad de la capa j , T_j es la temperatura local de la capa j que es una función de la posición y del tiempo, $R_{j,j-1}$ es la resistencia térmica entre la capa $j-1$ y la capa j , $R_{j,j+1}$ es la resistencia térmica entre la capa j y $j+1$, ρ_j es la densidad de la capa j , C_j es el calor específico de la capa j , y m es el caudal de refrigerante.

El método incluye además determinar el tiempo transcurrido entre la corriente de fallo I_i y una corriente de fallo anterior I_{i-1} cuando I_i no supera un nivel de corriente umbral predeterminado y determinar si el tiempo transcurrido supera un periodo de tiempo umbral predeterminado y, si lo hace, mantener la conexión del cable eléctrico superconductor en la red de suministro eléctrico. La determinación del valor de la energía total acumulada incluye determinar si el valor de la energía total acumulada es menor que un valor umbral crítico que representa la cantidad de energía a la que el cable podría dañarse si se produce un fallo general en un periodo de tiempo que es más corto que un periodo de tiempo umbral predeterminado. En otro aspecto de la invención, un sistema para proporcionar protección a un cable eléctrico superconductor localizado en una red de suministro eléctrico, incluye un sensor configurado para detectar una corriente de fallo transportada en el cable eléctrico superconductor; un controlador configurado para determinar la energía total acumulada disipada en el cable eléctrico superconductor de la corriente de fallo y al menos una corriente de fallo anterior durante un periodo de tiempo predeterminado; y configurado para determinar si debe desconectarse el cable eléctrico superconductor de la red de suministro eléctrico basándose en dicha energía total acumulada disipada.

Las realizaciones de este aspecto de la invención pueden incluir una o más de las siguientes características. El controlador determina la magnitud de la corriente de fallo I_i , y una duración de tiempo de la corriente de fallo t_{di} en el cable eléctrico superconductor. El controlador determina si la corriente de fallo I_i supera un nivel de corriente umbral predeterminado y, si lo hace, desconecta el cable eléctrico superconductor de la red de suministro eléctrico durante un periodo de tiempo basándose en el nivel de la corriente de fallo I_i . El periodo de tiempo está basado en la geometría del cable eléctrico superconductor y el sistema de refrigeración asociado. El controlador determina el tiempo transcurrido entre la corriente de fallo I_i y una corriente de fallo anterior I_{i-1} y determina si el tiempo transcurrido supera un periodo de tiempo umbral predeterminado y, si lo hace, mantiene la conexión del cable eléctrico superconductor en la red de suministro eléctrico.

Entre otras ventajas, el método y el sistema descritos anteriormente proporcionan una protección contra la sobrecorriente a los cables eléctricos superconductores monitorizando la corriente que fluye en una parte de una red eléctrica a la que está conectado el cable de alimentación. El método y el sistema tienen en cuenta un fallo que se está produciendo, así como los fallos producidos anteriormente, incluso los que no llegan al nivel de requerir la interrupción inmediata de la corriente a través del cable (es decir, la activación de un disyuntor de circuito) pero provocan, sin embargo, el calentamiento del superconductor en el cable. Al hacerlo de este modo, cuando se produce un fallo, se tienen en cuenta los efectos del calentamiento acumulado debido a fallos anteriores. Por ejemplo, un fallo que tiene una magnitud de corriente y una duración que, normalmente, no activarían un disyuntor de circuito, podría generar el calor suficiente para dañar el cable superconductor junto con el calentamiento por otros fallos producidos recientemente. Los detalles de una o más realizaciones de la invención se exponen en los dibujos adjuntos y en la siguiente descripción. Otras características, objetos y ventajas de la invención serán evidentes a partir de la descripción y los dibujos, y a partir de las reivindicaciones.

Descripción de las figuras

La figura 1 es un diagrama esquemático que ilustra un sistema de gestión de fallos para proporcionar protección contra la sobrecorriente a un cable HTS.

La figura 2 es una vista isométrica de un cable HTS.

La figura 3 es un diagrama de flujo que muestra el funcionamiento del sistema de gestión de fallos.

Las figuras 4A y 4B son gráficas que ilustran la corriente como una función del tiempo y la temperatura HTS como una función del tiempo, respectivamente, para una primera serie de sucesos de fallo.

Las figuras 5A y 5B son gráficas que ilustran la corriente como una función del tiempo y la temperatura HTS como una función del tiempo, respectivamente, para una segunda serie de sucesos de fallo.

En los diversos dibujos, los símbolos de referencia similares indican elementos similares.

Descripción detallada de la invención

Haciendo referencia a la figura 1, se muestra un cable superconductor de alta temperatura (HTS) 100 conectado dentro de una parte de una red de suministro eléctrico 10. El cable HTS 100 tiene en este caso una longitud de varios cientos de metros y proporciona una corriente relativamente alta y una trayectoria eléctrica de baja resistencia, a la vez que ocupa una fracción del espacio requerido por un cable de cobre convencional que

transporta la misma cantidad de corriente. Como se tratará con más detalle a continuación, el alambre HTS usado en el cable HTS 100 tiene un diseño y una estructura capaces de transportar tanto como 150 veces la corriente eléctrica de un alambre de cobre de tamaño similar. Con una cantidad relativamente pequeña de alambre HTS, en lugar de grandes cantidades de cobre trenzado en el núcleo de un cable de CA, puede transportarse de tres a cinco veces más corriente eléctrica a través de una línea de tamaño equivalente.

