



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



⑪ Número de publicación: **2 235 612**

⑫ Número de solicitud: 200301784

⑤① Int. Cl.7: **H02H 9/02**
H01F 36/00
H01F 6/02

⑫

SOLICITUD DE PATENTE

A1

④② Fecha de presentación: **28.07.2003**

④③ Fecha de publicación de la solicitud: **01.07.2005**

④③ Fecha de publicación del folleto de la solicitud:
01.07.2005

⑦① Solicitante/s:
Universidade de Santiago de Compostela
Edificio CATUS-CITT- Campus Sur
15782 Santiago de Compostela, A Coruña, ES

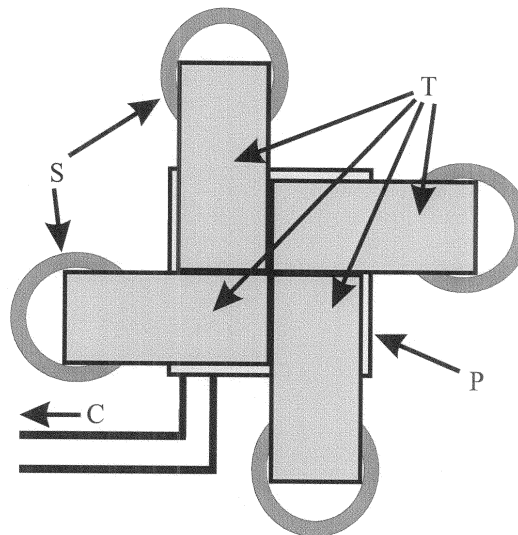
⑦② Inventor/es: **Vidal Costa, Félix;**
Rodríguez Osorio, Manuel y
Veira Suárez, Antonio

⑦④ Agente: **No consta**

⑤④ Título: **Limitador inductivo de corriente basado en múltiples anillos o películas superconductores de pequeño diámetro.**

⑤⑦ Resumen:

Limitador inductivo de corriente basado en múltiples anillos o películas superconductores de pequeño diámetro. Limitador inductivo de corriente basado en múltiples anillos o películas superconductores de pequeño diámetro cuya misión es reducir las corrientes de fallo que surgen en los procesos de producción y distribución de la energía eléctrica basado en múltiples anillos o películas superconductores de pequeño diámetro con una configuración tipo transformador en la que el primario es una bobina metálica devanada en torno a un núcleo magnético del cual se derivan una serie de brazos laterales de pequeña sección transversal, de forma que puedan alojar un conjunto de anillos superconductores que actúan como secundarios y que tienen un diámetro pequeño, del orden de 1-10 centímetros.



ES 2 235 612 A1

DESCRIPCIÓN

Limitador inductivo de corriente basado en múltiples anillos o películas superconductoras de pequeño diámetro.

Los materiales superconductores presentan la interesante propiedad de poseer una resistencia fuertemente no lineal y dependiente de varias magnitudes: la temperatura, la corriente que se hace circular por ellos y el campo magnético al que se hallen sometidos. Estos materiales están caracterizados por un estado de resistencia cero que se alcanza por debajo de una cierta temperatura crítica, T_c , por lo que deben estar refrigerados mediante líquidos criogénicos o refrigeradores eléctricos, y por debajo de una corriente I_c y un campo B_c . En aspectos de caracterización del superconductor es más propio referirse a la densidad de corriente crítica, J_c , que es la I_c por unidad de área atravesada por la corriente, $J_c = I_c / A$. Por encima de estos valores críticos, un superconductor experimenta una transición a un estado disipativo con resistencia no lineal, el cual puede desembocar en un régimen de resistencia óhmica (como la de un metal) si la disipación calienta el material lo suficiente o bien la corriente circulante excede un segundo valor crítico, denominado J^* (véanse, por ejemplo, W. Klein *et al.*, J. Low Temp. Phys. **61**, 413 (1985); S. G. Doettinger *et al.*, Phys. Rev. Lett. **73**, 1691 (1994); Z. L. Xiao *et al.*, Phys. Rev. B **59**, 1481 (1999), y José María Viña Rebolledo, *Contribución al estudio del transporte eléctrico en capas delgadas de cupratos superconductores: corrientes supercríticas y paraconductividad*, Tesis Doctoral, Universidad de Santiago de Compostela (2003)).

