

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 613 669**

51 Int. Cl.:

H01H 9/42 (2006.01)

H01C 10/16 (2006.01)

H01H 33/59 (2006.01)

H01C 10/04 (2006.01)

H01H 33/16 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **01.10.2012 PCT/US2012/058240**

87 Fecha y número de publicación internacional: **04.04.2013 WO2013049790**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **01.10.2012 E 12834648 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.12.2016 EP 2761637**

54 Título: **Disyuntor de conmutación**

30 Prioridad:

30.09.2011 US 201161541301 P

06.02.2012 US 201213366611

03.04.2012 US 201261619531 P

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

25.05.2017

73 Titular/es:

ALEVO INTERNATIONAL, S.A. (100.0%)

Canton of Valais

Switzerland, CH

72 Inventor/es:

FAULKNER, ROGER, W.

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 613 669 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

Disyuntor de conmutación

5 **Campo**

Esta divulgación se refiere a un disyuntor.

Antecedentes

10 Con el fin de abrir cualquier circuito de CC, debe absorberse la energía inductiva almacenada en los campos magnéticos debido a la corriente que fluye; esta puede almacenarse en condensadores o disiparse en resistencias (los arcos que se forman durante la apertura del circuito son en este sentido un caso especial de una resistencia). Debido a la rápida irrupción de la corriente en un cortocircuito, la energía inductiva puede ser fácilmente mayor que
15 la energía inductiva almacenada en el sistema a plena carga normal; si la corriente es cinco veces superior a los amperios a plena carga normal antes de controlarse, la energía inductiva sería hasta veinticinco veces mayor que en el circuito a plena carga normal (dependiendo de la localización del cortocircuito). La energía inductiva que debe disiparse para abrir un circuito de línea de transmisión de alta tensión de CC (HVCC) puede estar en cientos de megajulios (MJ). El otro gran problema con la apertura de un circuito de CC es que (a diferencia de la alimentación de CA), la corriente y la tensión no pasan por cero periódicamente, de manera que es muy difícil extinguir un arco de
20 CC.

Se conocen varias estrategias de la técnica anterior para interrumpir una corriente continua de alta alimentación. Los disyuntores de cámara de extinción del arco (por ejemplo, las patentes de Estados Unidos 2.270.723; 3.735.074; 7.521.625; 7.541.902) son eficaces para interrumpir las corrientes de CC de hasta 8000 amperios (8,0 kA, kiloamperios) a 800 voltios (0,8 kV, kilovoltios) de CC o 4000 amperios a 1600 voltios (1,6 kV). Se puede ir a una
25 tensión más alta con los disyuntores de cámara de extinción del arco, pero la separación física necesaria de los electrodos y el número de placas en la cámara de extinción del arco aumenta linealmente con la tensión en tales dispositivos, y por lo tanto se hacen muy grandes a una tensión mayor de 3,5 kV.

30 El concepto detrás de los disyuntores de cámara de extinción del arco es separar la corriente del arco hacia fuera en muchos pequeños arcos sobre una superficie grande entre unas placas de metal paralelas. Ya que el arco está bastante caliente, una mayor área superficial de los muchos arcos pequeños implica un enfriamiento radiactivo mucho mayor. A medida que los arcos se enfrían, la resistencia se hace tan alta que la corriente del arco se apaga
35 en última instancia; este proceso toma un tiempo: 50-300 milisegundos (ms) es un tiempo típico entre el golpeo del arco y la extinción del arco en un disyuntor de cámara de extinción del arco de la escala de megavatios (MW). Este largo tiempo para abrir el circuito tiene poco que ver con la velocidad de movimiento de los electrodos; en un disyuntor Gerapid™ de GE, por ejemplo, los electrodos se separan en 3 ms (milisegundos), pero enfriar el arco lleva hasta 100 veces ese tiempo, y la corriente puede seguir aumentando en el caso de un cortocircuito hasta diez ms en un disyuntor de cámara de extinción del arco antes de que empiece a disminuir.

Otro medio conocido en la técnica anterior para crear un disyuntor de CC de alta alimentación es usar la carga o descarga de un condensador para reducir momentáneamente la tensión y la corriente a un nivel en que un interruptor de tipo CA de acción rápida puede abrir el circuito. La patente de Estados Unidos 3.809.959 describe una
45 disposición en la que se combinan dos interruptores de tipo CA, una resistencia, una distancia disruptiva y un condensador para proporcionar un disyuntor de CC eficaz que puede trabajar a la tensión MVCC. Esto es más rápido que un disyuntor de cámara de extinción del arco, y puede aplicarse hasta niveles de tensión HVCC. Los refinamientos posteriores de esta idea incluyen la precarga del condensador a una polaridad opuesta en comparación con la corriente que fluye a interrumpirse.

50 La patente de Estados Unidos US 3.534.226 describe una forma específica de insertar una resistencia y una capacitancia en un circuito de CC, para abrir el circuito. El concepto básico de conmutación en resistencias para reducir la corriente de manera escalonada con el fin de controlar la magnitud de los transitorios de tensión durante la apertura de un circuito de CC está bien descrito en la patente de Estados Unidos US 3.534.226 que prevé el uso de
55 muchos interruptores y resistencias individuales. El método de la patente 3.534.226 implica dos tipos diferentes de interruptores que deben abrirse en una secuencia precisa: primero se abre un interruptor mecánico de baja resistencia (a través del cual fluye la mayor parte de la alimentación cuando el interruptor está cerrado). Este es un interruptor convencional en el que los contactos eléctricos están separados. Aunque un arco de plasma puede formarse brevemente entre los electrodos de separación del interruptor de baja resistencia, este arco se extingue rápidamente a medida que la corriente se conmuta en una línea paralela a través de las resistencias, que se conmutan a través de interruptores de acción rápida. La resistencia inicial en la red resistiva debe ser bastante baja para que el arco inicial se extinga y conmute a la línea resistiva paralela. En el momento en que se abre el último conmutador de acción rápida, la corriente se ha reducido a menos del 10 % de su valor máximo (lo que implica que se ha disipado más del 99 % de la energía magnética), lo que permite que la protección final del condensador sea
60 relativamente pequeña y económica en comparación con el tamaño que tendría que ser si tuviera que absorber la mayor parte de la energía magnética almacenada en el circuito en el momento de la apertura inicial. La patente de
65

Estados Unidos 3.534.226 forma la base de varias patentes posteriores, incluidas las patentes de Estados Unidos 3.611.031 y 3.660.723 (ambas usan también un interruptor mecánico de baja pérdida para conmutar la corriente a una red resistiva basada en interruptores electrónicos rápidos) y la patente de Estados Unidos 6.075.684 que usa un interruptor electrónico rápido en lugar del interruptor mecánico de conmutación.

5 La patente de Estados Unidos 4.822.961 desvela un interruptor de corte suave con un estátor, y una lanzadera que se mueve en relación con el estátor. El estátor tiene una región conductora, una región resistiva y una región aislante. A medida que la lanzadera se mueve a través de estas regiones, el flujo de corriente a través del conmutador disminuye. La patente de Estados Unidos 4.598.332 también desvela un limitador de corriente de fallo
10 con una lanzadera y un estátor. La patente de Estados Unidos 4.433.608 desvela un lanzador electromagnético de proyectiles con una serie de derivaciones que están destinadas a equilibrar las fuerzas electromagnéticas.

Sumario

15 Los disyuntores de conmutación funcionan conmutando la resistencia creciente en un circuito en una secuencia predeterminada hasta que la corriente se reduce suficientemente de manera que puede realizarse una apertura de circuito final usando un circuito de protección relativamente pequeño tal como un varistor o un condensador para absorber la última parte de la energía magnética almacenada. La resistencia necesita aumentar lo suficientemente lentamente para que la energía inductiva pueda apagarse sin crear picos de tensión que estén por encima de la
20 tensión máxima que el sistema puede tolerar. En el disyuntor de conmutación, la conmutación secuencial de resistencia en el circuito se logra mediante el movimiento de una lanzadera. A medida que la lanzadera se mueve, la resistencia aumenta debido a uno de estos tres "Casos":

- 25 1. La resistencia a través de una lanzadera de resistencia variable aumenta a medida que se mueve la lanzadera;
2. La resistencia a través del disyuntor aumenta a medida que una lanzadera de conmutación conmuta la corriente a través de una secuencia de resistencias fijas; o,
3. Se usa una lanzadera de conmutación de resistencia variable para conmutar a través de una secuencia de resistencias fijas, pero parte de la resistencia insertada está a bordo de la lanzadera.

30 En el disyuntor de conmutación, la corriente fluye entre un primer Polo A a través de un primer electrodo de estátor (electrodo de estátor # 1) hasta un primer electrodo de lanzadera en la lanzadera; esta parte de la línea de corriente desde el Polo A del disyuntor conectada a la lanzadera puede alcanzarse por cualquier medio realizable, o a través de una conexión de conmutación o una conexión continua estable; la conexión continua estable puede alcanzarse,
35 por ejemplo, mediante un cable flexible, un tubo telescópico o un anillo deslizante. Una vez que la corriente está en la lanzadera, fluye a un segundo electrodo de lanzadera que se conecta a uno o a una serie de segundos electrodos de estátor para completar el circuito en el Polo B de tal manera que la resistencia eléctrica aumenta a medida que se mueve la lanzadera.

40 En el Caso # 1 anterior de una lanzadera de resistencia variable, una parte de resistencia variable de la lanzadera conecta el Polo A del disyuntor de conmutación al Polo B a través de electrodos de estátor fijos. El movimiento de la lanzadera podría ser lineal o podría ser rotatorio. Los puntos de conexión eléctrica entre los electrodos de estátor fijos y los electrodos de lanzadera móviles incluyen al menos un electrodo de estátor discreto a lo largo del cual se desliza la lanzadera durante el funcionamiento del disyuntor, a través del que se transfiere la corriente. La otra
45 conexión de la lanzadera al circuito también puede ser un contacto deslizante, pero también puede ser una conexión de cable flexible o un tubo telescópico que permanece unido a la lanzadera cuando se mueve (en solo un lado del circuito de lanzadera).

50 En el Caso # 2 anterior de una lanzadera de conmutación, las resistencias permanecen fijas, y la lanzadera de conmutación suministra la alimentación a diferentes electrodos de estátor a medida que se mueve, que conectan el flujo de alimentación a través de una secuencia de resistencias fijas de tal manera que la resistencia aumenta repetidamente durante la apertura del disyuntor de conmutación. En este caso, al menos uno de los electrodos de lanzadera en la lanzadera de conmutación debe ser un electrodo discreto que está limitado por un aislamiento en al menos un lado, aunque en el caso más simple el aislamiento circundante puede ser un fluido o el vacío. En la
55 medida en que la masa de las resistencias necesarias para abrir un circuito depende de la energía total que debe absorberse y que puede ser de cientos de kilogramos para un disyuntor de conmutación diseñado para una línea de alta alimentación y alta tensión, es preferible en aplicaciones de alta alimentación no acelerar las resistencias como en el Caso # 1, sino basarse en cambio en una lanzadera de conmutación como en el Caso # 2 para conmutar la alimentación a través de un número de resistencias fijas. La lanzadera de conmutación puede pesar menos y estar convenientemente compuesta de materiales más fuertes que la lanzadera de resistencia variable del Caso # 1. La masa más baja de una lanzadera de conmutación en comparación con una lanzadera de resistencia variable implica que se necesita transferir menos momento para acelerar la lanzadera, lo que minimiza la sacudida debido a la aceleración de la lanzadera, y también reduce el choque, la vibración y la fatiga de la estructura que sostiene el disyuntor de conmutación.

65 Una lanzadera de conmutación de resistencia variable como en el Caso # 3 anterior es útil para proteger las

corrientes de arco que de otro modo podrían surgir cuando el borde trasero de un electrodo de estátor de conmutación deje su conexión eléctrica a un electrodo de lanzadera en movimiento específico. Al hacer que la última parte de un electrodo de lanzadera sea más baja en conductividad en comparación con la primera parte, puede suprimirse el arco mientras se conserva una línea de baja resistencia a través de la primera parte del electrodo de lanzadera para conducir la electricidad eficientemente cuando el circuito está cerrado o para conectar el siguiente electrodo de estátor en la secuencia de los electrodos de estátor contactados por el electrodo de lanzadera en movimiento. Este mismo tipo de gradiente de resistividad puede desearse también en los bordes traseros de los electrodos de estátor donde los electrodos de estátor se enlazan a las resistencias externas. Al hacer que el borde trasero de un electrodo sea mucho más resistivo que un metal implica colocar una parte de la inserción de resistencia de un disyuntor de conmutación a bordo de la lanzadera en la parte de salida de los electrodos de lanzadera o dentro de la parte de salida de los electrodos de estátor, o ambas.

En la medida en que debe acelerarse la masa de la lanzadera durante el funcionamiento de un disyuntor de conmutación, puede desearse minimizar la masa de la lanzadera y, por lo tanto, preferir que el gradiente resistivo del borde trasero se limite principalmente a los electrodos de estátor debido a que la adición de dicho gradiente en el borde trasero de los electrodos de lanzadera aumenta la masa de la lanzadera, lo que hace que el mecanismo de lanzamiento sea más pesado y más grande el momento transferido para acelerar la lanzadera. La graduación de la resistividad en los bordes traseros tanto de los electrodos de lanzadera como de los electrodos de estátor proporciona la mejor supresión de arco posible, ya que un electrodo de estátor específico pierde el contacto con un electrodo de lanzadera específico. La resistividad graduada en los bordes traseros de los electrodos que conectan a través de la línea A conmuta la corriente a una línea B eléctrica diferente de resistencia superior a través de los electrodos vecinos próximos que comparten una conexión en paralelo con los electrodos de separación. Mucho antes de la separación final de los electrodos que están en la línea A, puede desearse que la resistencia a través de la línea A se haya incrementado a al menos diez veces la resistencia a través de la línea B paralela, y esto puede alcanzarse mediante una resistividad graduada en los bordes traseros de los electrodos de la línea A de separación.

Debe haber al menos una zona de conmutación en un disyuntor de conmutación en la que el movimiento de la lanzadera cambia la línea eléctrica a través del disyuntor, de tal manera que la corriente se desvía en líneas de resistencia creciente durante la apertura del disyuntor. Esta zona puede conmutar la alimentación de un electrodo de lanzadera a través de una serie de electrodos de estátor fijos separados eléctricamente en las líneas que tienen una resistencia creciente, o la zona de conmutación de estátor puede comprender una pila de electrodos de estátor fijos conectados eléctricamente en serie de tal manera que la longitud de la línea a través de la pila de resistencia aumenta, conduciendo a una resistencia insertada creciente a medida que se mueve la lanzadera de conmutación, o el movimiento de una lanzadera de resistencia variable puede simplemente colocar una mayor resistencia entre el polo A y el electrodo de estátor que enlaza con el polo B.

Los disyuntores de conmutación permiten la transmisión y la distribución de alimentación de CC de alta alimentación por encima de 3.500 voltios. La distribución de alimentación de CC de media tensión (MVCC) a 2.000-36.000 voltios (2-36 kV) sería tanto eficiente en capital como eficiente en energía en comparación con la distribución de alimentación MVCA, pero hasta ahora ha sido económicamente inviable debido en parte al alto coste, la baja eficiencia y/o la acción lenta de los disyuntores de CC. La MVCC permite microrredes con muchos generadores, demandas de alimentación, y unidades de almacenamiento diferentes enlazados en una sola red, mientras que esto es mucho más difícil de hacer con la alimentación de CA.

La MVCC permite la distribución de alimentación eficiente en las instalaciones industriales (especialmente fábricas y plantas de procesamiento que usan una gran cantidad de motores de velocidad variable); a bordo de buques; y en terrenos de minas y otros sitios aislados fuera de la red. La provisión de alimentación de CC para muchas unidades de motor de velocidad variable diferentes ahorra tanto costes de capital como de energía en comparación con el modo normal de funcionamiento en el que cada controlador de motor para una unidad de velocidad variable debe primero producir una alimentación de CC a partir de una alimentación de CA dentro de la unidad, a continuación accionar un motor de CC o convertir a CA a una frecuencia controlada para accionar el motor de velocidad variable. Las unidades de velocidad variable son menos costosas y más eficientes si se alimentan por la MVCC, que anteriormente no eran prácticas debido a la falta de disyuntores MVCC rápidos, eficientes y económicos.

La transmisión de alimentación de CC de alta tensión (HVCC) es la forma más eficiente de transmitir a niveles de alimentación altos, por ejemplo, sobre un gigavatio (GW) para distancias superiores a los 1000 km. A diferencia de la alimentación de CA, las líneas de alimentación de CC pueden ir fácilmente subterráneas o submarinas, y por estas razones la HVCC es la forma más eficiente y factible de transmitir grandes cantidades de electricidad renovable desde granjas eólicas lejanas y paneles solares a las ciudades y los sitios de almacenamiento de energía remotos económicos, a medida que será necesario construir una economía energética eficiente basada en energías renovables. Hasta hace poco, la transmisión de alimentación HVCC era estrictamente a través de "convertidores de línea conmutada" (LCC) que solo funcionan como líneas de alimentación punto a punto, conectando dos o unos pocos nodos de la red de CA, con convertidores LCC en cada punto de conexión a la red de CA. Un sistema HVCC LCC no necesita disyuntores HVCC, debido a que la corriente puede interrumpirse en el lado de la CA. Un nuevo tipo de convertidor CA/CC, "convertidores de fuente de voltaje" (VSC) permite por primera vez, un verdadero HVCC multiterminal; sin embargo, estos sistemas HVCC multiterminal requieren disyuntores HVCC. El desarrollo de líneas

de alimentación HVCC multiterminal y, eventualmente, superredes HVCC, se ha inhibido por el alto coste, la baja eficiencia y la escasa confiabilidad de los disyuntores HVCC de la técnica anterior.

5 El disyuntor de conmutación es un avance en términos de coste de capital y características de funcionamiento (larga vida, transitorios de conmutación bajos) que permitirán a las redes de CC desde la modesta tensión relevante para centros de datos (~ 400 voltios) a la MVCC para microrredes, barcos, fábricas y plantas de procesamiento, una HVCC para el intercambio de alimentación a larga distancia.

10 **Breve descripción de los dibujos**

10 La figura 1 muestra un disyuntor balístico de movimiento lineal con una lanzadera de resistencia variable que tiene cambios de etapa de resistividad en la lanzadera; dos electrodos de estátor están dispuestos de manera circularmente simétrica para evitar un par de fuerza de Lorentz.

15 La figura 2 muestra un contenedor para una resistencia que a veces se denomina “cápsula” en el presente documento. Esta cápsula se llena con una resistencia en forma de disco encapsulado para formar una celda de resistencia.

20 La figura 3 muestra una pila de celdas de resistencia como la de la figura 2, que están conectadas en serie de tal manera que facilitan la conmutación mediante una lanzadera de movimiento que encaja alrededor de la pila como en la figura 4.

25 La figura 4: un disyuntor de conmutación de movimiento lineal con una lanzadera de conmutación en forma de tubo que encaja alrededor de una columna fija de resistencias en forma de disco.

30 La figura 5: un disyuntor de conmutación multietapa de movimiento lineal con cuatro zonas de conmutación en dos etapas.

30 La figura 6: un disyuntor de conmutación multietapa de movimiento rotatorio con seis zonas de conmutación.

35 La figura 7: apagado de corriente y energía para un disyuntor de conmutación de 18 etapas optimizado de la figura 6 y la Tabla 1.

40 La figura 8: una lanzadera de conmutación de una sola etapa con control de estrés eléctrico detrás del electrodo en movimiento; un circuito mostrado justo antes de accionar el movimiento de la lanzadera de conmutación.

45 La figura 9: una lanzadera de conmutación de una sola etapa con control de estrés eléctrico detrás del electrodo en movimiento; un circuito mostrado al final del movimiento de la lanzadera de conmutación.

50 La figura 10: una interfaz de electrodo de lanzadera/electrodo de estátor con bordes traseros de resistividad creciente.

La figura 11: un disyuntor de conmutación con conductor de cable flexible desde el Polo A hasta la lanzadera.

55 La figura 12: un disyuntor de conmutación con una lanzadera que tiene la forma de una barra, un tubo o un cable.

60 La figura 13: una lanzadera de resistencia variable con un manguito de elastómero para el control de estrés de tensión.

La figura 14: un manguito de elastómero para el control de estrés de tensión después del electrodo de estátor.

La figura 15: un disyuntor de conmutación híbrido con un interruptor rápido paralelo.

65 La figura 16: una lanzadera de conmutación en forma de tubo.

La figura 17: disyuntor rotativo conmutador, con dos zonas de conmutación y unas resistencias externas.

La figura 18: un disyuntor de conmutación rotatorio de acción rápida simplificado en el que los electrodos de estátor y las resistencias conforman las secciones trapezoidales en forma de cuña de la pared del estátor.

La figura 19 muestra el mecanismo de accionamiento y control para un disyuntor de conmutación rotatorio de gran diámetro diseñado para alta tensión.

La figura 20: un disyuntor de conmutación rotatorio montado en la placa base, con accionador de par, cojinetes, desbloqueo con accionamiento rápido y freno de detención.

La figura 21: una representación gráfica semilogarítmica que compara la corriente frente al tiempo en el peor caso con un cortocircuito perfecto (sin bajada de tensión, sin resistencia) frente a un circuito con resistencia interna.

5 Descripción de las realizaciones

En un disyuntor de conmutación es necesario acelerar una lanzadera. La lanzadera puede ser una lanzadera de resistencia variable como en el Caso # 1, o una lanzadera de conmutación como en el Caso # 2, o una mezcla de estos casos en los que parte de la inserción de resistencia variable ocurre en la lanzadera y parte a través de las resistencias fijas, como en el Caso # 3.

Pueden realizarse disyuntores de conmutación para circuitos de alimentación relativamente baja de menos de aproximadamente cien kilovatios (kW) con una lanzadera de resistencia variable (Caso # 1) que conecta entre dos conjuntos de contactos, como en la figura 1. Esto simplifica el diseño del mecanismo del disyuntor y el cableado, pero requiere la fabricación de una lanzadera bastante complicada con una resistencia más alta que la que normalmente se requiere para las resistencias. Se requieren resortes o mecanismos de lanzamiento más fuertes que para los diseños de lanzadera de conmutación (Caso # 2) para el mismo nivel de alimentación debido a que debe acelerarse toda la masa de las resistencias. La lanzadera de resistencia variable debe resistir altas cargas de aceleración, y debe tener una superficie que se deslice sobre los electrodos de estátor sin un desgaste excesivo.