Haciendo referencia a la figura 2, el cable HTS 100 incluye un núcleo de cobre trenzado 102 rodeado en sucesión radial por un primera capa superconductora de alta temperatura 104, una segunda capa superconductora de alta temperatura 105, una capa de aislamiento de alta tensión 106, una capa de blindaje superconductora de alta temperatura 108, una capa de blindaje de cobre exterior 109, una capa de protección 110, una cubierta de refrigerante 111, una pared de criostato interior 112, un espacio vacío 113, una pared de criostato exterior 114 y una envoltura de cable exterior 115. En funcionamiento, se suministra un refrigerante (por ejemplo, nitrógeno líquido) desde una fuente de refrigerante externa (no mostrada) para circular dentro y a lo largo de la longitud de la cubierta de refrigerante 111. Este tipo de cable de alimentación HTS está disponible en Nexans, París (Francia). Otras empresas como Sumitomo Electric Industries, Ltd., Osaka (Japón) y Ultera™, una sociedad conjunta de Southwire Company de Carrollton, Georgia, y NKT Cables, Asnaes (Dinamarca), también producen cables de alimentación HTS.

Haciendo referencia de nuevo a la figura 1, el cable HTS 100 está conectado dentro de un segmento de red de transmisión 120 que transporta las tensiones a un nivel de aproximadamente 138 kV y se extiende desde el segmento de red 122 al segmento de red 124 que transporta las tensiones a un nivel inferior de aproximadamente 69 kV. Un transformador reductor 126 hace caer la tensión desde la tensión de línea de transmisión de 138 kV a la tensión de línea de transmisión inferior de 69 kV. En esta aplicación específica, el segmento de red de transmisión 124 alimenta un número de cargas 128, así como una subestación 129. Un par de disyuntores de circuito 130, 132 se conectan en cada extremo del cable HTS 100 para permitir que el cable HTS se desconecte rápidamente de la red de suministro eléctrico.

Un sistema de gestión de fallos 200 proporciona protección contra la sobrecorriente al cable HTS 100 garantizando que cable HTS 100 se mantenga por debajo de una temperatura a la que el cable podría sufrir daños. El sistema de gestión de fallos 200 proporciona dicha protección contra la sobrecorriente monitorizando la corriente que fluye en el segmento de la red de suministro eléctrico a la que está conectado el cable HTS 100. En particular, el sistema de gestión de fallos 200 detecta la corriente de un par de transformadores de corriente 134 en un extremo del cable HTS 100. El sistema de gestión de fallos incluye una memoria 210 que incluye al menos una parte para almacenar un programa de ordenador 212 para controlar los disyuntores de circuito 130 132, un procesador 214 para ejecutar las instrucciones legibles por ordenador, y un bus 216 que conecta la memoria al procesador. El sistema de gestión de fallos también incluye un reloj GPS convencional 133 para determinar tanto la duración del fallo como el tiempo entre los fallos. Específicamente, el reloj GPS proporciona una marca de tiempo para el procesador 214 para establecer la duración del fallo y el tiempo entre los fallos. El programa almacenado incluye instrucciones legibles por ordenador que, basándose en las señales detectadas en los transformadores 134 y el reloj GPS convencional, proporcionan señales de control a los disyuntores de circuito 130, 132 para desconectar el cable HTS de la línea de transmisión 120.

Con referencia a la figura 3, el funcionamiento del sistema de gestión de fallos 200 se describirá junto con el cable HTS 100 que tiene una estructura como se muestra en la figura 2. En este ejemplo, el cable HTS 100 está diseñado para soportar una corriente de fallo tan alta como una corriente de fallo de 69 kA con una duración de 200 ms (12 ciclos) suponiendo que el cable HTS no se ha sometido a más de los límites de fallo pasante permitidos predeterminados, por lo que el aumento de temperatura de la capa HTS 105 es mayor que el margen de temperatura permitido. Debe entenderse que la presente invención puede aplicarse, en general, a cables de alimentación HTS y que los parámetros específicos usados en este ejemplo son para este diseño de cable específico y una configuración de red de transmisión específica. Los parámetros necesarios para poner en práctica la presente invención para un diseño de cable y una red determinados, se determinarán fácilmente por los expertos en la materia.

En funcionamiento, el sistema de gestión de fallos 200 incluye un registro de energía 220 para almacenar el valor de la energía total por longitud que se espera que se disipe por el cable HTS (etapa 302) en su localización más vulnerable (normalmente en el extremo del cable en el que el refrigerante tiene la temperatura más alta). El sistema de gestión de fallos monitoriza continuamente el nivel de la corriente en los transformadores de corriente 134 dentro de una ventana de tiempo proporcionada por la señal de reloj GPS. Si la corriente en esta ventana supera la corriente de funcionamiento normal, se emite una marca de tiempo cuando la corriente supera el nivel normal y cuando vuelve al nivel normal. Esto permite que el sistema de gestión de fallos determine el tiempo total del fallo específico (etapa 304). En esta realización, una corriente de fallo general de 69 kA haría que la temperatura de la capa superconductora 105 superase la temperatura de saturación del refrigerante, provocando posiblemente un daño permanente en el cable debido a la formación de burbujas dentro de la capa de aislamiento de alta tensión 106. Sin embargo, incluso si el nivel de corriente es menor de 69 kA, pero por encima de un nivel de corriente umbral predeterminado para un cable/red específico (en este ejemplo 20 kA), el cable HTS 100 podría sufrir daños si el nivel de corriente transportada por el cable y el tiempo de duración del fallo fueran lo suficientemente significativos

para elevar su temperatura sin tiempo suficiente para que el cable se enfríe a un nivel en el que pueda soportar una corriente de fallo en el nivel de 69 kA. Por lo tanto, el sistema de gestión de fallos 200 determina si la corriente monitorizada es menor de 20 kA (etapa 306). Si es mayor de 20 kA, el sistema de gestión de fallos 200 hace referencia a un tiempo de desconexión de cable 224 para establecer un periodo de tiempo necesario para que el cable HTS se enfríe sin considerar un fallo posterior. A continuación, el cable se desconecta durante el periodo de tiempo determinado enviando una señal a los disyuntores para ordenarles que se abran.