Este comportamiento no lineal de la resistencia, función de la temperatura, la corriente y el campo magnético aplicado, ha sugerido la utilización de los superconductores en dispositivos de limitación de corriente, destinados a reducir los efectos perniciosos de las altas corrientes y tensiones generadas durante un fallo en una línea de distribución eléctrica, bien sea en una central de producción o una red o ramificación local (T. Verhaege and Y. Laumond 1998, *Handbook of Applied Superconductivity*, **2**, ed B. Seeber (Bristol: Institute of Physics Publishing), p. 1691; W. T. Norris *et al.*, Cryogenics, **37**, 657 (1997); W. Paul *et al.*, Physica C, **354**, 27 (2001), y P. Tixador, IEEE Trans. Appl. Supercond., **4**, 190 (1994)).

Dependiendo de la forma en que se inserte el superconductor en el circuito que se quiere proteger, se pueden distinguir dos concepciones fundamentales de limitador: resistivo e inductivo. El limitador resistivo puede ser simplemente un elemento superconductor (en forma de barra, película delgada, bobina, etc) conectado en serie con el circuito que se quiere proteger. El limitador se diseña de forma que, cuando por la línea circula la corriente nominal, no se exceda el valor crítico, I_c , de modo que la resistencia que ofrece es nula, y su presencia no se percibe. Sin embargo, cuando ocurre un fallo y la corriente crece hasta valores superiores a I_c , se produce la transición al estado disipativo (o incluso óhmico), y surge una resistencia que limita de forma efectiva la corriente. Nótese que, en principio, una vez se elimina el fallo de la línea, el superconductor regresa a su estado de nula disipación. El limitador es, por lo tanto, autosuficiente y no necesita de ningún elemento adicional que detecte el inicio o la desaparición de un fallo (el propio disposi-

tivo es un detector). Por otro lado, su reacción es casi instantánea, y responde ante un fallo en tiempos del orden de 1 ms o menos.

El limitador inductivo tiene un diseño tipo transformador, en el que el primario (generalmente metálico) está conectado directamente al circuito que se quiere proteger, y el secundario es un superconductor que suele tener forma de anillo o cilindro hueco (también puede ser una bobina o una película depositada sobre un sustrato). Mientras circula la corriente nominal en el circuito, el flujo magnético que crea el primario en el núcleo magnético es cancelado por el que genera el superconductor, de forma que la inductancia efectiva del transformador es nula, y la única impedancia presente es la resistencia de la bobina primaria (y componentes debidas a posibles inductancias de fuga). Cuando se produce un fallo y se excede I_c , la transición del superconductor hace que la cancelación de flujo cese, por lo que surge una impedancia de carácter inductivo y resistivo (según el diseño domina una u otra componente) que limita la corriente. En cierto modo, esto puede verse como un transformador ideal cuyo secundario pasa de estar cortocircuitado a estar en circuito abierto.

En ambos casos, debido a la elevada energía que se disipa en forma de calor en el proceso de limitación de la corriente, es deseable que el limitador no actúe más de unos pocos ciclos de red, que es el tiempo que necesitan los actuales interruptores de circuito para detectar el fallo y abrir la línea (deben esperar a que se alcance un cero de la corriente). Si bien el aumento de la temperatura del superconductor puede ser beneficioso en cuanto a incrementar la impedancia del dispositivo (lo cual debe suceder en un tiempo similar al de reacción, es decir, ~ 1 ms), también puede provocar una recuperación muy lenta del dispositivo una vez eliminado el fallo, ya que el superconductor seguiría disipando y ofreciendo impedancia en la línea, algo indeseable (M. R. Osorio *et al.*, *Applied Superconductivity 1999* (EUCAS'01), Inst. Phys. Conf. Ser. No 167, **1**, ed. X. Obradors *et al.* (Bristol: Institute of Physics Publishing, J. W. Arrowsmith Ltd.) p. 1013 (2000), y M. R. Osorio *et al.*, Physica C, **372-376**, 1635 (2002)).

