

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 488 967**

51 Int. Cl.:

H01F 6/00

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.11.2008 E 08854370 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.05.2014 EP 2212980**

54 Título: **Limitador de corriente de fallo, de alta tensión, que tiene bobinas de fase sumergidas**

30 Prioridad:

27.11.2007 US 990362 P

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

01.09.2014

73 Titular/es:

**ASG SUPERCONDUCTORS S.P.A. (100.0%)
Corso F. M. Perrone, 73R
16152 Genova, IT**

72 Inventor/es:

DARMANN, FRANCIS ANTHONY

74 Agente/Representante:

PÉREZ BARQUÍN, Eliana

ES 2 488 967 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Limitador de corriente de fallo, de alta tensión, que tiene bobinas de fase sumergidas

5 **Campo de la invención**

La presente invención se refiere al campo de los limitadores de corriente de fallo, de alta tensión, y, en particular, da a conocer un limitador de corriente de fallo, de núcleo saturado, de alta tensión.

10 **Antecedentes de la invención**

Los limitadores de corriente de fallo (FCL) de núcleo saturado son conocidos. Ejemplos de dispositivos limitadores de corriente de fallo superconductores pueden encontrarse en: la patente de EE.UU. 7193825 de Darmann *et al.*; la patente de EE.UU. 6809910 de Yuan *et al.*; la patente de EE.UU. 7193825 de Boenig; y la solicitud de patente de EE.UU. número de publicación 2002/0018327 de Walker *et al.*

Los limitadores de corriente de fallo descritos son normalmente adecuados para su uso únicamente con disposiciones de bobinas de cobre de tipo seco. De hecho, las disposiciones descritas sólo son adecuadas probablemente para FCL saturados de CC que emplean aire como medio de aislamiento principal. Es decir, el medio de aislamiento estático principal entre las bobinas de fase de CA en un FCL polifásico y entre las bobinas de fase de CA y el núcleo de acero, la bobina de CC, el criostato y la estructura principal se proporciona mediante una distancia adecuada en aire. Esto limita sustancialmente el FCL a tecnologías de aislamiento "de tipo seco". Las tecnologías de tipo seco se refieren normalmente a aquellas técnicas de construcción de transformadores que emplean bobinas de cobre aisladas eléctricamente pero sólo aire estático normal y materiales barrera de aislamiento sólido aislados como equilibrio para el medio de aislamiento. En general, el aire forma la mayor parte del material de aislamiento eléctrico entre el lado de alta tensión y los componentes a tierra del dispositivo tal como el armazón de acero y la carcasa.

La utilización de un aislamiento de tipo seco limita el diseño a intervalos de menor tensión de tensiones de línea de CA de hasta 39 kV aproximadamente. Los transformadores y reactores de tipo seco sólo están disponibles comercialmente hasta niveles de tensión de 39 kV aproximadamente. Como resultado, la tecnología demostrada en la actualidad para FCL saturados de CC no es adecuada para su extensión a versiones de alta tensión. Los diseños de tipo seco dan como resultado la incapacidad de diseñar una estructura compacta de tamaño práctico usando aire como medio de aislamiento cuando se trata de tensiones mayores. Uno de los mercados prácticos principales para los FCL es el intervalo de media a alta tensión (33 kV a 166 kV) y de extra-alta tensión (166 kV a 750 kV). A estos intervalos de tensión, la técnica descrita en la actualidad y las descripciones bibliográficas de los FCL saturados de CC quizás no sean prácticas. El motivo principal son las consideraciones del diseño de tensión estática; por ejemplo, una descarga disruptiva en el medio de aislamiento de aire entre las bobinas de cobre de alta tensión y el criostato o núcleo de acero o bobina de CC. A menudo es necesario sumergir las bobinas de fase de alta tensión a de media a alta tensiones (superior a 39 kV) en un gas de aislamiento (tal como SF₆, nitrógeno), un vacío (mejor que 10⁻³ mbar) o un líquido tal como un aceite de silicona sintético, un aceite vegetal u otros aceites de aislamiento disponibles comúnmente en la tecnología de transformadores y reactores de media, alta tensión y extra-alta tensión. Cuando se sumerge un dispositivo de alta tensión en un medio de aislamiento de este tipo, ese medio se denomina a menudo "medio de aislamiento en masa" o "dieléctrico". Normalmente, el dieléctrico tendrá una permitividad relativa del orden de 2 a 4 aproximadamente, menos un vacío que tiene una permitividad relativa igual a 1. Estos medios de aislamiento denominados dieléctricos tienen propiedades de resistencia a las descargas disruptivas electrostáticas que son muy superiores a las del aire atmosférico si se emplean de manera razonable limitando la distancia máxima entre barreras de aislamiento sólido y optimizando la distancia rellena de dieléctrico con respecto a las propiedades de descarga disruptiva del dieléctrico líquido o gaseoso particular.

Los gases y líquidos de aislamiento en masa disponibles comúnmente tienen normalmente una resistencia a las descargas disruptivas del orden de 10 a 20 kV/mm, aunque habitualmente se emplean de modo que el esfuerzo de campo eléctrico promedio no supere aproximadamente los 6 a 10 kV/mm. Este margen de seguridad con respecto al valor de esfuerzo de descargas disruptivas es necesario porque aunque si el esfuerzo de campo electrostático promedio es de 6 a 10 kV/mm, el esfuerzo de campo electrostático pico a lo largo de cualquier línea de campo eléctrico isostática puede ser de 2 a 3 veces el promedio debido a diversos efectos de mejora del campo electrostático.

En general, hay cinco requisitos deseables principales de un líquido o gas dieléctrico para requisitos de aislamiento en masa de alta tensión en instalaciones alojadas tales como transformadores y reactores y limitadores de corriente de fallo:

- El dieléctrico debe mostrar una resistividad muy alta,
- Las pérdidas del dieléctrico deben ser muy bajas,

- El líquido debe poder albergar aislantes sólidos sin degradar ese aislamiento sólido (por ejemplo, aislamiento entre vueltas en devanados de bobinas o resina epoxi),

5

- La resistencia a la descarga disruptiva eléctrica debe ser alta, y

- El medio debe poder eliminar pérdidas de energía térmica.

10

Las técnicas de aislamiento sólido todavía no están disponibles comúnmente a de media a altas tensiones (es decir, > 39 kV) para dispositivos alojados tales como transformadores, reactores y limitadores de corriente de fallo. La desventaja de las técnicas de aislamiento sólido es la presencia de los inevitables huecos dentro de la masa del aislamiento sólido o entre superficies de materiales distintos tales como entre materiales de aislamiento de bobina y otros materiales de aislamiento sólido. Es bien sabido que los huecos en el aislamiento sólido con altas tensiones producen un alto esfuerzo eléctrico dentro del hueco debido al efecto de mejora de campo. Esto provoca una ruptura física del material circundante debido a descargas parciales y finalmente puede llevar a la formación de corriente superficial y a un fallo completo del dispositivo.

15

Se reconocerá que un limitador de corriente de fallo saturado de CC que emplea una única o múltiples bobinas de CC para saturar el núcleo de acero, tal como se da a conocer en la técnica anterior mencionada anteriormente, genera graves problemas cuando las bobinas de fase de CA de cobre ya no pueden ser de construcción "de tipo seco" o cuando el medio de aislamiento principal del dispositivo completo es aire. Un problema significativo en tales disposiciones es la presencia del criostato de acero para refrigerar la bobina HTS de CC y de la propia bobina HTS de CC. El criostato, la bobina y los núcleos de acero están esencialmente a un potencial de tierra con respecto a las bobinas de fase de CA.

20

Como cuestión secundaria, pero que mejora los requisitos de aislamiento para todas las instalaciones y equipos de alta tensión, normalmente sucede que el diseño de aislamiento básico también tiene que cumplir determinadas normas de ingeniería eléctrica que someten a prueba la tolerancia a diversos tipos de sobretensiones e impulsos de tipo rayo durante periodos de tiempo predeterminados. Un ejemplo, en Australia, de tales normas son los siguientes:

25

- AS2374 Parte 3. Niveles de aislamiento y pruebas de dieléctricos que incluyen la frecuencia de potencia (PF) y pruebas de impulsos tipo rayo (LI) de todo el transformador.

30

- AS2374 Parte 3.1. Niveles de aislamiento y pruebas de dieléctricos - Separaciones externas en aire.

35

- AS2374 Parte 5. Capacidad para resistir cortocircuitos.

Estas normas no forman una lista exhaustiva de las normas que deben cumplir los equipos eléctricos de alta tensión. Se reconoce que cada país tiene sus propias normas que cubren estas mismas áreas de diseño y la referencia a las normas de un país particular no excluye necesariamente las normas de otros países. De manera ideal, un dispositivo se construye para cumplir con las normas de múltiples países.

40

El cumplimiento de estas normas da como resultado un BIL (nivel de aislamiento básico) para el dispositivo o un "DIL" (nivel de aislamiento de diseño) que habitualmente es un múltiplo de la tensión de línea de CA básica. Por ejemplo, un transformador de media tensión de 66 kV u otro dispositivo alojado tal como un FCL puede tener un BIL de 220 kV. El requisito para cumplir esta norma da como resultado un diseño de tensión estática que es más difícil de cumplir en términos prácticos que considerando solamente la tensión de línea de CA. Las normas aplicables y este requisito resultan del hecho de que una instalación eléctrica práctica experimenta sobretensiones temporales que pueden experimentar las instalaciones y los dispositivos dentro de una red compleja, por ejemplo sobretensiones de tipo rayo y sobretensiones transitorias de conmutación. Por tanto, todo el equipo de una red eléctrica tiene un BIL o DIL apropiado para el peor caso esperado de tensiones transitorias.

