



19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 359 424**

51 Int. Cl.:  
**H02M 3/00** (2006.01)  
**H02P 9/30** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **06709726 .1**  
96 Fecha de presentación : **13.02.2006**  
97 Número de publicación de la solicitud: **1856790**  
97 Fecha de publicación de la solicitud: **21.11.2007**

54 Título: **Conjuntos excitadores.**

30 Prioridad: **24.02.2005 GB 0503800**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**23.05.2011**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**23.05.2011**

73 Titular/es: **CONVERTEAM UK Ltd.**  
**Boughton Road Rugby**  
**Warwickshire CV21 1BU, GB**

72 Inventor/es: **Crane, Allan David**

74 Agente: **Carpintero López, Mario**

**ES 2 359 424 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

Conjuntos excitadores

**Campo técnico**

5 La presente invención se refiere a conjuntos excitadores, y en particular a conjuntos excitadores para suministrar corriente a los devanados de rotor de una máquina síncrona superconductora.

Técnica anterior

10 Es normal que el rotor de una máquina síncrona superconductora se sitúe dentro de una cámara criogénica (a menudo denominada criostato) de manera que el material superconductor que se usa en los devanados de rotor se pueda mantener por debajo de su temperatura crítica superconductora. Para un material superconductor de temperatura elevada (HTS) tal como BSCCO-2223 ( $\text{Bi}_{(2-x)}\text{Pb}_x\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_2\text{O}_{10}$ ) o YBCO ( $\text{Yba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ) la temperatura en el criostato puede estar entre -246.15 y -163.15 grados Celsius. El resto de la máquina síncrona superconductora permanecerá a una temperatura ambiente de aproximadamente 26.85 grados Celsius. Para los fines de esta memoria de patente, el término "entorno frío" se usará para referirse al entorno de temperatura baja en el interior del criostato y el término "entorno caliente" se usará para referirse al entorno de temperatura ambiente en el exterior del criostato.

15 Es esencial para el funcionamiento de la máquina síncrona superconductora que los devanados de rotor se exciten suministrándoles una corriente de campo. En una máquina síncrona superconductora típica la corriente de campo pleno se suministra a los devanados de rotor a través de un par de conductores de transferencia que pasan del entorno caliente al entorno frío a través de una pared del criostato. La corriente de campo es proporcionada por una fuente de alimentación eléctrica y se puede suministrar a los conductores de transferencia usando un par de anillos colectores y contactos de escobilla. Los conductores de transferencia están diseñados para minimizar la transferencia de calor perdido entre el entorno caliente y el entorno frío para reducir cualquier posible impacto adverso sobre las condiciones de prestación del sistema de enfriamiento criogénico. Sin embargo, los conductores de transferencia deben tener también un área de sección transversal considerable si tiene que llevar la corriente de campo pleno, que puede ser de entre 10 y 2000 amperios. Incrementar el área de la sección transversal también incrementa la cantidad de transferencia de calor perdido a través de los constructores de transferencia. Por lo tanto, en la práctica, el diseño de los conductores de transferencia debe ser un compromiso entre la necesidad de maximizar la capacidad de llevar corriente y a la vez intentar minimizar la transferencia de calor perdido.

20 La patente de los Estados Unidos 6420842 describe un conjunto excitador para suministrar una corriente de campo a los devanados de rotor de una máquina síncrona superconductora. El conjunto excitador incluye un transformador 106 que tiene un devanado primario 108 y un devanado secundario 112. El devanado primario 108 recibe corriente de una fuente de alimentación CA 110 que es preferiblemente una fuente de excitación de alta frecuencia (por ejemplo 400 Hz a 2 kHz)- El transformador 106 es por lo tanto alimentado por una fuente de alimentación en modo conmutado. En la práctica, se apreciará fácilmente que el transformador 106 puede o no ser un transformador de impulsos dependiendo de si la fuente de alimentación en modo conmutado es filtrada o no.

25 Un voltaje CA se suministra desde el devanado secundario 112 a un rectificador puente de onda completa 114 cuya salida de corriente CC se suministra al condensador de almacenamiento 116. El voltaje CC a través del condensador de almacenamiento no se describe como siendo regulado de cualquier manera particular. El voltaje CC se convierte en una corriente regulada en modo conmutado que fluye en el devanado de campo 102 por dispositivos semiconductores de potencia giratorios 120, 122 y 138 que se puede situar bien en un entorno criogénico o un entorno caliente según se requiera. Cuando los dispositivos semiconductores de potencia giratorios 120, 122 y 138 se sitúan en un entorno criogénico, una corriente pulsada fluye en los conductores de transferencia que pasan entre entornos caliente y criogénico. Cuando los dispositivos semiconductores de potencia giratorios 120, 122 y 138 se sitúan en un entorno caliente, una corriente sustancialmente no pulsada fluye en los conductores de transferencia que pasan entre los entornos caliente y criogénico. En ambos casos, los dispositivos semiconductores de potencia de regulador de modo conmutado están en un entorno giratorio y llevan corriente de campo. Un proceso de regulación de corriente de campo usa un enlace telemétrico que comprende una interfaz de controlador de máquina estacionaria 134 y una interfaz de controlador de bobina de campo giratoria 130 que emplean transmisión y recepción óptica infrarroja de portador modulada por código de impulsos con el fin de transferir bidireccionalmente señales reguladoras entre entornos estacionario y giratorio. Un sensor de corriente 132 se sitúa en el entorno giratorio y es necesario transferir datos desde este sensor por el enlace telemétrico para permitir realizar una regulación de bucle cerrado de la corriente de campo.

30 En consecuencia, hay una necesidad de un conjunto excitador alternativo que no requiere que los dispositivos semiconductores de potencia de regulador en modo conmutado y un transductor de corriente de campo estén en un

entorno giratorio y de que estos tengan que comunicarse con el entorno estacionario con el fin de permitir la realización de una regulación de bucle cerrado de corriente de campo.

### Sumario de la invención

- 5 La presente invención proporciona un conjunto excitador para suministrar corriente de campo a los devanados de rotor de una máquina superconductora síncrona, comprendiendo el conjunto excitador:
- un transformador de impulsos que tiene un devanado primario y un devanado secundario;
  - una fuente de alimentación en modo conmutada para suministrar una corriente pulsada CC al devanado primario del transformador de impulsos; y
- 10 - un par de conductores de transferencia para suministrar una corriente pulsada CC desde el devanado secundario del transformador de impulsos a los devanados del rotor,
- caracterizado porque** un controlador (35) para controlar la rectificación síncrona del voltaje pulsado suministrado a los devanados de rotor (16), en el cual el transformador de impulsos (101) incluye, además, un devanado terciario (34) y el controlador (35) controla la rectificación síncrona del voltaje pulsado basado en una señal procedente del devanado terciario (34).
- 15 Lo devanados de rotor se situarán en una región criogénica de la máquina superconductora síncrona tal como dentro de una cámara criogénica o criostato. La región criogénica se denominará en lo sucesivo el "entorno frío".
- El devanado primario del transformador de impulsos es preferiblemente estacionario y el devanado secundario del transformador de impulsos gira preferiblemente en funcionamiento. Tanto los devanados primario como secundario del transformador de impulsos, así como la fuente de alimentación en modo conmutado, se sitúan preferiblemente en el "entorno caliente" fuera de la región criogénica. Los conductores de transferencia se usan para transferir la corriente pulsada CC entre el entorno caliente y el entorno frío, normalmente a través de una pared de la cámara criogénica o criostato.
- 20 La corriente de campo es preferiblemente proporcionada por una fuente de alimentación en modo conmutada que tiene un voltaje de fuerza considerable de manera que, en la puesta en marcha, se puede establecer una corriente de campo de trabajo en los devanados de rotor durante un periodo de tiempo relativamente corto. Durante el funcionamiento normal de la máquina superconductora síncrona, los conductores de transferencia llevarán solamente la corriente de campo durante una pequeña proporción de tiempo.
- 25 El conjunto excitador comprende preferiblemente, además, un dispositivo semiconductor rectificador en serie con el devanado de rotor y un dispositivo semiconductor de efecto volante en paralelo con el devanado de rotor. El dispositivo semiconductor rectificador puede ser un tiristor de apagado por puerta (GTO) u otro dispositivo con características de bloqueo inverso y encendido por puerta similares. El dispositivo semiconductor de efecto volante puede ser un transistor de efecto campo de unión (JFET) o transistor de efecto campo de unión vertical (VJFET), por ejemplo. Los dispositivos JFET y VJFET no experimentan la presencia del diodo de cuerpo parásito, una característica inherente de los transistores de efecto campo de metal-óxido-silicio (MOSFET) y los derivados de carburo de silicio de los mismos. Debido a que no tienen un diodo de cuerpo parásito, los dispositivos JFET y VJFET pueden bloquear voltajes de ambas polaridades bajo control por puerta. Además, los dispositivos JFET y VJFET no experimentan la limitación de prestación de recuperación inversa impuestas por los diodos de cuerpo parásito de otros dispositivos.
- 30 El dispositivo semiconductor rectificador y el dispositivo semiconductor de efecto volante se controlan preferiblemente para la rectificación síncrona del voltaje pulsado suministrado a los devanados de rotor. Contrariamente al conjunto excitador divulgado en la patente de los Estados Unidos 6420842, la rectificación síncrona se controla mediante un controlador electrónico, que usa una señal de tiempo tomada del devanado terciario del transformador de impulsos y suministra impulsos de puerta al dispositivo semiconductor rectificador y al dispositivo semiconductor de efecto volante para encenderlos y apagarlos en los momentos apropiados.
- 35 El conjunto excitador comprende, además, preferiblemente un dispositivo de protección que incluye un inductor en serie con los devanados de rotor y un condensador en paralelo con los devanados de rotor.
- 40 Para proteger los devanados de rotor de dañarse en caso de que se produzca un templado incipiente (es decir, que el material superconductor que forma los devanados de rotor empiece a ser localmente resistivo bien porque la temperatura sobrepasa la temperatura crítica o la densidad de corriente sobrepasa la densidad de corriente crítica o debido a un defecto de devanado, por ejemplo), la fuente de alimentación en modo conmutado se puede apagar y
- 45
- 50

un medio conmutable que incluye una resistencia de descarga de campo (a veces denominada resistencia basculante) se puede emplear en serie con los devanados de rotor con el fin de bajar la corriente de campo. La resistencia basculante está preferiblemente en serie con un dispositivo semiconductor de conmutación tal como un tiristor, tiristor de apagado por puerta (GTO) u otro dispositivo con características de bloqueo inverso y encendido por puerta similares, por ejemplo. La rectificación síncrona se debería inhibir también si se detecta un templado incipiente apagando tanto los dispositivos semiconductores rectificadores y de efecto volante. También se pueden proporcionar medios mecánicos de la protección pasiva de los devanados de rotor. Por ejemplo, se pueden depositar capas metálicas intermedias sobre películas superconductoras de alta temperatura (HTS) con el fin de proporcionar un material eléctrico y térmicamente conductor convencional que está en contacto íntimo con las películas HTS. Es esencial que las respectivas respuestas de estos medios de protección pasiva, el sistema de detección de templado incipiente y el dispositivo de conmutación de la resistencia basculante se coordinen con el fin de proporcionar protección efectiva contra el templado incipiente.