La figura 1 es una vista parcialmente en despiece de un disyuntor de conmutación 100 en el que la resistencia insertada está a bordo de la lanzadera. En la figura 1, un resorte 101 está bajo tensión, tirando de la lanzadera a través de una varilla no conductora 103; esta varilla se extiende al extremo trasero de la lanzadera y está conectada al imán permanente 119, el "imán de lanzadera". El imán de lanzadera 119 está en contacto con el imán de estátor 121 cuando el disyuntor está cerrado, antes de disparar el disyuntor. La bobina electromagnética 123 está orientada para repeler el imán de lanzadera y para disparar la apertura del disyuntor por el resorte cuando una corriente de CC pasa a través de la bobina. La figura 1 muestra una parte de resistencia variable 110 de la lanzadera que tiene cambios de etapa de resistividad en las capas de segmento de núcleo de lanzadera 111, 112 y 113. El estátor 107 tiene unos electrodos 105 y 115 que están dispuestos de una manera circularmente simétrica para evitar un par en la lanzadera por las fuerzas de Lorentz. Los dos electrodos de estátor circulares 105 y 115 están separados a una distancia establecida, suficiente lejos para evitar el arco durante la apertura del disyuntor.

Durante el tiempo que una única capa de resistividad está saliendo del electrodo de estátor 115, la resistencia aumenta suavemente debido a la inserción de una mayor longitud de segmentos resistivos entre el Polo A y el Polo B a medida que se mueve la lanzadera a la izquierda. A medida que cada límite de material resistivo pasa fuera de contacto con el electrodo de estátor 115, hay una discontinuidad en la curva de resistencia frente al tiempo, que a su vez genera un cambio de pendiente en la curva de la resistencia frente al tiempo, pero ninguna etapa cambia en resistencia.

La lanzadera de la figura 1 se muestra en su posición de circuito cerrado, pero se aplica una vista despiezada al imán de estátor 121 y al gatillo de electroimán 123 para que sea más fácil de representar. En el circuito cerrado, la alimentación fluye desde el Polo A hasta el electrodo de estátor 115, a continuación a través de la parte de la lanzadera 109 al electrodo de estátor 105; la 109 se compone de un buen conductor eléctrico con baja resistividad $\sim 10^{-8}$ ohmios-metro. Después de que la lanzadera comienza a moverse, la resistencia aumenta a medida que el límite entre el material 109 y el material 111 sale del lado izquierdo del electrodo de estátor 115; esta es la primera conmutación. Después de esto, la resistencia se eleva suavemente mientras que el material 111 sale del lado izquierdo del electrodo de estátor 115, a continuación con pendiente creciente en el momento de la segunda conmutación cuando el límite entre el material 111 y 112 sale del lado izquierdo del contacto de estátor 115, entonces la resistencia se eleva suavemente de nuevo durante un tiempo hasta que el límite entre 112 y 113 sale del electrodo de estátor 115. El circuito se abre finalmente cuando el material aislante 117 se extiende desde el lado izquierdo del electrodo 115. Cuando el circuito se abre finalmente una protección de algún tipo, como es familiar para un experto en la técnica anterior, tal como un varistor o un condensador, absorbe la última parte de energía almacenada inductivamente. El recorrido total durante la apertura del circuito es la distancia 125. No se muestra el medio para detener el movimiento hacia delante de la lanzadera.

Dos disyuntores de conmutación del tipo mostrado en la figura 1 pueden estar dispuestos sobre un soporte común de tal manera que el efecto del momento de acelerar una lanzadera a la izquierda se equilibra por el efecto del momento de acelerar la segunda lanzadera a la derecha.

La figura 2 muestra una única celda de resistencia de una columna de resistencias apiladas (mostrada en la figura 3) en la que una resistencia en forma de disco 127 se encapsula en una cápsula que facilita el apilamiento y la conmutación. La resistencia 127 es deseablemente una resistencia de alúmina/carbono, tal como las disponibles en HVR Advanced Power Components de Cheektowaga, NY, USA. Estas resistencias pueden manejar muy bien la alimentación pulsada, como se necesita durante el funcionamiento de un disyuntor de conmutación, y están disponibles en tres órdenes de magnitud de resistividad. Las propiedades físicas de esta clase de resistencias (especialmente la densidad y la resistencia) no serían deseables para un diseño tal como el de la figura 1, en el que

la resistencia en sí se acelera para alcanzar la apertura del circuito y los electrodos de estátor se mueven sobre la superficie de la resistencia. La cápsula de la figura 2 está compuesta por una parte inferior conductora 129, una parte superior aislante 133 y una parte de manguito aislante 135. Dicha cápsula proporciona un sitio de anidamiento para una resistencia en forma de disco 127 (o 137, 138, 139, 140, o 141, como se muestra en la figura 3) que está unido por un adhesivo conductor 131 a la parte inferior de la cápsula 129. El adhesivo conductor 131 es deseablemente un compuesto de soldadura fuerte de metal, una soldadura o un adhesivo conductor que es menor en resistividad de volumen que el material resistivo que comprende una resistencia de disco 127. Dicha parte inferior de la cápsula 129 es metálica y tiene un reborde de metal que se extiende parcialmente hacia arriba a lo largo, pero a cierta distancia de los lados de la resistencia de disco 127, 137, 138, 139, 140 o 141. Por encima y adyacente a la parte de metal de la cápsula 129 y extendiéndose hasta casi el mismo radio exterior que la parte de metal de la cápsula 129 está una sección eléctricamente aislante 133. Entre el radio interior común del reborde superior de la parte de metal de la cápsula 129 y la parte superior aislante de la cápsula 133 y el radio exterior de la resistencia de disco 127, 137, 138, 139, 140 o 141, se inserta un manguito aislante 135; este manguito garantiza que la corriente fluya verticalmente desde la parte superior a la parte inferior de cada resistencia, de tal manera que la generación de calor resistivo I^2R se distribuye a lo largo de todo el volumen de la resistencia de disco tal como 127. Las resistencias (127, 137, 138, 139, 140 o 141) se encapsulan en seis cápsulas conteniendo cada una unos componentes 129, 131, 133 y 135 con un sistema polimérico aislante libre de huecos (como se practica comúnmente, por ejemplo, en los transformadores encapsulados) para formar la celda de resistencia final encapsulada, como en la figura 2.

A continuación, se apilan seis celdas de resistencia similar a la mostrada en la figura 2 como en la figura 3 para formar la base de un estátor; la totalidad de la pared radial exterior de cada cápsula y todo el estátor formado apilando las cápsulas más una celda superior especial es una superficie deslizante concéntrica que es lisa. La celda de resistencia inferior contiene la resistencia de disco 127; la celda siguiente hacia arriba contiene la resistencia de disco 137; la celda siguiente contiene la resistencia de disco 138; la celda siguiente contiene la resistencia de disco 139; la celda siguiente contiene la resistencia de disco 140; la celda siguiente contiene la resistencia de disco 141; los niveles de resistividad de cada resistencia de disco aumentan en el orden $127 < 137 < 138 < 139 < 140 < 141$. En la parte superior de la pila de celdas de resistencia hay una celda de resistencia de resistividad variable especial que difiere de las otras celdas en que está compuesta por una placa base de metal 145 y encima de la misma hay un elemento cermet (metalocerámico) de resistividad graduada 143 que tiene una resistividad en la parte inferior que es aproximadamente igual a la resistividad de la resistencia de disco 141, con una resistividad que aumenta hasta que es un aislante excelente en la parte superior, con una resistividad $> 10^{12}$ ohmios-metro (ohmios-m). Todas estas celdas están unidas mecánicamente y eléctricamente entre sí, de tal manera que la base de metal de cada celda está unida a toda la superficie superior de la resistencia de disco por debajo de la misma en la pila.

La figura 4 muestra cómo la pila de segmentos de resistencia de la figura 3 se combina con una lanzadera de conmutación 147, que en este caso toma la forma de un manguito metálico que encaja a lo largo de la columna de segmentos de resistencia, un anillo deslizante conductor 149 que está conectado al Polo A y a la lanzadera de conmutación 147, y una placa base conductora 151 que está conectada al Polo B para formar un disyuntor de conmutación. La figura 4 muestra un estado intermedio que se produce durante la apertura del disyuntor de conmutación de las figuras 2, 3, 4; en este estado intermedio tres celdas de resistencia que contienen las resistencias de disco 127, 137 y 138 están en un estado conectado en serie entre la lanzadera de conmutación móvil 147 y la base de la pila de resistencias 151. Obsérvese que la lanzadera de conmutación de manguito metálico 147 es menor en masa que la columna de segmentos de resistencia, y por lo tanto necesita menos fuerza 150 para acelerar de lo que sería necesario para acelerar la pila de resistencias a la misma velocidad. La corriente fluye desde el Polo A hasta la lanzadera de conmutación móvil 147 a través del anillo deslizante 149 (en este caso toda la longitud de 147 es el electrodo de lanzadera). La conexión de la lanzadera de conmutación al Polo A también podría ser, en principio, a través de un cable. Cuando el disyuntor de conmutación de la figura 4 está cerrado, la corriente fluye con baja resistencia desde el Polo A a través del anillo deslizante 149, a continuación a través de la lanzadera de conmutación 147 a la parte de metal 129 en la parte inferior de la celda de resistencia más baja (que contiene el disco de resistencia 127), en el caso de estado encendido (no mostrado), la corriente fluye en su mayoría directamente en la placa base de metal 151 y en el Polo B, sorteando la resistencia de disco 127 (alguna pequeña corriente fluye todavía a través de la resistencia de disco 127).

Cuando se dispara el disyuntor de la figura 4, la lanzadera de conmutación 147 se acelera rápidamente hacia arriba, haciendo que la corriente pase primero a través de la resistencia 127, a continuación 127 + 137, a continuación 127 + 137 + 138 (este es el estado ilustrado en figura 4), y así sucesivamente. La lanzadera de conmutación continúa moviéndose hacia arriba hasta que se ha movido más allá de la última parte de metal de la columna de la pila de resistencias 145 de la figura 3, después de lo cual la última corriente restante pequeña final se apaga mediante la celda de resistividad graduada 143. En la parte inferior de la lanzadera de conmutación 147 está un manguito semiconductor o aislante 153 que encaja estrechamente alrededor de la columna de resistencias para suprimir la formación del arco cuando la parte conductora de la lanzadera de conmutación 147 se separa de una de las partes de metal 129 encontradas en la parte inferior de cada cubierta de resistencia. Dicho manguito 153 es deseablemente semiconductor cuando toca la lanzadera de conmutación 147, pero tiene un gradiente de resistividad de tal manera que se convierte en un material de alta resistencia dieléctrica y alta resistividad (superior a 10^{12} ohmios) en el extremo opuesto (extremo inferior de la figura 4). Dicho manguito 153 puede fabricarse de varios materiales; una

composición específicamente deseable es un elastómero de tejido reforzado de alta resistencia con una superficie interior resbaladiza. No se muestran en la figura 4 los medios por los que la lanzadera de conmutación se tira hacia arriba, los sensores para detectar una condición de fallo, y los medios para disparar la apertura del circuito; estas funciones pueden alcanzarse por medios conocidos en la técnica anterior. Los electrodos flexibles que facilitan un mejor contacto eléctrico entre la lanzadera de conmutación 147 y la superficie exterior de la pila de resistencias mostrada en la figura 3, no se muestran, pero opcionalmente están presentes en la superficie interior de la lanzadera de conmutación 147.

La figura 5 es un disyuntor de conmutación de dos etapas que tiene una lanzadera de conmutación 158 que se mueve una distancia 205 para abrir el circuito. La lanzadera de conmutación contiene dos pares de electrodos de lanzadera compuestos de 210, 211 y 212 (par de electrodos de lanzadera # 1), y 215, 216, 217 (par de electrodos de lanzadera # 2), los cuales están integrados en un aislante estructural 159. Hay cuatro zonas de conmutación 161 a 164: 161 y 162 forman conjuntamente la primera etapa 157; 163 y 164 forman conjuntamente la segunda etapa 219 de este disyuntor de conmutación de dos etapas. En cada una de estas zonas hay cuatro electrodos de estátor; por ejemplo, la zona de conmutación 161 contiene los electrodos de estátor 166, 168, 170, y 172; el electrodo de estátor 166 se conecta a través del conductor de baja resistencia 174 al Polo A. El electrodo de estátor 168 se conecta al Polo A a través de la resistencia 176; el electrodo de estátor 170 se conecta al Polo A a través de las resistencias 178 y 176 en serie; el electrodo de estátor 172 se conecta al Polo A a través de las resistencias 180, 178, y 176 en serie; y de manera similar para las otras zonas de conmutación. La zona de conmutación 162 contiene los electrodos de estátor 181, 183, 185, y 187. El electrodo de estátor 181 se conecta al electrodo de estátor 189 a través del conductor de baja resistencia 182. El electrodo 183 se conecta al conductor de baja resistencia 182 a través de la resistencia 184; el electrodo de estátor 185 se conecta al conductor de baja resistencia 182 a través de las resistencias 186 y 184 en serie; el electrodo de estátor 187 se conecta al conductor de baja resistencia 182 a través de las resistencias 188, 186, y 184 en serie. La zona de conmutación 163 contiene los electrodos de estátor 189, 190, 192 y 194. El electrodo de estátor 189 se conecta al electrodo de estátor 181 a través del conductor de baja resistencia 182; el electrodo de estátor 190 se conecta al conductor de baja resistencia 182 a través de la resistencia 191; el electrodo de estátor 192 se conecta al conductor de baja resistencia 182 a través de las resistencias y 191 193 en serie; el electrodo de estátor 194 se conecta al conductor de baja resistencia 182 a través de las resistencias 195, 193, y 191 en serie. La zona de conmutación 164 contiene los electrodos de estátor 196, 198, 200 y 202. El electrodo de estátor 196 se conecta al Polo B a través del conductor de baja resistencia 197. El electrodo de estátor 198 se conecta al Polo B a través de la resistencia 199; el electrodo de estátor 200 se conecta al Polo B a través de las resistencias 201 y 199 en serie; el electrodo de estátor 202 se conecta al Polo B a través de las resistencias 203, 201, y 199 en serie.

Cuando el circuito está cerrado hay una línea de baja resistencia del Polo de A al Polo B a través del disyuntor de conmutación de esta manera: el Polo A se conecta a través del conductor 174 al electrodo de estátor 166 al electrodo de lanzadera 211, que a continuación se conecta a través de conductor aislado 210 al electrodo de lanzadera 212, que a continuación se conecta al electrodo de estátor 181 y desde allí a través del conductor 182 al electrodo de estátor 189, a continuación, al electrodo de lanzadera 216, a continuación a través de conductor aislado 215 al electrodo de lanzadera 217, a continuación al electrodo de estátor 196, a continuación, a través del conductor 197 al Polo B. La lanzadera de conmutación en este caso es esencialmente un cuerpo rígido que mantiene una relación geométrica de conjunto entre los cuatro electrodos de lanzadera 211, 212, 216, y 217 a medida que avanza hacia la derecha para abrir el circuito. Puede desearse tener los tiempos en que los cuatro electrodos de lanzadera pierden el contacto con los cuatro electrodos de estátor en estado encendido que correspondan a un circuito cerrado (166, 181, 189, y 196) que no es simultáneo, ya que la conmutación simultánea en los cuatro conjuntos de electrodos aumentará la magnitud del transitorio de conmutación. Los bordes traseros de los cuatro electrodos de lanzadera 211, 212, 216, 217 pueden tener sus posiciones axiales, ajustadas al tiempo en que las cuatro primeras conmutaciones apagan los electrodos en estado encendido, durante el que la conexión eléctrica se pierde con los electrodos de estátor 166, 181, 189, 196; de hecho, todas las conmutaciones posteriores pueden programarse ajustando también la separación entre los electrodos segundo, tercero y cuarto dentro de cada zona de conmutación. Dicha programación puede alcanzarse ajustando el espacio entre los electrodos de lanzadera y los electrodos de estátor; o, puede adoptarse un espaciado convencional entre los electrodos de lanzadera, haciéndose todo el control de programación ajustando las posiciones de borde trasero de solo los electrodos de estátor. Esto es óptimo para insertar las doce resistencias a intervalos de tiempo controlados. Después de las doce inserciones resistivas implícitas en la figura 5, la corriente es suficientemente baja de manera que los electrodos de lanzadera pueden moverse más allá de su última conexión a través de las resistencias sin dañar los arcos como cuando se corta la corriente muy disminuida. Puede desearse graduar la resistividad de los bordes traseros de los electrodos de estátor, especialmente el electrodo de estátor específico que hace el cierre de alimentación final. En la figura 5, el cierre final ocurre cuando el electrodo de lanzadera 211 pierde su conexión al electrodo de estátor 172, que es el último electrodo en la zona 1. (Lo mejor es definir cuál de las cuatro conmutaciones finales (una en cada zona) es la que abre el circuito, de manera que el aislamiento extra de alta tensión que será necesario solo puede desplegarse en esta zona específica; esto ahorra costes). Ya que el electrodo de estátor 172 es el que abre el circuito, es muy deseable graduar la resistividad del borde trasero de este electrodo todo el camino desde el semiconductor a alta resistividad para proporcionar un cierre final suave de la corriente residual que fluye todavía después de la duodécima conmutación del disyuntor de conmutación de la figura 5.

Una larga cadena multietapa de disyuntores de conmutación como en la figura 5 puede usarse para interrumpir arbitrariamente una alta tensión. Con el fin de mover de manera eficiente una larga lanzadera de conmutación tal como esto implica, puede desearse usar varias unidades a lo largo de la longitud de la lanzadera de conmutación, tal como múltiples resortes colocados para acelerar la lanzadera entre las zonas de conmutación, o múltiples motores lineales que actúan entre las zonas de conmutación. Por ejemplo, un largo disyuntor multietapa con imanes permanentes integrados puede accionarse por medios electromagnéticos conocidos (sin embargo, puede ejercerse una mayor fuerza con resortes o electroimanes que acoplado los imanes permanentes). Una combinación de mecanismos de accionamiento también puede usarse para conseguir una mayor aceleración que la que puede producirse por un solo medio. Varios disparadores y liberadores pueden desarrollarse en un disyuntor lineal multietapa de este tipo, como se trata en más detalle más adelante.

La figura 6 representa un disyuntor de conmutación multietapa rotatorio teórico diseñado para un polo de un medio para un disyuntor de alimentación de CC o de CA de alta tensión. En este caso, se muestran seis zonas de conmutación, 221-229 (que comprenden un electrodo de lanzadera 221; unos electrodos de estátor 222, 223, 224, y 225; un cable conductor 226, y unas resistencias 227, 228, y 229); 231-239 (que comprenden un electrodo de lanzadera 231; unos electrodos de estátor 232, 233, 234 y 235; un cable conductor 236 y unas resistencias 237, 238 y 239); 241-249 (que comprende un electrodo de lanzadera 241; unos electrodos de estátor 242, 243, 244 y 245; un cable conductor 246 y unas resistencias 247, 248, y 249); 251-259 (que comprende un electrodo de lanzadera 251; unos electrodos de estátor 252, 253, 254 y 255; un cable conductor 256 y unas resistencias 257, 258 y 259); 261-269 (que comprende el electrodo de lanzadera 261; los electrodos de estátor 262, 263, 264 y 265; el cable conductor 266 y las resistencias 267, 268, y 269); y 271-279 (que comprende el electrodo de lanzadera 271; los electrodos de estátor 272, 273, 274, y 275; el cable conductor 276, y las resistencias 277, 278, y 279). Estas zonas están dispuestas en pares que comprenden las etapas de conmutación: la primera zona de conmutación (definida por 221 a 229 en la figura 6) es la más cercana al Polo A, y está enlazada a través del conductor aislado 220 a la segunda zona de conmutación (definida por 231-239 en la figura 6); la primera zona de conmutación y la segunda zona de conmutación junto con el conductor aislado 220 forman la primera de las tres etapas de conmutación en el disyuntor de conmutación de la figura 6. Las otras dos etapas incluyen los componentes 240-259 y 260-279. Una etapa se define como un circuito completo que se mueve desde el encendido de la lanzadera de conmutación y a continuación al apagado de la lanzadera. En la figura 5 hay dos etapas, y en la figura 6, hay tres etapas.

El disyuntor de conmutación rotativo multietapa de la figura 6 funciona de la misma manera que el disyuntor de conmutación multietapa lineal de la figura 5, excepto que el accionamiento es por medio de la rotación de un rotor de conmutación cilíndrico 280 en lugar de por medio un movimiento lineal de una lanzadera de conmutación como en la figura 5, y hay tres etapas en lugar de dos como en la figura 5. (Como se usa en el presente documento, un "rotor de conmutación" es un caso especial de una "lanzadera de conmutación"; un "electrodo de lanzadera" se refiere a cualquier electrodo en movimiento, si se mueve linealmente como en la figura 5, o a través de rotación, como en la figura 6). El disyuntor de circuito de la figura 6 tiene seis zonas conmutación, cada una de las cuales funciona de la misma manera que lo hace cada una de las cuatro zonas de conmutación de movimiento lineal de la figura 5. En este caso, la lanzadera de conmutación rota aproximadamente 18,2 grados en sentido contrario a las agujas del reloj para abrir el circuito, a continuación otros 7,9 grados a una posición de circuito abierto final, de tal manera que la rotación total durante el accionamiento del disyuntor de conmutación rotativo es de 29,1 grados (281). El rotor se compone de materiales de aislamiento eléctricamente fuertes tal como un material compuesto de polímero reforzado con fibra de vidrio, un compuesto termoplástico de calidad de ingeniería, o una espuma sintáctica de matriz de polímero, excepto para los electrodos de lanzadera 221, 231, 241, 251, 261, y 271 y las líneas conductoras aisladas mostradas con líneas negras gruesas (220, 240, y 260) dentro de la lanzadera que conectan pares de electrodos de lanzadera (tales como 221 y 231). El eje es deseablemente metálico, pero aislado eléctricamente de los conductores 220, 240, y 260. Toda la parte giratoria está rodeada por un estátor 290 en el que se montan los electrodos de estátor. Las resistencias están preferentemente fuera del estátor para facilitar la extracción de calor después de disparar el disyuntor.