45

50

Una consideración inicial del problema de diseño estático para los limitadores de corriente de fallo saturados de CC de alta tensión puede dar como resultado la conclusión de que el problema se soluciona fácilmente alojando solamente las bobinas de cobre de CA de alta tensión en un gas o líquido de aislamiento eléctrico adecuado. Sin embargo, el problema con esta técnica es que el núcleo de acero debe pasar a través del contenedor que contiene el gas o el líquido. Diseñar esta interconexión para un servicio a largo plazo es difícil de resolver mecánicamente. Sin embargo, cabe destacar que resolver el problema de la interconexión de manera electrostática es mucho más complejo y cualquier solución puede ser propensa a fallos o resultar poco económica. El problema es que debe formarse un sellado entre el recipiente que contiene el fluido dieléctrico y el núcleo de alta permeabilidad magnética.

55

60

Otra posibilidad es el uso de barreras de alta tensión sólidas secas entre fases y entre fases y el núcleo de acero y el criostato o una capa de aislamiento de alta tensión alrededor de las bobinas de fase de cobre y en contacto íntimo con las bobinas de fase sin el uso combinado de un líquido o gas dieléctrico. Sin embargo, la no inclusión de un dieléctrico líquido o gaseoso tiene un efecto secundario perjudicial significativo. Se sabe que el campo eléctrico estático en una combinación de aire y otros materiales con una permitividad relativa mayor da siempre como resultado un campo eléctrico mejorado en el material o fluido con la permitividad más baja (es decir, aire). Por

65

ejemplo, considérese un cilindro de cobre conductor con una capa de aislamiento normal para representar el aislamiento entre vueltas, según la ecuación 1.

$$E_x = \frac{U_m}{x \cdot \left\{ \frac{\ln\left[\frac{R}{r}\right]}{\varepsilon_2/\varepsilon_1} + \frac{\ln\left[\frac{d}{R}\right]}{1} \right\}} \quad \text{Ec. 1}$$

5 donde:

- U_m = tensión de fase de CA con respecto a tierra
- 10 • R = radio de un cilindro de cobre que incluye un aislamiento externo [mm]
- r = radio de un cilindro de cobre sin revestimiento [mm]
- 15 • d = distancia desde el centro del cilindro hasta el plano de tierra más cercano [mm]
- ε_2 = constante dieléctrica relativa del aislamiento que cubre el cilindro
- ε_1 = constante dieléctrica relativa del aislamiento en masa en el que está sumergido el cilindro (= 1 para el aire)
- 20 • x = distancia desde el centro del cilindro hasta un punto fuera del cilindro [mm]
- E_x = gradiente de campo electrostático en el punto x [kV/mm]

25 El efecto de mejora de campo está representado por el factor $\varepsilon_2/\varepsilon_1$ y es del orden de 2 a 4 para materiales habituales excepto en caso de emplear un vacío que tenga una permitividad relativa igual a 1. Por tanto, proporcionando un material de aislamiento sólido u otro material de aislamiento adicional (de mayor permitividad eléctrica que el aire) se aumenta el esfuerzo electrostático en el aislamiento de aire en masa del FCL. Cuanto mayor sea la calidad del aislamiento de alta tensión, mayor será el efecto de mejora de campo.

30 Por tanto, usar solamente barreras de aislamiento sólido de dieléctrico, sin inmersión en un líquido o gas dieléctrico, en un FCL aislado con aire no es una opción técnicamente deseable para FCL de alta tensión a más de 39 kV y, de hecho, esta técnica no debería emplearse para fabricar transformadores de tipo seco de alta tensión a más de 39 kV, por ejemplo. De hecho, hasta la fecha no se ha encontrado ninguna técnica que resulte adecuada y, por ello, los transformadores de alta tensión por encima de los 39 kV están aislados con un líquido o gas dieléctrico.

35 El análisis anterior es la razón por la cual los equipos eléctricos de alta tensión alojados están habitualmente sumergidos en su totalidad en un fluido o gas dieléctrico eléctricamente aislante. Es decir, las bobinas de cobre aisladas y el núcleo de acero de los transformadores y reactores están alojados dentro de un contenedor que después se llena completamente con un medio dieléctrico, que es un fluido. Esto reduce sustancialmente los problemas de diseño de tensión electrostática detallados en el análisis anterior. El medio de aislamiento (por ejemplo aceite, vacío o SF6) llena todos los huecos y distancias en masa entre los componentes de alta tensión y los componentes que están esencialmente a potencial de tierra o neutro. En este caso, las barreras de aislamiento sólido pueden incorporarse en el dieléctrico de aislamiento en masa y para muchos líquidos tales como aceite, dividir las grandes distancias con aislamiento sólido mejora la calidad de todo el aislamiento electrostático aumentando la resistencia de campo del fluido dieléctrico a las descargas disruptivas. Esto se debe a que la permitividad relativa del aceite y del aislamiento sólido son muy parecidas entre sí (por lo que los efectos de mejora de campo disminuyen en comparación con el aire) y la tensión disruptiva del medio dieléctrico en masa (expresada en kV/mm) mejora para distancias más pequeñas entre las barreras de aislamiento.

50 Sin embargo, el problema con la técnica de inmersión total es que no puede adaptarse fácilmente a diseños de FCL saturados de CC o a otros dispositivos que incorporan una bobina superconductora como elemento de saturación de CC. Esto se debe a que la bobina superconductora y su criostato o recipiente de vacío son un componente del FCL que también debe sumergirse necesariamente en el fluido dieléctrico.

55 Ningún análisis de la técnica anterior a lo largo de la memoria descriptiva debe considerarse como admisión de que esa técnica anterior es ampliamente conocida o forma parte del conocimiento general común en el campo.

Sumario de la invención

Un objeto de la presente invención es proporcionar una construcción mejorada de un limitador de corriente de fallo de alta tensión.

5 Según la presente invención, se proporciona un limitador de corriente de fallo que incluye: un circuito ferromagnético formado a partir de un material ferromagnético y que incluye al menos un primer ramal y un segundo ramal; un mecanismo de saturación que rodea un primer ramal para saturar magnéticamente el material ferromagnético; una bobina de fase enrollada alrededor de un segundo ramal; un fluido dieléctrico que rodea la bobina de fase; y el mecanismo de saturación no está sumergido en el fluido dieléctrico.

10 En algunas realizaciones, el mecanismo de saturación puede comprender una bobina superconductora refrigerada interconectada a una fuente de alimentación de CC. La bobina superconductora puede estar dentro de un criostato.

15 El limitador también puede incluir un recipiente externo para alojar los componentes del limitador; una serie de terminales montados en el recipiente externo y en el que la bobina de fase puede incluir preferiblemente un conductor de entrada de CA y uno de salida de CA interconectados a unos terminales predeterminados de los terminales. El limitador también puede incluir un tubo de alimentación de refrigerante de baja temperatura interconectado al mecanismo de saturación.

20 El limitador puede utilizarse en una fuente de alimentación multifase para limitar cada fase de la fuente. En algunas realizaciones, un único mecanismo de saturación rodea el circuito ferromagnético de cada fase de la fuente de alimentación multifase. El mecanismo de saturación y la bobina de fase están formados preferiblemente alrededor de la misma parte alargada de material ferromagnético. El mecanismo de saturación puede formarse alrededor de un extremo proximal de la parte alargada y la bobina de fase puede formarse alrededor del extremo distal de la parte
25 alargada. El circuito ferromagnético puede comprender una única parte alargada de material ferromagnético.

En algunas realizaciones, el circuito ferromagnético puede incluir preferiblemente un primer, un segundo y un tercer ramal paralelos entre sí, con partes de la bobina de fase enrolladas alrededor de un primer y un segundo ramal, con el mecanismo de saturación enrollado alrededor de un tercer ramal.

30 Según una realización adicional de la presente invención, se proporciona un limitador de corriente de fallo que incluye: un circuito ferromagnético formado a partir de un material ferromagnético y que incluye al menos un primer ramal, un segundo ramal; un tercer ramal; un cuarto ramal; un mecanismo de saturación que rodea el ramal para saturar magnéticamente el material ferromagnético; una primera bobina de fase enrollada alrededor del segundo
35 ramal; una segunda bobina de fase envuelta alrededor del tercer ramal y una tercera bobina de fase envuelta alrededor del cuarto ramal; y un fluido dieléctrico que rodea las bobinas de fase, y una atmósfera gaseosa que rodea el mecanismo de saturación. El mecanismo de saturación puede comprender una bobina superconductora enrollada alrededor del primer ramal dentro de un criostato.

40 Según una realización adicional de la presente invención, se proporciona un limitador de corriente de fallo que incluye: un circuito ferromagnético formado a partir de un material ferromagnético y que incluye al menos un primer ramal y un segundo ramal; un mecanismo de saturación que rodea un primer ramal para saturar magnéticamente el material ferromagnético durante condiciones sin fallo; al menos una bobina de fase enrollada alrededor de un
45 segundo ramal; y un fluido dieléctrico que rodea la bobina de fase. En algunas realizaciones, el primer y el segundo ramal son preferiblemente adyacentes entre sí y el mecanismo de saturación y la bobina de fase tienen preferiblemente de manera sustancial el mismo tamaño o extensión.