El controlador controla preferiblemente el funcionamiento del dispositivo semiconductor de conmutación, y opcionalmente los dispositivos semiconductores rectificadores y de efecto volante, basados en una señal de realimentación de corriente indicativa de la corriente de campo en los devanados de rotor durante un primer periodo de tiempo cuando se suministra un impulso de voltaje a los devanados de rotor y una señal de realimentación de voltaje indicativa del voltaje a través de los devanados de rotor durante un segundo periodo de tiempo cuando no se suministra un impulso de voltaje a los devanados de rotor. La señal de realimentación de corriente se puede derivar de un transductor de corriente en serie con el devanado primario del transformador de impulsos y la señal de realimentación de voltaje se puede derivar de un transductor de voltaje en paralelo con los devanados de rotor.

Los devanados de rotor se forman preferiblemente a partir de un material HTS tal como BSCOO o YBCO, por ejemplo. Otros posibles materiales HTS incluyen miembros de la familia de tierras raras-cobre-óxido. Se apreciarán fácilmente que los devanados superconductores de campo se pueden formar también a partir de un material superconductor de baja temperatura (LTS) tal como  $Nb_3Sn$  y  $NbTi$  o un material superconductor de temperatura media (MTS) tal como  $MgB_2$  (diboruro de magnesio)

#### Dibujos

La figura 1 es un diagrama esquemático que muestra la topología de un conjunto excitador según la presente invención en esbozo;

La figura 2 es un diagrama esquemático que muestra la topología del conjunto excitador de la figura 1 en detalle;

La figura 3 es un diagrama que muestra las formas de onda moduladas de onda de impulso de la corriente que fluye en el rectificador de diodo, diodo de efecto volante y el devanado de campo;

La figura 4 es un diagrama esquemático que muestra el controlador que se usa para controlar el funcionamiento del conjunto excitador de la figura 1;

La figura 5 es un diagrama que compara el voltaje de devanado de campo y las trazas de corriente para dos resistencias de descarga de campo diferentes y un dispositivo que tiene una resistencia no lineal;

La figura 6A es una vista en perspectiva de un primer transformador de impulsos;

La figura 6B es una vista en sección transversal de un segundo transformador de impulsos de la figura 6A;

La figura 7A es una vista en perspectiva de un segundo transformador de impulsos;

La figura 7B es una vista en sección transversal de un tercer transformador de impulsos de la figura 7A;

La figura 8A es una vista en perspectiva de un tercer transformador de impulsos;

La figura 8B es una vista en sección transversal de un cuarto transformador de impulsos de la figura 8A;

La figura 9A es una vista en perspectiva de un cuarto transformador de impulsos;

La figura 9B es una vista en sección transversal de un quinto transformador de impulsos de la figura 9A;

Ahora se explicará la topología y el funcionamiento básicos de un conjunto excitador según la presente invención con referencia a la figura 1. El conjunto excitador incluye una fuente de alimentación 100 en moto conmutado que se sitúa a temperatura ambiente sobre, o cerca del estator de una máquina superconductora síncrona (la "máquina"). El conjunto excitador incluye también un transformador de impulsos 101 y un primer conjunto de potencia 103 que se sitúan a temperatura ambiente.

La salida de la fuente de alimentación 100 en modo conmutado se conecta al devanado primario del transformador de impulsos 101. El devanado secundario del transformador de impulsos 101 se conecta al primer conjunto de potencia 103. El devanado primario permanece estacionario mientras que el devanado secundario y el conjunto de potencia 103 se fijan al rotor 102 de la máquina y giran con ella. La corriente de campo se suministra a partir del primer conjunto de potencia 103 a un segundo conjunto de potencia 104 que se sitúa dentro del criostato 17 usando un par de conductores de transferencia 14 que pasan a través de una pared del criostato.

El segundo conjunto de potencia 104 controla la circulación de la corriente de campo (comúnmente conocida como acción de efecto volante) en los devanados de rotor de la máquina, representados en la figura 1 por un devanado de campo 16, cuando el primer conjunto de potencia 103 no está suministrando corriente al segundo conjunto de potencia y el devanado de campo. Los devanados de rotor se forman a partir de un material superconductor de alta temperatura (HTS) tal como hilos o cintas BSCCO-2223 o YBCO. Los hilos BSCCO se hace a partir de filamentos de  $(\text{Bi, Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$  en una matriz metálica y tiene una temperatura crítica de -163.15 grados Celsius pero funciona típicamente en motores y generadores a menos de -233.15 grados Celsius. Los hilos o cintas YBCO podrían funcionar a mayores temperaturas en un motor o generador. El YBCO en forma de película fina se podría depositar directamente sobre un rotor de máquina. Un posible proveedor de hilo BSCCO-2223 o YBCO es American Superconductor (AMSC), HTS Wire Manufacturing Facility of Jackson Technology Park, 64 Jackson Road, Devens, Massachusetts 01434-4020 Estados Unidos de América.

La fuente de alimentación 100 en modo conmutado suministra un voltaje pulsado al primer devanado del transformador de impulsos 101. El voltaje pulsado se transfiere entre las partes estacionarias del conjunto excitador (es decir, la fuente de alimentación 100 en modo conmutado y el devanado primario del transformador de impulsos 101) a las partes giratorias del conjunto excitador (es decir, el devanado secundario del transformador de impulsos 101 y el primer y segundo conjuntos de potencia 103 y 104) a través del entrehierro del transformador de impulsos 101. El voltaje pulsado se transfiere entonces entre las partes del conjunto excitador que se sitúan en el entorno caliente (es decir, la fuente de alimentación 100 en modo conmutado, el transformador de impulsos 101 y el primer conjunto excitador 103) y las partes del conjunto excitador que se sitúan en el entorno frío dentro del criostato 17 (es decir, el segundo conjunto de potencia 104) a través de los conductores de transferencia 14. La corriente de campo suministrada al devanado de campo 16 se regula mediante dispositivos semiconductores estacionarios dentro de la fuente de alimentación 100 en modo conmutado. La rectificación síncrona de la corriente de campo se lleva a cabo mediante dispositivos dentro del primer y segundos conjuntos de potencia 103 y 104. El primer conjunto de potencia 103 no regula normalmente la corriente de campo sino que inicia la comunicación de la rectificación síncrona de la corriente de campo si se detecta un templado incipiente del devanado de campo 16. El procedimiento por el cual se detecta el templado incipiente del devanado de campo 16 se describirá más en detalle en lo sucesivo.

La frecuencia portadora de la modulación de ancho de impulso es suficientemente elevada para minimizar la dimensión y la disipación del transformador de impulsos, y para permitir también que la atenuación estructural minimice la generación de ruido y vibración inducidos estructurales. Si el transformador de impulsos suministrado a 60 Hz, la vibración estructural e el transformador de impulsos se excitara por series de frecuencias armónicas con una frecuencia fundamental de 60 Hz, por ejemplo 60, 120, 180, 240 Hz y así sucesivamente. Además, la ondulación resultante en la corriente de campo se compondrá también de la misma serie de armónicos y estos generarán fuerzas que excitarán la vibración estructural en la máquina. Es bien conocido que las respuestas estructurales a fuerzas aplicadas son muy complejas y dependientes de frecuencias, pero se caracterizan generalmente por tener bandas de resonancia a frecuencias particulares donde se amplifican los desplazamientos estructurales. A frecuencias muy por debajo de las bandas de resonancia, los desplazamientos estructurales permanecen constantes a medida que se incrementa la frecuencia. A frecuencias por encima de las bandas de resonancia, los desplazamientos estructurales se reducen más significativamente a medida que se incrementa la frecuencia. A medida que se incrementa la frecuencia de excitación, el mecanismo de masa, elasticidad y amortiguación causan atenuación estructural ventajosa. Por lo tanto es ventajoso y práctico emplear como frecuencia de excitación la más elevada. Además, es ventajoso que la frecuencia de excitación sea ajustable para de este modo evitar la coincidencia de las frecuencias resonantes de excitación y estructural. Un valor típico para la frecuencia portadora de la modulación de ancho de impulso sería 8 kHz.

La construcción y el funcionamiento del conjunto excitador se describirán ahora más en detalle con referencia a la figura 2. Una fuente de alimentación en modo conmutado del tipo "convertidor directo" (o convertidor buck) del estándar industrial incluye una fuente de alimentación CC 1, un condensador de alimentación CC 2, una resistencia de restablecimiento de núcleo 3, un condensador de restablecimiento de núcleo 4, un transistor de conmutación 5 y un diodo de restablecimiento de núcleo 6. Los componentes de restablecimiento de núcleo 3, 4 y 6 son solamente una implementación de estándar industrial y su topología de diseño efectiva será en gran medida dependiente de la potencia nominal del equipo y el intervalo de modulación de la modulación de ancho de impulso empleada por la fuente de alimentación en modo conmutado. En particular, cuando la profundidad de modulación se incrementa, el voltaje de restablecimiento se puede incrementar también de manera que la segunda integral de voltaje de

restablecimiento de núcleo es igual y opuesta a la segunda integral de voltaje de establecimiento de núcleo. El requisito para restablecer el núcleo después de cada impulso de “conversión directa” impone una restricción práctica sobre la profundidad de modulación y los familiarizados con el diseño de circuitos magnéticos en modo conmutado serán conscientes de las técnicas apropiadas de restablecimiento de núcleo.