Para este ejemplo específico, el cable HTS usa una tabla de búsqueda de tiempo de desconexión de cable como la siguiente:

Corriente (kA)	Tiempo aproximado (horas)
69	8
60	5,8
50	3,8
40	2,3
30	1,2
20	0,5

Los valores de tiempo aproximados para el tiempo de desconexión de cable se generan a partir de las ecuaciones de balance de energía de cable.

$$A_j k_j \frac{d^2 T_j}{dx^2} + \frac{(T_{j-1} - T_j)}{R_{j,j-1}} - \frac{(T_j - T_{j+1})}{R_{j,j+1}} = \rho_j C_j A_j \frac{dT_j}{dt} \quad (1)$$

donde A_j es el área de sección transversal de la capa j , k_j es la conductividad de la capa j , T_j es la temperatura local de la capa j que es una función de la posición y del tiempo, $R_{j,j-1}$ es la resistencia térmica entre la capa $j-1$ y la capa j , $R_{j,j+1}$ es la resistencia térmica entre capa j y $j+1$, ρ_j es la densidad de la capa j , C_j es el calor específico de la capa j .

La energía almacenada en el cable HTS 100 debido a un fallo tiene que eliminarse antes de que el cable pueda volver a energizarse. La duración de tiempo para enfriar el cable HTS 100 de vuelta a un modo de funcionamiento normal depende de varios factores. Estos factores incluyen la potencia de refrigeración disponible, el caudal de refrigerante, así como la energía total disipada dentro del cable durante un fallo. Cuanta más energía almacenada en el interior del cable, mayor será el tiempo requerido para enfriar el cable. Para calcular la duración de tiempo para el enfriamiento, es necesario un modelo térmico transitorio. Los resultados calculados de la duración de tiempo de cada fallo mostrados anteriormente pueden usarse por un operario del cable para determinar el tiempo que el cable tiene que estar desconectado para una corriente de fallo determinada.

Si la corriente monitorizada es menor de 20 kA, el cable puede no tener que desconectarse inmediatamente. Por lo tanto, el sistema de gestión de fallos 200 determina entonces si el tiempo entre un fallo anterior es menor que un umbral de tiempo predeterminado, en este caso 20 minutos (etapa 308). Si el tiempo entre los fallos es mayor de 20 minutos, el valor de la energía por longitud almacenada en el registro de energía se restablece a un valor cero, como si no hubiera habido un fallo anterior debido al efecto de enfriamiento. Si el tiempo entre los fallos ha sido menor de veinte minutos, el sistema de gestión de fallos supone que el cable HTS 100 sigue teniendo un cierto nivel de energía por longitud almacenada. El sistema de gestión de fallos 200 usa un algoritmo para determinar el nivel de esa energía almacenada (etapa 310):

$$E_j = \sum E_{j-1} + (I_j/F_s) * t_{d,j}$$

donde:

- E_j es la energía almacenada por unidad de longitud (J/m)
- E_{j-1} es la energía almacenada por unidad de longitud desde el fallo anterior (J/m)
- I_j es la magnitud de la corriente de fallo
- F_s es un factor de distribución de corriente (A*s*m/J)
- $t_{d,j}$ es la duración del fallo (segundos)

Obsérvese que la ecuación anterior incluye un factor de distribución de corriente F , que depende de un número de factores. La tabla de factores de distribución de corriente se genera modelando diversas condiciones de fallo y buscando la correlación entre la energía disipada en cierta capa HTS y una corriente de fallo y una duración de fallo determinadas. Como se ha descrito anteriormente, el cable HTS 100 consiste en varias capas. Durante una

condición de fallo, la corriente se distribuirá entre las capas superconductoras 104, 105, 108, la plantilla de devanado 102 y el blindaje de cobre 114 basándose en la configuración del cable. Debido a la geometría y el diseño del cable, la temperatura de la capa superconductora 105 será mayor que la de la capa superconductora 104 y, por lo tanto, el daño provocado por cualquier formación de una burbuja será más probable cerca de esta capa. Por lo tanto, la capa superconductora 105 se usa como la capa crítica para garantizar que el cable HTS 100 está protegido de daños. Para el cable HTS específico 100 mostrado en la figura 2, una tabla de factores de distribución de corriente que asocia los niveles de corriente de fallo con los factores de distribución de corriente, es la siguiente:

Corriente (kA)	F _s (Asm/J)
1	554700
2	5371
3	667
4	329
5	95
6	57
7	43
8	36
9	32
10	30