La vista de la figura 6 es una vista de extremo desde arriba de una lanzadera de conmutación que tiene la forma de un cilindro. La longitud del cilindro (perpendicular a la sección transversal mostrada en la figura 6) puede ajustarse para mantener la carga completa normal de amperios por cm^2 de área de contacto del electrodo dentro de los límites de diseño; por lo tanto, en función de la corriente, el cilindro 280 puede verse como un disco o un cilindro. La distancia de aislamiento circunferencial entre los electrodos de estátor (por ejemplo 222, 223, 224, 225) puede ajustarse para tratar con el gradiente de tensión en cada conmutación; en principio, tanto la anchura de cada electrodo de estátor como la distancia entre cada par vecino siguiente de electrodos de estátor se ajustaría para llegar a un diseño óptimo. Ni las distancias entre los electrodos de estátor, ni la anchura de los electrodos de estátor, ni la composición de los diferentes electrodos de estátor tienen que ser las mismas para cualquiera de los dos electrodos de estátor. También pueden montarse múltiples disyuntores de conmutación conectados en serie, tales como los de la figura 6 en un solo eje, para crear más etapas de conmutación (6, 9, etc.). En este caso, cada uno de los contactos de interruptor 221, 231, 241, 251, 261, y 271; y sus contactos de acoplamiento 222, etc. abarcan solamente una fracción de la longitud del eje de accionamiento separada por intervenir en las secciones aislantes.

En el diseño específico de la figura 6, los electrodos de estátor en estado encendido 222, 232, 242, 252, 262 y 272 son deseablemente electrodos de metal líquido; estos son los únicos electrodos estátor que transportan alta

corriente en el estado encendido. Los electrodos de metal líquido son aproximadamente 10^4 veces más conductores que los electrodos de metal sólido de deslizamiento en términos de resistencia de contacto. Los electrodos de metal líquido pueden, por lo tanto, ser también más estrechos que los electrodos de metal sólido de deslizamiento, lo que es una gran ventaja para las primeras etapas de conmutación de un disyuntor de conmutación. Considérese un caso concreto: en la figura 6 los electrodos de estátor de metal líquido 222, 232, 242, 252, 262, y 272 pueden ser por ejemplo una décima tan anchos como los electrodos de estátor sólidos 223, 224, y 225, y todavía tener una milésima de la resistencia de contacto de los electrodos de estátor sólidos. Como un ejemplo específico, considérese el caso donde el rotor de conmutación de la figura 6 es una lanzadera de conmutación en forma de cilindro de 31,5 cm de diámetro diseñada para 30 kV de alimentación de CC o CA. Fabricar uno de los electrodos de estátor de metal líquido 222, 232, 242, 252, 262, y 272 de un milímetro (mm) de anchura en la dirección circunferencial significa que sería posible alcanzar la primera conmutación solo por una rotación de 0,36 grados de la lanzadera 280 si el primer electrodo de estátor está alineado con el electrodo de rotor de manera que solo hay un mm para moverse para hacer la primera conmutación (por ejemplo). Esta primera conmutación es muy importante en cualquier disyuntor en el que es crítico controlar la corriente máxima de fallo, ya que tan pronto como se inserta la primera resistencia se controla la corriente de fallo. El uso de electrodos de metal líquido estrechos es una forma de acelerar la primera conmutación reduciendo la distancia que debe moverse la lanzadera de conmutación para llegar a la primera conmutación.

Una consideración a la hora de usar electrodos de metal líquido es evitar el oxidado de los contactos metálicos sólidos a conectar con el electrodo de metal líquido. Una forma de evitar la oxidación en la superficie del electrodo de lanzadera que se acopla con el electrodo de metal líquido es encerrar el disyuntor en un ambiente sellado libre de oxígeno; en este caso, pueden usarse los electrodos de lanzadera a base de plata o de cobre convencional con un electrodo líquido, siempre que el electrodo de metal líquido no reaccione con el cobre o la plata. Otro método conocido es el uso de un "metal noble" tal como oro, platino, o paladio en el aire. Una solución específicamente deseable es usar un electrodo con molibdeno en su superficie, ya que el molibdeno no se oxida en aire por debajo de 600° Celsius; a pesar de que el molibdeno tiene una baja conductividad para ser un metal (resistividad 85 veces mayor que el cobre), un recubrimiento delgado de molibdeno sobre un sustrato de un electrodo metálico resulta en una superficie libre de óxido que acopla muy bien con los electrodos de metal líquido, sin la resistencia añadida debido a una capa de óxido; la resistencia a través del molibdeno en sí es insignificante si es de solo un mm o menos de espesor sobre el electrodo, como puede obtenerse fácilmente por pulverización de plasma o diversos procesos de PVD (deposición física de vapor).

Los electrodos de metal líquido comprenden normalmente un componente estructural de metal poroso sinterizado formado por unos procesos metalúrgicos en polvo que se humedece y se inunda por un metal líquido como el galio o una aleación de galio de bajo punto de fusión. El sodio, una eutéctica de sodio/potasio, y el mercurio se han usado también en los electrodos de metal líquido, pero son menos deseables que los electrodos metálicos líquidos basados en galio. El galio, aleaciones de galio, el sodio, o una eutéctica de sodio/potasio se oxidarán, por lo que los electrodos deben protegerse dentro de un contenedor libre de oxígeno que puede contener gas, líquido o vacío, además de las partes móviles sólidas del disyuntor de conmutación multietapa de movimiento rotatorio de la figura 6. El coste añadido de la estructura de contención hermética al gas con el fin de ser capaz de usar los electrodos líquidos basados en galio o sodio está bien justificado en el caso de disyuntores de alta alimentación, tales como los de la figura 6. Si debe mantenerse un entorno libre de oxígeno para el metal líquido, entonces tampoco hay necesidad de que las superficies de deslizamiento de los electrodos no de metal líquido sean, en principio, materiales resistentes a la oxidación (los electrodos no de metal líquido incluyen todos los electrodos de lanzadera y todos menos uno de los electrodos de estátor de cada zona de conmutación); en un diseño de este tipo la superficie de electrodo de deslizamiento podría basarse en un metal puro o una aleación de cobre, níquel, cromo o plata, o un compuesto cermet que contiene uno de estos metales o una aleación de los mismos, en lugar de molibdeno. Incluso si se proporciona un entorno libre de oxígeno en el disyuntor de conmutación final, sin embargo, una superficie resistente a la oxidación en los electrodos que están en contacto con los electrodos de metal líquido en el estado encendido, puede ser importante para que sea conveniente fabricar el dispositivo sin tener que mantener un ambiente libre de oxígeno entre el momento en que se fabrican los electrodos y en el que se fabrica el disyuntor.

Las seis zonas de conmutación de la figura 6, cada una de las cuales puede cortar la alimentación, dan a este diseño una alta redundancia y fiabilidad de corte. Como un ejemplo específico, considérese de nuevo el caso donde el rotor de conmutación de la figura 6 es una lanzadera de conmutación en forma de cilindro de 31,5 cm de diámetro diseñada para 30 kV de alimentación de CC o CA. El conmutador rotatorio en forma de cilindro 280 en este ejemplo específico es de 99 cm de circunferencia y contiene 6 electrodos de lanzadera conductores que son de 1,25 cm de ancho en la dirección circunferencial (ocupando 4,55 grados en el radio exterior del rotor de conmutación). Los electrodos de lanzadera son lo suficientemente anchos como para tocarse con dos electrodos de estátor, en todo momento, excepto en la conmutación final; todos los electrodos de lanzadera están integrados en un material polimérico aislante. El rotor de conmutación en su conjunto tiene una superficie exterior lisa para deslizarse contra el estátor y sus electrodos. Cuanto mayor sea el número de amperios, más larga tiene que ser la longitud del cilindro para que pase la corriente en este diseño. En el caso específico de la zona de conmutación 1 en la figura 6, los electrodos de estátor 223, 224, y 225 son electrodos metálicos que pueden ser, por el bien de la demostración de 1,0 cm de anchura, con 0,25 cm de un aislante entre cada uno, de tal manera que los electrodos de lanzadera de 1,25 cm de anchura están en contacto total con el siguiente electrodo de estátor en el momento en que se pierde el

contacto con un electrodo de estátor dado. El primer electrodo de estátor 222 es de solo 0,25 cm de anchura, y es un electrodo de metal líquido, seguido por un hueco de aislamiento que es de 0,25 cm de anchura entre los electrodos de estátor 222 y 223; esto significa que el rotor de conmutación solo tiene que rotar 0,91 grados hacia la primera conmutación en la zona 1. En el momento en que el electrodo 222 pierde el contacto con el electrodo de lanzadera 221, el electrodo de lanzadera 221 está en pleno contacto con el electrodo 223; y en el momento en que el electrodo 223 pierde el contacto con el electrodo de lanzadera 221, dicho electrodo de lanzadera está en pleno contacto con el electrodo 224; y así sucesivamente.

Los bordes traseros de los electrodos conductores de la figura 6 pueden graduarse en términos de composición y de resistividad eléctrica para reducir la posibilidad de que un arco se iniciará en el momento en que los electrodos se separen. Esto es cierto para todos los diseños del disyuntor de conmutación tratados en el presente documento, y el gradiente de resistividad del borde trasero puede estar solo en los electrodos de lanzadera, solo en los electrodos de estátor, o tanto en los electrodos de lanzadera como de estátor. Esto se trata en términos más generales en otra parte; en el caso específico del disyuntor de conmutación de la figura 6 una sola zona de resistividad graduada en el borde trasero de uno de los electrodos de estátor podría fácilmente absorber la última parte de la energía magnética en la corriente que fluye después de la última conmutación de la Tabla 1, o un condensador puede ser más económico para absorber esta última parte de la energía inductiva.

La superficie más exterior de los electrodos de lanzadera se realiza mejor a partir de un metal o material compuesto altamente conductor que sea también resistente al desgaste, y que no se oxide, recristalice, o interdifusione con el revestimiento en los electrodos de estátor en el estado encendido durante el uso. La oxidación puede evitarse o excluyendo el oxígeno, o usando un metal resistente a la oxidación, tal como oro, platino o molibdeno. Cuando se excluye el oxígeno, un material compuesto de matriz de metal blando/partícula dura particulado con buena conductividad eléctrica, tal como unas estructuras porosas impregnadas de plata o de cobre basadas en metales sinterizados; por ejemplo, son adecuados el polvo de cromo como en la patente de Estados Unidos 7.662.208, o el polvo de tungsteno, como en los electrodos comerciales de Mitsubishi Materials C.M.I. Co. Ltd. Los electrodos de carburo de silicio/aluminio son también adecuados en un entorno libre de oxígeno. Cuando no se excluye el oxígeno, el molibdeno es una superficie de contacto preferida para todos los electrodos no de metal líquido; el molibdeno que es una pulverización de plasma sobre los electrodos de carburo de silicio/aluminio es especialmente favorable. Aunque podría fabricarse una versión del disyuntor de conmutación de la figura 6 para funcionar en un entorno de aire, que no sería posible en ese caso usar cualquier otro electrodo metálico líquido distinto del mercurio.

Para lograr un objetivo de pérdida de 1,0 kW para las pérdidas en el estado encendido a 2000 amperios en la condición de circuito cerrado, la resistencia total de la línea desde el Polo A al Polo B en la figura 6 sería a lo sumo de $2,5E-4$ ohmios. Esta baja resistencia solo es factible con uniones de electrodo en estado encendido de metal líquido. El logro de una menor resistencia implica usar un rotor de mayor masa, que requiere más par para acelerar; hay una base de diseño óptimo en el objetivo de resistencia en el estado encendido que será algo diferente para cada caso en específico; en algunos casos, una mayor producción de calor que un kW puede estar bien justificado en combinación con una refrigeración por ventilador o por líquido, que hace que sea más fácil hacer un disyuntor de conmutación de trabajo, sin recurrir a los electrodos de metal líquido para las conexiones de electrodos en el estado encendido.

El resorte u otro accionador usado para provocar la aceleración radial en el sentido contrario a las agujas del reloj de la figura 6 puede acelerar el rotor a lo largo del tiempo de las conmutaciones, o como alternativa, un resorte muy rígido podría impartir una aceleración inicial usando solo una pequeña parte de los 18,2 grados de movimiento radial que el rotor de conmutación se mueve durante la conmutación. En este escenario, el rotor de conmutación está en vuelo libre durante la mayor parte del tiempo que el rotor del disyuntor de conmutación está en movimiento y provocando conmutaciones.

Haciendo algunos supuestos simplificadores, puede modelarse una secuencia optimizada para los dieciocho cortes de resistencia que permiten las 18 conmutaciones del disyuntor de conmutación de la figura 6, para un disyuntor de conmutación de 300 kV. La Tabla 1 muestra los tiempos de conmutación objetivos calculados y las resistencias insertadas, basándose en estos supuestos:

1. Una inductancia de circuito supuesta de 100 milihenrios (estimación del lado realista alto);
2. La máxima corriente permitida es 10 kA en la primera conmutación;
3. El límite de tensión superior de 500 kV (1,67 X tensión normal); que a continuación decae exponencialmente a un límite de tensión inferior de 360 kV (1,2 X tensión normal) antes de la próxima conmutación.

Ya que no puede escogerse donde se produce un fallo de circuito, no es lógico tener la inductancia de sistema normal como una estimación realista de la inductancia del sistema en un fallo; esto significa que la inductancia de sistema puede no estar disponible para ralentizar la irrupción de corriente en un fallo. Este caso permite considerar un fallo de inductancia alta realista (100 milihenrios); en este caso, la energía magnética almacenada inductivamente que debe disiparse para abrir un circuito HVCC en fallo a 10 kA es de 5 millones de julios (5 MJ). Las anteriormente mencionadas resistencias sinterizadas de carbono/alúmina de HVR Internacional pueden absorber 111 J/g en el servicio de rutina, lo que significa que se necesitarían 45 kg de resistencias de disco HVR para absorber 5 MJ de

energía inductiva como se modela en la Tabla 1. Con el fin de poder absorber la energía de las tres aberturas de circuitos repetidas basándose en los supuestos anteriores, se necesitarían 135 kg de resistencias de pulso clasificado de HVR internacional.

5 La primera conmutación de la Tabla 1 inserta 50 ohmios, que se basa en la limitación de la tensión y la corriente en la base de diseño máximo (500 kV y 10 kA); esta primera conmutación necesita producirse dentro de 2,667 milisegundos (ms) con el fin de mantener la corriente de fallo a no más de 10 kA (iniciando a partir de plena carga normal de 2 kA en el tiempo cero). Después de la primera inserción de 50 ohmios, se necesitan 0,657 ms para que la tensión decaiga de 500 kV a 360 kV; este es el momento de la segunda conmutación, después de la cual la resistencia es de 69,4 ohmios, y se tarda solo 0,473 ms para que la tensión decaiga de 500 kV a 360 kV, y cada nivel de resistencia posterior se aplica para el menor tiempo transcurrido, porque a mayor resistencia, el decaimiento exponencial de la corriente es más rápido. Cada etapa de este decaimiento exponencial repetido de la corriente (i) se produce de acuerdo con esta ecuación:

$$(1) \quad i(t) = Ie^{-(R/L)t}$$

Donde I es la corriente cuando se inserta primero la resistencia R (en ohmios), y L es la inductancia (0,10 Henrios en este ejemplo), y t se refiere al tiempo (en segundos) ya que primero se inserta la resistencia R. La resistencia R se restablece repetidamente durante el funcionamiento del disyuntor de conmutación (como en la Tabla 1); esta es una manera altamente eficiente para absorber la energía magnética almacenada inductivamente durante la apertura de un circuito de CC con una gran cantidad de energía magnética almacenada. Manteniendo la tensión un 20 % por encima de la tensión de funcionamiento normal durante la apertura del disyuntor, se puede garantizar que cualquier batería y/o condensador de alta energía que pueda haber en el circuito no se descarga a través del fallo durante el tiempo en que se abre el circuito.

Tabla 1: Tiempos de conmutación optimizados y etapas de resistencia para el disyuntor de la figura 6

conmutación	tiempo, ms	R (ohmios)	Δ tiempo en R, ms	amperios	(energía inductiva, julios)
#1	2,667	50,0	0,657	10000,0	5000000
#2	3,324	69,4	0,473	7200,0	2592000
#3	3,797	96,5	0,341	5184,0	1343693
#4	4,138	134,0	0,245	3732,5	696570
#5	4,383	186,1	0,177	2687,4	361102
#6	4,560	258,4	0,127	1934,9	187195
#7	4,687	358,9	0,092	1393,1	97042
#8	4,778	498,5	0,066	1003,1	50307
#9	4,844	692,3	0,029	722,2	26079
#10	4,873	961,6	0,034	520,0	13519
#11	4,907	1335,5	0,011	374,4	7008
#12	4,918	1854,9	0,018	269,6	3633
#13	4,936	2576,2	0,013	194,1	1883
#14	4,948	3578,1	0,009	139,7	976
#15	4,958	4969,5	0,009	100,6	506
#16	4,967	6902,1	0,005	72,4	262
#17	4,972	9586,3	0,003	52,2	136
#18	4,975	13314,3	0,002	37,6	71
Apertura de circuito final	4,978	> 1E8		27,0	37

Dieciocho inserciones de resistencia se producen durante la apertura del circuito en la Tabla 1; la tensión resultante, la corriente, y los cambios de energía inductivos son como se muestra en la figura 7; las primeras seis conmutaciones pueden programarse con precisión ajustando los ángulos exactos de rotación en los que se producen cada una de las primeras seis separaciones del electrodo de estátor y el electrodo de lanzadera, a medida que el borde trasero de un electrodo de lanzadera se aleja del borde trasero de un electrodo de estátor específico. Esta capacidad de ajuste de programación fina para el primer evento de conmutación en cada una de las seis zonas de conmutación puede determinarse hacia abajo de la escala de tiempo de microsegundos por el diseño cuidadoso de la estructura de la lanzadera de conmutación de rotación 280 y el estátor de conmutación de acoplamiento 290; sin embargo, después de esto la separación mínima necesaria entre los electrodos de estátor para mantener el aislamiento eléctrico crea limitaciones de programación de las conmutaciones posteriores en cada zona de conmutación.

En una apertura realista de un disyuntor rotatorio según la figura 6, la conmutación no será lo suficientemente rápida para mantenerse con el avance de las últimas conmutaciones de la Tabla 1, ya que para los últimos niveles de resistencia, el retardo de tiempo indicado entre conmutación está a solo unos pocos microsegundos. Si la velocidad de conmutación es uniforme y más lenta que la indicada en la Tabla 1 para las últimas doce conmutaciones, 130

microsegundos entre cada conmutación después de la Conmutación # 6, entonces el cierre definitivo se produciría en 3,453 ms después de la primera conmutación en lugar de en 2,311 ms después de la primera conmutación como se indica en la Tabla 1. El intervalo de tensión de 500 kV a 360 kV es un intervalo de control inusualmente estrecho para variaciones de tensión durante la apertura de un disyuntor (transitorios de conmutación de tensión), que se permite en este caso por las dieciocho pequeñas etapas de conmutación de la Tabla 1 que el diseño de la figura 6 permite. La condición de circuito abierto final se produce cuando uno de los electrodos de la lanzadera se desliza más allá de la última de esa secuencia de la zona de los electrodos de estátor en su zona de descanso final altamente aislante. A pesar de que en el diseño de la figura 6 los seis electrodos de lanzadera se deslizan más allá de la última de cada secuencia de la zona de los electrodos de estátor en una zona de descanso final altamente aislante, solo el primer electrodo de lanzadera para hacerlo así es parte de la secuencia de apertura de circuito de las resistencias en conmutación; después de abrirse el circuito, las cinco finales conmutaciones restantes que se producen en las otras cinco zonas son aberturas de circuito final redundantes. Obsérvese en la Tabla 1 y en la figura 7 que el disyuntor de conmutación con 18 conmutaciones a través de las resistencias reduce la energía inductiva almacenada de 5 millones de julios a solo 37 julios en el momento cuando se abre el circuito; la corriente se comprime de 10 kA a 27 amperios a través de las 18 conmutaciones. Aún hay que tratar con la última parte de energía inductiva; esto puede lograrse con un pequeño condensador, o usando una resistividad graduada en el borde trasero del electrodo de estátor que hace la apertura del circuito final. Con el fin de lograr las conmutaciones implícitas en la Tabla 1, será necesario el uso de gradientes de resistividad en los bordes traseros de todos los electrodos, y rodear los electrodos por fluidos de alta resistencia dieléctrica, como se trata con más detalle posteriormente.

A pesar de que la figura 6 muestra los electrodos de lanzadera en el radio exterior de la lanzadera de conmutación, es igualmente posible colocar los electrodos de lanzadera en los extremos planos de la lanzadera. Ambos diseños tienen ventajas y desventajas. El diseño de la figura 6 es análoga a un freno de tambor, donde las pastillas de freno tienen una función análoga a la de los electrodos de estátor, y el tambor es análogo a la lanzadera de conmutación rotatoria. El diseño alternativo con los electrodos de lanzadera en los extremos de la lanzadera de conmutación es análogo a un freno de disco.

Es más fácil sumergir el rotor de conmutación cilíndrico de la figura 6 en un fluido de supresión de arco en comparación con un disyuntor de conmutación de movimiento lineal, tal como el de la figura 5 debido a que la rotación de un cilindro simétrico circularmente no produce resistencia de forma, mientras que el movimiento lineal en un fluido implica necesariamente una resistencia de forma, que puede inhibir significativamente el rápido movimiento de la lanzadera de conmutación en un líquido. El diseño cilíndrico también permite un sistema sumergido en líquido con un volumen muy bajo de líquido en comparación con un diseño accionado lineal. Pueden inhibirse mucho las chispas rodeando de fluido los electrodos de separación, especialmente si el fluido se mantiene a alta presión. Limitar el fluido dieléctrico a solo unos pocos cm cúbicos es factible en un disyuntor de conmutación cilíndrico tal como el de la figura 6. Esto significa que los fluidos de alta resistencia dieléctrica, tales como los fluidos de perfluorocarbono podrían usarse económicamente. La principal ventaja del uso de lubricantes de alta presión en un disyuntor de conmutación es que la distancia de separación entre los electrodos de estátor vecinos puede reducirse si el hueco entre los dieléctricos sólidos se inunda con un fluido de alta presión y muy alta resistencia dieléctrica. Esto permitirá disyuntores de conmutación más compactos. No se ha practicado comercialmente en la técnica anterior hacer funcionar la aparamenta a alta presión de líquido, pero la forma única del disyuntor de conmutación rotatorio de la figura 6 permite un volumen muy pequeño de líquido a alta presión, que no es peligroso en términos de energía almacenada.