5 La fuente de alimentación en modo conmutado alimenta un voltaje regulado modulado de ancho de impulso al transformador de impulsos que tiene un devanado primario 7, un núcleo magnético primario 8, un núcleo magnético secundario 9 y un devanado secundario 10. El devanado primario y el núcleo magnético 7 y 8 son estacionarios mientras que el núcleo magnético secundario y el devanado 9 y 10 giran con el rotor de la máquina. Los núcleos magnéticos primario y secundario 8 y 9 están separados por un entrehierro. Se apreciará fácilmente que no hay  
10 requisito de proporcionar un entrehierro entre los núcleos magnéticos 8 y 9, pero incluso cuando las caras polares de los núcleos magnéticos están en contacto deslizante entre sí, las asperezas de cara polar evitan un contacto íntimo entre sí y se forma una fina región de interfaz con permeabilidad magnética media relativamente baja con características de tipo entrehierro. Puesto que las variaciones en las características de entrehierro tendrían un efecto adverso sobre el rendimiento del transformador de impulsos, las implementaciones alternativas descritas en lo sucesivo mantienen una interfaz deslizante controlada entre los núcleos magnéticos primario y secundario.

La salida del devanado secundario 10 dl transformador de impulsos es también un voltaje modulado de mancho de impulso y se refiere al voltaje en el devanado primario 7 según la relación de espiras sobre los devanados primario y secundario del transformador de impulsos. Asimismo, cualquier corriente en el devanado secundario 10 será  
20 especular en el devanado primario 7 según la relación de espiras, teniendo en cuenta que el devanado primario contendrá un componente de corriente magnética con una característica predecible. El voltaje modulado de ancho de impulso tiene dos estados comúnmente denominados el estado “marca” y el estado “espacio”, respectivamente. El estado “marca” existe cuando el transistor de conmutación 5 de la fuente de alimentación en modo conmutado está en su estado “encendido” y el voltaje de fuente de alimentación en el condensador de fuente de alimentación 2 se aplica al devanado primario 7 del transformador de impulsos. El estado “espacio” existe cuando el transistor de  
25 conmutación está en su estado “apagado” y los componentes de restablecimiento de núcleo definen el voltaje que se aplica al devanado primario 7 del transformador de impulso. El núcleo del transformador de impulso se establece a menudo como “establecido” durante el estado “marca” y “restablecido” durante el estado “espacio”. Se ha de entender que los impulsos de corriente en los devanados primario y secundario 7 y 10 del transformador de impulsos son unidireccionales, con lo cual el voltaje se invierte en las transiciones de estado “marca” y estado  
30 “espacio, como se ha descrito anteriormente.

Durante la puesta en marcha de la máquina es necesario llevar la corriente de campo en devanado de campo 16 hasta el nivel requerido. En circunstancias ideales, esto se podría conseguir aplicando un único impulso de voltaje que dura algunos minutos para “arrancar” la corriente de campo. Sin embargo, en la práctica la aplicación de un solo impulso de voltaje para este periodo de tiempo conduciría rápidamente a una saturación en el transformador  
35 de impulsos y de este modo se tendrían que aplicar una serie de impulsos más cortos a lo largo del mismo periodo de tiempo o un periodo de tiempo ligeramente más largo para arrancar la corriente de campo en una serie de etapas. Otras limitaciones prácticas que se pueden aplicar a la duración del “arranque” de corriente de campo son:

- (i) la capacidad de aislar el devanado de campo;
- (ii) la potencia nominal de la corriente de pico de la fuente de alimentación en modo conmutado;
- 40 (iii) la potencia nominal de corriente de sobrecarga de corta duración del transformador de impulsos; y
- (iv) la carga térmica de los conductores de transferencia 14.

La limitación (i) no es normalmente un asunto de diseño fundamental porque el aislamiento del devanado de campo raras veces debe resistir el voltaje de fuerza asociado a la protección de templado incipiente. La expectativa de vida del aislamiento no está relacionada linealmente con el voltaje y la frecuencia aplicados, y aunque no se trata de  
45 proporcionar el periodo de tiempo a lo largo del cual se lleva a cabo el “arranque”, este es muchas veces superior al tiempo de “descarga de campo”. Las limitaciones (ii) y (iii) son simplemente cuestiones de disponibilidad de espacio y coste según las directrices de diseño convencionales. La limitación (iv) se describe más en detalle en lo sucesivo.

La corriente de campo en el devanado de campo 16 se disipará solamente muy lentamente cuando no se aplique voltaje. Por lo tanto, una vez que la corriente de campo ha alcanzado el nivel aceptable basta con aplicar una serie  
50 de impulsos cortos de voltaje a intervalos relativamente largos (quizás del orden de algunos minutos u horas) para mantener la corriente de campo sustancialmente al mismo nivel. Este proceso se denomina a menudo “bombeo” de la corriente de campo. El conjunto excitador debe, por lo tanto, poder funcionar en dos modos diferentes, en concreto un modo de “puesta en marcha” donde la corriente de campo se arranca a un nivel aceptable y un modo de “bombeo” cuando la máquina está funcionando normalmente y el nivel de corriente de campo se mantiene

suministrando un número de impulsos cortos de voltaje. El conjunto excitador también puede funcionar en un tercer modo (un modo de “protección” o “basculante”) cuando se detecta un templado incipiente.

Los diferentes modos operativos del conjunto excitador se explicarán ahora con referencia al voltaje modulado de ancho de impulso suministrado al devanado de campo 16. El periodo de tiempo durante el cual se aplica un impulso de voltaje al devanado de campo 16 es el estado “marca” y el periodo de tiempo entre los impulsos de voltaje es el estado “espacio”. El primer conjunto de potencia 103 incluye un dispositivo semiconductor rectificador 11 y el segundo conjunto de potencia 104 incluye un dispositivo semiconductor de efecto volante 15. El dispositivo semiconductor rectificador 11 y el dispositivo semiconductor de efecto volante 15 se usan en la rectificación síncrona de la corriente de campo y tienen una topología de convertidor reductor general (o Buck). El inductor 12 y el condensador 13 se usan para eliminar la magnitud de componentes de mayor frecuencia del voltaje modulado de ancho de impulso suministrado a los conductores 14 formando un filtro de paso bajo y actuando también por lo tanto como un amortiguador (red auxiliar de conmutación) para el dispositivo semiconductor rectificador 11 y el dispositivo semiconductor de efecto volante 15. Esto a su vez limita la magnitud de componentes de mayor frecuencia de corriente de campo que fluye en el devanado de campo 16. Durante un estado “marca” cuando el transistor de conmutación 5 de la fuente de alimentación de modo conmutado está en el estado “encendido”, el impulso de voltaje desarrollado está en el devanado secundario 10 pasa a través del dispositivo semiconductor rectificador 11 y a través de los conductores de transferencia 14 al devanado de campo 16. Durante un estado de “espacio” cuando el transistor de conmutación 5 de la fuente de alimentación en modo conmutado está en el estado “apagado”, la corriente de campo en el devanado de campo 16 fluye en una trayectoria cerrada a través del dispositivo semiconductor de efecto volante 15. La figura 3 muestra la manera en que la corriente de campo (etiquetada Campo I (16)) fluye a través del dispositivo semiconductor rectificador 11 durante el estado “marca” y a continuación a través del dispositivo semiconductor de efecto volante 15 durante el estado “espacio”. La forma de onda inferior muestra la manera que la corriente de campo en los devanados de campo solamente se disipa muy lentamente durante el estado “espacio” cuando no se aplica voltaje.

Las formas de onda mostradas en la figura 3 son del conjunto excitador que funciona en el modo de “bombeo”. Cuando el conjunto excitador está funcionando en el modo “puesta en marcha” entonces se aprecia fácilmente que el periodo de tiempo entre los impulsos de voltaje (o dicho de otro modo, el estado (espacio)) se reduce en gran medida de manera que la corriente de campo se puede arrancar al nivel requerido en una serie de etapas. La relación del periodo de tiempo durante el cual se aplica un impulso de voltaje respecto del periodo de tiempo entre impulsos de voltaje (es decir, la relación del estado “marca” respecto del estado “espacio” será por lo tanto diferente dependiendo de si el conjunto excitador está funcionando en el modo “puesta en marcha” o el modo de “bombeo”).

En lugar de vérselas con la corriente de campo completo, los conductores de transferencia 14 solamente tienen que suministrar impulsos cortos de voltaje al devanado de campo 16 a intervalos muy poco frecuentes cuando el conjunto excitador está funcionando en el modo de “bombeo”. Esto conduce a una reducción en la transferencia continua eficaz de calor perdido a través de los conductores de transferencia 14. La limitación (iv) anteriormente mencionada no es grave porque los conductores de transferencia 14 están dimensionados para limitar las pérdidas continuas de calor eficaces con el fin de ser dominantes en potencia nominal y dimensionamiento de la crioplanta. La constante térmica de tiempo del volumen del devanado de campo 16 es muchas veces la duración de “arranque” y las sobrecargas de corriente de los conductores de transferencia 14 no tienen un efecto crítico intermedio sobre la temperatura del devanado de campo. Sin embargo, se ha de tener cuidado para evitar la entrada excesiva de calor en la conexión entre los conductores de transferencia 14 y los extremos del devanado de campo 16. El riesgo de recalentamiento local se puede evitar mediante el diseño apropiado del circuito de enfriamiento por fluido criogénico que enfría el interior del criostato. En cualquier caso, los conductores de transferencia 14 deben poder resistir la corriente de descarga de campo asociada a la protección de templado incipiente, y es significativo que el requisito para la protección de templado pueda ser un resultado del fallo del circuito de enfriamiento por fluido criogénico.

El control del conjunto excitador se describirá ahora más en detalle con referencia a la figura 4. El transformador de impulsos incluye un devanado terciario 34 y la salida del devanado terciario 34 es también un voltaje modulado de ancho de impulso que se refiere al voltaje en el devanado primario 7. Un controlador 35 usa el voltaje en el devanado terciario como fuente de alimentación y referencia de sincronización.

Como se ha descrito anteriormente, el dispositivo semiconductor rectificador 11 y el dispositivo semiconductor de efecto volante 15 se usan principalmente como rectificadores síncronos y tienen sus impulsos de puerta sincronizados con la salida de voltaje del devanado terciario 34. Los terminales de puerta del dispositivo semiconductor rectificador 11 y el dispositivo semiconductor de efecto volante 15 también permiten que el controlador 35 inicie una comunicación forzada cuando se requiere.