Una vez que se ha calculado la energía por unidad de longitud almacenada E_i usando el algoritmo mostrado anteriormente, se compara con un umbral de energía por unidad de longitud predeterminado, en este caso 74 J/metro. Si la energía por unidad de longitud es menor que el umbral de 74 J/metro en este ejemplo, el cable HTS 100 permanece conectado dentro del segmento de transmisión 120. Si es mayor que 74 J/metro, el cable HTS 100 se desconecta del segmento de transmisión 120 durante 20 minutos antes de reconectarse. El tiempo de duración de 20 minutos es el requisito mínimo para eliminar la energía almacenada del cable 100 y está basado en el diseño del sistema de refrigeración. Para comprender mejor el funcionamiento del sistema de gestión de fallos 200, se hace referencia a las figuras 4A-4B y las figuras 5A-5B. Con el primer ejemplo de protección de fallos, la figura 4A muestra los niveles de corriente de fallo de tres sucesos de corriente de fallo sucesivos como una función del tiempo, mientras que la figura 4B muestra la temperatura correspondiente de la capa superconductora 105 dentro del cable HTS 100 como una función del tiempo. En tiempo = 0, el cable HTS 100 transporta un nivel de corriente de aproximadamente 300 A (figura 4A) y la temperatura más alta del cable es de aproximadamente 74 K (figura 4B). Un segundo después (t = 1 s), se produce una corriente de fallo de 3 kA que dura cinco segundos. Como se muestra en la figura 4B, durante los cinco segundos, la temperatura del cable HTS se eleva de manera constante hasta aproximadamente 74,6 K. Cuando se resuelve el fallo en t = 6 segundos, el nivel de corriente cae inmediatamente a la corriente de funcionamiento normal de 300 A. Sin embargo, la temperatura del cable solo cae ligeramente cuando el segundo de los tres fallos se produce en t = 6,5 segundos. Como se muestra en la figura 4A, el segundo fallo es un fallo de 5 kA y dura 0,4 segundos y, como se muestra en la figura 4B, la temperatura del cable HTS 100 aumenta de manera relativamente rápida a aproximadamente 75,2 K. En t = 7 segundos, se produce el suceso de corriente de fallo final, un fallo de 4 kA que dura 1 segundo antes de volver a las condiciones de corriente normales. Una vez más, como se muestra en la figura 4B, la temperatura del cable aumenta una vez más a aproximadamente 75,5 K, que está todavía por debajo del umbral de desconexión predeterminado de 76 K. La temperatura del cable HTS se relaciona con la energía por la siguiente ecuación

$$E_i = \int_{T_{ini}}^{T_f} \rho A C_p dT ,$$

donde E es la energía por longitud disipada en la capa HTS 105, T_{ini} es la temperatura inicial, T_f es la temperatura final de la capa HTS 105, ρ es la densidad de alambre HTS, A es el área de la sección de alambre HTS. Por lo tanto, en este primer ejemplo, la combinación específica de los sucesos de corriente de fallo no ha sido suficiente para hacer que el sistema gestión de fallos 200 aisle el cable HTS 100 de la línea de transmisión 120. Esto significa que incluso si hay un fallo general de 69 kA justo después del fallo de 4 kA, no se dañará el cable.

Haciendo referencia ahora a las figuras 5A y 5B, en un segundo ejemplo de protección de fallos, en tiempo = 0, el cable HTS 100 transporta un nivel de corriente de aproximadamente 300 A (figura 5A) y la temperatura del cable es de aproximadamente 74 K (figura 5B). Un segundo después (t=1), se produce una corriente de fallo de 6 kA que dura 0,4 segundos. Como se muestra en la figura 5B, durante los 0,4 segundos, la temperatura del cable HTS se eleva rápidamente hasta aproximadamente 75,2 K. Cuando se resuelve el fallo en t = 1,5 segundos, el nivel de corriente cae inmediatamente a la corriente de funcionamiento normal de 300 A. Sin embargo, la temperatura del cable cae muy poco cuando el segundo de los tres fallos se produce en t = 2 segundos. Como se muestra en la figura 5A, el segundo fallo es un fallo de 4 kA y dura 2 segundos y, como se muestra en la figura 5B, la temperatura del cable HTS 100 aumenta de manera relativamente rápida a aproximadamente 75,8 K. En t = 4,5 segundos, se produce el suceso de corriente de fallo final, en el que un fallo de 3 kA dura 5 segundos antes de volver a las condiciones de corriente normales. Obsérvese que la temperatura del cable HTS 100 se mantiene relativamente alta en el momento del tercer suceso de corriente de fallo. Como se muestra en la figura 5B, en aproximadamente t = 5,5 segundos, se

5 ve que la temperatura del cable supera la temperatura de desconexión de 76 K. Por lo tanto, a diferencia del ejemplo mostrado en las figuras 4A y 4B, el sistema de gestión de fallos 200 envía señales de control a los disyuntores de circuito 130, 132 para desconectar el cable HTS 100 de la línea de transmisión 120. Si el cable se mantiene conectado, un fallo general de 69 kA justo después del fallo de 3 kA podría, posiblemente, provocar daños en el cable 100.

10 Se han descrito una serie de realizaciones de la invención. Sin embargo, se entenderá que pueden hacerse diversas modificaciones sin alejarse del espíritu y el alcance de la invención. Por ejemplo, es importante apreciar que los valores descritos anteriormente para el nivel de protección contra la sobrecorriente dependen del diseño y la estructura específicos del cable HTS y de cómo y dónde se usa dentro de la red de suministro eléctrico. Por lo tanto, los valores para la corriente y los periodos de enfriamiento aproximados mostrados en la tabla de desconexión de cable como los valores para la tabla de factores de distribución de corriente, se determinan sobre la base del diseño del cable HTS, así como su aplicación en una red de suministro eléctrico.