Por otro lado, el sobrecalentamiento puede provocar la degradación del elemento superconductor (incluso su fusión), especialmente debido a la presencia de *puntos calientes* o *zonas débiles*, que son regiones del material con, por ejemplo, menor temperatura crítica, T_c , o bien menor densidad de corriente crítica, J_c . Los superconductores llamados de *baja temperatura crítica* (SBT), cuya T_c es inferior a la de ebullición del nitrógeno líquido (77 K), suelen ser metálicos, y la homogeneidad es bastante buena. Además, poseen una conductividad térmica elevada (~ 100 W/m-K), por lo que el calor generado en la transición puede evacuarse con cierta facilidad al medio refrigerante. Estas propiedades los hacen poco sensibles al problema de los puntos calientes. Sin embargo, los *superconductores de alta temperatura crítica* (SAT) son cerámicos y mucho más heterogéneos. Por una parte en lo que se refiere a la estequiometría, pudiendo coexistir una fase dominante con proporciones no despreciables de precursores o productos intermedios. Por otra, tienen una estructura menos uniforme que un metal. Así, los SAT granulares están formados por una multitud de pequeños granos unidos entre sí, de forma que la transición al estado disipativo afecta primero a las

fronteras intergranulares y, posteriormente, al interior del grano. Además, su conductividad térmica es mucho más reducida (~ 1 W/m-K), por lo que si existe una zona débil y se sobrecalienta, su expansión sería lenta y podría producirse un daño local en el material que empeorase las prestaciones del limitador.

La utilización de limitadores inductivos con corrientes elevadas exige el empleo de núcleos magnéticos de gran sección y, por lo tanto, de anillos superconductores con un diámetro lo suficientemente grande como para actuar como secundarios (decenas de centímetros). El aumento de las dimensiones de los anillos plantea problemas de falta de homogeneidad, dificultad en la fabricación y mala refrigeración (la relación entre la superficie que está en contacto con el medio refrigerante y el volumen del anillo es baja).

Algunos investigadores han propuesto solucionar estos problemas fabricando anillos superconductores de grandes dimensiones a partir de pequeños trozos que, posteriormente, se unen mediante un material muy similar que actúa como una cola (A. Leenders *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., **11**, 3728 (2001); K. Iida *et al.*, Physica C, **370**, 53 (2001), y S. Haseyama *et al.*, Physica C, **354**, 437 (2001)). Otros autores han utilizado como secundario una bobina metálica normal que se cortocircuita mediante una barra o bobina de material superconductor (P. Tixador, IEEE Trans. Appl. Supercond., **5**, 1055 (1995); X. Granaños *et al.*, Physica C, **372**, 1680 (2002), y X. Obradors *et al.*, Supercond. Sci. Technol., **13**, 879 (2000)), o bien con una película delgada (H. Choi *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., **14**, 1833 (2002)). Estos limitadores híbridos tienen la ventaja de eliminar la necesidad de emplear superconductores de grandes dimensiones, como ya hemos comentado uno de los más importantes inconvenientes de los limitadores inductivos, pero presentan pérdidas óhmicas en los contactos metálicos asociados con los elementos superconductores, incluso en ausencia de fallo alguno en la línea. Además, resulta muy complicado hacer uniones metal-superconductor de óptima calidad, lo que en ocasiones conlleva que la transición sea muy heterogénea, debido a que el calor generado en la parte metálica al paso de una corriente elevada afecta más a las partes más próximas del superconductor (X. Obradors *et al.*, Supercond. Sci. Technol., **13**, 879 (2000)).

La presente invención consiste en un limitador inductivo de corriente, un dispositivo capaz de limitar una alta corriente de fallo en una línea de distribución de energía eléctrica utilizando para ello anillos de pequeño diámetro (entre 1 y 10 cm), los cuales pueden ser suplidos por películas superconductoras depositadas sobre un sustrato adecuado cuya actuación sería totalmente equivalente. El limitador está constituido por un núcleo compuesto por un grueso brazo central, en el cual se dispone el bobinado primario, y un conjunto de brazos laterales de menor sección transversal en los que se dispone un conjunto de anillos superconductores que actúan como secundario del transformador (en el caso de que se utilicen películas, éstas deberán tener un orificio central que permita acoplarlas en el núcleo). El número requerido de brazos y anillos viene dado por la potencia que se quiera transmitir en la línea en la cual se instale el dispositivo. A mayor número de anillos, más alta es la potencia que se puede limitar, ya que la corriente crítica global del dispositivo aumenta (S. R. Currás *et al.*, Cryogenics, **37**, 653 (1997)). Por otra parte, los brazos laterales,

cuya sección es reducida para permitir el acomodo de los anillos de pequeño diámetro, tienen la función de ofrecer un camino al flujo magnético que sea equivalente al de un transformador de sección uniforme e igual a la del brazo central. De esta forma, la impedancia del dispositivo se mantiene y, por lo tanto, también su capacidad limitante.