El controlador 35 muestrea de manera síncrona una señal de realimentación de corriente 37 que se deriva de un transductor de corriente 36 durante el estado “marca”. Durante el estado “marca” la corriente en el transductor 36 es equivalente a la corriente de campo que fluye en el devanado de campo 16 y el controlador 35 puede por lo tanto

detectar la corriente de campo a lo largo de todo el estado "marca". El controlador 35 muestrea también de manera síncrona una señal de realimentación de voltaje 39 derivada de un transductor de voltaje 38 durante el estado "marca" y el estado "espacio". La señal de realimentación de voltaje 39 se transfiere entre el entorno frío y el entorno caliente por un conductor 40. Situando el transductor de voltaje 38 cerca del devanado de campo 16, se pueden los errores que resultan de las caídas de voltaje de fuga fuera del devanado de campo 16, pero se ha de observar que se tiene que tener cuidado de evitar los errores que se generan a partir de efectos de termopar en conexiones de detección de voltaje. Alternativamente, también es posible localizar el transductor de voltaje 38 fuera del criostato mientras la corriente de fuga dentro del dispositivo semiconductor rectificador 11 y el dispositivo semiconductor de conmutación 19 es suficientemente baja para no causar una caída de voltaje excesiva en los conductores de transferencia 14, y proporcionar al controlador 35 solamente muestras de la señal 39 de realimentación de voltaje durante el estado "espacio". La localización del transductor de voltaje 38 fuera del criostato elimina la necesidad del conductor 40 con una simplificación correspondiente del diseño del conjunto excitador.

El controlador 35 usa la señal 37 de realimentación de corriente y la señal 39 de realimentación de voltaje en combinación con un algoritmo de cálculo apropiado para estimar la resistencia y la inductancia del devanado de campo 16. estas estimaciones se actualizan a la frecuencia portadora de modulación de ancho de impulso de la fuente de alimentación en modo conmutado. El controlador 35 compara las estimaciones con valores predeterminados para la resistencia y la inductancia con el fin de detectar el templado incipiente del material HTS en el devanado de campo 16. Si el templado incipiente se detecta entonces la rectificación síncrona del dispositivo semiconductor rectificador 11 y el dispositivo semiconductor de efecto volante 15 se inhibe apagando ambos dispositivos por control de puertas.

Quando la rectificación síncrona se inhibe, la fuente de alimentación en modo conmutada suministrará solamente corriente magnética al devanado primario 7 del transformador de impulsos. No hay ningún requisito de detención del funcionamiento de la fuente de alimentación en modo conmutado después de la inhibición de rectificación síncrona porque el dispositivo semiconductor rectificador 11 puede resistir el voltaje de salida de circuito abierto de la fuente de alimentación en modo conmutado cuando se encuentra acoplado por el transformador de impulsos. Sin embargo, el apagado de la fuente de alimentación se puede llevar a cabo implemente en la fuente de alimentación en modo conmutado si se considera ventajoso hacerlo. Además, no hay ningún requisito de proporcionar telemetría de rotor con el fin de notificar al operador o "desconectar" la fuente de alimentación en modo conmutado después del inicio de la protección de templado incipiente, porque la fuente de alimentación en modo conmutado puede determinar que se ha inhibido la rectificación síncrona detectando su impedancia de carga. Es habitual para el equipo de fuente de alimentación en modo conmutado detectar su corriente de salida y su voltaje de alimentación y usarlos para determinar la impedancia de carga de un conocimiento de profundidad de modulación y una estimación de la corriente magnética en el devanado primario 7 del transformador de impulsos. Esto permite que la fuente de alimentación en modo conmutado detecte extremos de impedancia de carga tales como el circuito abierto, por ejemplo.

Quando el dispositivo semiconductor rectificador 11 y el dispositivo semiconductor de efecto volante 15 se apagan simultáneamente, el controlador 35 puede aplicar un impulso de puerta 42 a un dispositivo de conmutación 19 mientras el voltaje a través del devanado de campo 16 genera rápidamente una polaridad que permite conducir el dispositivo de conmutación. La conducción del dispositivo de conmutación 19 hace que la resistencia de descarga 18 (a veces denominada resistencia basculante) se conecte en serie con el devanado de campo 16. La caída de voltaje a través de la resistencia 18 hace que la corriente de campo en el devanado de campo 16 se deteriore aproximadamente de manera exponencial respecto del tiempo. La resistencia se determina según un compromiso entre las restricciones de diseño de aislamiento y la disipación por fallo del devanado de campo 16. Un pequeño valor de resistencia hace que el voltaje de devanado de pico se restrinja mientras aumenta la constante de tiempo de descarga de corriente de campo. Por otra parte, un valor elevado de resistencia hace que el voltaje de devanado de pico aumente mientras que la constante de tiempo de descarga de corriente de campo se reduce. El voltaje de devanado de pico influye en el diseño de aislamiento y el tiempo de descarga de corriente de campo influye en la disipación de fallo en el material HTS. La relación entre estas dos influencias se puede modificar ventajosamente empleando una resistencia no lineal en lugar de la resistencia 18 de descarga de campo convencional. Un grupo de varistores de óxido metálico (MOV) u otros dispositivos de relé de protección contra sobretensiones no lineales, con coeficiente de temperatura positiva similar de voltaje de avalancha y resistencia de pendiente positiva, se pueden usar para proporcionar un voltaje de devanado sustancialmente constante durante el periodo de descarga de corriente de campo. Esto tiene el efecto de reducir la relación de disipación de fallo en el material HTS respecto del voltaje de aislamiento de pico.

Con referencia a la figura 5, cuando, se usa un dispositivo de resistencia lineal (tal como la resistencia de descarga de campo 18 anteriormente mencionado) para fines de descarga de campo entonces el voltaje de devanado de campo y la corriente se deterioran exponencialmente con el tiempo. Sin embargo, si se usa un dispositivo de resistencia no lineal entonces el voltaje de devanado de campo tiene una degradación rectangular, y la corriente se



degrada según una rampa con el tiempo. La figura 5 muestra tres trazas de corriente y voltaje de devanado de campo para tres dispositivos de resistencia diferentes. La primera traza (etiquetada "Degradación exponencial con constante de tiempo más corta") representa el voltaje de devanado de campo a medida que se degrada desde un voltaje inicial V1 a cero en un tiempo T2, como sería el caso cuando se emplea una resistencia de descarga de campo superior. La segunda traza (etiquetada "Degradación exponencial con constante de tiempo más larga") representa el voltaje de devanado de campo a medida que se degrada desde un voltaje inicial V2 a cero en un tiempo T1, como sería el caso cuando se emplea una resistencia de descarga de campo inferior. La tercera traza (mostrada en líneas de punto y etiquetada "Degradación rectangular") representa el voltaje de devanado de campo a medida que se degrada desde un voltaje inicial V3 a cero en un tiempo T3, como sería el caso cuando se emplea un dispositivo no lineal. Obsérvese que en la segunda traza la tensión de aislamiento se ha reducido respecto de V1 a V2. Sin embargo, la duración de la degradación de corriente mostrada por debajo de las trazas de voltaje se ha incrementando de T2 a T1, poniendo de este modo el devanado de campo bajo una mayor tensión térmica con un consiguiente riesgo de templado incipiente. Obsérvese que en la tercera traza, el voltaje de pico V3 es inferior tanto a V1 como a V2 y la duración de la degradación de corriente T3 es también inferior tanto a T1 como T2. El uso de un dispositivo de resistencia no lineal en lugar de la resistencia de descarga de campo 18 tiene, por tanto, la ventaja de reducir simultáneamente tanto la tensión de aislamiento y la tensión térmica sobre el devanado de campo.

El dispositivo semiconductor de efecto volante 15 puede ser un Transistor de efecto de campo de unión (JFET) o transistor de efecto campo de unión vertical (VJFET) que se puede implementar como un dispositivo en modo de agotamiento o un dispositivo en modo de potenciación con activación de puerta síncrona proporcionada por el controlador 35. De hecho, un número de implementaciones de conmutación criogénica son posibles y es bien conocido que la mayoría de los dispositivos semiconductores de portadora tienen un coeficiente térmico positivo de caída de voltaje en estado "encendido" a temperatura superior a la descongelación de portadora, lo cual se produce a aproximadamente -223.15 grados Celsius en dispositivos de silicio. Este coeficiente térmico positivo causa la autoestabilización y la uniformidad de la densidad de corriente del estado "encendido", proporcionando dispositivos de enfriamiento, disposiciones de geometría de interconexión y mando de puertas se especifican cuidadosamente con el fin de conseguir simetría térmica, mecánica y eléctrica. Tales dispositivos semiconductores también tienen una velocidad de conmutación muy elevada. El uso de un JFET, VJFET transistor de efecto de campo semiconductor de óxido de metal (MOSFET) bajo condiciones criogénicas facilita por lo tanto la fabricación de conmutadores de gran área útil con baja disipación, gran potencia nominal de corriente y alta velocidad de conmutación.

El dispositivo semiconductor rectificador 11 y el dispositivo de conmutación 19 pueden ser un tiristor, un tiristor de apagado por puertas (GTO) o cualquier otro dispositivo semiconductor apropiado con características de bloqueo inverso y encendido por puertas similares. Salvo cuando se debe inhibir la rectificación síncrona del dispositivo semiconductor rectificador 11 y el dispositivo semiconductor de efecto volante 15 apagando el control por puertas, la relación de fase del impulso de puerta 43 aplicado al dispositivo 15 semiconductor de efecto volante por el controlador 35 se sincroniza con el funcionamiento del devanado secundario 10 del transformador de impulsos y el dispositivo semiconductor rectificador 11 debido al ajuste de fase preciso del devanado terciario 34 del transformador de impulsos respecto del devanado secundario. Asimismo, la relación de fase del impulso de puerta 41 aplicado al dispositivo semiconductor rectificador 11 por el controlador 35 se sincroniza con el funcionamiento del devanado secundario 10 del transformador de impulsos y el dispositivo semiconductor de efecto volante 15 debido al ajuste de fase preciso del devanado terciario 34 del transformador de impulsos respecto del devanado secundario 10.

Cuando el dispositivo semiconductor de efecto volante 15 es un dispositivo de modo de agotamiento volverá a su estado "encendido" naturalmente salvo cuando el impulso de puertas 43 se aplica para cambiarlo a su estado "apagado". Los impulsos de puertas 41 y 43 se aplican simultáneamente y por estos medios se evita la conducción simultánea de dispositivos semiconductores 11 y 15. cuando el dispositivo semiconductor de efecto volante 15 es un dispositivo en modo de potenciación volverá a su estado "apagado" naturalmente salvo cuando el impulso de puertas 43 se aplica para conmutarlo a su estado "encendido". Los impulso de puertas 41 y 43 se aplican en antifase y por estos medios se evita la conducción simultánea de dispositivo semiconductores 11 y 15.