La distancia de separación necesaria entre los electrodos de conmutación vecinos depende principalmente de la variación de tensión que se produce durante la etapa de conmutación cuando la corriente que fluye a través de una línea resistiva se desvía a la siguiente línea cuando se produce la separación del electrodo de lanzadera y el electrodo de estátor. La diferencia de tensión entre estas dos líneas alternativas que llevan la misma corriente es una estimación razonable de la diferencia de tensión real que acciona la formación del arco como dos electrodos separados; esta fuerza de accionamiento para formar un arco tiene poco que ver con el medio que rodea a los electrodos (vacío, gases o líquidos), pero si un arco se forma realmente también depende de la resistencia dieléctrica del fluido que rodea los conductores de separación. Esto a su vez depende de factores tales como la presión y la composición química del fluido y los gases disueltos presentes en el fluido si es un líquido. Específicamente, los fluidos deseables para rodear el electrodo de lanzadera y el electrodo de estátor de separación incluyen hidrocarburos parafínicos, incluyen aceite mineral y queroseno; aceites vegetales; ésteres metílicos de ácidos grasos; fluidos de perfluorocarbono; y hexafluoruro de azufre líquido o gaseoso (incluidas las mezclas de gases), y un alto vacío. Las mezclas de gas que contienen hexafluoruro de azufre son bien conocidas en la técnica anterior por su alta resistencia dieléctrica (para un gas) y excelentes propiedades de extinción del arco, pero el hexafluoruro de azufre en fase líquida no se usa comercialmente en la actualidad hasta lo que se conoce como un dieléctrico líquido intencional. El volumen de líquido bajo necesario en los disyuntores de conmutación de diseño rotativo tales como los de la figura 6 hacen factible el uso de SF₆ en estado líquido como fluido dieléctrico.

Las propiedades que influyen en si un arco, una pequeña chispa, o ninguna chispa en absoluto va a encenderse en el momento de la separación del electrodo de lanzadera y del electrodo de estátor incluyen:

1. la corriente que fluye en el momento de la separación;
2. los perfiles de resistividad de los electrodos de separación;
3. la resistencia dieléctrica de los fluidos que rodean los electrodos de separación;
4. la disponibilidad de una línea paralela para la corriente.

5 Cada vez que se produce una conmutación de la tensión total a través del disyuntor se redistribuye a lo largo de las seis zonas de conmutación proporcional a la fracción de la resistencia total desde el Polo A al Polo B que se aplica a la zona de conmutación dada. Cuando se conecta una nueva resistencia mayor en el circuito, la mayor proporción del gradiente de tensión total será a través de la zona de conmutación más recientemente cambiada con la más alta resistencia. En el diseño de la figura 6, configurado como un disyuntor independiente para 300 kV como se deduce de la Tabla 1, la primera conmutación representa un gran aumento en la resistencia que efectivamente la totalidad de los 500 kV podría ser a través de la primera resistencia en conmutar, y la tensión soportada debe ser adecuadamente alta en esa zona de conmutación.

15 Puede desearse crear unos disyuntores de conmutación multietapa como en la figura 5 (movimiento lineal) y la figura 6 (movimiento de rotación), especialmente para aplicaciones de CC de alta tensión; las múltiples etapas dividen la tensión, permitiendo de este modo una tensión más baja por etapa. Con el fin de lograr esto, se requiere unas lanzaderas de conmutación que contengan pares de electrodos de lanzadera que estén conectados entre sí eléctricamente, pero que estén aislados unos de otros en la superficie de la lanzadera de conmutación. Dicho material aislante puede comprender un polímero, un vidrio inorgánico, una cerámica, un material de cemento, o una combinación de dos o más de estos componentes. Unos ejemplos específicos de los aislantes que pueden usarse para aislar alrededor de los electrodos de lanzadera incluyen:

1. materiales compuestos reforzados con fibras basados en un polímero de curado de fase de matriz (tal como, fibra de vidrio-epoxi, poliaramida-epoxi, fibra de boro -epoxi, fibra de vidrio-poliéster, etc.);
2. plásticos moldeables de calidad de ingeniería (definidos como polímeros con un módulo de tracción > 2,5 GPa y resistencia a la tracción > 40 MPa, que pueden ser polímeros no reforzados, o polímeros reforzados por cargas de refuerzo no conductoras;
3. materiales compuestos de cemento, que incluyen materiales compuestos de cemento de fibra reforzada y látex de polímero endurecido;
4. revestimientos de plasma pulverizado o de llama pulverizada en los metales;
5. espuma sintáctica polimérica (baja densidad y alta compresión y resistencia al corte);
6. nanocompuestos.

35 Cada electrodo de lanzadera se alinea con varios electrodos de estátor diferentes a medida que se mueve la lanzadera, y en la mayoría de los casos cada electrodo de lanzadera también está conectado a un segundo electrodo de lanzadera en una localización diferente en la lanzadera de conmutación, de tal manera que los dos electrodos de lanzadera están aislados el uno del otro en el plano de superficie.

40 Los electrodos de lanzadera de una lanzadera de conmutación multizona ocupan menos de la mitad de la superficie total de la lanzadera de conmutación, y en la mayoría de los casos ocupan menos del 10 % de la superficie de la lanzadera de conmutación. La lanzadera de conmutación puede fabricarse de componentes de metal y aislantes anteriormente formados; o, la lanzadera de conmutación puede obtenerse por sobremoldeo de un aislante sobre un núcleo metálico. El sobremoldeo puede lograrse, por ejemplo, mediante moldeo por inyección de reacción (RIM) de los sistemas de polimerización rápida, por colada de los sistemas de polimerización lenta, o mediante moldeo por inyección de termoplásticos.

Las figuras 8 y 9 representan un disyuntor de conmutación de única etapa con una lanzadera de conmutación 310 (que incluye un electrodo de lanzadera altamente conductor 335, un enchufe de transición semiconductor 312, un enchufe aislante 311, y un manguito aislante 347 que rodea parte de una varilla de conexión altamente conductora 337). Una varilla de conexión 337 une el electrodo de lanzadera 335 al Polo B a través de un anillo rozante conductor 345 y un cable conductor 346. El electrodo de lanzadera 335 conecta los diversos electrodos de estátor 321, 322, 323, 324 al Polo B a medida que el electrodo de lanzadera 335 se mueve hacia la derecha. Los electrodos de estátor están conectados a través de líneas de diferente resistencia al Polo A del disyuntor de conmutación; en el estado encendido (figura 8), el electrodo de estátor 321 se conecta a través del cable conductor de baja resistencia 331 al Polo A; a medida que la lanzadera de conmutación se mueve hacia la derecha, el electrodo de estátor 322 se conecta al electrodo de lanzadera 335 a través de la resistencia 332; a continuación, la conexión es a través del electrodo de estátor 323 a través de las resistencias 333 y 332 al Polo A; a continuación, la conexión es a través del electrodo de estátor 324 a través de las resistencias 334, 333, y 332 en serie. La lanzadera de conmutación 310 se acciona por la presión P (301) detrás del enchufe aislante 311 de lanzadera de conmutación, que hace que la lanzadera de conmutación se mueva desde el estado cerrado (encendido) mostrado en la figura 8 al estado abierto (apagado) mostrado en la figura 9. El enchufe aislante 311 debe ser lo suficientemente largo para estar sobre todos los electrodos de estátor (321, 322, 323, 324) en el extremo del desplazamiento de la lanzadera de conmutación, y para solaparse con la capa aislante 340, como en la figura 9, en el estado completamente abierto para crear una resistencia total entre el Polo A y el Polo B mayor que 10^8 ohmios en el estado completamente abierto.

Las figuras 8 y 9 representan un disyuntor de conmutación simplificado con solo una zona de conmutación; estas representaciones simplificadas de una sola zona de conmutación con solo tres inserciones de resistencia antes de la apertura del circuito hacen que sean más fáciles de describir y tratar ciertos aspectos del disyuntor de conmutación. El disyuntor de conmutación de las figuras 8 y 9 tiene solo 5 niveles de resistencia primarios. La alimentación está enlazada desde el Polo B a través de unos anillos rozantes 345 al electrodo de lanzadera 335, y desde allí a través de una serie de diferentes electrodos de estátor conectados a unas resistencias crecientes dadas aproximadamente por:

1. nivel de resistencia uno se muestra en la figura 8: la corriente fluye con una resistencia mínima a través del disyuntor.
2. nivel de resistencia dos: la corriente fluye principalmente a través del electrodo de estátor 322 y a continuación a través de la resistencia 332 hasta el Polo A opuesto del disyuntor.
3. nivel de resistencia tres: la corriente fluye principalmente a través de electrodo de estátor 323 y a continuación a través de las resistencias 332 + 333 hasta el Polo A opuesto del disyuntor.
4. nivel de resistencia cuatro: la corriente fluye principalmente a través de electrodo de estátor 324 y a continuación a través de las resistencias 332 + 333 + 334 hasta el Polo A opuesto del disyuntor.
5. nivel de resistencia cinco es la condición de circuito abierto mostrada en la figura 9 en la que la resistencia total $> 10^5$ ohmios (véase la figura 9).

El accionamiento del disyuntor comienza con la lanzadera de conmutación 310 (compuesta de los componentes 311, 312, 335, 337, y 347) en el estado de circuito cerrado de la figura 8; la resistencia a través del disyuntor de conmutación en el caso de circuito cerrado es también conocida como la "resistencia en estado encendido" del disyuntor. La resistencia en el estado encendido del disyuntor de la figura 8 está comprendida en realidad de dos resistencias de componente R1 y R2 a través de circuitos paralelos:

- R1 es la resistencia del anillo rozante 345 + las resistencias conductoras 346 + 337 + la resistencia de contacto entre el electrodo de lanzadera 335 y el electrodo de estátor 321 + resistencia de cable conductor 331
- R2 es la resistencia del anillo rozante 345 + las resistencias conductoras 346 + 337 + la resistencia de contacto entre el electrodo de lanzadera 335 y el electrodo de estátor 322 + la resistencia 332;

el total de la resistencia en estado encendido viene dado a continuación por:

$$(2) \quad R_{total} = \frac{R1 \times R2}{R1 + R2}$$

Por lo tanto, en general, cuando el electrodo de lanzadera 335 está tocando los dos electrodos de estátor, la resistencia real debería calcularse como una resistencia de línea paralela. En la condición de circuito cerrado en estado encendido, $R2 \gg R1$ (debido a que R2 incluye la resistencia 332, la primera de una serie de resistencias insertadas); así que la mayoría de la corriente pasa a través de la línea de baja resistencia R1 y la resistencia total R_{total} es solo un poco menor que la resistencia a través de únicamente esta línea. Para hacer esto concreto, considérese el caso de una tensión normal de 1200 voltios, con una plena carga normal de 1200 amperios, y una pérdida de calor máxima basada en el diseño en el estado encendido debido a las pérdidas óhmicas (I^2R) de 100 vatios; esto requiere que R_{total} en el caso de circuito cerrado (estado encendido) no puede ser más de 69 micro-ohmios. La primera resistencia insertada sería 0,40 ohmios (basado en la corriente máxima de diseño en un fallo = 6000 amperios, tensión máxima = 2400 voltios), por lo que la ecuación 2 implica que la resistencia del circuito paralelo de la ecuación 2 solo sería un 0,017 % menor que la conexión sencilla a través de una sola línea resistiva (R1). Obsérvese, sin embargo que, en conmutaciones posteriores, por ejemplo, cuando hay líneas paralelas disponibles a través de los electrodos de estátor 323 y 324, la corriente se divide de manera más uniforme entre las líneas paralelas, aunque incluso en este caso la mayor parte de la corriente fluirá a través de la línea menos resistiva a través del electrodo 323.

Durante la conmutación, el área de contacto entre el electrodo de lanzadera 335 y el electrodo de estátor 331 tiende a cero, y la resistencia a través de R1 aumenta hasta que se supera R2, justo antes de la conmutación (debido a que la resistencia de contacto escala con $1/(\text{área de contacto})$). Graduando la resistividad de los bordes traseros del electrodo de lanzadera 335 y del electrodo de estátor 331, puede obligarse a la conmutación deseada a ocurrir mucho antes de que los dos electrodos pierdan el contacto entre sí. En este caso, una parte de salida semiconductor del electrodo de lanzadera 335 se proporciona por el enchufe de transición 312.

A medida que la lanzadera de conmutación 310 se mueve hacia la derecha desde la posición inicial de la figura 8, también habrá una línea de corriente eléctrica a través del enchufe de transición 312 hasta una secuencia de electrodos de estátor (321, 322, 323, y 324). Esto significa que en algunos puntos durante la apertura del disyuntor habrá líneas eléctricas a través de tres electrodos de estátor diferentes, siendo las conexiones de más a la izquierda a través del enchufe de transición semiconductor 312. Cuando el electrodo de lanzadera 335 deja el contacto con el electrodo de estátor 321, hay un aumento repentino de la resistencia a través de 321 y 331 a medida que la corriente a través de esta línea pasa a continuación a través del enchufe de transición 312 después de que se separen los electrodos de metal 335 y 321, lo que conmuta rápidamente la corriente a la línea a través de R2, pero mucho más

suavemente que si el borde (izquierdo) de salida del electrodo de lanzadera 335 se apoyase en un aislante tal como 311 en lugar de en el enchufe de transición semiconductor 312.

Una consideración durante esta conmutación es que la corriente a través del enchufe de transición semiconductor 312 no debe provocar la fusión o daños en el material usado para crear el enchufe de transición semiconductor 312. Esto puede evitarse haciendo que la resistividad del enchufe de transición 312 sea lo suficientemente alta de manera que solamente una parte menor de la corriente fluye a través del enchufe de transición 312 en cada conmutación, excepto en la última. Al final del movimiento de la lanzadera de conmutación 310, el enchufe de transición semiconductor 312 realiza el apagado final de la última energía inductiva. En la conmutación final, a medida que el electrodo de lanzadera 335 se mueve a la derecha del electrodo de estátor 324, la única conexión eléctrica que queda entre el Polo A y el Polo B va a través del enchufe de transición semiconductor 312. Debido a la resistividad graduada en el enchufe de transición 312, puede proporcionarse un cierre suave si la corriente y la tensión son lo suficientemente bajas para no dañar el material semiconductor que compone el enchufe de transición 312 durante el cierre.

En el equilibrio en el disyuntor de conmutación de las figuras 8 y 9 (que solo puede ocurrir cuando el electrodo de lanzadera 310 es fijo), la corriente se reparte entre todas las líneas resistivas conectadas en paralelo en la proporcionalidad inversa a la resistencia de línea. Durante una conmutación no corresponde un verdadero equilibrio en realidad, pero no obstante es útil considerar una condición de pseudo equilibrio que se evalúa momento a momento durante la apertura del disyuntor de conmutación. En general, el equilibrio eléctrico es rápido en comparación con el movimiento mecánico de la lanzadera de conmutación, o el calentamiento resistivo de los componentes de lanzadera conductores, por lo que esta condición de pseudo equilibrio es al menos razonable. Puede desearse minimizar la inductancia de las líneas resistivas mostradas en las figuras 8 y 9, ya que cada vía almacenará una cantidad de energía $L \cdot I^2$ cuando la corriente está fluyendo que debe disiparse con el fin de conmutar la corriente a una línea diferente. En este caso, L línea se refiere simplemente a la inductancia de la línea de corriente desde el punto donde la corriente se convierte desde otra línea alternativa para ir a través de la línea dada, tal como L331, que es la inductancia del electrodo de estátor 321 a través del conector 331 hasta el Polo A o L332, que es la inductancia desde el electrodo de estátor 322 a través de la resistencia 332 y sus cables conductores hasta el Polo A. Por lo tanto puede desearse, en particular, que las resistencias 332, 333, y 334 tengan una relativamente baja inductancia, como será familiar para un experto en la materia de la ingeniería eléctrica.

Eta a eta a través del proceso de accionamiento para el dispositivo de las figuras 8 y 9: la presión 301 crea una fuerza 300 que actúa sobre el área superficial del aislador 311; la fuerza 300 mueve la lanzadera hacia la derecha dentro del cilindro 302, una distancia total 305; la resistencia eléctrica aumenta en etapas:

1. Antes de la primera conmutación, la resistencia es la resistencia de línea paralela en la que $R1 = 331$ y $R2 = 332$ como se define por la ecuación 2 anterior, que incluye las resistencias de contacto entre el electrodo de estátor 321 y el electrodo de lanzadera 335 y entre el electrodo de estátor 322 y el electrodo de lanzadera 335;
2. después de que se pierda el contacto entre el electrodo de lanzadera 321 a 335, la resistencia está cercana a $R2$ durante un tiempo, pero ligeramente reducida por la línea paralela a través del enchufe semiconductor 312 hasta el electrodo 321;
3. a continuación hay un período en el que la resistencia se corresponde con una línea paralela entre $R2 = 332$ y $R3 = 333$;
4. después se pierde el contacto entre el electrodo de lanzadera 322 a 335, la resistencia está cercana a $R3 = 333$ durante un tiempo (y así sucesivamente a través de la secuencia de conexiones resistivas).

Como se ha descrito anteriormente, la aplicación de la ecuación 2 para el cálculo de la resistencia real a través de líneas paralelas como se ha descrito anteriormente modifica solo ligeramente las etapas de resistencia definidas al principio de la exposición de las figuras 8 y 9. La designación de los dos polos en las figuras 8 y 9 como Polo A y Polo B puede igualmente bien invertirse; la polaridad a través de un disyuntor de conmutación puede invertirse debido a la naturaleza arbitraria de los polos. Para cualquiera de las figuras mostradas, el Polo A puede intercambiarse con el Polo B y el disyuntor de conmutación seguirá funcionando. En función de qué polo está vivo después de que el disyuntor de conmutación haya abierto el circuito, habrá diferentes partes del disyuntor de conmutación que se desactivan en el caso de un flujo de alimentación direccional cuando se abre el circuito. Si la fuente de alimentación está en el lado A del disyuntor de las figuras 8 y 9 entonces, cuando el disyuntor está abierto como en la figura 9, el electrodo de lanzadera 335 y el anillo rozante 345 se desactivan (lo que facilita el mantenimiento del anillo rozante 345). Si por otra parte la fuente de alimentación está en el lado B del disyuntor de las figuras 8 y 9, entonces cuando el disyuntor está abierto como en la figura 9, los electrodos de estátor 321-324 se desactivarán (lo que facilita el mantenimiento de los electrodos de estátor 321-324).

Tres tipos específicamente deseables de material para el enchufe aislante dieléctrico 311 son:

1. una espuma sintáctica rígida es especialmente conveniente para el enchufe aislante 311, debido a su alta relación resistencia a densidad, tanto en términos de resistencia a la compresión como de resistencia al corte;
2. un tubo aislante hueco que es bastante fuerte y rígido, y se tapa con un extremo fuerte en el límite con el enchufe de transición 312 también podría trabajar como un enchufe aislante 311.

3. un enchufe elastomérico altamente aislante que se comprime cuando se aplica presión para accionar la lanzadera de conmutación también puede usarse para el enchufe aislante 311; en el caso donde se emplean enchufes elastoméricos para el enchufe aislante 311 o el enchufe de transición semiconductor 312, la interfaz entre estos enchufes y la pared 302 debería estar bien lubricada, y la superficie interior del tubo 302 debería ser bastante suave y tener una baja fricción con los enchufes de elastómero.

Los elastómeros son deseables para al menos una parte del enchufe de transición 312, tanto debido a la comodidad de preparación de las capas de elastómero químicamente similares con la resistividad controlada, como debido a la compresión de una capa de elastómero tal como un enchufe de transición 312 que resulta en una presión contra la pared que facilita un estrecho contacto con el cilindro de estátor 302, que inhibe la formación de un arco entre el enchufe 312 y la pared de tubo 302. La conveniencia relativa de crear una pila de capas de compuestos de elastómeros compatibles que se curan entre sí, mecánicamente similares y todos con buenas propiedades de deslizamiento hace que sea bastante barato de procesar, moldear y fabricar enchufes de elastómero curados, de manera que puede usarse en el enchufe de transición 312 con la resistividad graduada desde 10^{-2} a 10^{12} ohmios-m; esto es mucho más fácil, por ejemplo, que crear todas esas capas en un plástico. Dos mezclas madres de elastómeros compatibles pueden usarse para crear la parte de resistencia graduada del enchufe de transición 312. Esta parte elastomérica del enchufe de transición puede estar unida a un material más conductor, tal como, por ejemplo, carbono amorfo o una capa de alnico sinterizado para cubrir el intervalo de resistividad desde 10^{-4} a 10^{-2} ohmios-m, que puede desearse en el borde delantero del enchufe de transición 312, donde se soporta contra el electrodo de lanzadera 335. Se trata de un método convencional, conocido para mezclar dos mezclas madre de elastómero en diversas relaciones para obtener elastómeros que van desde ser buenos aislantes a ser semiconductores con una resistividad tan baja como 10^{-2} ohmios-metro. Es difícil crear un contacto eléctrico íntimo entre dos discos de polímero termoplástico semiconductores moldeados por separado, o entre un polímero termoplástico, semiconductor y una superficie de metal o de cerámica, pero el alto cumplimiento de los elastómeros facilita una mejor conexión eléctrica a una superficie, siempre y cuando la interfaz de elastómero/metal esté bajo presión.

Es útil tener un lubricante disponible para llenar los espacios vacíos de la superficie que están siempre presentes en la fricción por deslizamiento. Esta capa lubricante interfacial entre la lanzadera y el cilindro de estátor 302 puede ser más delgada si las superficies de acoplamiento de la lanzadera y el estátor son lisas, y coinciden entre sí en forma. En la medida en que las superficies de la lanzadera y el rotor no son perfectamente lisas, la capa límite también puede ser más delgada si el estátor es algo flexible y se presiona contra el rotor.

Una característica de diseño útil de una lanzadera de conmutación o una lanzadera de resistencia variable es usar un elastómero revestido de politetrafluoroetileno (PTFE) en algunas de las superficies de deslizamiento entre la lanzadera y el estátor tal como en el exterior de un cilindro elastómero como el 311. Un PTFE puro o formulado se puede sinterizar y a continuación cortar en bisel para crear una película de PTFE que a continuación puede usarse para crear un manguito. Un PTFE y/o unos compuestos de PTFE también pueden ser un pistón extruido para formar un tubo de paredes finas que a continuación puede cortarse en longitudes para uso como un manguito. Un manguito de este tipo puede a continuación adherirse a un elastómero grabado primero químicamente, por ejemplo, con FluoroEtch® disponible en Acton Technologies, Inc., y a continuación co-moldeado con un elastómero curado. Sin embargo, no es tan fácil variar el nivel de resistencia de una capa de PTFE como es el caso de los elastómeros ordinarios, por lo que el revestimiento de PTFE de las superficies de elastómero es más deseable en el arco que suprimir el manguito aislante de la figura 4 (153) o en segmentos puramente aislantes, tal como el 311 de las figuras 8 y 9, en lugar de los componentes semiconductores tales como el enchufe de transición 312 de las figuras 8 y 9.