El número de brazos y anillos puede incrementarse siguiendo este esquema, según las exigencias de impedancia y corriente limitada que se deseen. Para un limitador de alta potencia, se requerirá un núcleo de gran sección uniforme, A, dada por

$$A \geq \frac{V_{\text{eficaz}} \sqrt{2}}{\pi \nu N_p B_{\text{sat}}}$$

donde V_{eficaz} es el voltaje de la línea, ν la frecuencia de la señal de voltaje, N_p el número de vueltas del primario y, B_{sat} el campo de saturación del material magnético del núcleo. Con el diseño propuesto para el limitador, el brazo central (en el cual se halla el primario) tendrá la misma sección, A, y el número de brazos laterales vendrá dado por el cociente A/A_{lateral} , donde A_{lateral} es la sección de los mencionados brazos, y estará determinada por el diámetro de los anillos superconductores. Por último, los secundarios estarán repartidos por igual en todos los brazos, y su número será, como mínimo, igual al de brazos laterales.

Para un número de anillos superconductores dado, la impedancia del limitador depende de la sección del brazo central. Por eso, si se juntan varios núcleos formando uno de mayor área y más brazos, la capacidad de limitación se ve incrementada. Así, con cuatro núcleos la impedancia es mayor que con tres, con dos, y ésta a su vez mayor que con uno solamente. De forma equivalente, al incrementarse la sección central y el número de brazos por encima de cuatro, el limitador puede funcionar a potencias cada vez más altas y ofrecer, cuando se produce un fallo, una alta impedancia que limite la corriente eléctrica.

Ejemplo 1

Construimos un limitador superconductor inductivo formado por un conjunto de cuatro núcleos de hierro-silicio (3%), unidos entre sí mediante un primario común que los abraza en la zona de mayor sección, y ocho anillos superconductores de Bi-2223 ($\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.26}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$).

El esquema del dispositivo se muestra en la Figura 1. a, y una fotografía del mismo en la Figura 1. b. Está formado por 4 núcleos toroidales (T), y sus correspondientes anillos superconductores (S). El primario (P) abraza los cuatro toroides, y está conectado en serie a la línea que se quiere proteger de un fallo (C). Los núcleos están constituidos por láminas de material de 0.3 mm de espesor, enrolladas unas sobre las otras pero aisladas eléctricamente entre sí para minimizar las pérdidas producidas por las corrientes que se inducen en ellas (el aislante representa una pérdida de material magnético de un 5%). La longitud de camino magnético es de 14 cm, y la sección de cada uno de los brazos laterales de 2.3 cm², siendo la sección central de 9.2 cm². El campo magnético de saturación, B_{sat} , es de aproximadamente 1.7 T. El primario está construido con hilo de cobre de 0.3 mm de diámetro y tiene 40 vueltas. Los anillos superconductores tienen 0.5 cm de altura, 2.1 cm de diámetro interno y 0.25 cm de espesor de pared. Su temperatura

crítica es $T_c = 108 \text{ K}$, y su densidad de corriente crítica a la temperatura de ebullición del nitrógeno líquido (77 K) es $J_c > 1000 \text{ A/cm}^2$.

Para estudiar la actuación del limitador, se conectó a un circuito eléctrico en el cual se simuló un fallo al eliminar una resistencia. La impedancia del limitador antes del fallo es de unos 0.75Ω , y tras el mismo, de ≈ 4.8 y 3.5Ω , según se empleen uno o dos anillos superconductores por brazo lateral. En cada caso, la corriente que debe circular por el primario para provocar la transición de los secundarios al estado disipativo es de aproximadamente 2.5 y 5 A .

La Figura 2 muestra las curvas de corriente en el primario, I_p , frente a voltaje aplicado en la línea, V_{aplicado} , con el fin de ilustrar la diferencia en corriente limitada cuando se incrementa el número de anillos superconductores en cada brazo, y la variación de impedancia a medida que se añaden núcleos para incrementar la sección del transformador. Los datos experimentales de esta figura se refieren a la configuración experimental del Ejemplo 1 (4 núcleos y 1 ó 2 anillos en cada brazo lateral), así como a dos diseños diferentes de limitador, uno con 2 núcleos y el otro sólo con 1 y, en cada caso, con 1 ó 2 anillos en los brazos laterales. Los bobinados primarios tienen en todos los casos 40 vueltas.