Breve descripción de los dibujos

50 A continuación se describirán realizaciones preferidas de la invención, únicamente a modo de ejemplo, con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

la figura 1 ilustra una vista en perspectiva lateral de un limitador de corriente de fallo saturado de CC de alta tensión monofásico de una primera realización;

55 la figura 2 ilustra una vista en perspectiva lateral de un limitador de corriente de fallo saturado de CC de alta tensión monofásico de una segunda realización;

60 la figura 3 ilustra una vista en perspectiva lateral de un primer limitador de corriente de fallo saturado de CC de alta tensión trifásico;

la figura 4 ilustra una vista en perspectiva lateral de un limitador de corriente de fallo saturado de CC de alta tensión trifásico adicional que tiene un orificio de llenado de refrigerante;

65 la figura 5 ilustra una vista en perspectiva lateral de un limitador de corriente de fallo saturado de CC de alta tensión trifásico que tiene bobinas horizontales;

la figura 6 ilustra una vista en perspectiva lateral de una realización modificada adicional que tiene las bobinas de fase estrechamente adyacentes a la bobina superconductora;

5 la figura 7 ilustra una vista en perspectiva lateral de una realización modificada adicional que incluye un único núcleo de acero alargado para cada bobina de fase; y

la figura 8 ilustra una realización modificada adicional.

10 Descripción de realizaciones preferidas y otras

En las realizaciones preferidas se proporciona un FCL saturado de CC de alta tensión que no sufre sustancialmente los problemas de aislamiento en masa comentados anteriormente. Las bobinas de fase de CA están conectadas a una fuente de CA de alta tensión. La bobina de CC es una bobina de tensión relativamente baja energizada mediante una fuente de CC y utilizada para saturar el núcleo.

Haciendo referencia inicialmente a la figura 1, se ilustra una vista seccionada y en perspectiva lateral de un primer limitador de corriente de fallo de alta tensión monofásico 1. El limitador está diseñado para funcionar sustancialmente según las enseñanzas de funcionamiento de la patente de EE.UU. 7193825 de Darmann *et al.*, extendiéndose al funcionamiento con alta tensión. El limitador 1 incluye dos bucles de núcleo cuadrado de acero, por ejemplo 2, que tienen una sección superior alrededor de la cual se enrolla una bobina superconductora 3. La bobina 3 está colocada en un criostato de refrigeración y actúa para saturar magnéticamente el bucle de núcleo 2 durante el funcionamiento normal.

25 Alrededor de cada uno de los núcleos están enrolladas unas bobinas de fase de CA 5, 6. Las bobinas están interconectadas a través de un conductor que tiene un aislamiento sólido, por ejemplo 13, a casquillos y terminales de alta tensión, por ejemplo 7, 8. La parte inferior del núcleo está sumergida en un fluido o gas dieléctrico 10.

30 La bobina superconductora 3 se alimenta mediante conductores de corriente 12 que están interconectados a casquillos, por ejemplo 11, para una fuente de alimentación externa.

En las realizaciones preferidas, las bobinas de fase de CA 5, 6 están enrolladas en sentido opuesto y conectadas directamente en serie.

35 La bobina portadora de corriente de saturación de CC 3 actúa como mecanismo de saturación para el núcleo de alta permeabilidad, por ejemplo 2, y rodea los ramales del núcleo. En una realización preferida, la bobina portadora de corriente 3 es una bobina superconductora que puede estar rodeada por un aislamiento térmico multicapa 9 y está colocada en un criostato de recipiente de vacío 4. El nivel de vacío requerido en el criostato es adecuado solamente para un aislamiento térmico eficaz, no para un aislamiento electrostático. El criostato de recipiente de vacío 4 puede fabricarse con acero inoxidable, plástico, plástico reforzado con fibra de vidrio o con cualquier otro material adecuado para mantener un vacío.

45 Se requiere un par de bobinas 5, 6 para cada fase con el fin de limitar de manera eficaz la corriente de fallo en ambos semiciclos de la forma de onda de corriente de fallo.

50 Todavía se aplica la teoría básica de los limitadores de corriente de fallo saturados de CC tal como se expone en la patente de EE.UU. 7193825 de Darmann *et al.* Es decir, todo el núcleo de acero se satura hasta un nivel de campo magnético de modo que se minimiza la impedancia de terminal de cada fase en los casquillos de fase de CA. Por ejemplo, para un núcleo laminado de acero que emplea laminaciones de M6, el nivel de saturación puede ser de 2,05 teslas. A este nivel de saturación, la permeabilidad relativa del núcleo de acero es de aproximadamente 1,6. La impedancia de terminal de fase del FCL viene dada por la siguiente ecuación 2:

$$X = [2\pi f \cdot n^2 A / L] \mu_r \cdot \mu_0 \quad [\text{unidades} = \Omega] \quad \text{Ecuación 2}$$

55 donde:

- X es la impedancia de terminal en estado estable de CA del FCL vista por la red cuando no se produce ningún evento de corriente de fallo

60 • f es la frecuencia

- n es el número de vueltas de ca en cada uno de los devanados de fase

- A es el área de sección transversal del núcleo de alta permeabilidad

- L es la longitud magnética eficaz del núcleo de alta permeabilidad por fase

5

- μ_0 es la permitividad del espacio libre

- μ_r es la permitividad relativa del núcleo de alta permeabilidad en el estado saturado

10

Utilizando el diseño mostrado en la figura 1, se minimiza el espacio de ocupación del dispositivo para cualquier tensión de fase de CA dada. Esto es importante en subestaciones situadas cerca del centro de las ciudades. Un mercado importante para los FCL es como mejora de subestaciones existentes y otras instalaciones. A menudo, sólo está disponible una cantidad mínima de espacio de ocupación entre las celdas de transformador existentes.

15

Haciendo referencia a continuación a la figura 2, se ilustra una realización alternativa 20 de un limitador de corriente monofásico. En esta disposición modificada 20, las dos bobinas de fase de CA de alta tensión 22, 23 están montadas en ramales 25, 26 que están interconectados además de manera integral al núcleo de acero 21. El núcleo de acero 21 incluye además un ramal que pasa a través de una bobina superconductora montada horizontalmente 27, que tiene un aislamiento térmico multicapa 30 y un criostato de pared única circundante 31. El criostato se alimenta con gas helio a través de tubos 28, 29.

20

El diseño 20 es particularmente ventajoso para proporcionar un espacio de ocupación reducido porque las dos bobinas de fase, por ejemplo 22, 23, están ubicadas en culatas de núcleo de alta permeabilidad similares conectadas al núcleo de acero 21. Otra ventaja de la disposición 1 es la separación física del devanado de polarización superconductor de baja tensión 27 con respecto a las bobinas de fase de ca de alta tensión 22, 23. Esto simplifica el diseño electrostático para el ingeniero de alta tensión.

25

De manera ventajosa pueden emplearse la manera y técnicas convencionales aplicadas a las bobinas de devanado de alta tensión para fabricar las bobinas de fase convencionales. De hecho, las bobinas de fase pueden ser bobinas de cobre aisladas con papel y el dieléctrico puede ser aceite de silicona sintético que hace que la parte inferior del FCL sea esencialmente como un reactor convencional o transformador de circuito abierto.

30

Otra ventaja de las disposiciones de la figura 1 y la figura 2 es que el criostato y los elementos de paso de alimentación (para corriente, un medio criogénico, sensores, orificios de vacío) no tienen que sumergirse en un dieléctrico líquido y son accesibles desde la parte superior del recipiente completo. Esto hace que la disposición sea más práctica para su aplicación en servicios públicos en los que deben realizarse reparaciones, sustituciones y modificaciones generales en el criostato.

35

Además, no hay nada inherente en las disposiciones que restrinja o limite la relación de aspecto del dispositivo completo a ninguna configuración particular. El espacio de ocupación puede aumentarse para que sea mayor en cualquier diseño si hay espacio disponible, y la altura del FCL puede reducirse según se requiera para despejar líneas de alta tensión entrantes aéreas si fuera necesario.

40

De manera ideal, en la disposición de la figura 2, los ramales inferiores 25, 26 tienen un área de sección transversal reducida. Esto es para garantizar una saturación adecuada de todo el núcleo incluyendo todos los ramales en los que se disponen las bobinas de fase.

45

En una realización preferida, la bobina de saturación de CC es un devanado superconductor. La refrigeración de las bobinas superconductoras de CC puede conseguirse o bien mediante gas criogénico forzado (por ejemplo gas helio a $-213,15\text{ }^\circ\text{C}$ (20 Kelvin) o gas neón a 30 K) u otro gas refrigerante adecuado con una capacidad térmica adecuada. El gas refrigerante, a su vez, puede refrigerarse mediante un intercambiador de calor en un refrigerador criogénico que utiliza gas helio como refrigerante o fluido de trabajo. El intercambiador de calor / refrigerador criogénico puede ubicarse por fuera del limitador de corriente de fallo, a una distancia de hasta 5 metros, por ejemplo, y a una distancia proporcional a la tensión de los casquillos de CA. Ubicando el refrigerador criogénico / intercambiador de calor de manera alejada, pueden llevarse a cabo procedimientos de mantenimiento planificados, trabajo de reparación, comprobaciones y sustituciones mientras que el FCL está en servicio.