La figura 10 muestra esquemáticamente una conexión deslizante entre dos electrodos de estátor y un electrodo de lanzadera en movimiento; 355, 370, y 371 son electrodos metálicos altamente conductores, mientras que 360, 375, y 376 son electrodos semiconductores que son funcionalmente similares a 312 de las figuras 8 y 9. Los componentes 375 y 370 forman juntos el i-ésimo electrodo de estátor, y 371, 376 forman juntos el j-ésimo electrodo de estátor, con el aislante de estátor 380 rodeándolos; el i-ésimo electrodo de estátor se conecta a través de la resistencia 372, mientras que el j-ésimo electrodo de estátor se conecta a través de la resistencia 373, que es mayor que la resistencia 372. Un electrodo de lanzadera deslizante (compuesto de las dos capas 355 y 360) está conectado eléctricamente tanto al i-ésimo como al j-ésimo electrodo de estátor en el momento mostrado en la figura 10. Los electrodos de lanzadera 355 y 360 están rodeados por unas regiones altamente aislantes de la lanzadera 365. El electrodo de lanzadera se desliza a la izquierda (indicado por 350) por debajo de los electrodos de estátor y el borde trasero de la parte altamente conductora del electrodo de lanzadera 355 que está a punto de perder la conexión eléctrica con la primera parte altamente conductora del i-ésimo electrodo de estátor 370. Puede verse que este evento no abrirá completamente la conexión de circuito a través del i-ésimo electrodo de estátor a través de la resistencia 372, ya que el circuito está todavía abierto a través de las partes de electrodo semiconductoras 360 y 375. En el momento en que se produzca la apertura final del circuito a través de la resistencia 372, cuando se separen los dos electrodos semiconductores 360 y 375, la corriente que fluye a través de B 1 se habrá tenido que reducir a menos de un amperio.

La figura 10 ilustra otro caso de cómo las capas de alisado eléctrico pueden implementarse en los bordes traseros de los electrodos, que muestra el caso en el que los elementos de alisado eléctrico (360, 375, y 376) están

conectados a los bordes traseros de tanto un electrodo de lanzadera 355 como a dos electrodos de estátor (370, 371). A continuación, se muestra una lista parcial de materiales que pueden usarse para modificar la resistividad de los electrodos que es útil en esta invención:

- 5 1. plata pulverizada en frío (resistividad $\sim 1,5310^{-8}$ ohmios-metro), u otro metal o compuesto de baja resistividad;
2. aleaciones de nicromo (resistividad $\sim 1,5310^{-6}$ ohmios-metro) u otra aleación de metal o compuestos de alta resistividad;
3. resistencias cermet (resistividad $\sim 10^{-6}$ a 10^{-3} ohmios-metro) u otra aleación de metal o compuestos de alta resistividad;
- 10 4. aleación de alnico # 8 (resistividad $\sim 4,7 \times 10^{-3}$ ohmios-metro);
5. aleaciones cuasicristalinas (resistividad $\sim 10^{-4}$ a 10^0 ohmios-metro)
6. carbono amorfo (resistividad $\sim 10^{-4}$ a 10^{-2} ohmios-metro);
7. capas de elastómero llenas de conductor (resistividad $\sim 10^{-2}$ a 10^{12} ohmios-metro);

- 15 Estos materiales o un subconjunto de los mismos pueden desplegarse en los bordes traseros de los electrodos metálicos, o en los componentes de semiconductores tales como 153, 312, 360, 375, y 376. Sin embargo, es posible usar tantas etapas de resistividad como sean necesarias.

20 La capa de resistividad variable 360 es una parte de la lanzadera de movimiento, y por lo tanto necesita ser más fuerte que las capas de resistividad graduadas fijas 375 y 376 en los bordes traseros de los electrodos de estátor 370 y 371. Los materiales apropiados para el elemento de resistividad graduada del electrodo de lanzadera 360 incluyen cermet, aleaciones de metal cuasicristalinas, o altamente cargadas, polímeros resbaladizos rígidos, mientras que los enchufes de transición 375 y 376 pueden fabricarse de materiales más débiles. También puede desearse mantener aproximadamente iguales la rigidez y la velocidad de desgaste de todas las capas que están

25 acopladas en el movimiento relativo de fricción en un disyuntor de conmutación (para que el dispositivo tenga una larga vida).

Un electrodo de estátor específico es relevante para minimizar la generación de calor en el estado encendido debido a las pérdidas óhmicas solo si una parte importante de la corriente en estado encendido fluye a través de ese electrodo de estátor específico, cuando el circuito está completamente cerrado y la lanzadera está fija en el estado encendido (tal como el electrodo 321 en la figura 8). Los electrodos de estátor que llevan la corriente principal en el circuito cerrado en estado encendido tal como el 321 deberían ser altamente conductores (como el cobre o la plata, o un electrodo de metal líquido como se ha tratado anteriormente), pero los otros electrodos de estátor tales como 322, 323, 324 pueden fabricarse de varios metales y/o cermet, elegido más por las propiedades de fricción, desgaste, coste, y resistencia a la corrosión que en lugar de por especialmente la baja resistividad. El níquel y/o las aleaciones de níquel son materiales de electrodo específicamente útiles, para los electrodos de estátor que solo llevan corriente durante un corto tiempo.

30

35

La figura 11 muestra el caso en el que se suministra alimentación eléctrica a la lanzadera de un disyuntor de conmutación mediante un cable flexible 417 desde el Polo A. En este caso, se representa un diseño de lanzadera de conmutación con unos límites de conductor/aislante marcados, pero los electrodos de resistencia variable como en las figuras 8, 9 y 10 también pueden usarse con un mecanismo de unión de cable atado como en la figura 11. El cable de conexión 417 debe tener una alta resistencia y muy buena resistencia a la fatiga. El movimiento total del electrodo de lanzadera 425 a la derecha es de tal manera que al final de su recorrido 445 el electrodo se rodea por un tubo de alta resistencia dieléctrica y alta resistividad 430. Un elemento aislante de absorción de choques 427 está al final del recorrido de la parte delantera (a mano derecha) frente al electrodo 425. En el estado cerrado, que se representa en la figura 11, casi toda la corriente del electrodo de lanzadera 425 fluye a través del electrodo de estátor 431 y a continuación a través de la línea de la corriente de baja resistencia 440 hasta un segundo terminal B del disyuntor. Como el electrodo de lanzadera 425 se mueve hacia la derecha; la corriente se desvía de manera secuencial a través de los electrodos de estátor 432, 433, y 434 y de la secuencia de resistencia respectiva; en la primera resistencia de conmutación aumenta desde 440 a 441, a continuación a 441 + 442, a continuación a 441 + 442 + 443, antes de que la corriente se apague en una pequeña chispa o cargando un pequeño condensador (no mostrado) a medida que el electrodo de lanzadera 425 pasa más allá del borde del electrodo de estátor 434. El accionador de movimiento 400 puede ser cualquier dispositivo de acción rápida adecuado; el empuje proporcionado por el accionador pasa a través de un eje de metal 405 a un acoplamiento de aislamiento eléctrico 410, y desde allí a través de un eje no conductor 413 al acoplamiento 415 que enlaza el eje de metal 420 al Polo A del disyuntor a través del cable conductor 417. El eje 420 está rodeado por un manguito aislante 423 que alinea y soporta el eje dentro del cilindro de estátor no conductor 430, a través del cual se instalan los electrodos de estátor 431, 432, 433, y 434.

40

45

50

55

60

La figura 12 muestra una variante en el concepto de disyuntor de conmutación simple mostrado en la figura 4. Una pila de forma cilíndrica de resistencias de discos huecos 460 con arandelas de metal 451 entre cada par de siguientes resistencias de disco vecinas (tal como la 450) está unidas entre sí por algunos medios adecuados tales como un adhesivo conductor, una soldadura, o una soldadura fuerte. Esto es más sencillo y menos costoso de implementar que la pila de resistencias de disco de la figura 3, basada en una cápsula de metal para mantener cada resistencia de disco como se muestra en la figura 2. Las arandelas de metal 451 son ejemplos muy simples de

65

electrodos de estátor, y preferentemente tienen un agujero ligeramente más pequeño a través de los mismos que el agujero 455 a través de las propias resistencias de disco (por ejemplo, la 450), de manera que las arandelas sobresalen en la cavidad central a través de las resistencias; esto protege las superficies interiores de las resistencias de disco de daños a través del contacto directo con el electrodo de lanzadera en movimiento 465, que en este caso es simplemente una varilla o un tubo de metal que se extiende claro a través de la pila de resistencias 460. En el extremo inferior del electrodo de lanzadera está un extremo opcional 466 de la lanzadera de conmutación 465 que puede funcionar como un dispositivo de control de estrés eléctrico con una función similar al 312 en las figuras 8 y 9, pero que también puede tener una funcionalidad adicional como se describe a continuación, proporcionando una superficie de agarre para retener la varilla 465 en el estado encendido (circuito cerrado). En el estado de circuito cerrado, la conexión eléctrica al Polo A se realiza por el electrodo de estátor de baja resistencia 490 que puede ser un electrodo de metal de alta conductividad o un electrodo de metal líquido que se acopla con el extremo de la lanzadera de conmutación 465. Hay una línea paralela desde el Polo A a la parte inferior de la pila de resistencias 485. La conexión desde el Polo B a la lanzadera de conmutación 465 puede realizarse a través del anillo rozante eléctrico 470, o por otros medios como se describe a continuación. El extremo superior de la lanzadera de conmutación 475 es un elemento para conectar a una fuerza 480 que tira de la lanzadera de conmutación hacia fuera de la pila de resistencias de disco 460 para abrir el circuito. Aunque la figura 12 muestra que todas las resistencias de disco tienen el mismo diámetro exterior, este no es necesariamente el caso; en particular, debido a que las primeras resistencias de disco insertadas en el circuito absorben la energía mucho más inductiva que las resistencias posteriores. Puede desearse que la resistencia de disco más baja en la figura 12 (esta es la primera insertada en el circuito) tenga la mayor masa y por lo tanto el diámetro exterior más grande. Es importante que los discos de metal tales como el 451 cubran toda la cara de las resistencias a las que están unidos, de tal manera que la corriente pueda fluir uniformemente a través de todo el volumen de cada resistencia de disco.

El disyuntor de circuito de la figura 12 tiene varios elementos únicos. Usa la lanzadera de conmutación más simple posible, una varilla de metal o un tubo. La fuerza máxima 480 que puede aplicarse a la varilla o al tubo depende de la resistencia del material, y el área en sección transversal de la pared de la varilla o del tubo. Si toda la fuerza en la lanzadera de conmutación se origina a partir de la aceleración, entonces la aceleración máxima que es posible para cualquier material dado es estrictamente una función de la relación de resistencia/densidad del material que forma la lanzadera de conmutación, y la longitud de la lanzadera de conmutación. Si σ es la resistencia de elasticidad de tracción de un material en pascuales, D es su densidad en kg/m^3 , y L es la longitud de la lanzadera de conmutación en metros, entonces la aceleración máxima en metros/segundo^2 $A_{\text{máx}}$ que puede aplicarse a una lanzadera de conmutación como la 465 viene dada por:

$$(3) \quad A_{\text{máx}} = \sigma/LD$$

Los resultados de esta ecuación aparecen en la Tabla 2 para una columna de 2 metros de largo de metal tirado desde un extremo como en la figura 12; la aceleración máxima posible varía desde menos de 1000 m/s^2 para el sodio hasta 114.000 m/s^2 para un cable de fibra de aluminio de matriz de aluminio. La Tabla 2 también muestra la masa de diversos materiales a 20°C que son necesarios para crear una columna de 2 metros de larga 25 micro-ohmios de material; en este nivel de pérdida la lanzadera de conmutación teórica de 2 metros de longitud transmitiría 2000 amperios con 100 vatios de producción de calor residual l^2R . (Escala de calor residual linealmente con la masa del conductor, por ejemplo, una décima parte de conductor de masa significa diez veces la generación de calor). La masa de metal necesaria para crear una columna de 25 micro-ohmios de material varía desde 3,7 kg de sodio hasta 618 kg para la aleación más fuerte mostrada, la aleación de titanio beta-C (que permite la máxima aceleración entre los metales de la Tabla 2). La Tabla 2 también contiene datos sobre los metales adicionales que se tratan en diferentes partes del presente documento en referencia a, por ejemplo, las superficies de electrodo o la graduación de la resistividad en los bordes traseros de los electrodos.

La mejor solución global para una lanzadera de conmutación 465 como en la figura 12 depende del coste relativo del material conductor frente a la estructura mecánica (incluyendo los resortes y los disparadores y los soportes estructurales que mantienen la 465 en un estado de estrés, o aplican estrés a la misma) y, fundamentalmente, en la aceleración necesaria. El coste estructural se escala con la masa del conductor que debe acelerarse y el tiempo de aceleración. La aceleración determina el tiempo para la primera conmutación crítica, por lo que hay una buena razón para empujar hacia una alta aceleración con el fin de minimizar el tiempo de la primera conmutación, siempre y cuando esto sea importante (es más importante llegar a la primera conmutación muy rápido si la inductancia de sistema en un fallo es baja que si la inductancia de sistema en un fallo es alta). Simplemente tirando de un tubo conductor tan rápido que se llega al límite de ingeniería para una máxima resistencia a la tracción del material (véase la Tabla 2, la columna "aceleración máxima") es la forma teórica más rápida para acelerar una lanzadera de conmutación de movimiento lineal.

Tabla 2: Datos relacionados con acelerar un conductor como en la figura 4 y la figura 12

Conductor	Densidad kg/m ³	Resistencia de elasticidad de tracción (Pa)	Aceleración máxima	Resistividad ohmios- m	kg para pasar 2kA	Movimiento 4 ms (cm)	Factor de mérito M	Fuerza máx. pascales
Sodio	971	1,00E+06	5,15E+02	4,76E-08	37	41	0,047	1,905E+03
Calcio	1550	1,11E+07	3,56E+03	3,36E-08	42	285	456	1,485E+04
Magnesio	1738	2,00E+07	5,75E+03	4,39E-08	61	460	564	3,512E+04
Magnesio AM60A,B	1800	1,30E+08	3,61E+04	1,20E-07	17	2,889	1,294	6,240E+05
Magnesio AZ91 C,E templada T6	1800	1,45E+08	4,03E+04	1,51E-07	22	3,222	1,147	8,758E+05
Aluminio	2700	5,01E+07	9,28E+03	2,82E-08	61	742	1,415	5,651E+04
Aleación de aluminio 6061, templada T6	2700	2,21E+08	4,09E+04	3,98E-08	86	3,274	4,411	3,527E+05
Cable de fibra de aluminio de matriz de aluminio (3M ACCR)	3294	7,50E+08	1,14E+05	7,62E-08	201	9,107	6,424	2,286E+06
AlSiC-9 (CPS Technologies)	3000	4,88E+08	8,13E+04	2,07E-07	497	6,507	1,690	4,041E+06
Cobre (recocido)	8960	7,00E+07	3,91E+03	1,68E-08	120	313	1,000	4,704E+04
Cobre (trabajado en frío)	8960	2,20E+08	1,23E+04	4,20E-08	301	982	1,257	3,696E+05
Titanio elemental	4506	3,20E+08	3,55E+04	4,20E-07	151	2,838	363	5,371E+06
Aleación de Titanio beta-C	4830	1,03E+09	1,07E+05	1,60E-06	618	8,541	287	6,602E+07
Tántalo	16600	2,10E+08	6,32E+03	1,35E-07	179	506	201	1,134E+06
Invar 36	8050	2,07E+08	1,29E+04	8,23E-07	530	1,028	0,067	6,810E+06
Nicromo (20 % de cromo)	8400	3,54E+08	2,10E+04	1,30E-06	874	1,684	0,070	1,839E+07
Molibdeno	10240	4,80E+08	2,34E+04	1,44E-06	1,180	1,875	0,070	2,765E+07
Níquel/Cromo (80/20 Nicromo)	8400	3,45E+08	2,05E+04	1,25E-06	840	1,642	0,071	2,20E+11
Alinico Grado 8 (fundido, totalmente denso)	7300	6,90E+07	4,73E+03	4,70E-03	730	378	0,000	2,20E+11

El disyuntor de conmutación de accionamiento más rápido de la figura 12 que usa un material de la Tabla 2 se basaría en el material de relación resistencia/densidad más alta, el cable de fibra de aluminio de matriz de aluminio. Este cable cermet es el elemento de resistencia mecánica (en sustitución del acero en el cable reforzado de núcleo de acero de aluminio ASCR más estándar) en el cable (3M ACCR) reforzado de material compuesto conductor de aluminio de 3M™, que está disponible comercialmente en 3M. Usando solo la lista de los materiales mostrados en la Tabla 2, también puede obtenerse una combinación deseable de accionamiento rápido combinado con una masa total razonablemente baja para acelerar fabricando la lanzadera de conmutación 465 a partir de una cubierta de aleación de titanio de alta resistencia con el sodio en el interior. Entre las únicas soluciones posibles de materiales de componentes para la lanzadera de conmutación 465, el aluminio puro y el magnesio puro tienen esencialmente la misma masa para cumplir el objetivo de resistencia de 25 micro-ohmios, pero el aluminio puro es más fuerte y por lo tanto es una mejor solución para la lanzadera de conmutación 465. La penúltima columna de la Tabla 2 es un factor de mérito M sin dimensiones

$$M = \left\{ \frac{\text{(resistencia)}}{[\text{densidad} \times \text{resistividad}]} \right\} / \left\{ \frac{\text{(resistencia)}}{[\text{densidad} \times \text{resistividad}]} \right\} \text{ para el cobre recocido}$$

Este factor de mérito M está indexado a un valor de referencia para el cobre recocido de 1,00; de los únicos materiales de componentes (no materiales compuestos o estructuras fabricadas) que se muestran en la Tabla 2, el cobre trabajado en frío tiene un factor de mérito M modestamente mejorado (1,257) en comparación con el cobre, y todas las formas de magnesio y aluminio examinadas también tienen un valor M ligeramente más alto que el cobre recocido, que va desde 1,147 a la 4,411 para la aleación de aluminio 6061-T6 de alta resistencia. El factor de mérito M más alto en la Tabla 2 (43,4) es para un cable cermet, compuesto de fibras de vidrio de alúmina en una matriz de aluminio puro. También se ha informado de cables similares que están compuestos de fibra de carbono reforzada de aluminio, pero son mucho más difíciles de preparar, y no están disponibles (por lo que se sabe) en el mercado en la actualidad. Un cable cermet de este tipo puede servir tanto como un conductor como un accionador del movimiento de la lanzadera de conmutación 465 de la figura 12.

Debido a que el módulo del cable de cermet (un cable de núcleo de 3M ACCR) es tan alto (4550 MPa), al estirarlo solo un pequeño porcentaje puede almacenar una gran cantidad de energía elástica (comparable a un resorte muy rígido) podría suministrar la fuerza 480 a la vez que obviar la necesidad del anillo rozante 470. Este diseño podría usarse para un diseño de accionamiento muy rápido capaz de una tensión muy alta. En la versión más extrema, es posible estresar un cable ACCR cermet hasta cerca de su resistencia a la rotura (1400 MPa), con el cable ensartado a través de una pila de resistencias tal como la mostrada en la figura 12, a continuación, liberar el cable por debajo de la pila de resistencias para abrir el circuito. Este diseño, en el que un cable reforzado de fibra de alta resistencia 465 se extiende a través de una pila de resistencias 460, y está sujetado por debajo de la pila, en una zona 466 que está fuertemente unida al cable estresado 465 permite el accionamiento más rápido posible de un disyuntor de conmutación de movimiento lineal. Hay varias opciones conocidas para liberar rápidamente una versión de cable reforzado de fibra altamente estresado del 465:

1. el elemento 466 puede ser una varilla fuerte y rígida que se mantiene en su lugar por un anillo de propulsores piezoeléctricos que mantiene el extremo de cable 466 en su lugar a través de una fuerza normal que puede liberarse dentro de 20 microsegundos (la fuerza normal necesaria puede reducirse si parte de la restricción al movimiento de 466 puede deberse a dominios magnéticos correlacionados en la superficie de 466 que coinciden con los dominios similares que se imprimen en la superficie del manguito 490);
2. el cable 465 o un extremo de cable 466 pueden cortarse con explosivos fuertes;
3. la fractura del cable por sí misma o un extremo de cable 466 puede iniciarse con láseres pulsados.

Este tipo de disyuntor podría restablecerse sin reemplazar componentes solo en la opción 1. Los dos últimos métodos todavía serían útiles como una forma de fusible rápido para los circuitos HVCC que solo rara vez se funden; estos también pueden restablecerse, sin embargo, una parte (del fusible) necesita reemplazarse cada vez. Un disyuntor de conmutación de la figura 12 puede restablecerse si los agarres piezoeléctricos se usan para mantener el extremo inferior de la lanzadera de conmutación 465, a través de la superficie de agarre en forma de varilla de tope proporcionada por el elemento 466 en la figura 12.

El diseño de la figura 12 minimiza la masa de las partes no esenciales de una lanzadera de conmutación, eliminando la mayor parte del aislamiento unido a la lanzadera de conmutación y minimizando la masa de la tecnología de control de campo eléctrico de borde trasero descrita en otra parte en esta divulgación. Solo el conductor se requiere absolutamente para el disyuntor de la figura 12; el componente de borde trasero de resistividad graduada opcional 466 no es un requisito, aunque se espera que reduzca la formación de arcos en el interior del núcleo de la pila de resistencias durante el funcionamiento, y por lo tanto es un elemento deseable. Este diseño también puede desplegarse con un alto vacío, o con una mezcla de gas de apagado de arco que contenga hexafluoruro de azufre rodeando a la lanzadera de conmutación 465 y a la pila de resistencias 460.