El impulso de puertas 43 se transfiere entre el entorno frío y el entorno caliente por un conductor 44.

La protección activa de templado incipiente descrita anteriormente es particularmente ventajosa porque la detección se puede llevar a cabo muy rápidamente a la frecuencia portadora de modulación de ancho de impulso. Se apreciará fácilmente que el material HTS en los devanados de rotor puede ir provisto de protección pasiva, quizás en forma de una capa intermedia de cobre por ejemplo.

El transformador de impulsos se puede implementar en de numerosas maneras diferentes y ahora se van a describir algunas de las alternativas. En todos los casos el sistema primario (es decir, el devanado primario y su núcleo magnético asociado) es estacionario y se localiza en el entorno caliente y el sistema secundario (es decir, el

devanado secundario y su núcleo magnético asociado) gira con el rotor de la máquina y se sitúa en el entorno caliente.

Una variedad de diferentes transformadores de impulsos se describirá ahora con referencia a las figuras 6 a 9. Todos los siguientes circuitos magnéticos se forman a partir de material de ferrita.

5 En referencia en primer lugar a las figuras 6A y 6B, un primer transformador de impulsos incluye un núcleo primario 18 que es un sólido de revolución con sección en U para proporcionar una cavidad 18b dentro de la cual se inserta un devanado primario solenoidal 19. Las conexiones primarias 19a son accesibles por un hueco o abertura 18a en el núcleo primario 18. El primer transformador de impulsos también incluye un núcleo secundario 21 que es un sólido de revolución con sección en U para proporcionar una cavidad 21b dentro de la cual se inserta un devanado secundario solenoidal. Las conexiones secundarias 20a son accesibles por un hueco o abertura 21a en el núcleo secundario 21.

15 En referencia ahora a las figuras 7A y 7B, un segundo transformador de impulsos incluye un núcleo primario 22 en forma de U de estándar industrial. Un devanado primario solenoidal 22a se forma alrededor del núcleo 22. Dos anillos primarios 23 y 24 de piezas polares dispuestos concéntricamente se forman a partir de material similar de ferrita y se conectan al núcleo 22 con el fin de distribuir el flujo desde las caras polares del núcleo. Se muestra un único núcleo 22 pero en la práctica varios núcleos se pueden conectar a los anillos 23 y 24 de piezas polares con el fin de reducir el componente circunferencial del flujo en los anillos de piezas polares. Las conexiones primarias 22b se establecen fuera del devanado 22a. El segundo transformador de impulsos incluye también un núcleo secundario 27 en forma de U de estándar industrial. Un devanado 27a secundario solenoidal se forma alrededor del núcleo 27. Dos anillos 25 y 26 secundarios de piezas polares dispuestos concéntricamente se forman a partir de material similar de ferrita y se conectan al núcleo 27 con el fin de distribuir el flujo a partir de las caras polares del núcleo. Se muestra un único núcleo 27 pero en la práctica varios núcleos se pueden conectar a los anillos 25 y 26 de piezas polares con el fin de reducir el componente circunferencial del flujo en los anillos de piezas polares. Las conexiones secundarias 27b se establecen fuera del devanado 27a. Cuando se emplean múltiples núcleos primarios y secundarios 22 y 27, se espacian regularmente con el fin de reducir el componente circunferencial del flujo en los anillos primarios y secundarios de piezas polares. Las posiciones axial y radial de los componentes primarios y secundarios del segundo transformador de impulsos se regulan con el fin de mantener características aceptables de entrehierro, fricción y desgaste. El segundo transformador de impulsos mostrado en las figuras 7A y 7B es totalmente simétrico pero también es posible que miembros desiguales de los núcleos primarios y secundarios se puedan usar con el fin de reducir los efectos de variación cíclica en la conexión de flujo cuando los núcleos giratorios están en movimiento.

30 El tercer transformador de impulsos mostrado en las figuras 8A y 8B es una variante asimétrica del primer transformador de impulsos donde el núcleo primario 18 es sustituido por el núcleo anular 29 de sección transversal radial rectangular. En este caso, el devanado primario solenoidal 28 se aloja dentro de la cavidad 21b del núcleo secundario 21, adyacente al devanado secundario 20. Las posiciones axiales de los devanados primario y secundario 28 y 29 se regulan con el fin de evitar la fricción y el desgaste porque están muy cerca el uno del otro.

35 En referencia ahora a las figuras 9A y 9B, un cuarto transformador de impulsos tiene un núcleo exterior que es un sólido de revolución con sección en U formado en dos secciones de acoplamiento 33a y 33b. El núcleo proporciona una cavidad 33c en la cual se insertan los devanados 31 y 32 solenoidales primario y secundario concéntricamente dispuestos. El circuito magnético se completa con un núcleo anular interno 30. Las conexiones primarias 32a son accesibles por un hueco o abertura 33d en la sección de núcleo 33a. Las conexiones secundarias 31a son accesibles por un hueco o abertura 30a en el núcleo anular interno 30. Las posiciones axial y radial de los núcleos primario y secundario se regulan con el fin de mantener características aceptables de entrehierro, fricción y desgaste. Las posiciones axial y radial de los devanados primario y secundario 31 y 32 se regulan también para evitar la fricción y el desgaste porque están muy cerca uno de otro y de las paredes de la cavidad 33c.

## REIVINDICACIONES

- 1.- Conjunto excitador para suministrar una corriente de campo a los devanados de rotor (16) de una máquina superconductor sincrona, comprendiendo el conjunto excitador:
- 5 - un transformador de impulsos (101) que tiene un devanado primario (7) y un devanado secundario (10);
- una fuente de alimentación (100) en modo conmutada para suministrar una tensión pulsada al devanado primario (7) del transformador de impulsos (101); y
- un par de conductores de transferencia (14) para suministrar una tensión pulsada del devanado secundario (10) del transformador de impulsos (101) a los devanados de rotor (16);
- 10 **caracterizado porque** un controlador (35) para controlar la rectificación sincrona del voltaje pulsado suministrado a los devanados del rotor (16), en el cual el transformador de impulsos (101) incluye, además, un devanado terciario (34) y el controlador (35) controla la rectificación sincrona del voltaje pulsado en base a una señal procedente del devanado terciario (34).
- 15 2.- Conjunto excitador según la reivindicación 1, en el que el devanado primario (7) del transformador de impulsos (101) es estacionario y el devanado secundario (10) gira en uso.
- 3.- Conjunto excitador según la reivindicación 1 o la reivindicación 2, que comprende, además, un dispositivo semiconductor rectificador (11) en serie con el devanado del rotor (16) y un dispositivo semiconductor de efecto volante en paralelo (15) con el devanado del rotor.
- 20 4.- Conjunto excitador según la reivindicación 3, en el cual el dispositivo semiconductor rectificador (11) y el dispositivo semiconductor de efecto volante (15) son controlados para rectificación sincrona del voltaje pulsado suministrado a los devanados del rotor (16).
- 5.- Conjunto excitador según la reivindicación 3 o la reivindicación 4, en el cual el dispositivo semiconductor rectificador (11) es un tiristor o tiristor de apagado por puerta (GTO).
- 25 6.- Conjunto excitador según cualquiera de las reivindicaciones 3 a 5, en el cual el dispositivo semiconductor de efecto volante es un transistor de efecto campo de unión (JFET) o transistor de efecto campo de unión vertical (VJFET).
- 30 7.- Conjunto excitador según cualquiera de las reivindicaciones anteriores en el cual la rectificación sincrona del voltaje pulsado hace que la potencia sea transmitida desde el devanado primario (7) del transformador (101) de impulsos al devanado secundario (10) del transformador de impulsos (101) solamente en un cuadrante único del bucle B-H del circuito magnético del transformador de impulsos (101).
- 8.- Conjunto excitador según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende, además, medios conmutables para proteger los devanados del rotor (16) contra el templado incipiente.
- 9.- Conjunto excitador según la reivindicación 8, en el cual los medios conmutables incluyen una resistencia (18) en serie con un dispositivo semiconductor de conmutación (19).
- 35 10.- Conjunto excitador según la reivindicación 8, en el cual los medios conmutables incluyen un dispositivo resistivo no lineal en serie con un dispositivo semiconductor de conmutación.
- 11.- Conjunto excitador según la reivindicación 10, en el cual el dispositivo resistivo no lineal tiene una característica de corriente de voltaje sustancialmente "cuadrada".
- 40 12.- Conjunto excitador según la reivindicación 10 o la reivindicación 11, en el cual el dispositivo resistivo no lineal es un varistor de óxido metálico (MOV).
- 13.- Conjunto excitador según cualquiera de las reivindicaciones 10 a 12, en el cual el dispositivo semiconductor de conmutación es un transistor de efecto campo de unión (JFET) o transistor de efecto campo de unión vertical (VJFET).
- 45 14.- Un conjunto excitador según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 13, en el cual el controlador (35) controla el funcionamiento del dispositivo semiconductor de conmutación (19) en base a una señal de realimentación de corriente (37) indicativa de la corriente de campo en los devanados del rotor durante un primer periodo de tiempo cuando se suministra un impulso de voltaje a los devanados del rotor (16) y una señal de

realimentación de voltaje (39) indicativa de la corriente de campo en los devanados del rotor (16) durante el primer periodo de tiempo y durante un segundo periodo de tiempo cuando no se suministra un impulso de voltaje a los devanados del rotor. (16)

- 5 15.- Conjunto excitador según la reivindicación 14, en el cual la señal de realimentación de corriente (37) se deriva de un transductor de corriente (36) en serie con el devanado del rotor (16) y la señal de realimentación de tensión se deriva de un transductor de tensión (38) en paralelo con los devanados del rotor (16).
- 16.- Conjunto excitador según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende, además, un filtro o red auxiliar de conmutación que incluye un inductor (12) en serie con los devanados del rotor (16) y un condensador (13) en paralelo con los devanados del rotor (16).
- 10 17.- Máquina superconductora síncrona que tiene devanados del rotor (16) y un conjunto excitador según cualquiera de las reivindicaciones 3 a 18 para suministrar una corriente de campo a los devanados del rotor (16).
- 18.- Máquina superconductora síncrona según la reivindicación 17, en la cual los devanados del rotor (16) se sitúan en una región criogénica.
- 15 19.- Máquina superconductora síncrona según la reivindicación 18, en la cual el devanado primario (7) y el devanado secundario (10) del transformador de impulsos (101) se sitúan fuera de la región criogénica.
- 20.- Máquina superconductora síncrona según la reivindicación 18 o la reivindicación 19, en la cual la fuente de alimentación (100) en modo conmutado está situada fuera de la región criogénica.
- 21.- Máquina superconductora síncrona según cualquiera de las reivindicaciones 18 a 20, en la cual el dispositivo semiconductor rectificador (11) está situada fuera de la región criogénica.
- 20 22.- Máquina superconductora síncrona según cualquiera de las reivindicaciones 18 a 21, en la cual el dispositivo semiconductor de efecto volante (15) está situado fuera de la región criogénica.
- 23.- Máquina superconductora síncrona según cualquiera de las reivindicaciones 17 a 22, en la cual los devanados de rotor (16) están formando a partir de un material superconductor de alta temperatura (HTS).
- 25 24.- Máquina superconductora síncrona según cualquiera de las reivindicaciones 17 a 23, en la cual los devanados del rotor (16) incluyen medios para proteger los devanados del rotor (16) de daños en caso de extinción incipiente.