50

Además, usando refrigeradores criogénicos / intercambiadores de calor diferentes y redundantes para refrigerar el fluido refrigerante de bobina superconductora, puede conseguirse una robustez de construcción inherente que es necesaria y atractiva para la utilización práctica de limitadores de corriente de fallo en subestaciones y otras infraestructuras de suministro de electricidad críticas.

55

En una realización alternativa, el grado de robustez de refrigeración requerido y el alto nivel de fiabilidad pueden conseguirse con un medio criogénico líquido tal como nitrógeno líquido, neón líquido o helio líquido. Con el fin de integrar de manera práctica una bobina superconductora refrigerada con líquido en el diseño del FCL, el criostato es de la manera más práctica un criostato de pared doble. Esto es para facilitar el diseño de los pasos de alimentación eléctricos desde el entorno atmosférico al entorno criogénico. Debido a la baja tensión / baja corriente de estos pasos de alimentación eléctricos, están disponibles y listos para usar a través de varios distribuidores tales como

60

65

Ceramaseal, Kurt J Lesker, Leybold e ISI.

Una ventaja de utilizar un medio criogénico líquido en la realización preferida en una situación para servicio público es que el dispositivo se vuelve menos sensible a las averías mecánicas, el refrigerante puede almacenarse en un recipiente de almacenamiento aparte y puede diseñarse un acumulador intermedio inherente dentro del propio criostato.

Por motivos de claridad, en la figura 1 no se muestra la forma cilíndrica u otras formas deseadas de las barreras de fase electrostáticas entre el núcleo de acero y las bobinas de fase de CA, las bobinas de fase de CA de diferentes fases, y entre todas las bobinas de fase y el recipiente contenedor que esencialmente está a un potencial de tierra. El diseño y la incorporación de estos elementos es ampliamente conocido por los expertos en el diseño de transformadores de alta tensión. Se reconocerá que la integración de este criostato en la estructura de núcleo de acero propuesta es una tarea sencilla y que el uso razonable de barreras de fase de alta tensión en combinación con el fluido dieléctrico hace que sea un diseño que puede realizarse de manera práctica para un FCL de alta tensión.

En diseños de extra-alta tensión, las bobinas de fase pueden estar a una distancia entre sí incluso mayor con el fin de facilitar el diseño electrostático práctico. En tales disposiciones, las bobinas y núcleos de fase de acero pueden separarse una mayor distancia para permitir al ingeniero de diseño de alta tensión colocar barreras de fase de aislamiento electrostático adicionales cuando sea necesario. Esto permite dividir de manera precisa el líquido o gas de aislamiento dieléctrico incluso en más canales. Esto proporciona un margen considerable para optimizar el diseño para el esfuerzo eléctrico y el esfuerzo de descarga disruptiva eléctrica para el fluido dieléctrico particular empleado.

En todas las variaciones de diseño consideradas en el presente documento, si el elemento de saturación de CC falla de alguna manera, entonces un experto en la técnica reconocerá que el limitador de corriente de fallo se comporta esencialmente como un reactor de núcleo de acero y, si se diseña de manera razonable, no requiere poner la estructura de FCL fuera de servicio. Posibles mecanismos de fallo incluyen la fuente de alimentación, la bobina superconductora, los refrigeradores criogénicos y el recipiente de vacío.

Por otro lado, es bien sabido por los expertos en la técnica del diseño de alta tensión que la interconexión entre el fluido dieléctrico y la atmósfera normal es una región de elevado esfuerzo eléctrico y está sometida a un efecto de mejora de campo eléctrico. La mejora es proporcional a la relación de la permitividad dieléctrica del fluido dieléctrico y el aire. La disposición global del FCL de alta tensión y extra-alta tensión descrita en el presente documento permite un margen considerable para que el ingeniero de diseño de alta tensión diseñe barreras electrostáticas y aisladores de esfuerzo de arrastre conformados adecuados para hacer frente a este efecto. Además, la distancia entre el criostato (que está a un potencial de tierra) y la superficie del fluido dieléctrico puede hacerse tan grande como sea necesario para hacer frente al esfuerzo de campo eléctrico esperado.

Evidentemente, como es bien sabido en la técnica anterior, la utilización de barreras de aislamiento de esfuerzo eléctrico de tipo sólido bien diseñadas también puede emplearse entre la superficie inferior del criostato (potencial de tierra) y la superficie del dieléctrico. Tales barreras deben diseñarse de modo que la tensión de arrastre y el esfuerzo máximo estén dentro de las tolerancias del material elegido.

Además, tal y como se emplea normalmente en transformadores de alta tensión convencionales, el espacio entre el dieléctrico líquido y la parte superior del recipiente de recubrimiento completo también puede llenarse con un gas inerte seco. Normalmente, se emplea nitrógeno gaseoso para transformadores de alta tensión, por ejemplo, entre la parte superior del dieléctrico líquido (por ejemplo, aceite sintético) y la tapa superior del recipiente contenedor. Esto constituye una ventaja para el diseño electrostático. La conducción inteligente de los conductores de bobina de fase es una consideración de diseño adicional para el ingeniero de alta tensión. Los conductores y casquillos de fase para cada par de bobinas pueden colocarse en proximidad relativa entre sí ya que están esencialmente al mismo potencial de tensión. Sin embargo, la distancia entre cada par de conductores de fase y las barreras de aislamiento electrostático debe diseñarse para que sea compatible con el fluido dieléctrico empleado.

También se observará que a diferencia de un transformador de alta tensión, el lado de recipiente de los casquillos de alta tensión necesitará barreras de esfuerzo eléctrico adecuadas que rodeen el conductor de alta tensión totalmente hasta el fluido dieléctrico.

Una ventaja adicional de las disposiciones descritas es que la parte superior de los casquillos de fase de alta tensión empleados en este diseño puede ser casquillos de alta tensión convencionales sin ninguna adaptación o requisito para pasos de alimentación de vacío o pasos de alimentación criogénicos. La única adaptación requerida es la extensión del lado de dieléctrico de la barrera de esfuerzo eléctrico del conductor eléctrico. Esta extensión puede ser un material cerámico u otro material adecuado. La barrera de esfuerzo eléctrico puede extenderse al interior del fluido dieléctrico y por tanto el material elegido debe ser compatible con ese fluido en tales casos, aunque esto no es esencial en ningún caso.

Como es bien sabido, deben evitarse esquinas afiladas en todos los equipos de alta tensión tales como los presentados en la técnica descrita en el presente documento. Por tanto, los conductores de fase deben fabricarse a

partir de un conductor que tenga un radio apropiado para la tensión de diseño (es decir, el BIL), el fluido dieléctrico empleado y la disposición geométrica particular de las bobinas de fase y los criostatos elegidos. Además, la cubierta del criostato, si se fabrica de acero inoxidable u otro material eléctricamente conductor similar, debe fabricarse con esquinas redondeadas de un radio mínimo apropiado para la tensión de fase, BIL, y las distancias en consideración.

5 Si el criostato se fabrica con GFRP, plástico u otros materiales que no sean sustancialmente conductores eléctricamente, entonces la distribución de campo electrostático debe disponerse y diseñarse de modo que la tensión de arrastre a través de la superficie del criostato esté dentro de la tolerancia de diseño para la interconexión aislamiento/dieléctrico.

10 Si el criostato se fabrica usando una tecnología híbrida, por ejemplo una cubierta de acero inoxidable externa y un GFRP interno u otro material eléctricamente no conductor para la cubierta interna, entonces el diseño de campo electrostático debe ser tal que se preste la debida consideración a todos los efectos electrostáticos apropiados incluyendo, pero sin limitarse a, lo siguiente: las separaciones dieléctricas apropiadas entre los conductores de alta tensión y las partes eléctricamente conductoras del criostato; la eliminación de esquinas afiladas en las partes metálicas del criostato; la disposición apropiada de materiales de aislamiento sólido de modo que la tensión de arrastre a través de las partes eléctricamente aislantes del criostato sea apropiada para el dieléctrico y los materiales de aislamiento empleados.

15 20 Las disposiciones dadas a conocer proporcionan un FCL de alta tensión que permite a un ingeniero de diseño de alta tensión emplear la técnica anterior en ingeniería de alta tensión para fabricar un FCL de alta tensión de tipo saturado de CC. El diseño presentado aquí es ventajoso porque pueden emplearse directamente las técnicas de diseño de alta tensión existentes para realizar un diseño de FCL de alta tensión con un devanado de saturación de CC. Un diseño puede emplear fácilmente componentes listos para usar para fabricar un FCL de alta tensión.

25 También resultará evidente que las presentes disposiciones pueden extenderse a sistemas de menor tensión cuando sea necesario. Además, la realización preferida puede extenderse a disposiciones multifase como se describirá a continuación.

30 La figura 3 ilustra una vista en perspectiva lateral de una forma de disposición multifase que puede utilizarse en la práctica. En esta disposición 40, se proporcionan seis bobinas de fase 40 a 46, proporcionándose una bobina de fase de entrada y de salida para cada fase. Cada bobina de fase está interconectada a través de una línea conductora de CA de alta tensión, por ejemplo 48, a un casquillo y terminal de alta tensión, por ejemplo 49, correspondiente. Cada bobina de fase está envuelta alrededor de un núcleo correspondiente, por ejemplo 51. Una bobina de polarización de CC 52 está formada dentro del criostato 53. La bobina 52 se alimenta mediante terminales 56, 57 y se introduce un suministro de nitrógeno líquido al criostato a través de tubos 58, 59.