Una consideración importante en la aceleración y la desaceleración de la lanzadera de un disyuntor de conmutación es la integridad mecánica de la lanzadera bajo una aceleración dada. Las configuraciones mostradas en las figuras

1, 4 y 13 aceleran la lanzadera de conmutación linealmente de manera estricta con una fuerza de tracción; en un método de aceleración de este tipo de la lanzadera, no hay una tendencia a que la lanzadera se doble, independientemente de la relación de delgadez de la lanzadera (longitud/diámetro para una lanzadera de conmutación cilíndrica circular). Obsérvese, sin embargo, que durante la desaceleración las lanzaderas delgadas y largas de las figuras 1, 4 y 12 tendrían una alta tendencia a doblarse si la fuerza de frenado se aplica en la parte delantera, lo que limitaría la deceleración máxima a un valor más bajo que la aceleración máxima. Puede prevenirse que una lanzadera de conmutación larga y delgada tal como la 465 en la figura 12 se doble rodeando la lanzadera de conmutación con un fuerte estátor rígido; sin embargo hacer que el estátor realice una función mecánica además de su función eléctrica primaria (reduciendo en gran medida el volumen donde puede ocurrir la formación del arco) hará más caro todo el dispositivo. Esta es una ventaja principal de un disyuntor de conmutación de movimiento rotativo, tal como el de la figura 6 en comparación con un diseño en el que la lanzadera se mueve linealmente. En la medida en que las lanzaderas de conmutación largas y delgadas tienen distintas ventajas en términos de costes en niveles muy altos de alimentación (figura 12), es útil analizar las opciones para frenar una lanzadera de movimiento lineal desde la parte trasera.

El elemento 466 en el extremo de la varilla conductora 465 puede comprender unos imanes permanentes, como se indica para el elemento 119 en la figura 1, que pueden tanto restringir que la varilla 465 se mueva en el estado conectado, como que también pueden proporcionar una fuerza de frenado (generada induciendo una corriente en el metal, un medio bien conocido de frenado) después de que el disyuntor de conmutación haya completado su movimiento a través de la pila de resistencias. Otros tipos de restricciones mecánicas, que incluyen una cuerda no conductora unida al extremo de la lanzadera de conmutación, por ejemplo, en la posición 466 en la figura 12, y unida en el otro extremo a un freno mecánico que puede detener el movimiento hacia delante de la lanzadera de conmutación después de que el circuito se ha abierto o los frenos de fricción que solo se acoplan con el elemento 466 al final del desplazamiento, son también opciones viables para frenar desde la parte trasera.

La figura 13 muestra un diseño de lanzadera de resistencia variable del disyuntor de conmutación en el estado encendido, en el que un material altamente conductor 540 puentea entre los dos electrodos de estátor 505 y 510. Hay dos cambios significativos a partir del diseño similar de la figura 1: primero, se usa un núcleo de lanzadera de resistencia continuamente variable 530 en lugar del núcleo de etapa graduada 110 de la figura 1. La figura 1 ilustra el caso de un núcleo de resistencia en movimiento 110 con límites bien definidos entre los materiales con diferente resistividad (111, 112, 113, 117), mientras que la figura 13 muestra el caso de un núcleo de resistencia variable 530 que es un cermet continuamente graduado que tiene un aumento de resistividad suave de derecha a izquierda, sin cambios bruscos en la resistividad. Las resistencias cermet con resistividad estratificada que van desde baja a alta resistividad pueden prepararse por medios conocidos (véase, por ejemplo, "Functionally Graded Cermets", por L. Jaworska et al, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Volumen 17, julio-agosto 2006). La sustitución de una resistencia graduada continuamente durante los cambios de etapa en la resistencia elimina los transitorios de conmutación, por lo que esta es una implementación deseable de la invención que es factible, o con resistencias en la lanzadera (como en la figura 13), o resistencias fijas. En segundo lugar, se muestra un nuevo elemento en las figuras 13 y 14, el manguito elastomérico de borde trasero de electrodo de estátor 500, que es funcionalmente similar al elemento de borde trasero 153 mostrado en la figura 4. Dicho manguito elastomérico de borde trasero 500 se solapa con el electrodo 505, y ocupa la región 535 a la derecha del electrodo 505. La figura 14 muestra una vista de primer plano del manguito elastomérico de borde trasero de electrodo de estátor 500, que está unido al electrodo de estátor 505 como se muestra en la figura 14. El manguito 500 inhibe la formación de arcos y hace que sea posible hacer funcionar el disyuntor de conmutación de la figura 13 en el aire abierto por un diferencial de tensión más alto entre el electrodo de estátor 505 y el electrodo de estátor corriente abajo 510 de lo que sería posible en ausencia del manguito 500. En el momento en que el material de resistencia variable 530 se expone al aire tras salir el manguito elastomérico 500, el gradiente de tensión en ese punto se reduce considerablemente en comparación con lo que el gradiente de tensión es tras salir el electrodo 505. El gradiente de tensión máxima puede ser mayor bajo el manguito de elastómero 500 sin provocar una degradación eléctrica en comparación con el gradiente de tensión que podrían sustentarse sin degradación en una interfaz aérea en el borde trasero del 505 si la parte de resistencia variable de la lanzadera de conmutación 530 sale por el extremo del electrodo metálico de estátor 505 al aire. El electrodo de estátor corriente abajo 510 no necesita un manguito como el 500, ya que la corriente solo fluye entre el Polo A y el Polo B. El movimiento total del núcleo de lanzadera 550 es lo suficientemente lejano de manera que la parte altamente aislante de la lanzadera de conmutación 533 llena una zona que se extiende desde la izquierda a la derecha del electrodo de estátor 505, en algún lugar debajo del manguito de elastómero 500. La figura 13 también proporciona un ejemplo de accionamiento del movimiento de la lanzadera con la presión de gas 525.

El manguito 500 encaja alrededor de la sección transversal circular del electrodo de estátor en forma de tubo 505, y tiene un elemento de reborde 555 para unir el manguito de elastómero 500 al borde trasero de dicho electrodo de estátor. La forma de 500 como moldeada será sustancialmente diferente de cómo se ve en el estado deformado mostrado en la figura 14. Como será familiar para un experto en la materia del diseño de las fundas de caucho para los mecanismos mecánicos (fundas de dirección y similares), es posible trabajar hacia atrás desde la forma deformada final del manguito de elastómero (figura 14) para calcular las dimensiones del molde para fabricar el manguito de caucho. Un ejemplo de un criterio de diseño apropiado sería establecer la relación de extensión λ (que es la relación del diámetro en el estado deformado con el diámetro como moldeado) en la interfaz entre el manguito

de elastómero y la lanzadera en la localización 556 para aproximadamente 1,1 a 1,25. Puede desearse que la superficie interna del manguito elastomérico 500 se recubra por PTFE, y que el manguito se fabrique de un elastómero fuerte con una baja velocidad de relajación de estrés. En el caso del manguito 500, el estrés debe mantenerse durante la vida de la parte de elastómero, como unos tipos de elastómeros de relajación lenta, tales como los elastómeros curados con peróxido con reticulaciones carbono-carbono son los preferidos. También puede desearse que el manguito 500 tenga una resistividad disipativa electrostática entre aproximadamente 10^5 a 10^9 ohmios-metro. Además, el manguito de la figura 14 tendrá que durar muchos años en un entorno de ozono potencialmente alto alrededor del equipo eléctrico, en un estado extendido. Por lo tanto este manguito también debe ser altamente resistente al ozono; por estas razones, el HNBR reticulado de peróxido (un elastómero de nitrilobutadieno hidrogenado), el EPDM (un caucho de etileno-propileno) y el EPDM (un monómero de etileno-propileno-dieno) son específicamente apropiados como elastómeros de base para el manguito 500.

El método de utilización de un material aislante flexible presionado en estrecho contacto con un electrodo en movimiento justo detrás de un electrodo de escobilla para eliminar las chispas en un conmutador fue descrita por primera vez por Nikola Tesla en la patente de Estados Unidos 334.823, usando una placa de mica justo detrás de las escobillas de un motor de CC. Se ha inventado una versión mejorada de este concepto que tiene una capa de aislamiento de elastómero de ajuste hermético justo detrás del electrodo de estátor eléctrico 505 para inhibir la formación del arco a medida que la parte más conductora de la lanzadera de resistencia variable se aleja del electrodo de estátor. Creando una presión de contacto, el manguito elastomérico 500 aumenta la intimidad del contacto entre el manguito y la superficie exterior de la lanzadera de resistencia variable. Este mecanismo puede aplicarse a una lanzadera de conmutación, así como en el elemento de borde trasero 153 mostrado en la figura 4 y en un enchufe de elastómero semiconductor tal como una versión del 312 en las figuras 8 y 9.

Los disyuntores de conmutación también pueden desplegarse en un diseño de disyuntor híbrido tal como la figura 15, en la que la primera conmutación crítica se realiza mediante un interruptor muy rápido 605; este interruptor de conmutación rápida está conectado a una barra colectora común 601 que conecta tanto el interruptor rápido 605 como el disyuntor de conmutación 610 al Polo A. Del mismo modo, la barra colectora 615 conecta tanto el 605 como el 610 al Polo B a través de un interruptor de desconexión sin carga 602, que está normalmente cerrado (pero que se muestra como abierto en la figura 15). En el estado encendido, los interruptores 602, 605 y el disyuntor de conmutación 610 están todos cerrados, y la corriente fluye a través de las dos conexiones. Cuando se abre el interruptor rápido 605, la corriente total se conmuta rápidamente al disyuntor de conmutación, que a continuación acaba de abrir el circuito durante un periodo de ~ 10 ms. Después de que la corriente se apague, el interruptor sin carga 602 también está abierto, lo que facilita el restablecimiento de tanto el interruptor rápido 605 como el disyuntor de conmutación. El interruptor híbrido de la figura 15 todavía tiene la capacidad de apertura de circuito suave de un disyuntor de conmutación independiente, pero puede llegar a la primera inserción de resistencia mucho más rápido que un disyuntor de conmutación puramente electromecánico. El diseño del disyuntor híbrido de la figura 15 puede relajar el requisito de una muy baja resistencia en estado encendido a través del disyuntor de conmutación 610, ya que en el estado encendido, la mayor parte de la corriente fluye a través de la línea paralela a través del interruptor rápido 605. Por ejemplo, cuando un disyuntor de conmutación multietapa rotatorio de la figura 6 y de la Tabla 1 se usa en un circuito en paralelo con un interruptor de conmutación rápida como en la figura 15, la secuencia de inserción de resistencias de la Tabla 1 se modifica de manera que la resistencia de estado encendido del disyuntor de conmutación (antes del accionamiento) es igual a la primera resistencia insertada de la Tabla 1 (50 ohmios en este ejemplo). En este caso no hay necesidad de usar metal líquido u otros electrodos de muy baja resistencia en el disyuntor de conmutación, lo que simplifica significativamente el diseño, debido a que el interruptor rápido lleva la mayor parte de la corriente en estado encendido.

El interruptor de conmutación rápida mostrado en la figura 15 puede ser:

- una derivación superconductor (cerámica) tipo II que se diseña de tal manera que la resistencia sube mucho cuando la corriente supera un límite predeterminado. (Este tipo de superconductores cerámicos se usan en los limitadores de corriente de fallo superconductores (SFCL)); esta es la opción más rápida y preferida donde el control de la sobrecorriente de cortocircuito es el riesgo principal, y es intrínsecamente a prueba de fallos, incluso para cortocircuitos de baja inductancia);
- un tubo de electrones que incluye el tipo de tubo de vacío de cátodo frío mencionado en la patente de Estados Unidos 7.916.507 (como en el Ejemplo 1);
- una válvula de arco de mercurio;
- un interruptor semiconductor tal como un GTO, IGBT o IGCT (aunque esto implica altas pérdidas en el estado encendido en comparación con un interruptor mecánico);
- un interruptor mecánico rápido de un tipo diferente al de los disyuntores de conmutación de esta invención, tal como el de la patente de Estados Unidos 6.501.635;
- un conjunto de conmutadores MEMS (sistemas microelectromecánicos);
- un disyuntor de vacío (véase por ejemplo la patente de Estados Unidos 7.239.490).

En el caso de un disyuntor híbrido como en la figura 15, basado en el disyuntor de conmutación 610 que tiene el diseño de la figura 6 y el conjunto de inserciones de resistencias de la Tabla 1, la resistencia inicial del disyuntor de

conmutación (antes de cualquier movimiento del rotor) sería de 50 ohmios, que podría repartirse igualmente entre las seis zonas de conmutación haciendo más baja la resistencia de cada uno de los seis enlaces eléctricos (226, 236, 246, 256, 266, y 276 en la figura 6), por ejemplo, de 8,33 ohmios cada una. La resistencia inicial de 50 ohmios también podría dividirse entre cinco de las seis zonas de conmutación; la zona de conmutación restante con baja resistencia será entonces la zona donde se produce la segunda conmutación (esta segunda conmutación es la primera conmutación provocada por el movimiento de la lanzadera de conmutación rotatoria 280 de la figura 6); de acuerdo con la Tabla 2, esta segunda resistencia insertada sería de 19,4 ohmios (insertada en serie con los 50 ohmios anteriores, de manera que la resistencia total es de 69,4 ohmios). A partir de este punto en adelante, todas las conmutaciones e inserciones de resistencias posteriores serían manejadas por el disyuntor de conmutación 610.

El interruptor rápido 605 puede conmutar en algunos casos la alimentación al disyuntor de conmutación en menos de un microsegundo, y a continuación la lanzadera de disyuntor de conmutación comienza a moverse y puede llevarle 5-50 ms para abrir completamente el circuito, pero es capaz instantáneamente de restringir la irrupción de corriente debida a un cortocircuito perfecto para proteger los componentes conectados, tales como un VSC (convertidor de fuente de tensión), o por ejemplo un transformador. Este elemento de conmutación rápida es específicamente importante en una red HVCC multi-terminal. En esta aplicación, los limitadores de corriente de fallo superconductores y los tubos de vacío de cátodo frío son especialmente deseables para el interruptor rápido 605.

La figura 16 ilustra un método simple para crear una lanzadera de conmutación de movimiento lineal que es funcionalmente similar a una sola etapa 157 de las dos etapas del disyuntor de conmutación accionado lineal mostrado en la figura 5. El diseño de la figura 16 se basa en una pieza de tubería cermet de metal o metal-matriz 620, sobre la que se fijan o se unen los manguitos conductores 625, 626, y los manguitos aislantes 630, 631, y 632. Dichos manguitos conductores 625 y 626 se corresponden con los electrodos de lanzadera 211 y 212 en la figura 5, y son electrodos metálicos de deslizamiento. Los manguitos 630, 631, y 632 son manguitos eléctricamente aislantes que se corresponden con el material aislante 159 que rodea el conductor 210 en la figura 5. Dichos electrodos metálicos de deslizamiento pueden unirse mecánica y eléctricamente al núcleo en forma de tubería 620 mediante un encaje de fricción sobre la base de un montaje de precisión de piezas mecanizadas a diferentes temperaturas (encaje por contracción); usando una soldadura o una soldadura fuerte; o por un metal pulverizado con plasma o llama aplicado directamente al núcleo en forma de tubería 620. Los manguitos eléctricamente aislantes pueden vidriarse sobre el sustrato metálico 620 como un vidrio; un manguito aislante preformado que se mecaniza con precisión puede colocarse sobre el núcleo en forma de tubería 620 mediante un encaje de fricción basado en el montaje con precisión de piezas dimensionadas a diferentes temperaturas (encaje por contracción); por un aislamiento de cerámica pulverizada con plasma o llama aplicado directamente al núcleo en forma de tubería 620; o, puede aplicarse un recubrimiento de polímero adherente aislante al sustrato metálico 620 para aislarlo por todas partes excepto en los electrodos deslizantes 625 y 626. Como alternativa, la lanzadera de conmutación de la figura 16 puede prepararse por un torno que corta una tubería conductora con el fin de dejar rebordes levantados por detrás para formar los dos electrodos de lanzadera 625 y 626, seguido por el recubrimiento de la parte restante de la tubería con un aislante, tal como una resina epoxi o de poliuretano, o mediante moldeo por inserción usando un termoplástico. Después de formar el conductor y de aislar los manguitos, alisar la superficie de la tubería revestida de tal manera que el radio exterior de las secciones aislantes 630, 631, y 632 es igual al radio de los dos electrodos 625 y 626, es importante que no haya bordes afilados en los límites entre los manguitos conductores y los manguitos aislantes.

La figura 17 representa un disyuntor de conmutación rotatorio de dos zonas, una sola etapa con resistencias externas que se adapta bien a las aplicaciones de CC de media tensión (MVCC), alta corriente. La figura 17 es similar a la figura 6 en que representa una vista de extremo desde arriba de una lanzadera de conmutación rotatoria circular y las partes de acoplamiento del estátor, pero está diseñada para tener una lanzadera de conmutación de rotación más pequeña y sencilla, para elevar la velocidad de accionamiento. La sección transversal circular compacta de la superficie más exterior 670 del rotor de conmutación (que comprende los componentes principales 650, 671, 672, 673) de la figura 17 es lisa en su superficie exterior, lo que le permite encajar cómodamente dentro de un conjunto de estátor 652, no mostrado en detalle, que mantiene todos los electrodos de estátor (675, 680, 690, 700, 710, 676, 720, 730, 740, 750). Los electrodos de estátor 680, 690, 700, y 710 se conectan a las resistencias externas 681, 691, 701, y 711; del mismo modo los electrodos de estátor 720, 730, 740, y 750 se conectan a las resistencias externas 721, 731, 741, y 751 como se muestra. Los dos electrodos de estátor 675 y 676 son electrodos de metal líquido que se conectan a través de cables conductores de baja resistencia al Polo A y al Polo B del disyuntor de conmutación. La totalidad del conjunto de estátor 652, incluyendo las superficies internas de los electrodos de estátor tiene una superficie interior lisa en contacto con la lanzadera de conmutación rotatoria (650, 671, 672, 673). La totalidad de la superficie del estátor distinta de los electrodos de estátor se compone de un material altamente aislante, tal como un polímero o un compuesto de polímero. Una película interfacial lubricante (no mostrada en la figura 17) reside deseablemente entre la superficie exterior de rotor 670 y el estátor 652. Los electrodos de estátor se mantienen deseablemente contra la lanzadera con una presión uniforme, que puede proceder de una fuerza elástica, de una presión en el exterior de un estátor flexible, o de ambas.

El núcleo de rotor de conmutación 650 se compone deseablemente de un eje de material compuesto de SiC, una matriz de aluminio o algún material similar de conductividad eléctrica alta, baja densidad y bajo coeficiente de dilatación térmica, que esté revestido en su perímetro exterior con una cubierta eléctricamente aislante adherente

671, por ejemplo una cerámica tal como una alúmina pulverizada de plasma, nitruro de aluminio, vidrio de cuarzo, o un polímero, excepto que la cubierta aislante se interrumpe en las dos regiones de electrodos de lanzadera 672, 673 donde el tubo metálico está recubierto con una fina capa de metal conductor que es del mismo espesor que la capa aislante, pero que es conductor y tiene buenas propiedades como un electrodo de deslizamiento; dos metales específicamente deseables para la mayor parte de los electrodos de lanzadera 672, 673 son la plata, el níquel y/o molibdeno. Los electrodos de lanzadera 672 y 673 son lo suficientemente anchos como para hacer la conexión completa a los dos primeros electrodos de estátor en el estado encendido. La programación de las conmutaciones puede establecerse variando la anchura de los dos electrodos en estado encendido 675, 676 y ajustando los huecos de separación 682 y 692 entre dichos electrodos de estátor en estado encendido y los dos siguientes electrodos de estátor 680 y 720.

La figura 18 representa una vista de extremo desde arriba de un disyuntor de conmutación rotatorio de dos zonas, una sola etapa 800 con resistencias que están incorporadas en el estátor, pero que es por lo demás similar al disyuntor de conmutación rotatorio de la figura 17. En la figura 18, las resistencias de electrodo de estátor de forma trapezoidal hueca (811, 821, 831, 841, 861, 871, 881, 891) actúan tanto como electrodos como resistencias de estátor; estas resistencias de electrodo de estátor de forma trapezoidal en realidad forman parte de las paredes interiores del estátor y hacen contacto con el rotor de conmutación (que es en este caso un eje sólido o hueco metálico fuerte 855, seleccionado para permitir que un par muy elevado de aceleración radial máxima y muy rápido accionamiento). Este diseño permite una resistividad graduada de manera continua en las resistencias de electrodo de estátor, lo que elimina los aumentos repentinos de tensión debidos a las conmutaciones discretas a través de una serie de diferentes resistencias similares a las resistencias graduadas de movimiento lineal de la figura 13. La inserción de resistencias se produce en ambos lados de la lanzadera de conmutación rotativa cuando los electrodos de lanzadera 802 y 852 giran en el sentido de las agujas del reloj fuera del contacto con los electrodos de metal líquido 801 y 851 (esta es la primera conmutación, sincronizada en los lados A y B del disyuntor en este caso, aunque la primera conmutación de los electrodos de metal líquido no necesita ser simultánea). Los electrodos de metal líquido 801 y 851 están conectados al Polo A y al Polo B del disyuntor, y también están conectados eléctricamente a los electrodos de estátor vecinos 811 y 861, que pueden fabricarse, por ejemplo, de una aleación de nicromo, cermet, aleaciones cuasicristalinas, o carbono amorfo. De una manera similar, las resistencias de electrodo de estátor 811 y 861 también están conectadas eléctricamente a las resistencias de electrodo de estátor 821 y 871 y así sucesivamente, hasta las resistencias de electrodo de estátor finales 841 y 891. En cada una de estas dos series (lado del Polo A: 801 a 811 a 821 a 831 a 841; lado del Polo B: 851 a 861 a 871 a 881 a 891) la resistividad del material que forma cada resistencia de electrodo de estátor secuencial aumenta en comparación con la resistencia de electrodo de estátor anterior de la serie, y también ha graduado la resistividad internamente. Después de conmutar a través de todas las resistencias de electrodo de estátor, hay dos partes altamente aislantes del estátor (825, 826); los electrodos de lanzadera rotan bajo estas partes altamente aislantes del estátor cuando se abre el circuito. Tanto en la figura 17 como en la figura 18, la rotación total de la lanzadera de conmutación es de 135 grados durante el accionamiento del disyuntor desde el estado conectado (cerrado) hasta el estado de apagado (abierto).

Aunque la figura 18 muestra todas las resistencias de electrodo de estátor como que tienen el mismo diámetro exterior, el diámetro exterior de las diversas resistencias de electrodo de estátor puede variar en función de la cantidad de energía que se espera que absorba cada resistencia de electrodo de estátor durante el funcionamiento normal del disyuntor de conmutación; las primeras resistencias a conmutarse en el circuito (811, 861) absorben mucha más energía que las últimas resistencias (841, 891), y por lo tanto deberían tener una mayor masa. Esto puede lograrse aumentando el radio exterior de 811 y 861. El radio exterior de las resistencias intermedias de electrodo de estátor (821, 831, 871, 881) sería entonces intermedio en términos de diámetro exterior entre los diámetros de las primeras resistencias (811, 861) y las últimas resistencias (841, 891).