REIVINDICACIONES

1. Un método para proporcionar protección a un cable eléctrico superconductor localizado en una red de suministro eléctrico, comprendiendo el método:
- 5 detectar una corriente de fallo en el cable eléctrico superconductor;
determinar la energía total acumulada disipada en el cable eléctrico superconductor de la corriente de fallo y al menos una corriente de fallo anterior durante un periodo de tiempo predeterminado; y
determinar si debe desconectarse el cable eléctrico superconductor de la red de suministro eléctrico basándose en dicha energía total acumulada disipada.
- 10 2. El método de la reivindicación 1, en el que la etapa de detección incluye determinar la magnitud de la corriente de fallo I_j y una duración de tiempo de la corriente de fallo t_{dj} en el cable eléctrico superconductor.
- 15 3. El método de la reivindicación 2, que incluye además determinar si la corriente de fallo I_j supera un nivel de corriente umbral predeterminado y, si lo hace, desconectar el cable eléctrico superconductor de la red de suministro eléctrico durante un periodo de tiempo basándose en el nivel de la corriente de fallo I_j .
- 20 4. El método de la reivindicación 2, que incluye además determinar el tiempo transcurrido entre la corriente de fallo I_j y una corriente de fallo anterior I_{j-1} y determinar si el tiempo transcurrido supera un periodo de tiempo umbral predeterminado y, si lo hace, mantener la conexión del cable eléctrico superconductor en la red de suministro eléctrico.
- 25 5. El método de la reivindicación 1, en el que determinar si debe desconectarse el cable eléctrico superconductor incluye determinar si el valor de la energía total acumulada es menor que un valor umbral crítico que representa la cantidad de energía a la que podría dañarse el cable si se produce un fallo general en un periodo de tiempo que es más corto que un periodo de tiempo umbral predeterminado.
- 30 6. El método de la reivindicación 3, en el que el periodo de tiempo está basado en la geometría del cable eléctrico superconductor y el sistema de refrigeración asociado.
- 35 7. El método de la reivindicación 6, en el que la geometría del cable eléctrico superconductor incluye una pluralidad de capas y el periodo de tiempo está basado en A_j , el área de sección transversal de la capa j , k_j , la conductividad de la capa j , T_j , la temperatura local de la capa j que es una función de la posición dentro del cable y del tiempo, $R_{j,j-1}$, la resistencia térmica entre la capa $j-1$ y la capa j , $R_{j,j+1}$, la resistencia térmica entre la capa j y la capa $j+1$, ρ_j , la densidad de la capa j , y C_j , el calor específico de la capa j .
- 40 8. El método de la reivindicación 1, en el que el cable eléctrico comprende material superconductor de alta temperatura (HTS).
- 45 9. El método de la reivindicación 8, en el que el cable eléctrico incluye un núcleo de cobre y una pluralidad de capas HTS separadas por aislamiento eléctrico.
- 50 10. Un sistema para proporcionar protección a un cable eléctrico superconductor localizado en una red de suministro eléctrico, comprendiendo el sistema:
un sensor configurado para detectar una corriente de fallo transportada en el cable eléctrico superconductor;
un controlador configurado para:
determinar la energía total acumulada disipada en el cable eléctrico superconductor de la corriente de fallo y al menos una corriente de fallo anterior durante un periodo de tiempo predeterminado; y
determinar si debe desconectarse el cable eléctrico superconductor de la red de suministro eléctrico basándose en dicha energía total acumulada disipada.
- 55 11. El sistema de la reivindicación 10, en el que el controlador determina la magnitud de la corriente de fallo I , y una duración de tiempo de la corriente de fallo t_{dj} en el cable eléctrico superconductor.
- 60 12. El sistema de la reivindicación 11, en el que el controlador determina si la corriente de fallo I_j supera un nivel de corriente de umbral predeterminado y, si lo hace, desconecta el cable eléctrico superconductor de la red de suministro eléctrico durante un periodo de tiempo basándose en el nivel de la corriente de fallo I_j .
- 65 13. El sistema de la reivindicación 11, en el que el controlador determina el tiempo transcurrido entre la corriente de fallo I_j y una corriente de fallo anterior I_{j-1} y determina si el tiempo transcurrido supera un periodo de tiempo umbral predeterminado y, si lo hace, mantiene la conexión del cable eléctrico superconductor en la red de suministro eléctrico.

14. El sistema de la reivindicación 10, en el que el controlador determina si debe desconectarse el cable eléctrico superconductor determinando si el valor de la energía total acumulada es menor que un valor umbral crítico que representa la cantidad de energía a la que el cable podría dañarse si se produce un fallo general en un periodo de tiempo que es más corto que un periodo de tiempo umbral predeterminado.
- 5
15. El sistema de la reivindicación 12, en el que el periodo de tiempo está basado en la geometría del cable eléctrico superconductor y el sistema de refrigeración asociado.
- 10
16. El sistema de la reivindicación 15, en el que la geometría del cable eléctrico superconductor incluye una pluralidad de capas y el periodo de tiempo está basado en A_j , es el área de sección transversal de la capa j , k_j , es la conductividad de la capa j , T_i , es la temperatura local de la capa j que es una función de la posición dentro del cable y del tiempo, $R_{j,j-1}$, es la resistencia térmica entre la capa $j-1$ y la capa j , $R_{j,j+1}$, es la resistencia térmica entre la capa j y la capa $j+1$, ρ_j , es la densidad de la capa j , y C_j , el calor específico de la capa j .
- 15
17. El sistema de la reivindicación 10, en el que el cable eléctrico superconductor comprende material superconductor de alta temperatura (HTS).
- 20
18. El sistema de la reivindicación 17, en el que el cable eléctrico superconductor incluye un núcleo de cobre y una pluralidad de capas HTS separadas por aislamiento eléctrico.