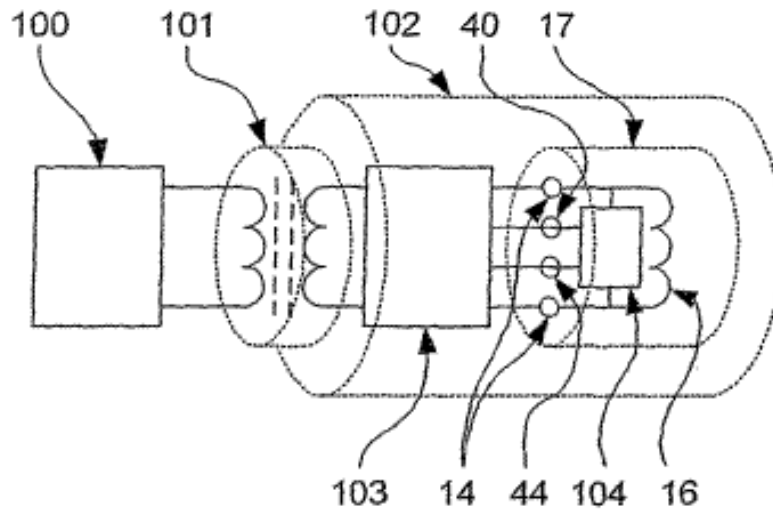


Figura 1

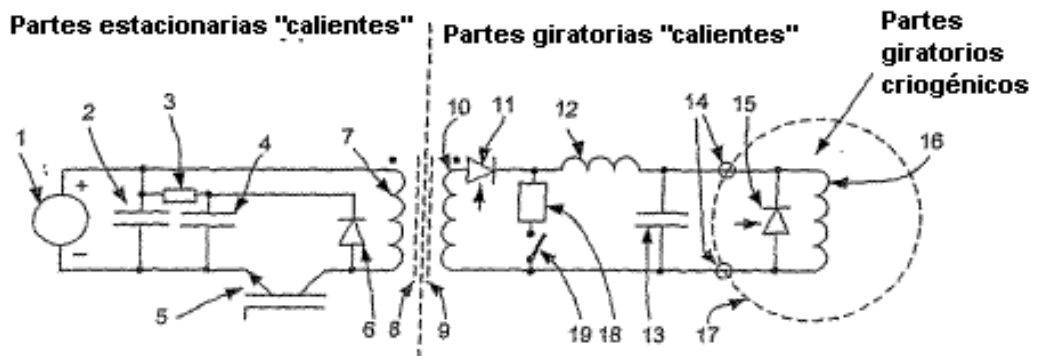


Figura 2

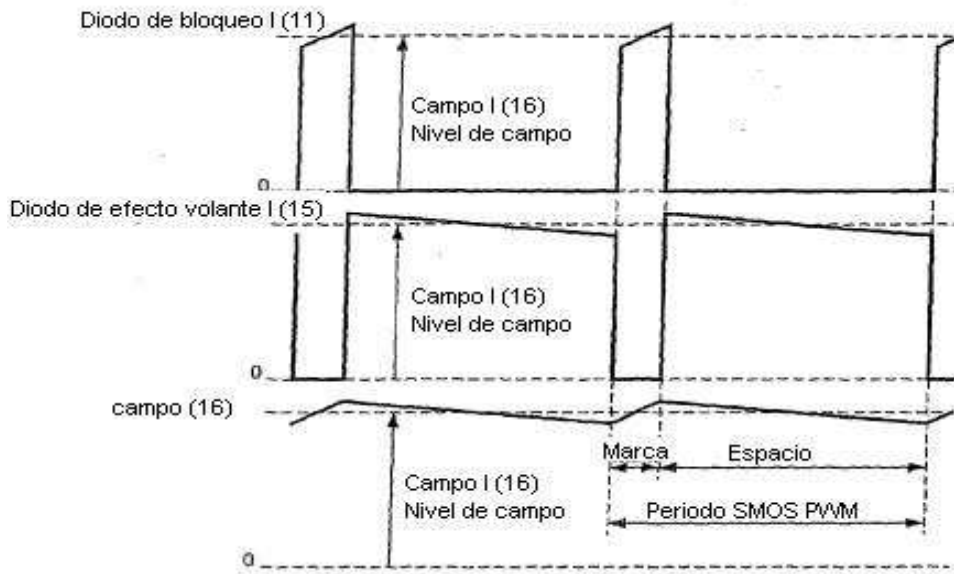


Figura 3

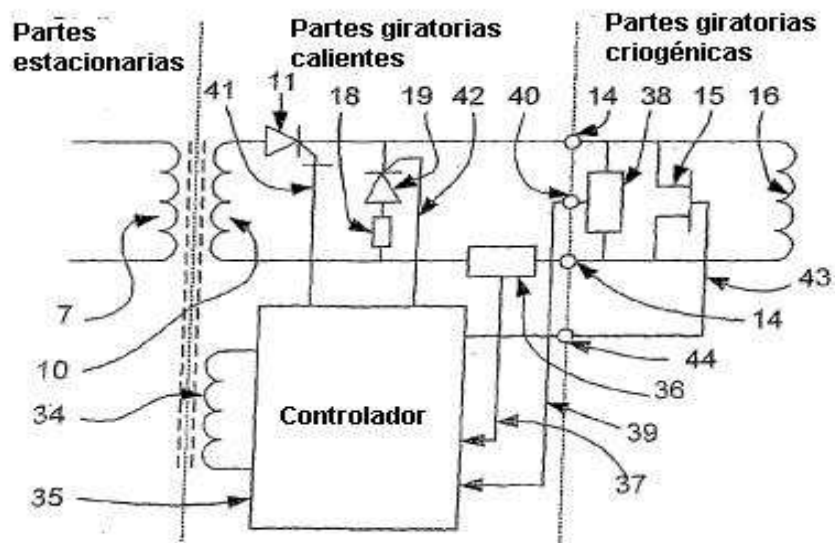


Figura 4

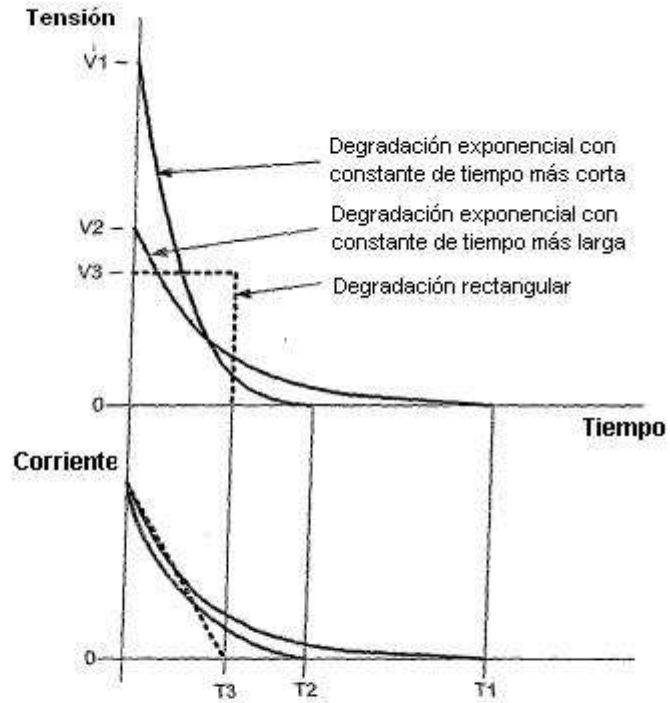


Figura 5

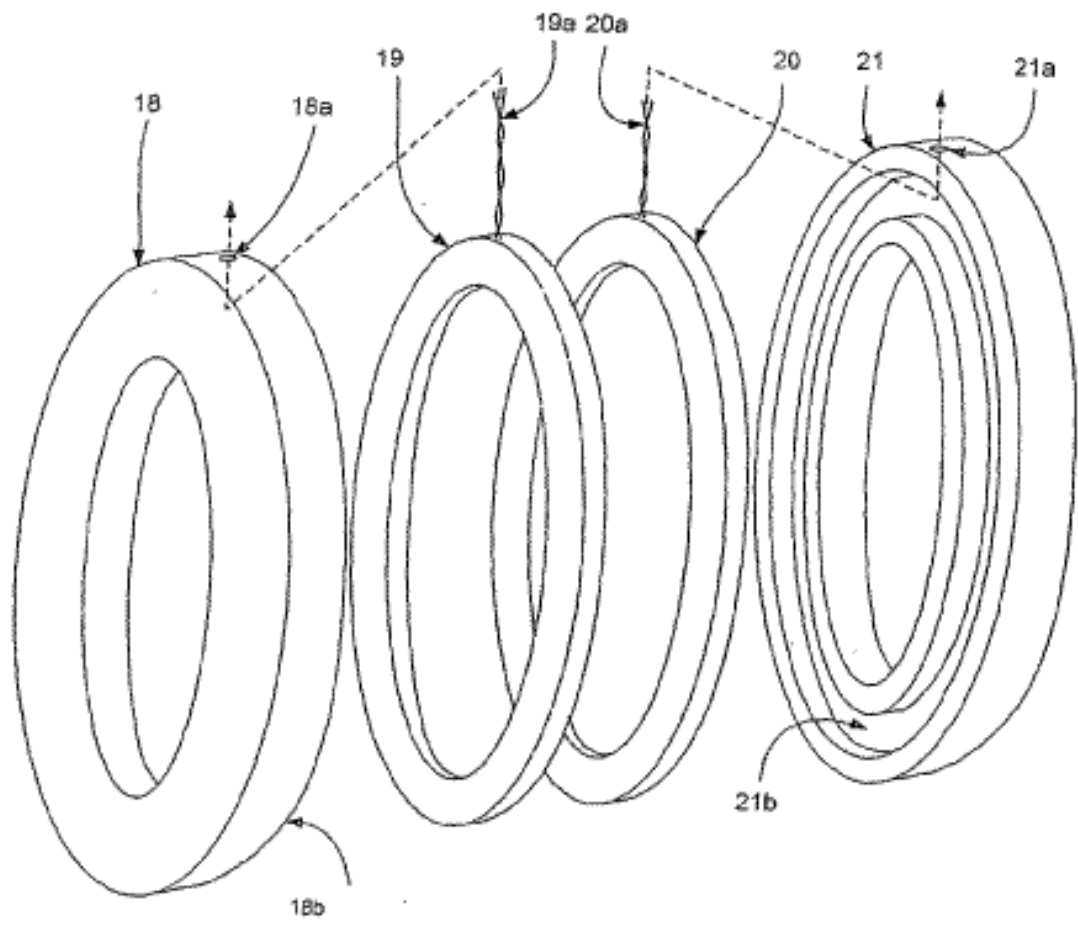
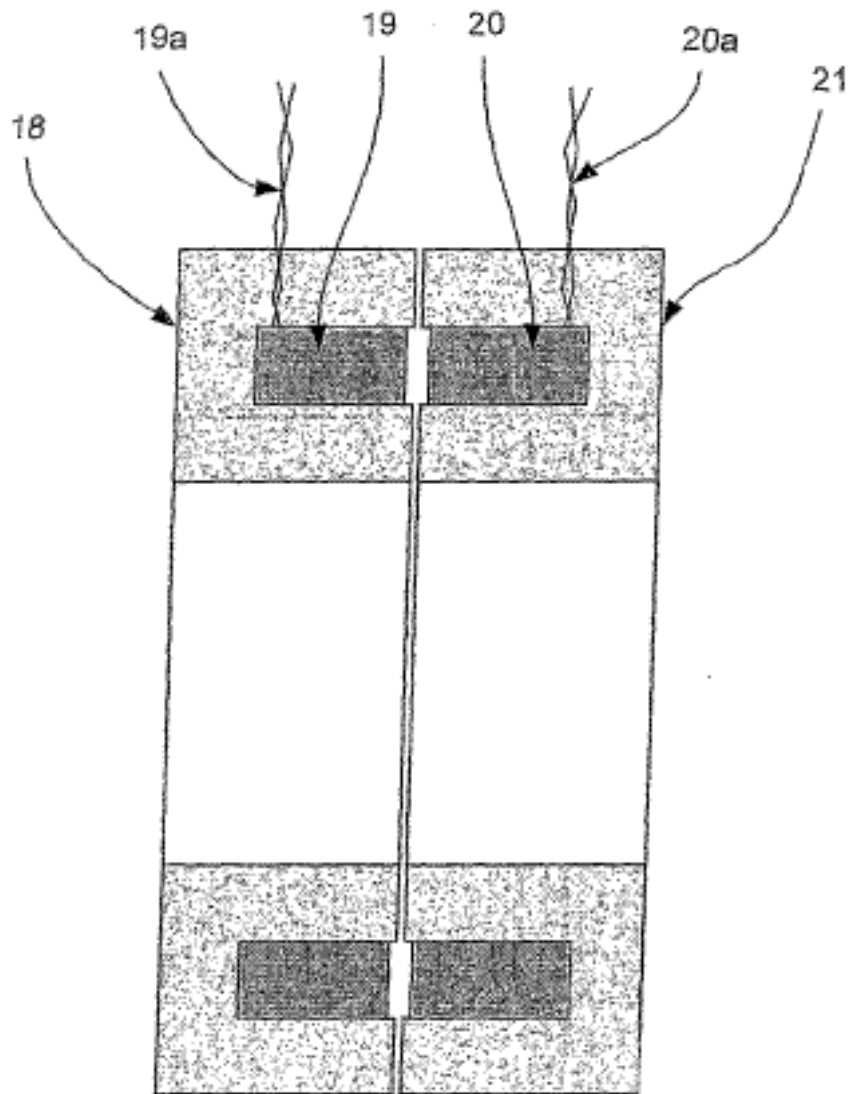