Como en la figura 17, la superficie exterior del eje de rotor 855 está recubierta con una capa aislante de cerámica, vidrio, o polímero 803, 853 a lo largo de la mayor parte de su superficie, pero también se recubre en dos regiones de electrodo de lanzadera 802 y 852 con metales adecuados, como se ha descrito anteriormente. La pared exterior del rotor de conmutación se extiende hacia fuera del radio 804, y se pule lisa de tal manera que hay a lo sumo solo una muy pequeña irregularidad en pasar de una parte aislante de la pared (803, 853) a las partes conductoras vecinas de la pared (802, 852). Una holgura estrecha se mantiene entre los bordes exteriores del rotor y las piezas en forma trapezoidal que forman la parte interior del estátor (801, 811, 821, 831, 841, 826, 851, 861, 871, 881, 891, y 825), que se produce en el radio 804; puede haber un lubricante no conductor líquido o seco en esta interfaz.

También es posible hibridar los diseños de las figuras 18 y 19, usando una combinación de electrodos de estátor enlazados a resistencias externas, como en la figura 17, para las primeras inserciones de resistencia (que absorben la mayor parte de la energía que se disipa durante el funcionamiento del disyuntor de conmutación) y las resistencias de electrodo de estátor como en la figura 18 para alcanzar las últimas varias conmutaciones a través del aumento de resistencia de la pared de estátor.

Para llegar a una alta tensión, los disyuntores de conmutación multietapa son deseables que puedan ser o rotores de gran diámetro o dispositivos de largo movimiento axial. Es altamente deseable accionar tan grandes lanzaderas de conmutación desde múltiples áreas en la superficie de la lanzadera de conmutación en lugar de aplicando una

fuerza en uno o ambos extremos de un disyuntor multietapa de largo movimiento axial, o en el eje de un disyuntor rotatorio de gran diámetro. Por ejemplo, en un disyuntor de conmutación rotatorio de tres etapas con seis zonas de conmutación a lo largo de su superficie exterior (como en la figura 6), diseñado para 800 kV el rotor tendrá que ser probablemente de más que un metro de diámetro para permitir el aislamiento adecuado entre las líneas eléctricas alternativas a través del rotor. En ese diámetro, accionar una rotación rápida desde un eje central requeriría una gran cantidad de par, y la estructura soportar ese par. Los rotores de gran diámetro se accionan más eficazmente mediante muchos resortes o accionadores pequeños todo a lo largo del radio exterior de la lanzadera de conmutación que puede distribuir la fuerza necesaria para acelerar la lanzadera de conmutación sobre la superficie de la lanzadera de conmutación de tal manera que la fuerza necesaria para acelerar la lanzadera de conmutación se suministra a la lanzadera cerca de donde se necesita para acelerar las partes de la lanzadera, como en la figura 19.

La figura 19 ilustra un mecanismo de accionamiento que es especialmente adecuado para accionar un disyuntor de conmutación rotatorio multietapa de gran diámetro similar a la figura 6. Múltiples resortes planos o suavemente curvados 905 están dispuestos alrededor del radio exterior del rotor de conmutación 900. Cada resorte se acopla con el rotor a través de un elemento de coincidencia 910 unido a la lanzadera de conmutación rotatoria. El rotor de conmutación se mantiene en su lugar por medio de unos frenos de liberación rápida 915 que restringen el movimiento del rotor hasta que una señal del controlador 925 que se desplaza a través de los cables de señal de control 920 libera los frenos. Como se ha tratado anteriormente, los frenos se basan deseablemente en los accionadores piezoeléctricos que aplican una fuerza normal contra superficies pulidas para resistir el movimiento por fricción. Cuando el controlador 925 hace que los accionadores piezoeléctricos 915 cambien rápidamente la forma con el fin de aliviar la fuerza normal, el conmutador rota para abrir el disyuntor.

La figura 20 muestra una configuración general de un conjunto de disyuntor de conmutación rotatorio accionado por eje. A la izquierda, el 930 es una unidad de par que aplica un par al eje 945, que acciona la rotación del disyuntor de conmutación rotatorio 940 cuando se libera el freno rápido 950. El disyuntor de conmutación rotatorio 940 puede ser de varios diseños, tales como por ejemplo los de las figuras 7, 18, o 19. Todos los componentes están montados en una placa base fuerte 960 (que también podría tener la forma de una tubería o una armazón que rodea el conjunto de disyuntor de conmutación). La fuente de par 930 puede ser un resorte de torsión, un anillo de resortes planos que actúan sobre una rueda de accionamiento, como en la figura 19, una unidad electromecánica o fluidica, o incluso un tramo de eje torcido. El disyuntor de conmutación rotatorio 940 está entre dos cojinetes 935. El freno de liberación rápida 950 está en el lado opuesto del disyuntor de conmutación rotatorio 940 de la unidad de torsión, que mantiene el par de la unidad de par 930 en el estado encendido del disyuntor, de manera que el par que se aplica al eje 945 se ve retenido por el freno de liberación rápida 950; tan pronto como el freno rápido libera el eje y el disyuntor rotativo rota a una posición abierta. En el estado encendido hay un par igual y opuesto sobre la placa base 960 entre la unidad de par 930 y el freno de liberación rápida 950. El eje 945 se extiende más allá del freno de liberación rápida 950 hasta un freno de detención 955 que está montado en el eje mediante una estría para que no obstaculizar el movimiento del eje hasta después de que la apertura del circuito se haya completado por el disyuntor de conmutación, después de lo cual el freno de detención detiene rápidamente la rotación del eje, mientras que también evita el rebote y la inversión de la rotación del eje. En este punto se abre un interruptor eléctrico sin carga 965, que desactiva el disyuntor de conmutación rotatorio de tal manera que puede restablecerse de manera segura.

El freno de detención 955 también incorpora una función para restablecer el disyuntor de conmutación rotatorio, retorciendo el eje de nuevo a su posición inicial después de que se haya abierto el disyuntor de conmutación rotatorio. Después de que el eje se restablece a su posición inicial de estado encendido, el freno de acción rápida se restablece, a continuación el freno de detención se devuelve a su posición normal de estado encendido y se bloquea de manera que no puede rotar con respecto a la placa base. Por último, el interruptor sin carga 965 se vuelve a cerrar para devolver el conjunto de disyuntor de conmutación rotatorio a su estado encendido original, listo de nuevo para llevar la corriente desde el Polo A al Polo B, al mismo tiempo que es capaz de abrirse de nuevo rápidamente cuando sea necesario.

El freno rápido puede ser de varias versiones mecánicas diferentes de la técnica anterior, o un freno piezoeléctrico tal como se describe en otra parte en esta divulgación, o una combinación de dominios magnéticos correlacionados para retener parte del par aplicado, en combinación con un freno piezoeléctrico para permitir el accionamiento muy rápido. Es posible aplicar el principio de coincidencia de dominios magnéticos impresos para mantener una lanzadera de conmutación fija mientras se aplica estrés, o en un modo de rotación de accionamiento o en un modo lineal de accionamiento. Esto se basa en un método de colocación preciso que está desarrollándose por Correlated Magnetics de New Hope, AL (véase, por ejemplo, la patente de Estados Unidos 8.098.122). Usando este concepto, puede crearse un patrón de "huella digital" de coincidencia de dominios magnéticos en la lanzadera de conmutación y el estátor de acoplamiento del disyuntor de conmutación 940, o en un eje y un manguito que forman una parte del freno rápido 950 que es capaz de restringir la rotación de la lanzadera de conmutación en relación con el estátor debido a una gran fuerza de atracción agregada entre los dominios magnéticos correlacionados; se supone que los patrones de dominio magnético de coincidencia pueden restringir la rotación de la lanzadera fuera del "pozo de energía magnética" hasta un par aplicado de T_c . A continuación, es posible combinar el efecto de frenado de los accionadores piezoeléctricos con los dominios magnéticos correlacionados; en este caso, se aplicaría un par por unidad 930 que es ligeramente mayor que el máximo que puede restringirse solo por los dominios magnéticos correlacionados, por ejemplo, se aplicaría un 1,1 (T_c) por unidad 930, que se restringe parcialmente por los dominios

magnéticos correlacionados, y parcialmente por los accionadores piezoeléctricos que aplican una fuerza perpendicular a las lengüetas de metal pulido o de cerámica, como en el elemento 915 de la figura 19. Tan pronto como los accionadores piezoeléctricos se liberan, la lanzadera comienza a moverse, debido a que el par aplicado supera el máximo que puede resistirse por los dominios magnéticos correlacionados. Esto reduce la fuerza normal que necesita aplicarse por los accionadores piezoeléctricos, lo que es económico. Esto conserva el mismo modo de fallo deseable como es el caso solo para los frenos piezoeléctricos, ya que la fuerza del resorte por sí sola hará que la lanzadera salga del pozo de energía magnética y abra el circuito si se pierde la alimentación del circuito de control a los accionadores piezoeléctricos.

- 5
- 10 Los dominios magnéticos correlacionados tienen la característica adicional importante de que pueden colocar con precisión el rotor de lanzadera de conmutación en una relación precisa con el estátor de conmutación (dentro de 10 micrómetros). Esto es especialmente importante en las versiones de los disyuntores de conmutación que usan electrodos de metal líquido finos, que deben alinearse con precisión en el estado encendido. Es fácil disponer las cosas de manera que una vez que la lanzadera de conmutación comienza a moverse, los dominios magnéticos
- 15 no restrinjan el movimiento de manera significativa, y sin embargo, un segundo conjunto de dominios magnéticos correlacionados pueden detener la lanzadera de conmutación en un estado apagado deseado al final de su rotación.

El principio de coincidencia de dominios magnéticos impresos para mantener una lanzadera de conmutación fija mientras se aplica estrés, a través de "huellas digitales" coincidentes también es capaz de restringir el movimiento lineal de una lanzadera de conmutación de una lanzadera de resistencia variable. Los patrones de dominio magnético de coincidencia pueden evitar el movimiento de la lanzadera fuera del "pozo de energía magnética" hasta una fuerza aplicada de F_c . Hay dos posibilidades distintas en cuanto a cómo estos dominios magnéticos correlacionados pueden usarse en un disyuntor de conmutación de movimiento lineal de acción rápida. La primera opción es que se despliegan unos resortes de acción rápida los cuales aplican una fuerza inferior a la que liberaría la lanzadera desde el pozo de energía magnética, por ejemplo $0,95 (F_c)$; los dominios magnéticos son en este caso suficientes para restringir el movimiento de la lanzadera fuera del pozo energía magnética. Una fuerza adicional relativamente pequeña de solo el 5 % o más de la fuerza de resorte puede aplicarse para hacer que la lanzadera de conmutación salga de su "pozo de energía magnética" después de lo cual se acelerará rápidamente por los resortes. Esta fuerza adicional podría aplicarse, por ejemplo, de manera electromagnética, por accionadores piezoeléctricos, o por la presión de gas.

La segunda manera de usar los dominios magnéticos correlacionados en un disyuntor de conmutación rápida es combinar el efecto de frenado de los accionadores piezoeléctricos con los dominios magnéticos correlacionados que no son muy capaces de restringir el movimiento de la lanzadera por sí mismos (como se ha tratado en relación con el movimiento de rotación en la exposición de la figura 20 anterior). En este caso, una fuerza aplicada que es mayor que el máximo que puede restringirse por los dominios magnéticos correlacionados solamente, por ejemplo $1,1 (F_c)$ se aplica a la lanzadera de un disyuntor de conmutación que está parcialmente restringido por los dominios magnéticos correlacionados, y parcialmente por los accionadores piezoeléctricos que aplican la fuerza perpendicular a las lengüetas de metal pulido o de cerámica, como en el elemento 915 de la figura 19. Este método de restricción parcial a través de los dominios magnéticos también podría aplicarse, por ejemplo, para reemplazar los elementos de restricción magnética 119 y 121 en la figura 1, o para complementar la fuerza de restricción aplicada por los accionadores piezoeléctricos para mantener el elemento 466 de la figura 12. Tan pronto como los accionadores piezoeléctricos se liberan, la lanzadera comienza a moverse, pero los accionadores piezoeléctricos solo necesitan proporcionar aproximadamente el 10 % de la fuerza de restricción total, lo que es económico. Este método tiene la ventaja de que si se pierde la alimentación de control, el disyuntor se abre automáticamente, por lo que su modo de fallo es mucho menos peligroso que el otro método descrito anteriormente para restringir el movimiento usando los dominios magnéticos correlacionados, en el que la fuerza de resorte por sí misma no es adecuada para hacer salir la lanzadera del pozo de energía magnética si se pierde la alimentación del circuito de control.

- 50 En cualquier disyuntor de conmutación, el movimiento de la lanzadera de resistencia variable o de la lanzadera de conmutación implica una aceleración rápida, lo que provocará una sacudida mecánica a menos que dos movimientos opuestos con cambios de momentos iguales y opuestos se combinen en un solo disyuntor. Con el fin de minimizar la fatiga de las conexiones entre el disyuntor y su compartimento, o los sujetadores de montaje que mantienen el compartimento en la estructura del edificio o del vehículo, y para reducir el ruido y las vibraciones debido a la apertura de un disyuntor de conmutación, puede desearse tener dos movimientos opuestos y equilibrados, de manera que se minimiza el momento que debe transferirse al compartimento del disyuntor y a los soportes estructurales del compartimento.

60 Son posibles tres mecanismos para contener los efectos del momento del accionamiento de disyuntor de conmutación dentro del estátor (la carcasa del núcleo móvil de disyuntor de conmutación, si el núcleo móvil es un elemento de resistencia variable o una lanzadera de conmutación):

- 65 1. acelerar dos lanzaderas de resistencia variable lineales o lanzaderas de conmutación en direcciones opuestas dentro de una carcasa del estátor común (que es capaz de absorber la carga de choque que resultará cuando los núcleos de lanzadera lleguen al final de su recorrido y deban detenerse) que contendrá los efectos del momento de dos cilindros simétricos y equilibrados que se mueven axialmente en direcciones opuestas;

2. equilibrar, en el caso de lanzaderas rotativas (que pueden comprender unas resistencias variables rotativas o unos conmutadores de lanzadera), los efectos del momento perfectamente requeriría unos discos coaxiales que roten en sentido contrario; sin embargo, es mucho más fácil usar dos lanzaderas que roten en sentido contrario en una base de soporte común; las fuerzas de torsión modestas debidas a tener los centros del momento rotacional de los dos discos ligeramente desplazados se pueden tolerar; esta fuerza de precesión es pequeña comparada con el momento de rotación necesario para acelerar y desacelerar las lanzaderas de conmutación de rotación, que puede ser equilibrado;

3. para o el movimiento lineal o los disyuntores de conmutación de rotación, el componente de momento de equilibrio puede ser una masa que no es un disyuntor de conmutación por sí mismo.

Es importante en la mayoría de los disyuntores tratar la irrupción de corriente en un cortocircuito perfecto. Un análisis completo requiere una comprensión de todo el sistema eléctrico en el que está integrado el disyuntor, incluyendo especialmente la respuesta de tensión del sistema, la capacitancia, la resistencia y la inductancia en un fallo. La velocidad a la que la corriente puede aumentar en un fallo se modera principalmente por la inductancia, y siempre es posible en principio añadir inductancia para frenar la irrupción de corriente en un fallo anticipado. Hay un equilibrio entre la velocidad de funcionamiento que se requiere para el disyuntor y la inductancia del sistema. La adición de inductancia puede permitir que la inserción de resistencia sea más lenta, mientras que todavía se restringe la corriente de irrupción a un nivel aceptable, pero a un coste: ambos para el inductor en sí mismo, pero también la adición de inductancia puede aumentar la masa de las resistencias que se necesitan para descargar la corriente. En general, los disyuntores de conmutación de la presente invención funcionan mejor cuando la relación de la tensión del sistema V (en voltios) con la inductancia L (en henrios) es menor que 40 millones como máximo; más preferentemente la relación de V/L debería ser menor que o igual a 8 millones. Pueden permitirse relaciones más altas que 40 millones en los disyuntores híbridos de la figura 15.

Los disyuntores de conmutación para circuitos de alimentación relativamente baja pueden incorporar deseablemente las resistencias en la lanzadera de resistencia variable en movimiento, tal como en las figuras 1 y 13; este principio también puede usarse en los disyuntores de conmutación rotatorios, usando un rotor de resistencia variable.

Los disyuntores de conmutación de los circuitos de alimentación relativamente alta (más de aproximadamente 100 kW) se fabrican preferentemente con una lanzadera de conmutación que conecta la corriente a través de una secuencia de aumento de las líneas de resistencia haciendo contactos secuenciales a través de los electrodos de estátor conectados con múltiples resistencias fijas, como en las figuras 4, 5, 6, 8, 9, 11,12, 17, y 18. Esto es especialmente cierto en el caso de los circuitos con alta inductancia de sistema (tales como las líneas de transmisión HVCC), ya que la energía almacenada inductivamente debe disiparse en forma de calor durante la apertura del circuito, lo que puede implicar la necesidad de cientos de kilogramos de resistencias.

Puede desearse en algunos casos tener un circuito de protección integrado en el disyuntor de conmutación que tiene el efecto de minimizar el pico de tensión que se produce cuando los contactos se deslizan fuera de la conexión (ya sea directa o indirectamente) hacia un conjunto de resistencias en el siguiente conjunto de resistencias de mayor resistividad. Se ha tratado el uso de resistividad graduada en el borde trasero de los electrodos para suavizar los picos de tensión debidos a la conmutación, pero también hay numerosos circuitos de protección conocidos que pueden reducir o "filtrar" los transitorios de tensión, tales como varistores, diodos Zener, condensadores, condensadores conectados al circuito a través de diodos, y otros tipos conocidos de protecciones.

Se consideran varios enfoques de diseño específicos para resolver el desafío de crear diseños ilustrativos de disyuntores de conmutación de CC de media tensión (MVCC) de 2 kA y 6 kV. Estos supuestos básicos se utilizan en desarrollar los Ejemplos 1 a 4:

- Carga completa = 2000 amperios;
- fuente de tensión de 6 kV; se han modelado dos casos: Caso # 4 no tiene bajada de tensión debido a la resistencia interna (un supuesto de peor caso, similar a un gran banco de condensadores); Caso # 5 tiene la corriente que proviene de un gran banco de baterías con la resistencia interna realista de 0,36 ohmios;
- una resistencia de carga completa normal de (6 kV) / (2 kA) = 3 ohmios
- amperios de diseño máximo en cortocircuito perfecto = 10 kA (esto determina cómo de rápida debe ser la conmutación para conmutar en el primer nivel de resistencias);
- la primera resistencia conmutada es (tensión máxima)/(amperios máximos en un fallo) = 1,2 ohmios (lo bastante alta como para restringir la corriente y revertir di/dt)
- 1,0 microhenrios es el peor caso asumido de la inductancia de sistema L0 en un cortocircuito perfecto;
- se añade la inductancia adicional L_x como sea necesario para frenar la irrupción de corriente; diferentes valores de L_x se consideran en cada uno de los Ejemplos 1 a 4;
- Tensión máxima durante la conmutación = 12 kV (el doble de la tensión normal del sistema; se produce debido a la conmutación de la resistencia).

La Tabla 3 muestra los tiempos calculados para pasar de plena carga (2kA) hasta sobrecarga máxima (10 kA en dos casos de sobrecarga diferentes:

Caso # 4: un peor caso de cortocircuito perfecto, resistencia cero, sin bajada de tensión; el aumento de la corriente con el tiempo sigue la ecuación (3)

Caso # 5: alimentación suministrada por baterías, con la resistencia de batería interna = 0,36 ohmios; el aumento de corriente con el tiempo sigue la ecuación (4)

5 **Tabla 3: Tiempo para amperios máximos (10 kA) para varias inductancias de sistema (circuito de 6 kV, 2 kA)**

Inductancia de sistema, mH	Tiempo (2 kA→ 10 kA), ms Case #4	Tiempo (2 kA→ 10 kA), ms Case #5
0,001	0,00133	0,00163
0,150	0,200	0,333
0,750	1,00	1,63
3,750	5,0	8,17

10 En el tiempo cero, la resistencia tiende a cero en el Caso # 4 (un peor caso de cortocircuito perfecto), después de lo cual solo la inductancia de sistema limita la subida de la corriente dI/dt . En el Caso # 4, la corriente de fallo $I(t)$ es una función lineal del tiempo después del fallo, dada por (4); por otra parte si el circuito contiene la resistencia R (Caso # 5), el aumento de corriente con el tiempo sigue la ecuación (5):

$$(4) \quad I(t) = Vt/L \quad \rightarrow \quad dI/dt = V/L \quad (\text{Caso \#4})$$

$$(5) \quad I(t) = (V/R)\{1-\exp[-t/(L/R)]\} \quad (\text{Caso \#5})$$

15 La figura 21 muestra una representación gráfica de estas dos ecuaciones para un caso de inductancia intermedia (150 microhenrios); hasta plena carga normal de 2 kA, las dos representaciones gráficas son casi las mismas, pero difieren de manera significativa en una corriente más alta y un tiempo más largo. Dado el muy bajo valor asumido de la inductancia de sistema mínima L (1,0 microhenrios; véase la Tabla 3), en ausencia de la inductancia añadida, dI/dt (cambio de la corriente con el tiempo en un cortocircuito perfecto) es de seis billones de amperios/segundo. Con el fin de limitar este aumento de corriente a no más de 10 kA (comenzando desde 2kA, a plena carga normal), sería necesario insertar la primera resistencia en 1,33 microsegundos. Esto no es posible para un sistema mecánico; solo diseños híbridos, tales como el de la figura 15 con tipos muy rápidos de interruptores (transistores IGBT, limitadores de corriente de fallo superconductores, o tubos de vacío de cátodo frío) pueden funcionar en menos de dos microsegundos como es necesario si la inductancia de sistema es solo un microhenrio.