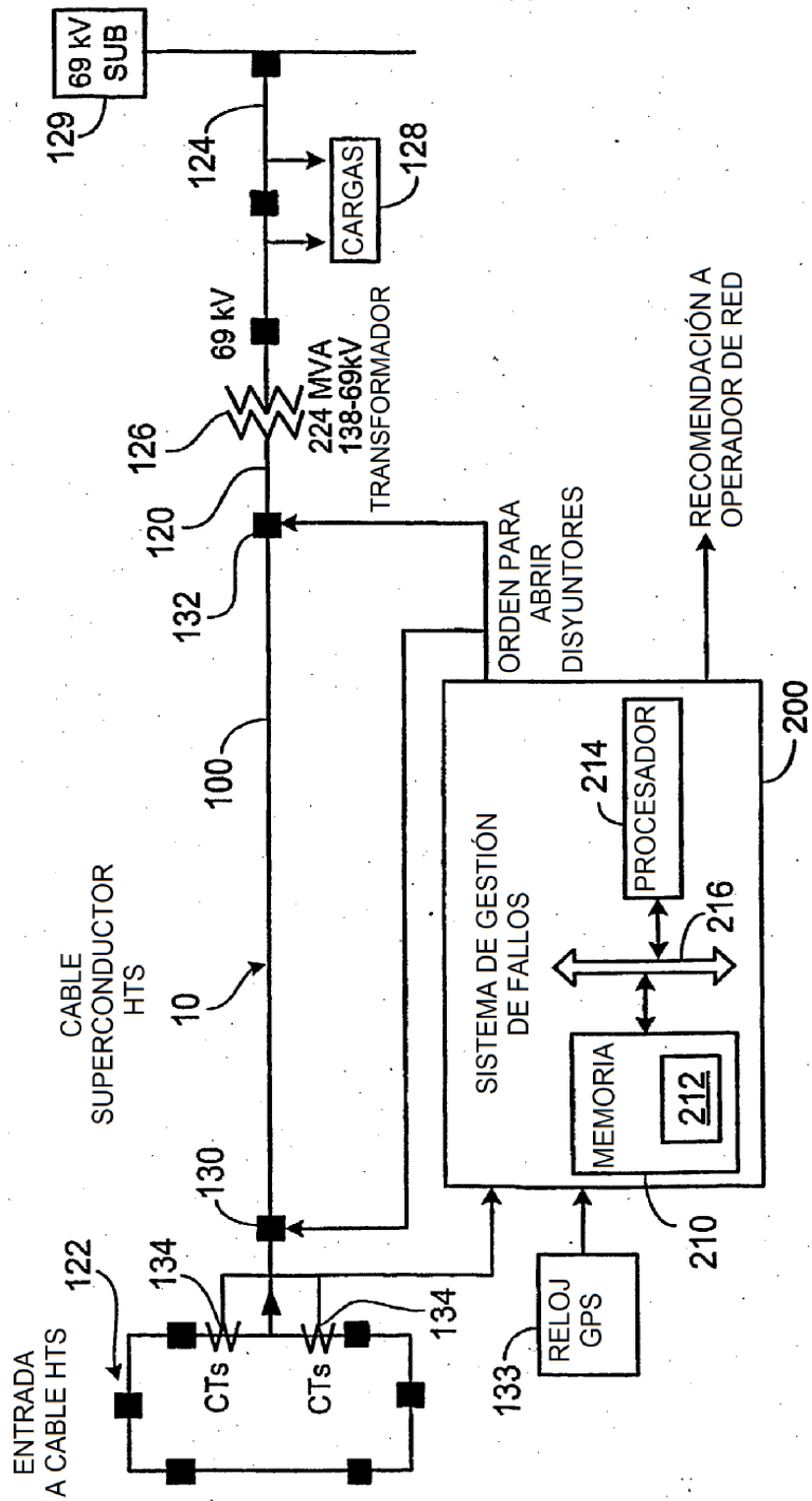


FIG. 1

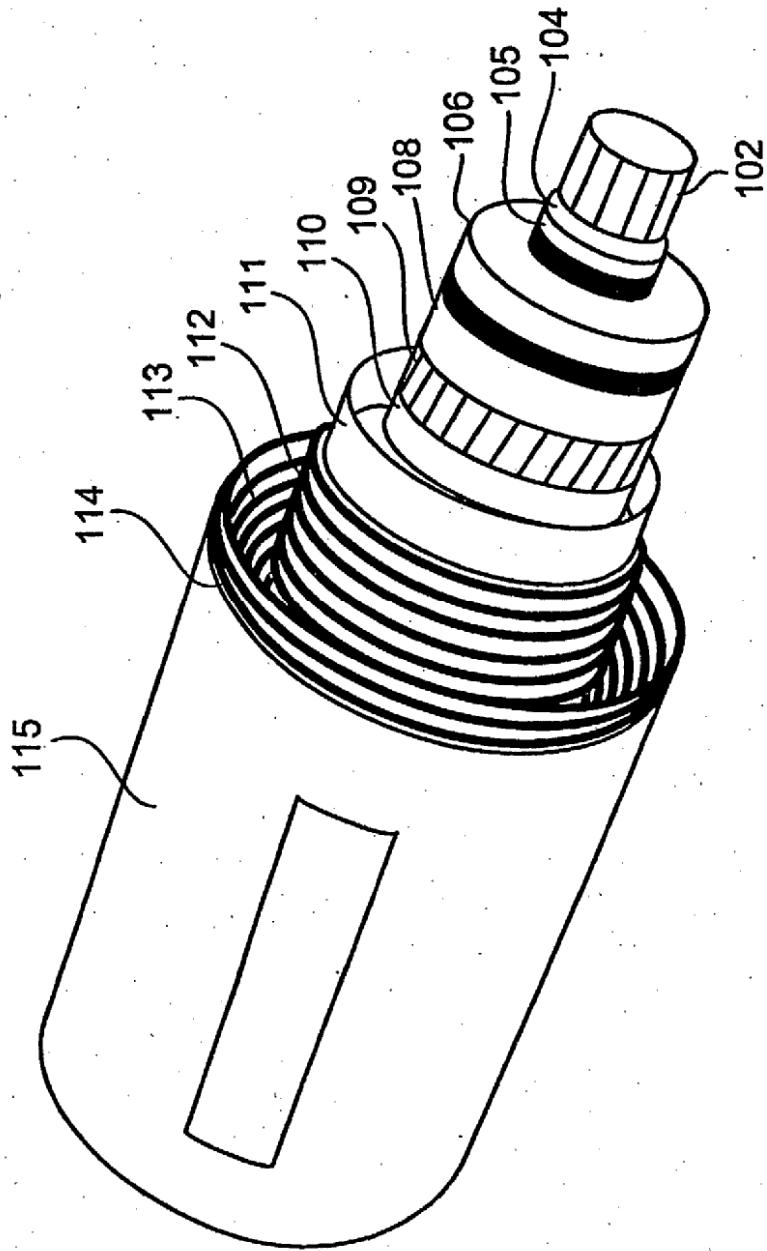


FIG. 2