Leyenda para la figura 2:

- ◇ - Un núcleo y un anillo
- ▽ - Un núcleo y dos anillos
- △ - Dos núcleos y un anillo en cada uno
- - Dos núcleos y dos anillos en cada uno
- - Cuatro núcleos y un anillo en cada uno
- ☆ - Cuatro núcleos y dos anillos en cada uno

La Figura 2 muestra que, cuanto mayor es el número de anillos superconductores, más alta es la corriente que se necesita para alcanzar la transición al estado disipativo (que se aprecia como un cambio de pendiente de las curvas, correspondiendo la recta inicial al estado superconductor): para un anillo se ha marcado con I_c , y para dos anillos con $2I_c$. También se puede ver en esta figura que la pendiente de las curvas I_p - V_{aplicado} se vuelve menor al aumentar el número de núcleos, y por lo tanto la sección central y el número de brazos laterales. Esto indica que la impedancia, Z , crece, ya que $Z = V_{\text{aplicado}}/I_p = 1/\text{pendiente}$. Tras producirse un fallo y con un único núcleo, las impedancias son 2.7 y 1.9Ω , según se empleen 1 ó 2 anillos. Con dos núcleos son 3.6 y 2.3Ω .

REIVINDICACIONES

1. Limitador inductivo de corriente basado en múltiples anillos o películas superconductoras de pequeño diámetro, **caracterizado** por estar constituido por un núcleo magnético, un bobinado primario y varios secundarios superconductores, cuya utilidad es reducir las corrientes de fallo que surgen en los procesos de producción y distribución de la energía eléctrica.

2. Limitador inductivo de corriente, según la reivindicación 1, **caracterizado** por estar constituido por un núcleo magnético con un brazo central de gruesa sección, determinada por las especificaciones de potencia que se quiera transmitir y en torno al cual

se devana el bobinado primario, y un conjunto de brazos laterales de menor área que el central, pero de tal forma que sumen la misma sección.

3. Limitador inductivo de corriente, según la reivindicación 1, **caracterizado** porque los secundarios son anillos o películas superconductoras de pequeño diámetro, preferentemente entre 1 y 10 cm, que se localizan en los brazos laterales.

4. Limitador inductivo de corriente, según la reivindicación 1, **caracterizado** por ser escalable a grandes potencias y adaptable al tamaño de los anillos o películas superconductoras de los que se disponga mediante la alteración del número de brazos laterales y sus secciones transversales respectivas.