Las bobinas de fase 41 a 46 se mantienen en el medio de fluido dieléctrico 60 mientras que el criostato se mantiene por encima del medio de fluido dieléctrico 60.

40 La figura 4 ilustra una disposición similar a la proporcionada en la figura 3; sin embargo, en esta disposición, el criostato 70 se llena a través de un orificio de llenado de refrigerante 71 en lugar de a través de los tubos de gas refrigerante, como se muestra en la disposición de la figura 4.

45 Haciendo referencia ahora a la figura 5, se muestra una realización modificada adicional 81 en la que las bobinas de fase, por ejemplo 82, se colocan alrededor de los ramales inferiores del núcleo. Esta disposición tiene la ventaja de que se requiere potencialmente menos fluido dieléctrico 83 para cubrir las bobinas de CA completamente y, por tanto, se consigue una disposición más compacta.

50 Evidentemente, los expertos en la técnica reconocerán que los detalles del diseño electrostático de esta disposición pueden diferir de los de las disposiciones anteriores descritas en el presente documento.

Son posibles realizaciones modificadas adicionales. A continuación se describirá una realización modificada de ejemplo con referencia a la figura 6. Esta realización 90 pretende minimizar la pérdida de densidad de flujo a través de una estructura de alta permeabilidad. Estas pérdidas se deben normalmente a dos efectos principales:

1. El efecto marginal del campo magnético alrededor de la bobina de polarización de CC 91 y el retorno a través de una trayectoria meramente de aire;
- 60 2. Retorno parcial de flujo de núcleo / aire en el que el flujo entra en las culatas superiores pero vuelve a través de una trayectoria de aire en lugar de una trayectoria de alta permeabilidad completa.

A modo de investigación preliminar, se llevó a cabo un análisis FEA en la siguiente estructura: ancho de dimensión de ventana = 450 mm, altura de dimensión de ventana = 650 mm, material: núcleo de acero laminado M6, laminaciones empleadas para construir el núcleo: estructura de núcleo forrada escalonada de 0,35 mm, área de sección transversal final del núcleo: 100 mm x 100 mm, altura total del núcleo = 850 mm, anchura total del núcleo =

650 mm.

5 Con una estructura simulada de este tipo se observó que había una pérdida de densidad de flujo magnético en las culatas y ramales alejados de la siguiente manera: densidad de flujo magnético de ramal interno = 2,35 teslas, densidad de flujo magnético de culata = 1,97 teslas, densidad de flujo magnético de ramal externo = 1,95 teslas.

10 Una manera de superar este efecto es proporcionar amperio-vueltas adicionales de manera que la polarización de la parte de ramal externa esté a un nivel satisfactorio para el funcionamiento del FCL (por ejemplo 1,95 teslas). Sin embargo, como alternativa a este enfoque (es decir, emplear más amperio-vueltas de polarización) es práctico colocar las bobinas de CA, por ejemplo 93, en los ramales laterales próximos cerca de la bobina de polarización 91, como se muestra en la figura 6. De este modo, la densidad de flujo en los ramales inmediatamente por debajo de las bobinas de CA es sustancialmente igual que inmediatamente por debajo de las bobinas de CC. La ventaja adicional de esta técnica es que durante el transitorio de limitación de fallo, el flujo desde las bobinas de CA anula el del núcleo de manera más eficaz. Esto tiene diversos beneficios: un espacio de ocupación más pequeño, se requiere
15 menos conductor para polarizar el núcleo al nivel requerido para una saturación eficaz de todo el núcleo.

20 En una realización modificada adicional, también puede construirse un FCL de núcleo saturado práctico con sólo los ramales centrales en una disposición de núcleo parcial. En la realización de núcleo parcial, las culatas y los ramales externos de cada uno de los núcleos de acero pueden eliminarse.

Haciendo referencia ahora a la figura 7, se ilustra una realización modificada adicional en la que los núcleos de
25 acero, por ejemplo 101, están formados con un único núcleo laminado alargado que emplea laminaciones M6. En un extremo de cada núcleo está formada una bobina de fase de CA de alta tensión, por ejemplo 102. Cada uno de los seis núcleos pasa a través de la bobina de saturación, que puede comprender una bobina superconductora de CC 103. La bobina superconductora 103 mantiene los núcleos saturados.

Esta realización modificada adicional tiene la ventaja añadida de que se requiere menor masa al no tener las culatas y los ramales externos, obteniéndose además un menor espacio de ocupación y un coste de construcción reducido.

30 La figura 8 muestra otro FCL multifase 109, que no está dentro del alcance de las reivindicaciones, que muestra un criostato de bobina de CC completamente sumergido 110 así como bobinas de fase de CA, por ejemplo 111. En esta realización preferida, las bobinas de CA se extienden por la mayor longitud del ramal de CC y de CA, respectivamente. Esto garantiza que durante el fallo se desatura el mayor volumen de material de núcleo permeable y puede dar como resultado un mejor rendimiento de eliminación de fallos en comparación con el caso en el que las bobinas de CA no se extienden hasta la altura máxima permitida de manera práctica en el marco de núcleo.
35

Lo anterior describe características preferidas de la presente invención. Pueden realizarse en la misma modificaciones obvias para los expertos en la técnica sin salir del alcance de la invención.

REIVINDICACIONES

1. Un limitador de corriente de fallo (1, 20, 40, 81, 90, 100), que incluye:
- 5 un circuito ferromagnético (2) formado a partir de un material ferromagnético y que incluye al menos un primer ramal y dos segundos ramales;
- un mecanismo de saturación (3) que rodea el primer ramal para saturar magnéticamente el material ferromagnético;
- 10 una bobina de fase (5, 6) enrollada alrededor de cada segundo ramal;
- caracterizado por:
- 15 un fluido dieléctrico (10, 60, 83) que rodea dicha bobina de fase (5, 6); y
- en el que el mecanismo de saturación (3) no está sumergido en el fluido dieléctrico (10, 60, 83).
2. Un limitador de corriente de fallo según la reivindicación 1, que comprende además una atmósfera gaseosa que rodea el mecanismo de saturación (3).
- 20 3. Un limitador de corriente de fallo según la reivindicación 2, en el que dicho mecanismo de saturación (3) comprende una bobina superconductora refrigerada interconectada a una fuente de alimentación de CC.
4. Un limitador de corriente de fallo según la reivindicación 3, en el que dicha bobina superconductora está dentro de un criostato (4, 31, 53).
- 25 5. Un limitador de corriente de fallo según la reivindicación 1, que comprende además: un recipiente externo (14) para alojar los componentes del limitador; una serie de terminales (7, 8, 49) montados sobre el recipiente externo y en el que dicha bobina de fase incluye un conductor de entrada de CA y uno de salida de CA interconectados a terminales predeterminados de dichos terminales.
- 30 6. Un limitador de corriente de fallo según la reivindicación 5, que comprende además un tubo de alimentación de refrigerante de baja temperatura (28, 29) interconectado al mecanismo de saturación.
- 35 7. Un limitador de corriente de fallo según la reivindicación 1, donde dicho limitador (1, 20, 40, 81, 90, 100) se utiliza en una fuente de alimentación multifase para limitar cada fase de la alimentación.
8. Un limitador de corriente de fallo según la reivindicación 7, en el que un único mecanismo de saturación (3) rodea el circuito ferromagnético (2) de cada fase de la fuente de alimentación multifase.
- 40 9. Un limitador de corriente de fallo según la reivindicación 1, en el que el mecanismo de saturación (3) y la bobina de fase (5, 6) están formados alrededor de la misma parte alargada de material ferromagnético (101).
10. Un limitador de corriente de fallo según la reivindicación 9, en el que el mecanismo de saturación (103) está formado alrededor de un extremo proximal de la parte alargada y una bobina de fase está formada alrededor del extremo distal de la parte alargada.
- 45 11. Un limitador de corriente de fallo según la reivindicación 9, en el que dicho circuito ferromagnético (101) comprende una única parte alargada de material ferromagnético.
- 50 12. Un limitador de corriente de fallo según la reivindicación 1, en el que dicho circuito ferromagnético incluye un primer, un segundo y un tercer ramal paralelos entre sí, con partes de la bobina de fase (22, 23) enrolladas alrededor de un primer y un segundo ramal (25, 26), con el mecanismo de saturación (27) enrollado alrededor de un tercer ramal.
- 55 13. Un limitador de corriente de fallo según la reivindicación 1, que incluye: un circuito ferromagnético formado a partir de un material ferromagnético y que incluye al menos un primer ramal, un segundo par de ramales, un tercer par de ramales, un cuarto par de ramales, un mecanismo de saturación (52) que rodea el primer ramal para saturar magnéticamente el material ferromagnético; primeras bobinas de fase (41, 42) enrolladas alrededor de cada segundo ramal (51), segundas bobinas de fase envueltas alrededor de los terceros ramales y terceras bobinas de fase envueltas alrededor del cuarto par de ramales y un fluido dieléctrico (60) que rodea dichas bobinas de fase (41, 42, 43, 44, 45, 46), y una atmósfera gaseosa que rodea el mecanismo de saturación (52).
- 60 14. Un limitador de corriente de fallo según la reivindicación 13, en el que el mecanismo de saturación comprende una bobina superconductora (52) enrollada alrededor del primer ramal dentro de un criostato (53).
- 65

15. Un limitador de corriente de fallo según la reivindicación 1, en el que el mecanismo de saturación (52) que rodea el primer ramal es para saturar magnéticamente el material ferromagnético (51) durante condiciones sin fallo.
- 5 16. Un limitador de corriente de fallo según la reivindicación 15, en el que dichos primer y segundo ramales son adyacentes entre sí y dicho mecanismo de saturación y dichas bobinas de fase tienen sustancialmente el mismo tamaño o extensión.
17. Un limitador de corriente de fallo (20, 40, 81, 90, 100) según cualquier reivindicación anterior, que tiene además un intervalo de funcionamiento normal de sustancialmente 33 kV a 750 kV.