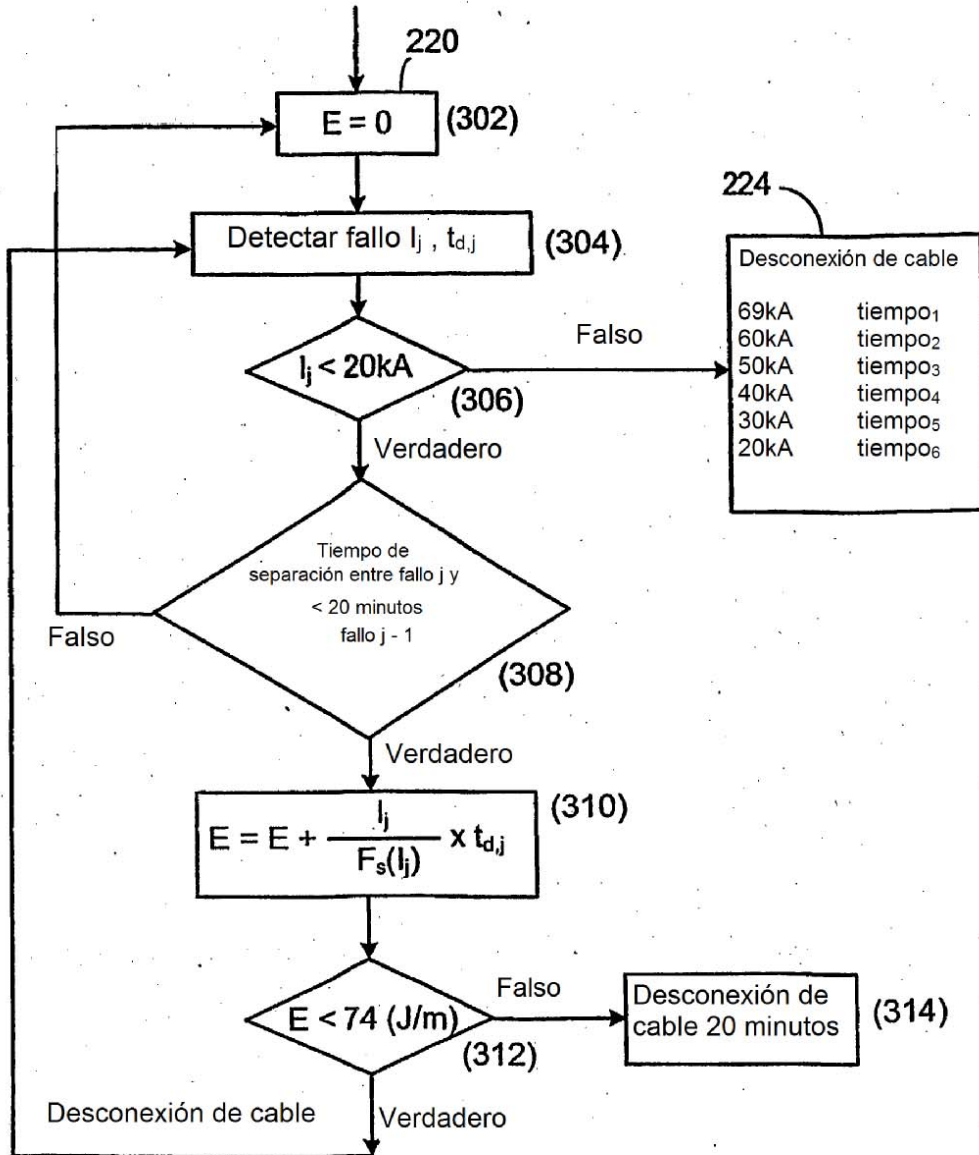


FIG. 3

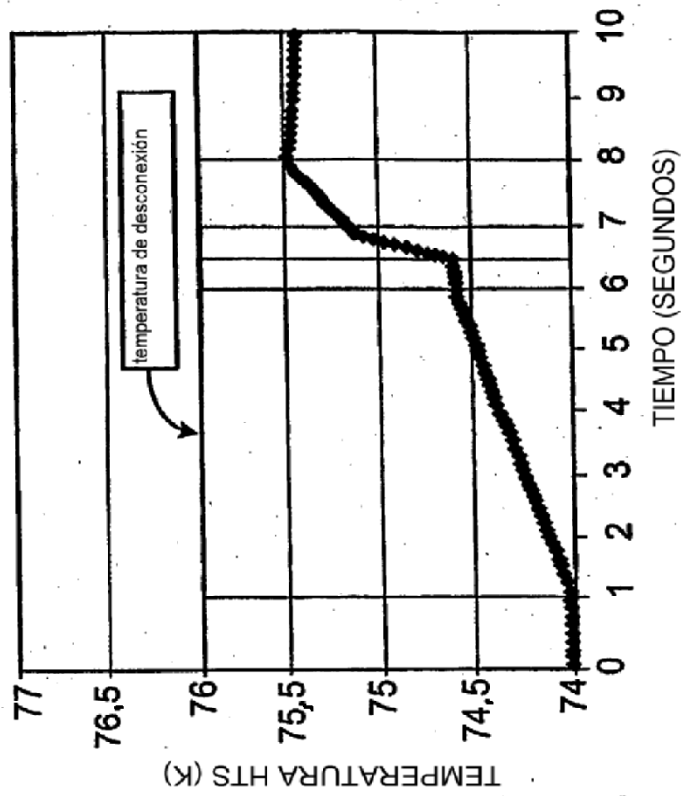


FIG. 4B

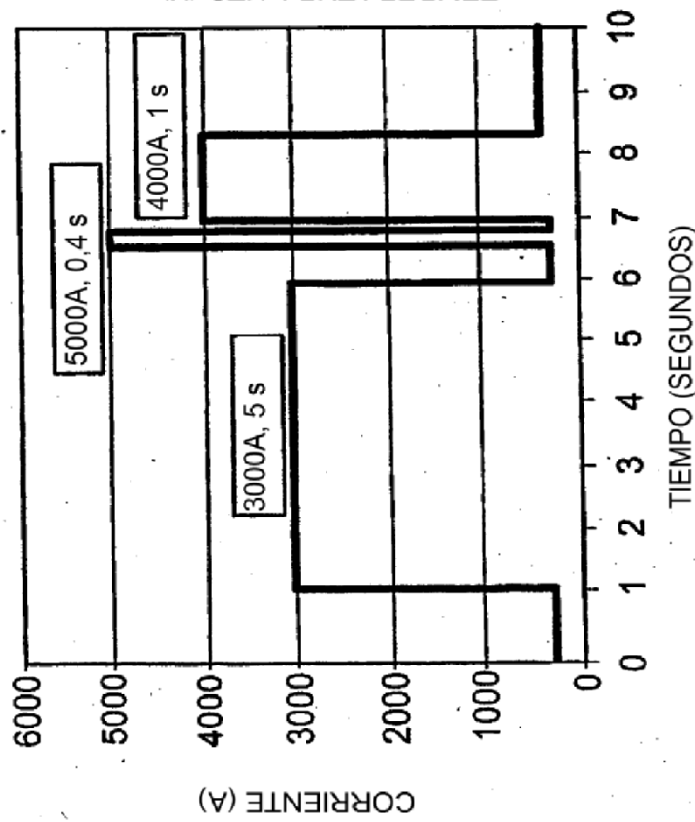