Figura 6A





**Figura 6B**

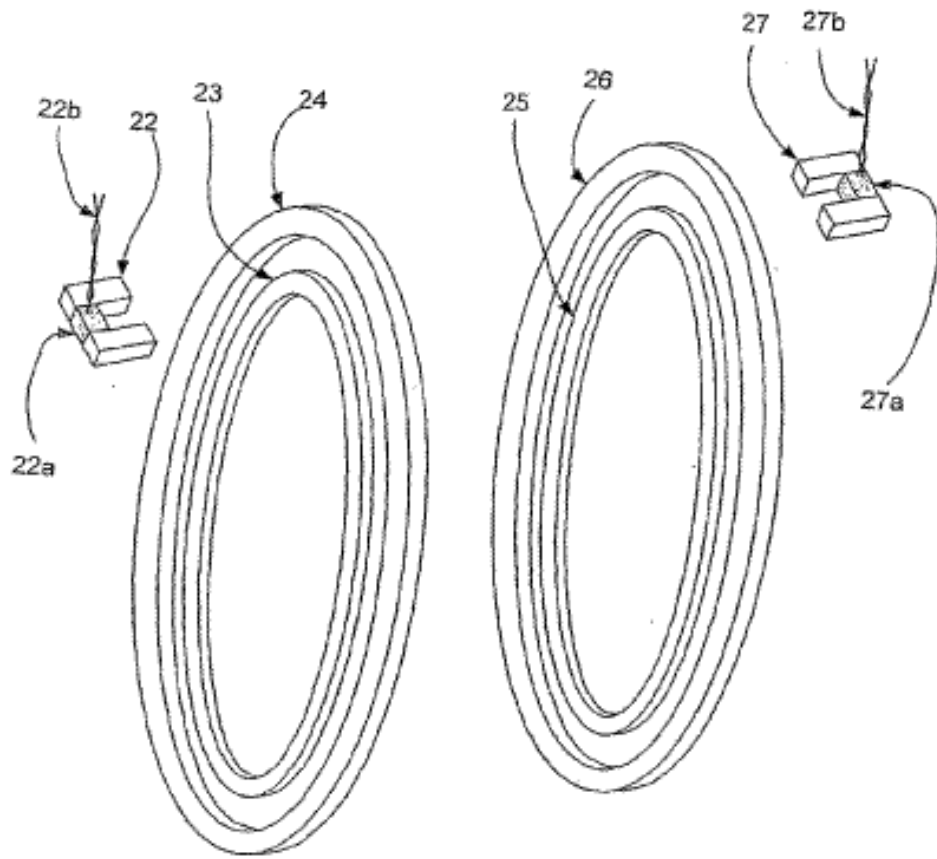


Figura 7A

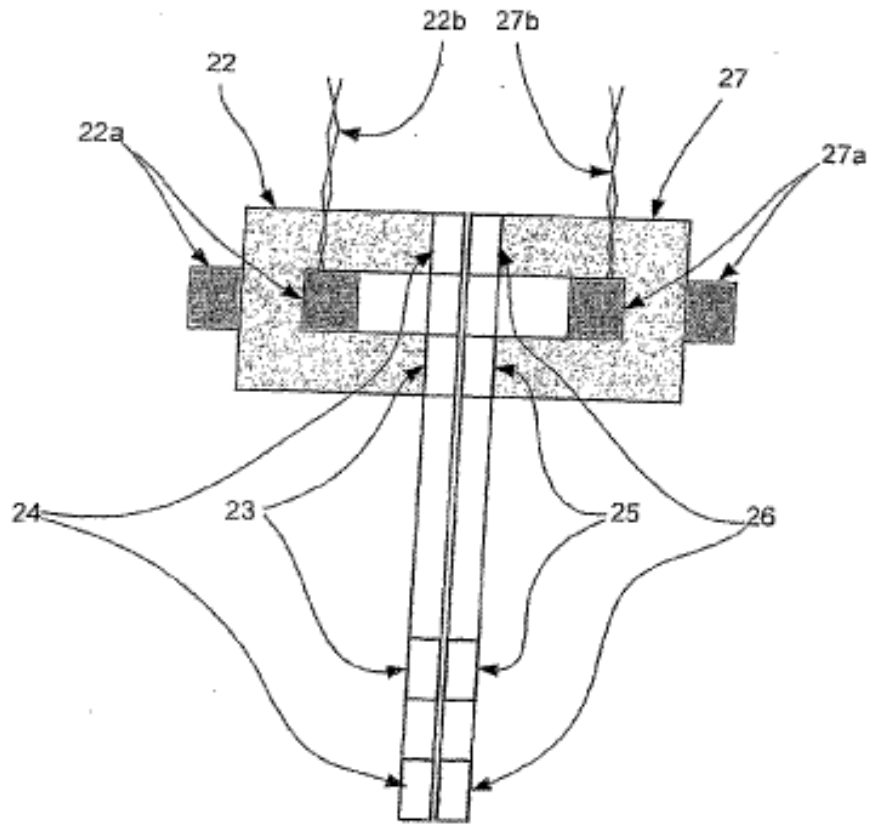


Figura 7B

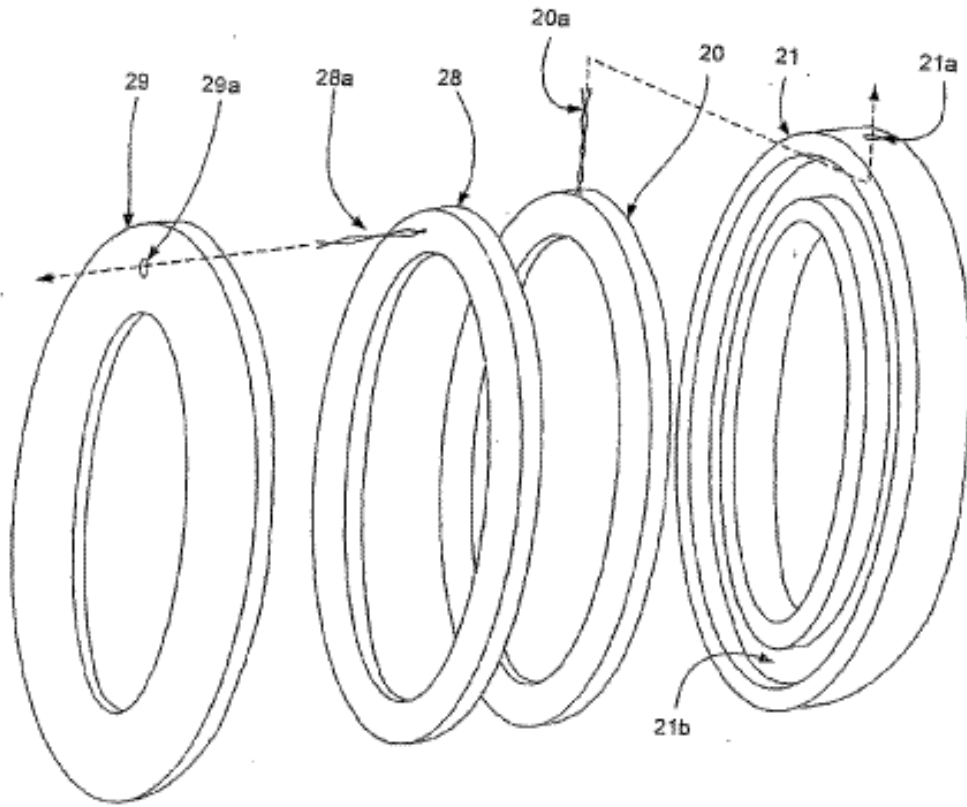