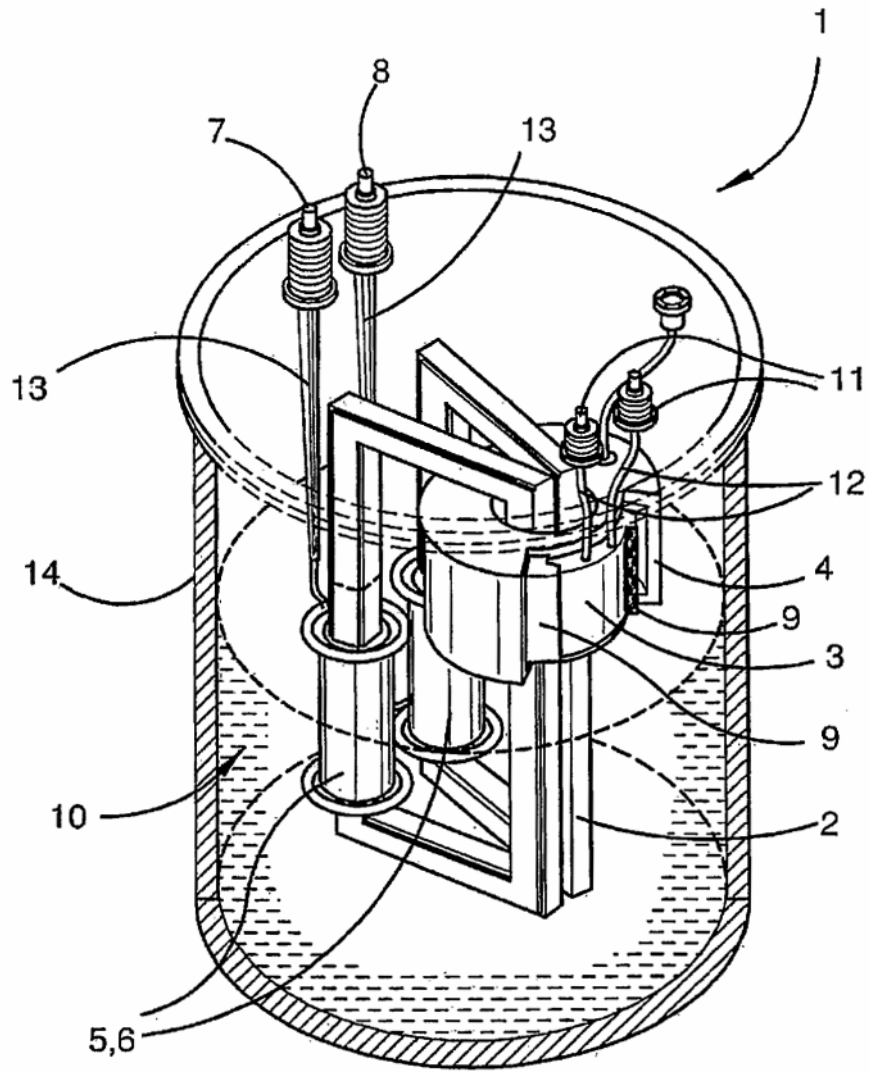


FIG. 1

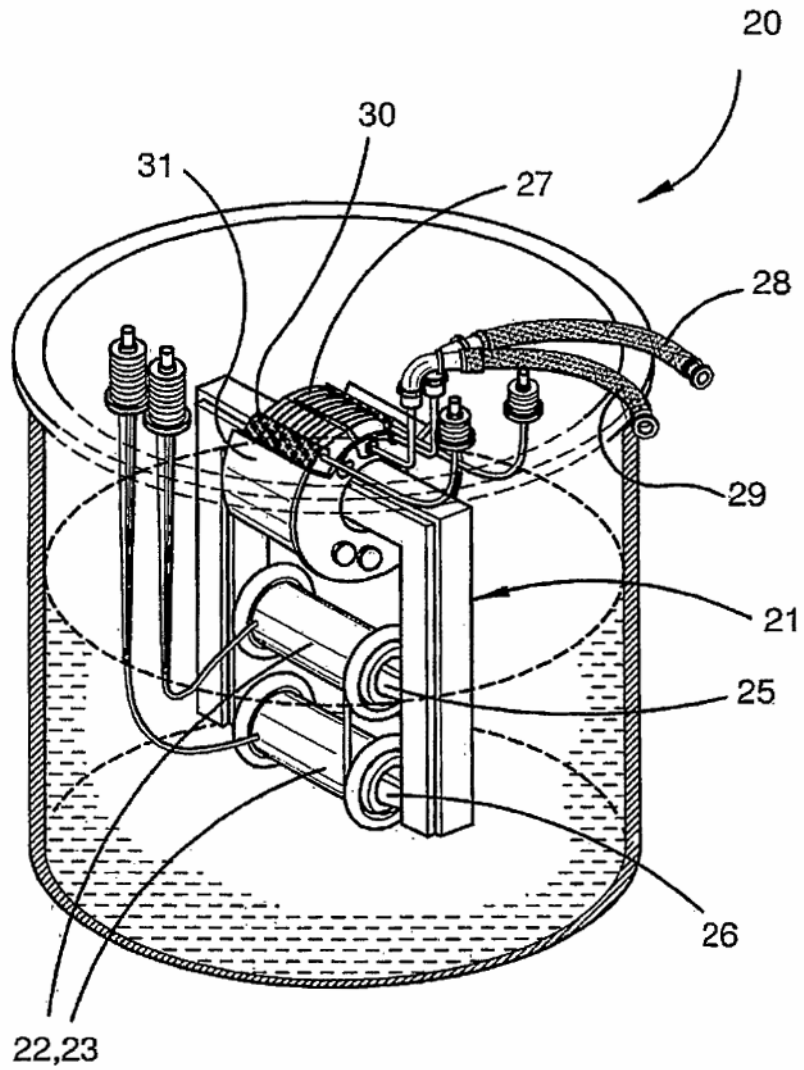


FIG. 2

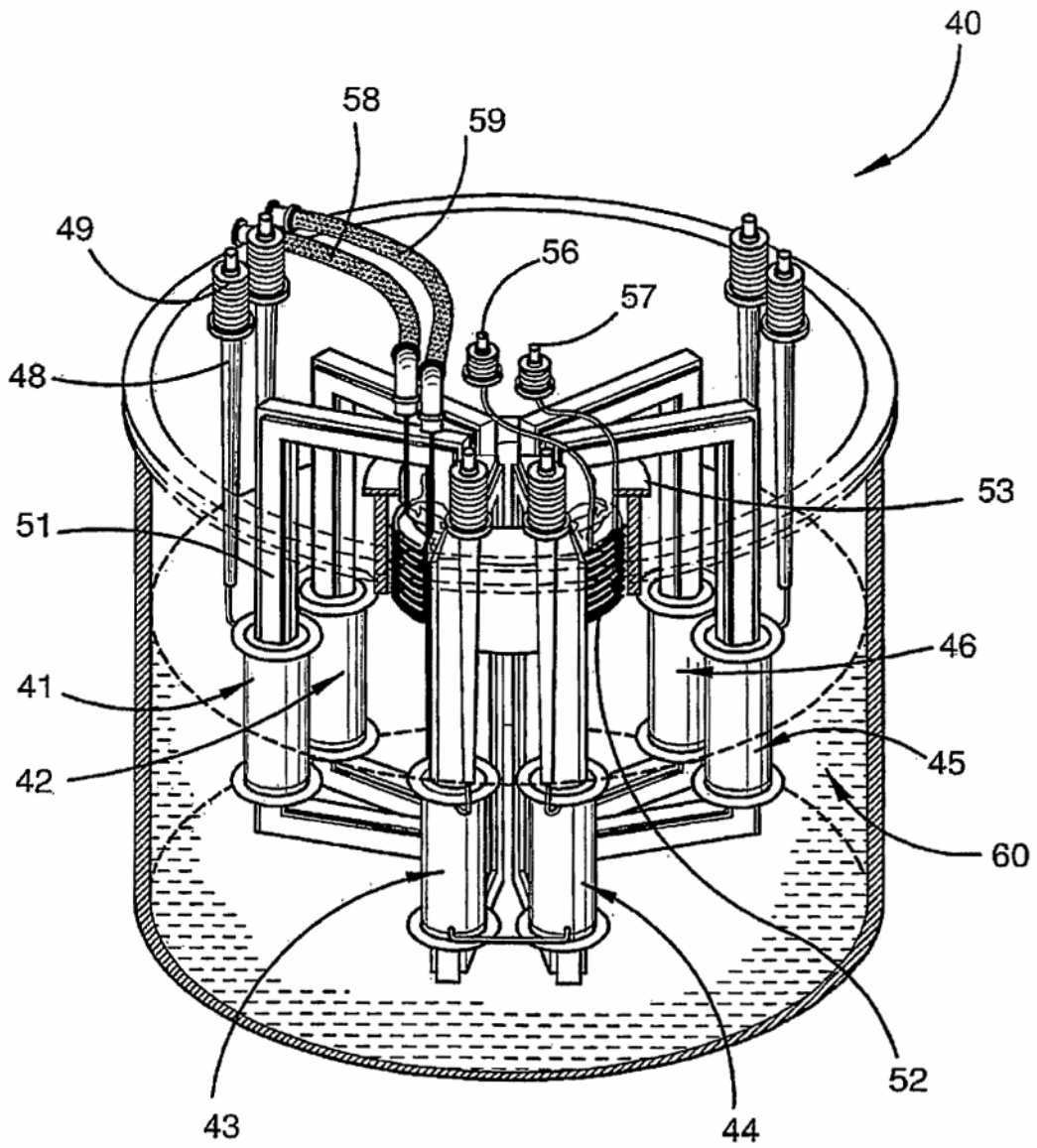