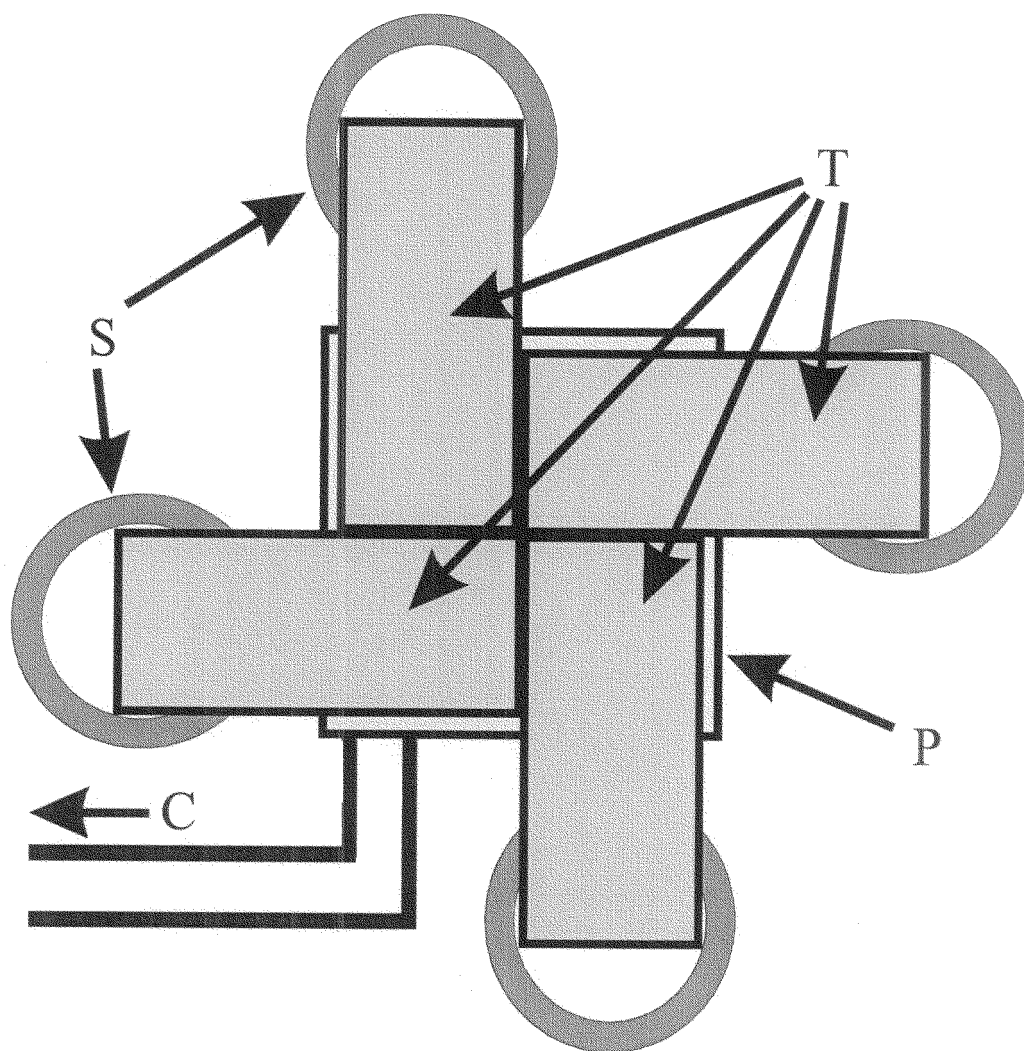


Figura 1. a

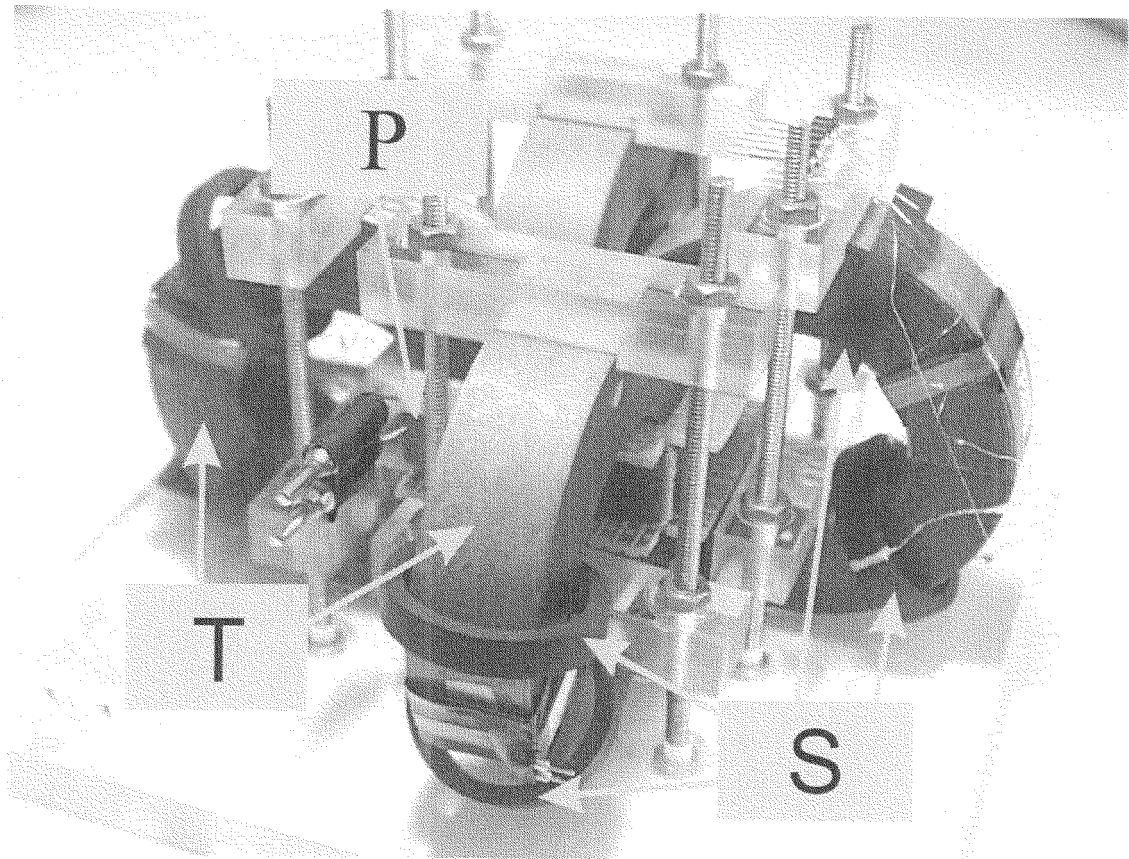


Figura 1. b

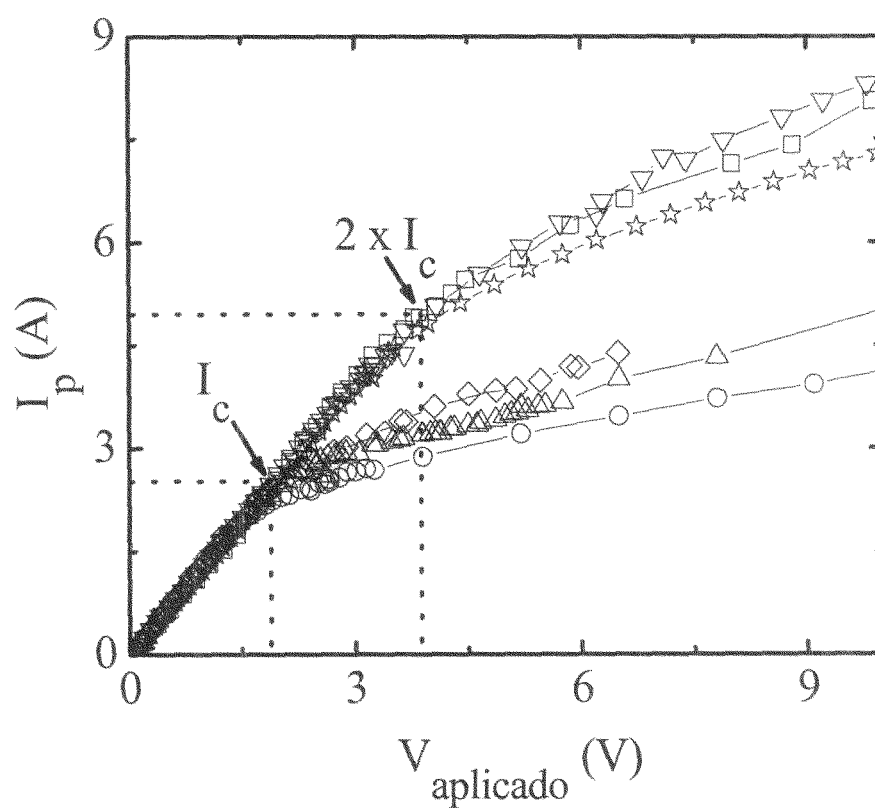


Figura 2



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

⑪ ES 2 235 612

⑫ Nº de solicitud: 200301784

⑬ Fecha de presentación de la solicitud: 28.07.2003

⑭ Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑮ Int. Cl.7: H02H 9/02, H01F 36/00, 6/02

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
X	GB 2321137 A (GEC ALSTOM LIMITED) 15.07.1998, página 3, línea 4 - página 6, línea 3; resumen; figura 1.	1
A		2-4
X	EP 0984462 A1 (OXFORD INSTRUMENT LIMITED) 08.03.2000, párrafos 15-19; figura 1.	1
A		2-4
X	JP 8316534 A (HITACHI LTD) 29.11.1996, resumen. World Patent Index DW0797, nº de acceso 1997-070922[07].	1
A		2-4
X	JP 9009499 A (HITACHI LTD) 10.01.1997, resumen. World Patent Index DW1297, nº de acceso 1997-125987[12].	1
A		2-4
A	DE 19851047 A1 (JOO, BACK et al.) 10.06.1999, resumen; figuras.	1-4

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

☒ para todas las reivindicaciones

☐ para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe
06.06.2005

Examinador
L. García Aparicio

Página
1/1