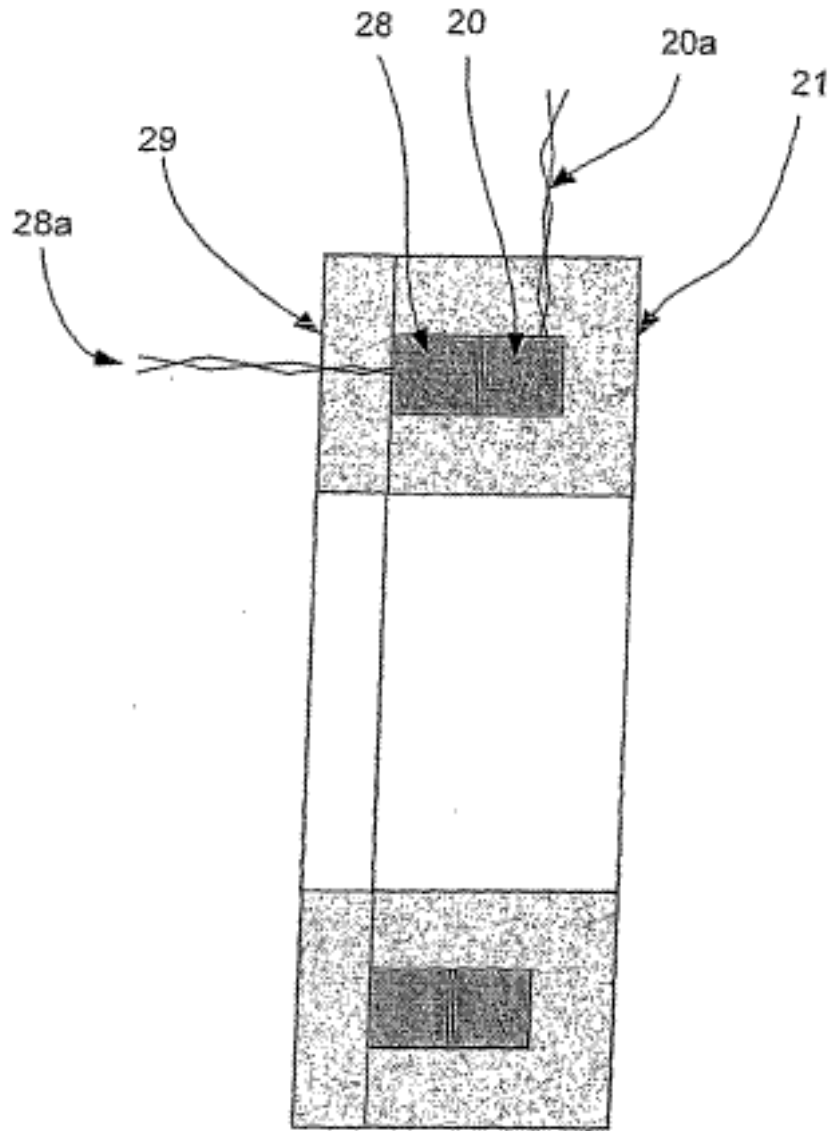


Figura 8A



**Figura 8B**

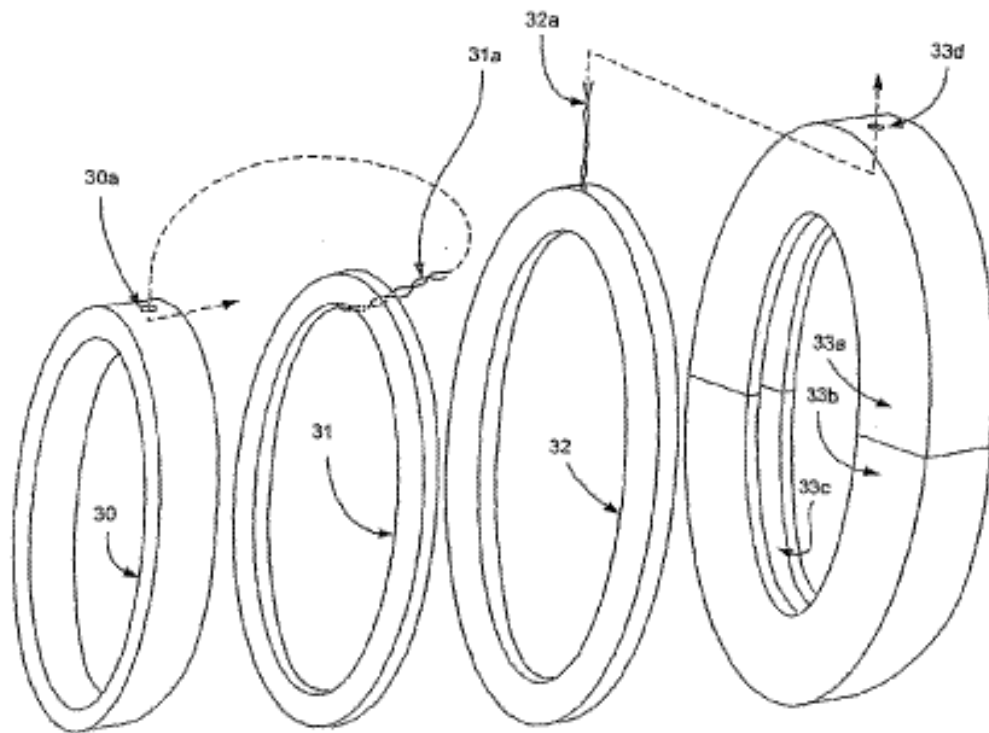


Figura 9A

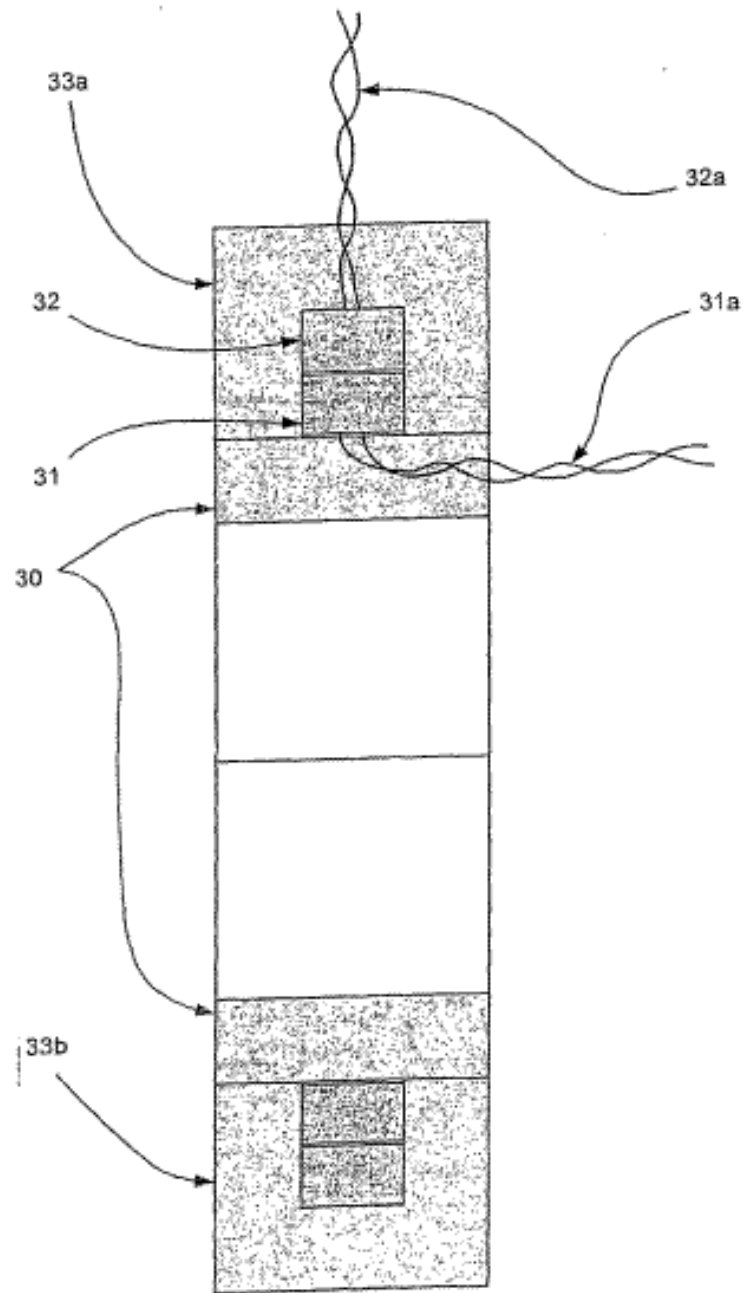


Figura 9B