FIG. 3

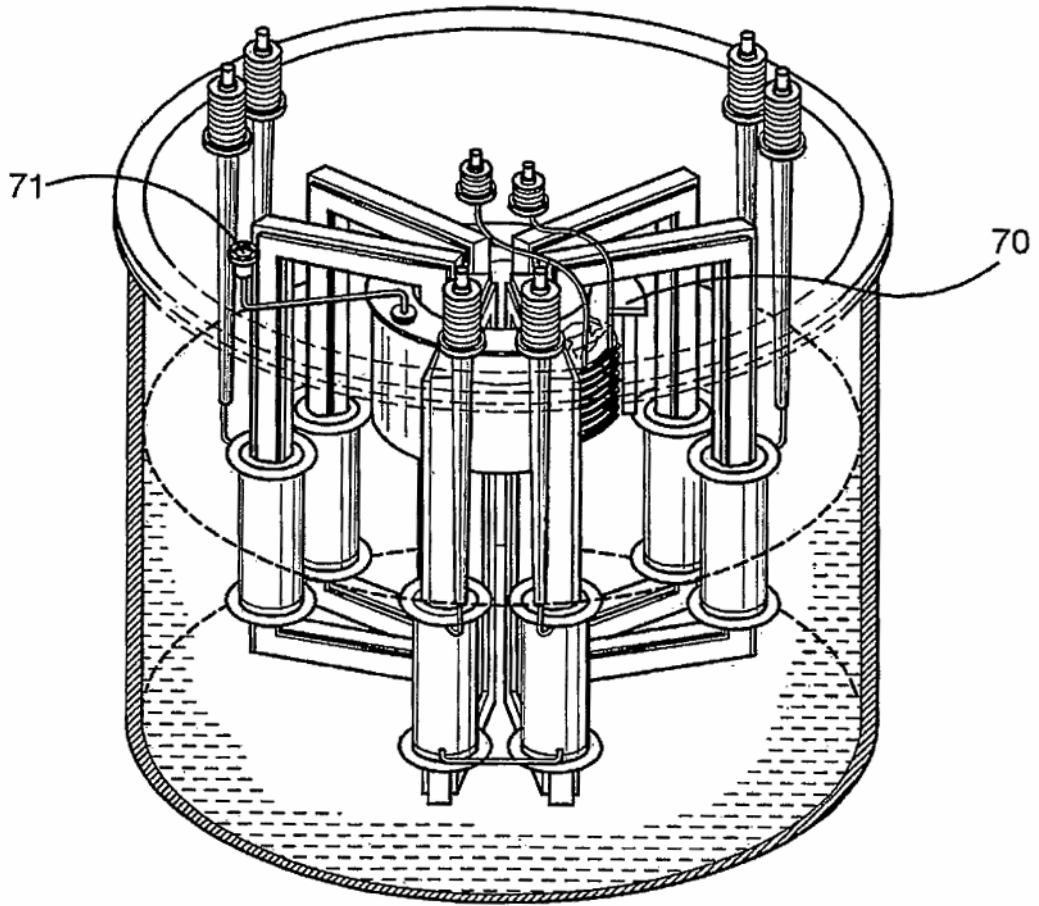


FIG. 4

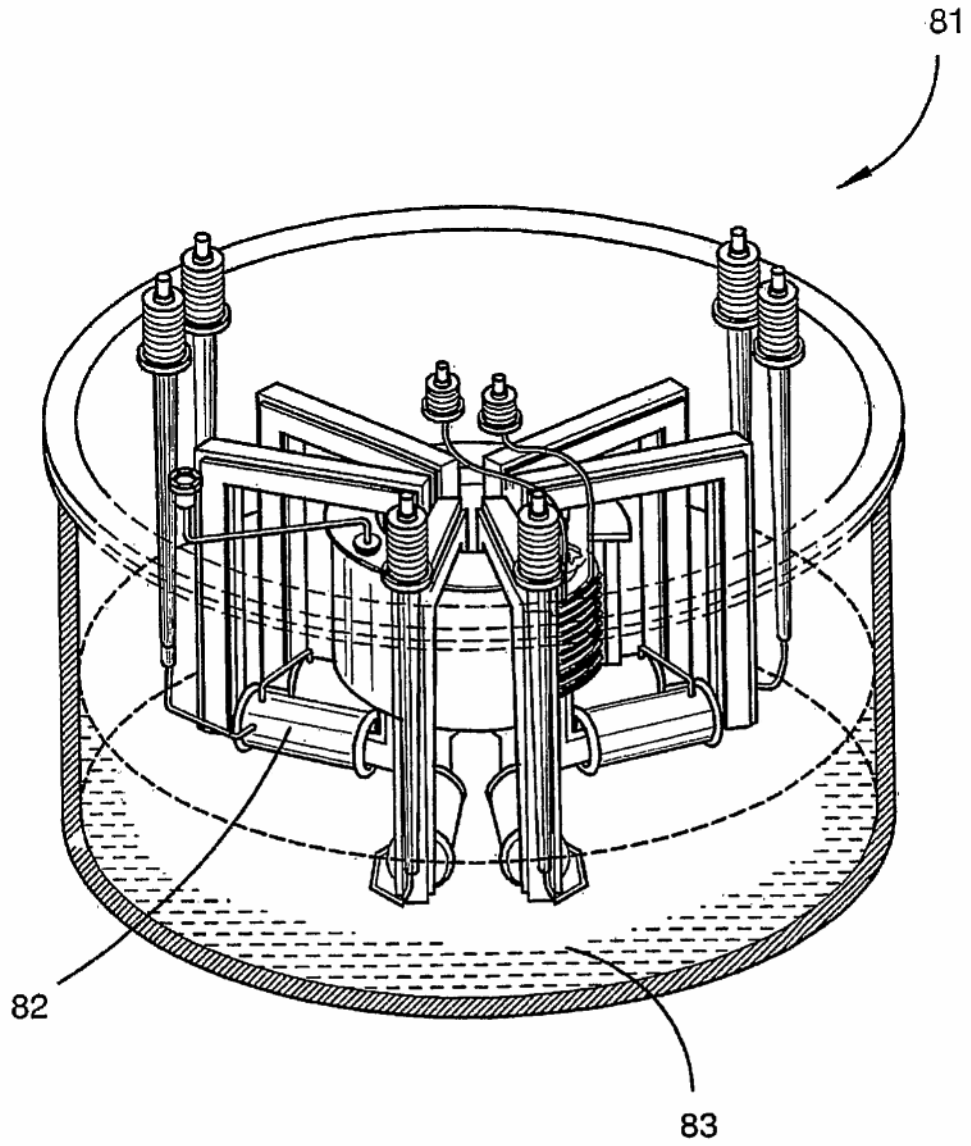


FIG. 5