FIG. 4A

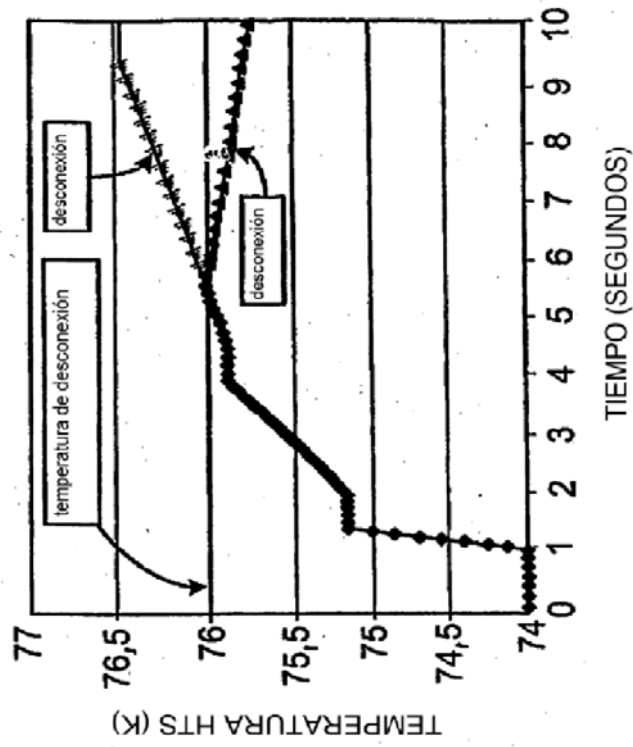


FIG. 5B

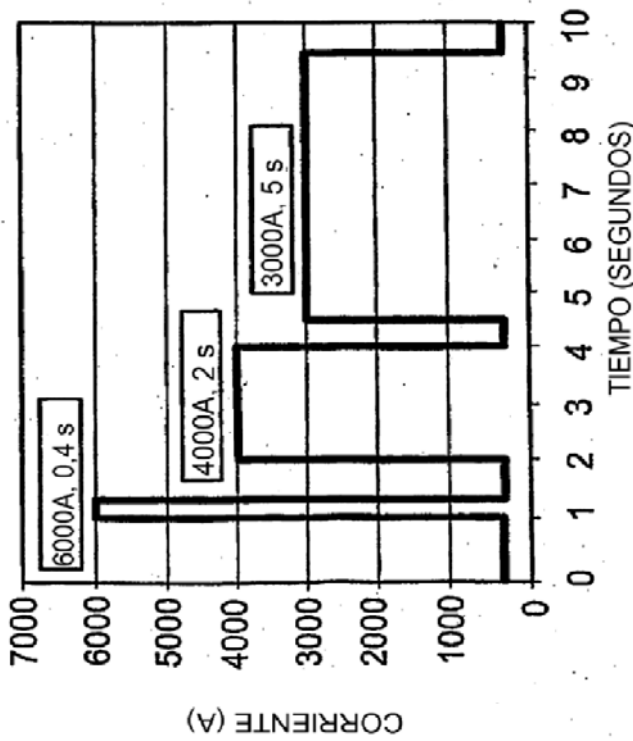


FIG. 5A