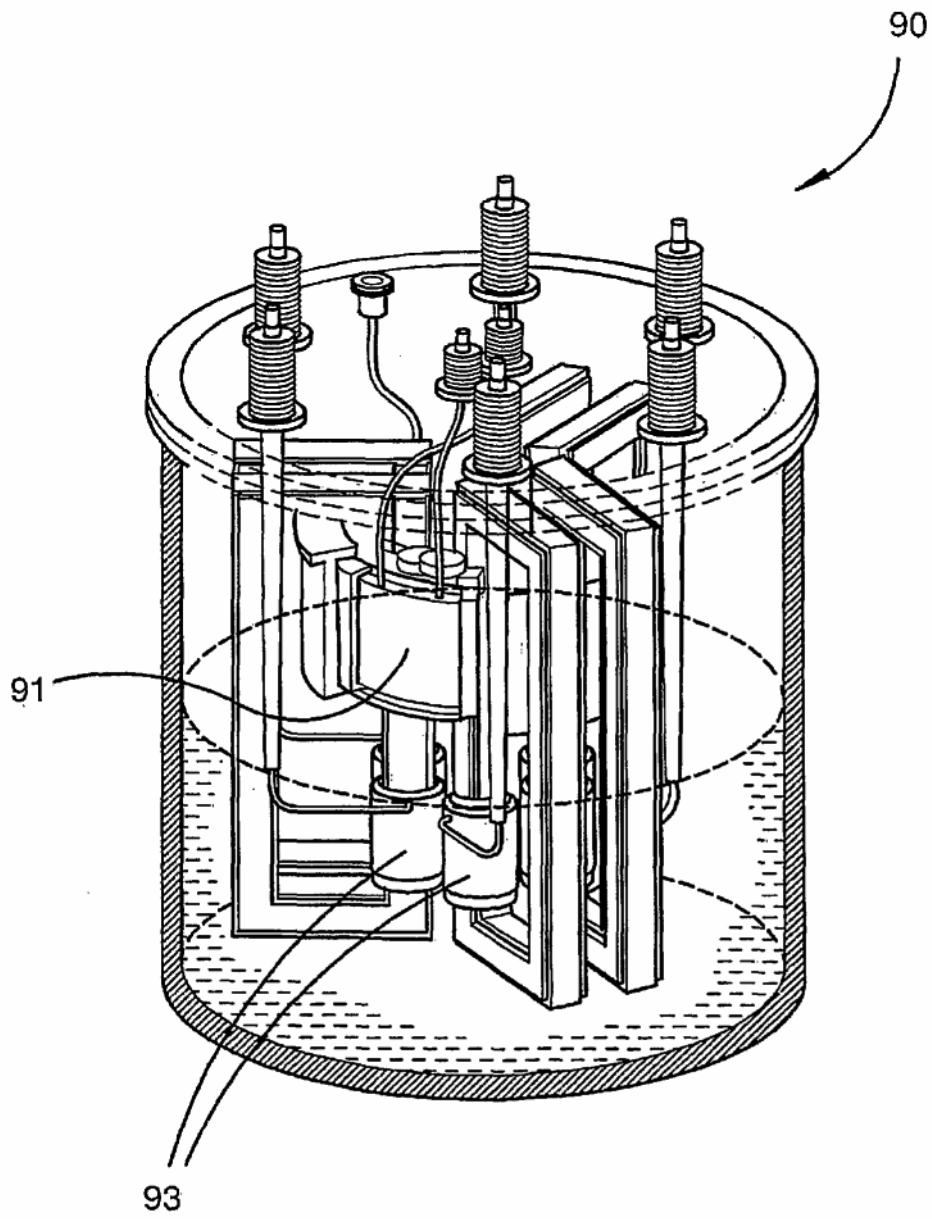


FIG. 6

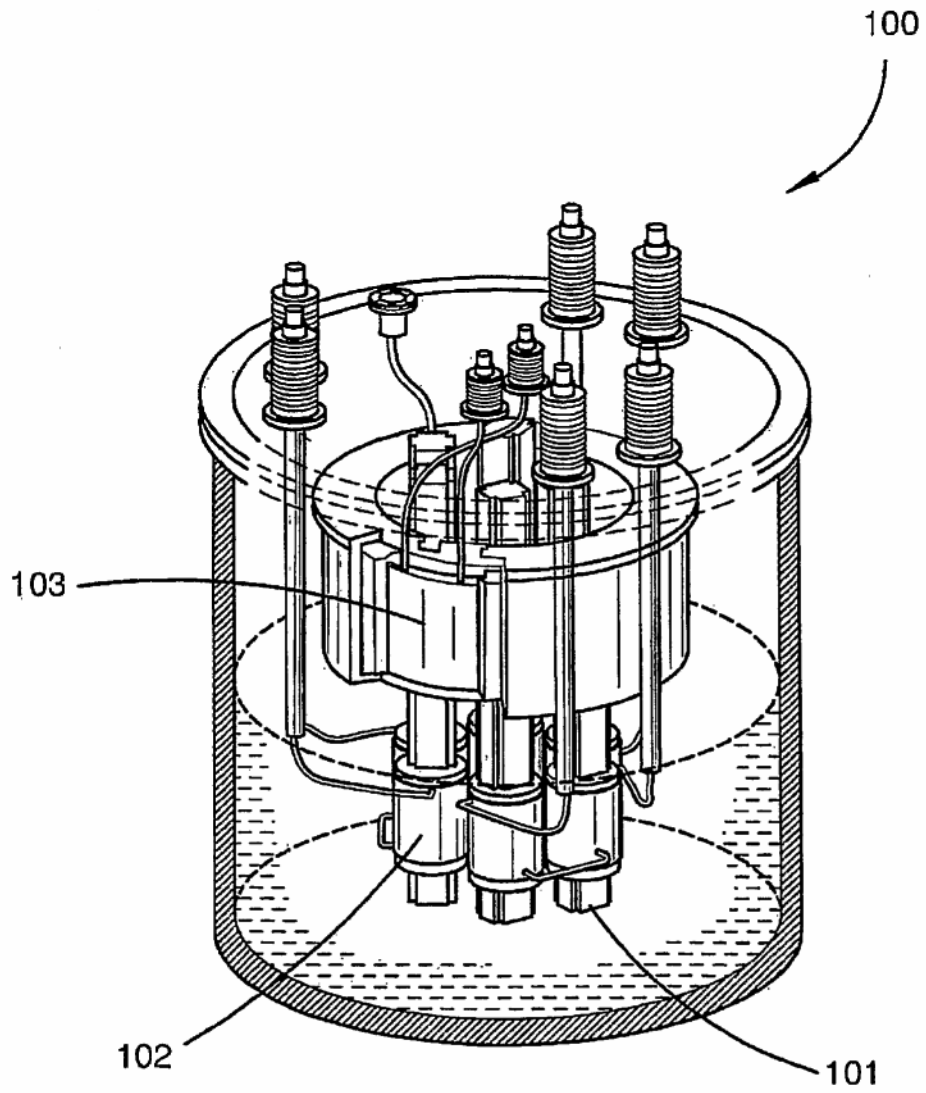


FIG. 7

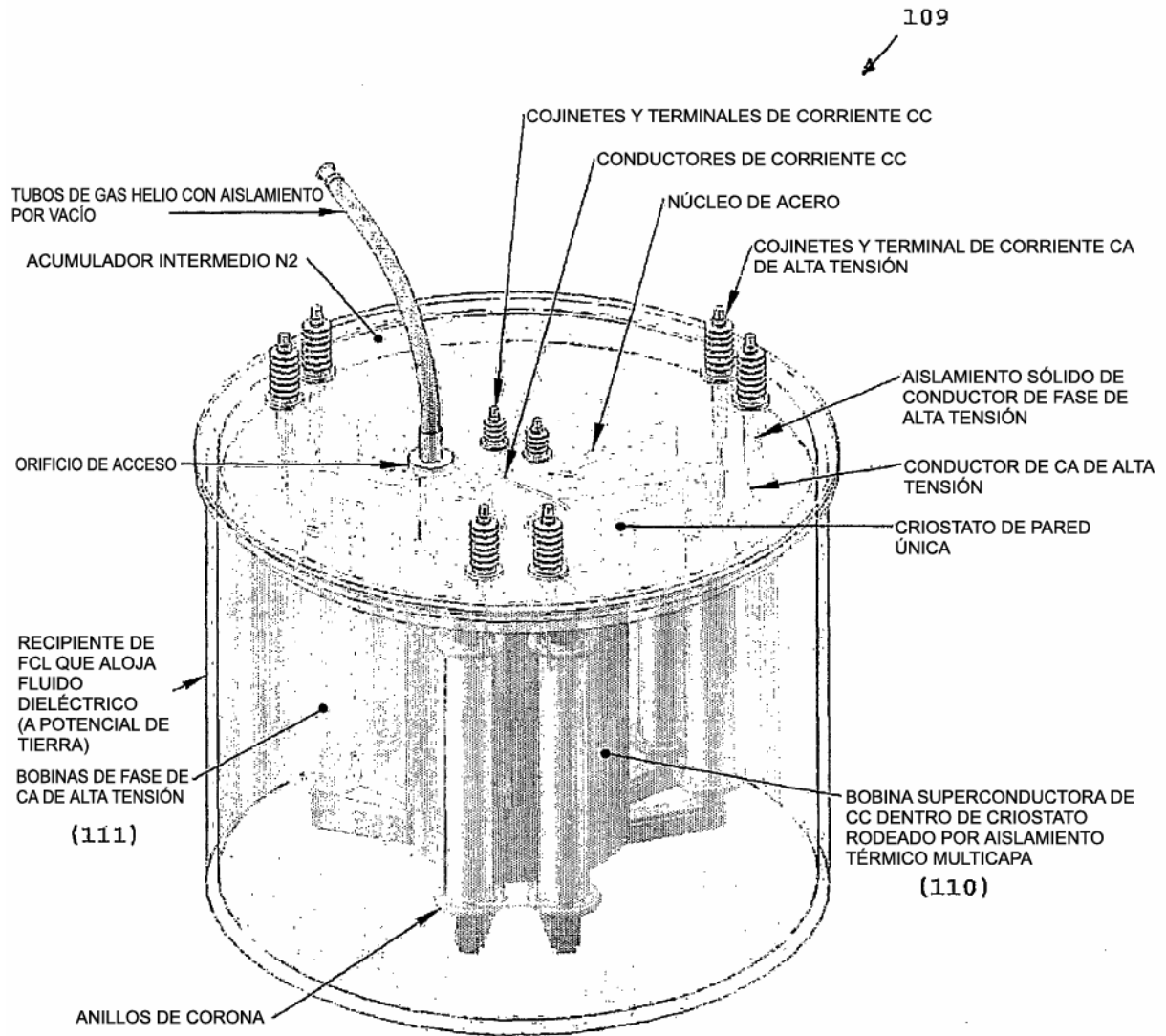


Fig. 8