25 El tiempo hasta la primera inserción de resistencia (conmutación) es un atributo importante de un disyuntor de conmutación, debido a que la primera resistencia invierte o en gran medida retarda el aumento de corriente; esto es cierto si es un disyuntor de conmutación independiente o un diseño híbrido como en la figura 15; o de hecho para cualquier disyuntor de CC basado en inserciones secuenciales de resistencias. (También hay muchos tipos de fallos en un sistema de CA (caída de rayos, por ejemplo), donde la irrupción de corriente es demasiado rápida como para esperar a que funcione un disyuntor ordinario de tipo CA.) Si la primera resistencia insertada es (tensión máxima) / (amperios máximos en un fallo) = 1,2 ohmios en el caso de los supuestos básicos anteriores, y si se inserta esta resistencia en o antes del momento en que se alcanza la corriente de 10 kA máxima de diseño en el circuito (Tabla 3), el primer pico de tensión será menor que o igual a la tensión de diseño máxima, y la corriente decaerá desde ese punto en adelante. Si la corriente = 10 kA, entonces, después de conmutar en la resistencia de 1,2 ohmios, la tensión a través de la resistencia será de 12 kV. La resistencia seleccionada para la primera inserción es solo lo suficientemente alta para restringir la corriente y revertir dI/dt , pero sin provocar que la tensión aumente por encima de 12 kV. Como se ha tratado en detalle anteriormente alrededor de la figura 6 y la Tabla 1 (que se refiere a un sistema de transmisión de alta inductancia), debe permitirse suficiente tiempo para que la corriente decaiga a un nivel deseado antes de la siguiente conmutación. La adición extra de inductancia L_x ralentiza no solo la irrupción de corriente en el corto (como en las ecuaciones 3 y 4), sino que también extiende el tiempo hasta que se abre el circuito (ya que la corriente decae cuando $\exp(-t(R/L))$, como los siguientes ejemplos mostrarán.

45 **Ejemplos de la divulgación**

Ejemplo 1

50 Se considera un disyuntor del estilo de la figura 15, en el que el interruptor rápido es un tubo de vacío de cátodo frío del tipo descrito en la patente de Estados Unidos 7.916.507. Dicho tubo tiene una caída de tensión de estado encendido de aproximadamente 10 voltios, lo que implica una pérdida de energía de alrededor de 10/6000 o ~ 0,17 % de la alimentación transmitida (mejor que un IGBT y no necesita refrigeración por agua), para los supuestos básicos citados anteriormente. Este tipo de tubo puede cambiarse fácilmente en menos de 0,1 microsegundos, conmutando la alimentación al disyuntor de conmutación antes de que la corriente de irrupción pase el nivel máximo de 10 kA, incluso a una inductancia de un microhenrio, siempre que por supuesto pueda activarse con suficiente rapidez.

En este caso, el tubo de vacío está haciendo la primera conmutación, y si la inductancia de sistema es solo un microhenrio, entonces hay muy poca energía inductiva para disipar: solo 100 julios si la corriente se interrumpe en 10 kA, de tal manera que podría usarse un pequeño condensador o varistor para absorber esta energía. Las ventajas ofrecidas por el disyuntor de conmutación serían insignificantes en este caso, excepto si (como es a menudo el caso) la inductancia del fallo pudiese ser muy variable en función de su localización. En el escenario de la inductancia muy variable en un fallo, se puede confiar en el tubo de vacío para una rápida conmutación para restringir la irrupción en el caso de un fallo de baja inductancia, y el disyuntor de conmutación puede optimizarse para la inductancia máxima esperada, con el fin de minimizar los picos de tensión durante la apertura del disyuntor. En particular, los picos de tensión pueden mantenerse por debajo de la tensión que se experimentaría si se usase un varistor para absorber la energía inductiva.

Ejemplo 2

Se considera el caso de inductancia mínima que es de 150 microhenrios en algún fallo. Esto implica un accionamiento y un movimiento muy rápido de un disyuntor de conmutación para llegar a una primera conmutación en 200-333 microsegundos (por los supuestos básicos de la Tabla 3). Esto es tan rápido que (como es el caso del Ejemplo 1), solo un disyuntor de conmutación híbrido en un circuito en paralelo con un interruptor electrónico rápido (como en el Ejemplo 1 y la figura 15) puede alcanzar de manera factible la primera conmutación dentro de 200 microsegundos, pero en el caso de que estén disponibles 333 microsegundos para alcanzar la primera conmutación (en el Caso # 5 de un circuito con resistencia interna) es factible (pero difícil) usar un disyuntor de conmutación rápido para llegar a la primera conmutación dentro de este tiempo. Estos cálculos se basan en el uso del método más rápido conocido para accionar la liberación de un disyuntor de conmutación de rotación, un accionador piezoeléctrico que se mueve 20 micrómetros en 20 microsegundos. En el caso de un dispositivo de rotación, el par necesario por unidad de aceleración angular se escala con el radio al cuadrado, mientras que la distancia circunferencial (disponible para colocar los electrodos) se escala con el radio. Por lo tanto, para un par disponible dado se producirá el accionamiento más rápido para el radio más pequeño factible del rotor de conmutación. Para empujar los límites de un disyuntor de conmutación rotatorio en el que se aplica el par a través de un eje hacia el accionamiento más rápido posible, es por lo tanto deseable minimizar el radio de la lanzadera de conmutación. Esto a su vez significa minimizar el número de electrodos de estátor, la anchura de los electrodos de estátor, y la distancia de separación entre los electrodos de estátor, debido a que cada electrodo de estátor y cada separador entre los electrodos de estátor vecinos deben encajar a lo largo de la circunferencia de la lanzadera rotatoria. Cuanto más amplio es cada electrodo de estátor, y cuanto mayor sea el número de electrodos de estátor, más larga debe ser la circunferencia. Como este ejemplo está diseñado para sondear los límites de la velocidad de acción de un disyuntor de conmutación, usa diversos trucos simultáneos, como se detalla a continuación y se muestra en la figura 18.

La liberación del rotor de la figura 18 que se encuentra bajo un alto par se supone que se produce dentro de los 50 microsegundos del fallo, que incluye 30 microsegundos para el ordenador de control para detectar el fallo y desactivar un par de accionadores piezoeléctricos para liberar la fuerza normal de restricción contra un freno de metal pulido o de cerámica que también es parte de la lanzadera de conmutación rotatoria, pero fuera de la región donde se encuentran los electrodos de lanzadera, y en el lado opuesto de la lanzadera de conmutación rotatoria desde el dispositivo que se aplica el par (como en la figura 20). Unos resortes ordinarios no son suficientes para aplicar el par a tal movimiento rápido; solo un estrés elástico de un material muy rígido puede mantenerse con el movimiento necesario; por ejemplo, un tubo de aleación de titanio trenzado o un material compuesto reforzado de fibra de carbono en forma de tubo que es del mismo diámetro que la lanzadera de conmutación rotatoria puede suministrar la fuerza de resorte y mantenerse con el movimiento de la lanzadera de conmutación rotatoria.

Con fines de cálculo se toma la longitud axial de la lanzadera de conmutación rotativa de la figura 18 para que sea de 10 cm, lo que implica un solapamiento circunferencial necesario de los electrodos de rotor 802 y 852 con los electrodos de estátor de metal líquido 801 y 851 de menos de un mm en el circuito cerrado en el estado encendido; esto puede ser un área de contacto demasiado pequeña para la alineación precisa de rutina de los electrodos en un disyuntor industrial; por lo tanto, para los fines de esta exposición se ha tomado la anchura circunferencial de los electrodos de estátor de metal líquido 801 y 851 para que sea de 2,0 mm, lo que permite una modesta desalineación entre el borde trasero del electrodo de rotor y el borde delantero del electrodo de metal líquido. En el radio exterior seleccionado de la lanzadera de rotación (2 cm), esto implica que la lanzadera debe rotar 5,73 grados (0,100 radianes) en la primera conmutación (donde los electrodos de lanzadera 802 y 852 se deslizan fuera de los electrodos de metal líquido 801 y 851); con el fin de lograr ese movimiento en 150 microsegundos, la aceleración radial debe ser de 8,89 millones de radianes/segundo. Esto requeriría un par de 2158 newton-metros, que es mayor que el par máximo que puede aplicarse incluso a un eje beta-C de titanio sólido de 2 cm de radio. (Para fines de cálculo, todo el rotor que contiene el conmutador rotativo de 10 cm de longitud se supone que es equivalente a un eje de aleación beta-C de titanio de 20 cm de largo, 4 cm en el diámetro exterior y 20 cm de largo, y un peso de 1.214 kg). En el caso de un circuito resistivo (Caso # 5), la resistencia interna retrasa el cruce de 10 kA en un cortocircuito perfecto, de tal manera que están disponibles 283 microsegundos para alcanzar la primera conmutación (después de los 50 microsegundos permitidos para la detección de fallos y la liberación de los frenos piezoeléctricos); esto reduce la aceleración angular necesaria a 2,5 millones de radianes por segundo y el par necesario a 606 newton-metros, que apenas está dentro de las limitaciones de resistencia del rotor de aleación de

titanio sólido supuesto. Esto no es un diseño práctico, pero sí muestra que es técnicamente viable para lograr la primera conmutación dentro de 333 microsegundos usando el diseño rotatorio de la figura 18.

Ejemplo 3

5 Se considera el caso de inductancia mínima en un fallo en el circuito de la Tabla 3 que es de 750 microhenrios. Se continuará la exposición basándose en la figura 17, una buena parte de la cual ya se ha tratado anteriormente con respecto al Ejemplo 2, ya que el diámetro de rotor es el mismo que antes, para el disyuntor de conmutación rotatorio de la figura 18. El aumento de la inductancia mínima en un fallo de 750 microhenrios aumenta el tiempo para que la corriente se eleve a 10 kA desde la presunta corriente de arranque de 2 kA por un factor de cinco: para el peor de los casos, el fallo de resistencia cero (Caso # 4) esto da 1,0 milisegundos para alcanzar la primera conmutación, y para el circuito del Caso # 5, 1,63 milisegundos. Usando los mismos supuestos descritos anteriormente para el Ejemplo 2 (50 microsegundos para liberar el freno, momento de rotación de inercia equivalente a un eje de aleación beta-C de titanio de 20 cm de largo, 4 cm en el diámetro exterior y 20 cm de largo), Esto reduce la aceleración angular necesaria a 222000 radianes/segundo para el fallo del Caso # 4 y 80100 radianes/segundo para el fallo del Caso # 5. El par correspondiente para estas aceleraciones es de 54 y 19 newton-metros; dentro de un intervalo de pares prácticos. De hecho, estos pares no requieren un eje de titanio sólido fuerte, tal como sería necesario en el ejemplo 2, lo que significa que puede usarse un eje de aleación de aluminio hueco, lo que reduce tanto el peso como el momento de inercia del rotor, lo que reduce el par necesario aún más. Obsérvese sin embargo que la velocidad de accionamiento necesaria en este caso aún descartará los resortes helicoidales de acero de múltiples vueltas convencionales para el accionamiento; un resorte de acción rápida será necesario aún aunque no tan rápido como en el Ejemplo 2. Esto demuestra que pueden fabricarse los disyuntores de conmutación rotativos prácticos con alrededor de un milisegundo de tiempo para la primera conmutación.

25 Después de la primera conmutación lejos de los electrodos de metal líquido en la figura 17, los otros ocho electrodos de estátor no son electrodos de metal líquido, y como consecuencia tienen que ser más anchos que el electrodo de metal líquido con el fin de llevar la corriente de fallo de manera segura y sin dañar los electrodos. Además, como se ilustra en la Tabla 1 y en la figura 7 para un caso diferente pero similar, el intervalo óptimo entre conmutaciones también cambia a medida que la corriente y la energía inductiva almacenada se apagan mediante inserciones de resistencia repetidas. No se ha tomado la etapa de acoplar la ecuación de movimiento del rotor 650 con los tiempos optimizados para la inserción de resistencias (como en la Tabla 1 y la figura 7 para un caso específico diferente), con el fin de calcular la anchura óptima de cada electrodo de estátor específico para el peor caso supuesto de fallo (10 kA, resistencia de sistema cero). Obsérvese sin embargo que esto es un cálculo sencillo una vez que se conozcan los detalles de la fuente del par y el rotor. La figura 17 ilustra este principio por el hecho de que los dos primeros electrodos de estátor de deslizamiento de metal 680 y 720 son más anchos (un cm de anchura en la dirección circunferencial) que cualquiera de los electrodos de estátor de metal líquido iniciales 675, 676 (que son de 0,2 cm de anchura) o los tres electrodos de estátor posteriores 690, 700, 710, 730, 740, 750 (que son de 0,6 cm de anchura). En este caso, los dos conjuntos de electrodos de estátor (los de 720 a 750 y los de 680 a 710 son iguales en tamaño a su electrodo equivalente en la zona de conmutación opuesta. La sincopación de la conmutación entre la zona de conmutación 760 y 770 se logra haciendo la anchura del primer hueco aislante 682 entre el electrodo de estátor de metal líquido 675 y el electrodo de estátor 680) de 0,45 cm, mientras que todos los otros huecos de aislamiento (incluyendo el hueco de aislamiento 692) son de 0,30 cm; esto compensa las conmutaciones del electrodo de rotor 672 fuera de los electrodos de estátor (680, 690, 700, 710) en la zona de conmutación derecha superior en 4,30 grados detrás de las conmutaciones correspondientes del electrodo de rotor 673 fuera de los electrodos de deslizamiento de metal (720, 730, 740, 750) en la zona de conmutación izquierda inferior. El uso de este método para crear las conmutaciones sincopadas tiene la ventaja de la normalización de las anchuras de los electrodos de estátor, y permitir que el rotor de conmutación tenga un diseño simétrico. Esta no es una configuración optimizada, pero ilustra el principio del uso de una separación circunferencial de electrodo de estátor asimétrica para hacer que las conmutaciones en dos zonas de conmutación diferentes se produzcan en diferentes momentos durante el funcionamiento de un disyuntor de conmutación; y muestra que la alteración del hueco de separación entre un solo conjunto de electrodos de estátor puede lograr conmutaciones sincopadas entre una zona de conmutación (en la parte superior derecha de la figura 17) y una segunda zona de conmutación conectada en serie (en la parte inferior izquierda de la figura 17).

55 Los mejores conductores disponibles cercanos a la temperatura ambiente son de plata y cobre; son bien conocidos, por ejemplo, los electrodos de matriz de plata en los que la plata se infiltra en un sustrato de metal poroso sinterizado de cromo o wolframio. Si se usa plata o cobre en contacto con electrodos de metal líquido, estos pueden reaccionar; la plata reacciona con galio y mercurio, por lo que incluso si por ejemplo, se fabrican electrodos de plata-mercurio la superficie del electrodo de plata será una amalgama de plata-mercurio. La plata puede usarse con el eutéctico de bajo punto de fusión de sodio-potasio, pero esto introduce problemas de seguridad. Una superficie específicamente deseable para los electrodos de lanzadera 672, 673 de tal manera que la superficie del electrodo sea compatible con mercurio o una aleación de galio es pulverizar en frío plata en un sustrato de material compuesto de aluminio no oxidado o de aluminio en una capa de grosor moderado 100-1000 micrómetros de espesor, y a continuación pulir la superficie lisa antes de aplicar una capa de molibdeno, que deseablemente puede lograrse por métodos de deposición física de vapor (PVD) para depositar una película bastante delgada (1-5 micrones) en la superficie de plata pulida, cuya película aplicada de PVD refleja el acabado de superficie del sustrato de plata por

debajo, y no requiere más pulido. Unas técnicas de pulverización de plasma también pueden usarse para aplicar una capa superficial más gruesa de molibdeno en un sustrato de cobre, plata, compuesto de aluminio/SiC, o de cromo en principio. La co-pulverización de plasma de un metal de sustrato y molibdeno puede usarse para crear una capa límite difusa entre la plata y el molibdeno (por ejemplo) para reducir la posibilidad de delaminación. Sin embargo, una capa gruesa de molibdeno en un sustrato de cobre, plata o aluminio es intrínsecamente inestable debido a la diferencia en la dilatación térmica del molibdeno en comparación con el sustrato, y por lo tanto menos favorecida que un recubrimiento más delgado de molibdeno aplicado por PVD. En cualquier caso, la razón para aplicar una película superficial de molibdeno es recubrir el electrodo sólido con un metal no oxidante (por debajo de aproximadamente 600 °C) que no reacciona con galio o mercurio para formar una amalgama.

Debido a que las capas de electrodo 672, 673 en la superficie del rotor de conmutación 650 de la figura 17 son relativamente delgadas (menos de un mm), y también por razones de simplicidad de fabricación, puede desearse que todo el espesor de los electrodos esté compuesto de molibdeno que es plasma pulverizado sobre el tubo de metal de sustrato 651. En este escenario, la capa aislante 670 puede ser lógicamente una capa de alúmina de plasma pulverizado (en este caso después de la pulverización de plasma se haría un esmerilado suave a la superficie del rotor de conmutación). Debido a que el molibdeno y la alúmina tienen ambos una baja dilatación térmica en comparación con los metales conductores, puede desearse minimizar la dilatación térmica del tubo o eje conductor de sustrato 650 en el disyuntor de conmutación de la figura 17. Se consideran dos posibles materiales para el núcleo de un disyuntor de conmutación rotativo tal como el que se muestran en la figura 17:

- un eje sólido fabricado de material compuesto infiltrado AISiC-9;
- un eje de titanio hueco para altas capacidades de carga de impacto.

Estos dos materiales de ejes tienen dilataciones térmicas muy similares. El AISiC-9 es un material compuesto de carburo de silicio infiltrado de aluminio de CPS Technologies que tiene 8-9 ppm (partes por millón por grado Celsius) una dilatación térmica de 30 °C a 200 °C (menos de la mitad de la dilatación térmica del aluminio), y el titanio tiene 8,6 ppm (partes por millón) de dilatación térmica de 30 °C a 200 °C. Ambos materiales forman enlaces con la alúmina y el molibdeno pulverizados de plasma que son más resistentes a la fatiga termomecánica que las capas de alúmina o molibdeno pulverizados de plasma de espesor similar en aluminio, cobre, plata, o sus aleaciones. El uso de un eje sólido fabricado de AISiC-9 para el núcleo del rotor de conmutación 651 en la figura 17 conduce a una resistencia entre los dos electrodos de lanzadera de aproximadamente 0,0026 micrones-ohmio, con una disipación de calor resistivo correspondiente de solo 0,01 vatios a 2 kA. Para comparar un eje AISiC-9 sólido con un tubo de titanio hueco, se calcula el espesor de pared de tubo que proporciona el mismo momento de inercia alrededor del eje de rotación que el eje AISiC-9 sólido; en este caso el mecanismo para acelerar ambos tubos puede ser el mismo, como puede desearse en la comparación de las dos opciones económicamente. El espesor de pared del tubo de titanio (titanio puro) que coincide con el momento de inercia de un eje AISiC-9 sólido (siendo el diámetro exterior de ambos de 4,00 cm), es de solo 0,149 cm de espesor. En un espesor de pared de tubo de titanio puro de 0,149 cm, la resistencia entre los dos electrodos de lanzadera sería de aproximadamente 88,5 micrones-ohmio, lo que implica pérdidas en estado encendido a carga máxima completa (2000 amperios) de aproximadamente 350 vatios solo del calentamiento por resistencia de los 10 cm de largo de la sección de eje de titanio entre los electrodos 672 y 673. Se calculan también los mismos tipos de cifras para un tubo de aleación beta-C de titanio con el mismo momento de inercia de rotación que un tubo de titanio puro; debido a la pequeña diferencia de densidad del titanio (véase la Tabla 2), el espesor de pared es un poco menos para un tubo de aleación beta-C de titanio (0,138 cm): la resistencia entre los dos electrodos de lanzadera sería en este caso de aproximadamente 365 micrones-ohmio, lo que implica pérdidas en estado encendido a carga máxima completa (2000 amperios) de aproximadamente 1.460 vatios solo del calentamiento por resistencia de los 10 cm de largo de la sección de eje de titanio entre los electrodos 672 y 673. (Aunque se considera que esto es inaceptable, esto solo corresponde al 0,01 % de la energía transmitida, mucho menos de lo que se dispararía por un interruptor IGBT o incluso un interruptor de tubo de cátodo frío). Se observa que la resistencia de un electrodo rotatorio de núcleo de tubo de titanio puede reducirse en gran medida insertando un núcleo de tubo de aluminio en el interior de la cubierta de tubo de titanio de tal manera que se evite cualquier óxido en la interfaz.

En el caso donde se requiere un accionamiento muy rápido, lo que implica también una carga de choque, es necesario usar un material resistente a choques, muy fuerte como sustrato para el rotor de conmutación de la figura 17 o 19, tal como un tubo de titanio o de aleación de titanio unido eléctricamente a un núcleo de aleación de aluminio. En cualquier escenario donde la lanzadera de conmutación puede protegerse a partir de la carga de choque, el AISiC-9 será un material más adecuado para el núcleo de una lanzadera rotatoria, tal como la 650 de la figura 17, y los tubos de aleación de aluminio también pueden usarse en algunos casos.

60 Ejemplo 4

En este ejemplo, la inductancia mínima de sistema se toma para que sea cinco veces mayor que la inductancia mínima del Ejemplo 3 (3,75 mH). De acuerdo con la Tabla 3, esto permite 5 ms para la primera conmutación en el Caso # 4, u 8,13 ms para la primera conmutación en el Caso # 5. Dadas las mismas estimaciones de zona alta para el momento de inercia total del rotor de la figura 17 o la figura 18 realizadas para los Ejemplos 2 y 3 anteriores (correspondientes a un eje sólido de 20 cm de longitud y 4 cm diámetro de la aleación beta-C de titanio), las

aceleraciones angulares necesarias son de 8160 radianes/segundo para el Caso # 4 (par requerido = 2,0 newton-metro), o de 3060 radianes/segundo para el Caso # 5 (par requerido = 0,7 newton-metro). Estas aceleraciones y pares están dentro del intervalo que puede accionarse por resortes helicoidales de acero convencionales.

5 Ejemplo 5

Muchos circuitos de CC de media tensión están dispuestos con un "neutro flotante", lo que significa (a diferencia de una batería de coche y un sistema eléctrico del automóvil, por ejemplo) que los dos polos se consideran "calientes" y cualquier disyuntor debe cortar simultáneamente la alimentación de ambos polos para aislar un dispositivo o un circuito. Una forma deseable de hacerlo ya se ha mencionado: dos disyuntores de conmutación de polo único pueden dispararse de manera simultánea, uno para el lado relativamente positivo del circuito, uno para el lado relativamente negativo del circuito. En este caso, puede desearse especialmente si la aceleración necesaria de las lanzaderas puede hacerse de tal manera que un conjunto emparejado de disyuntores de conmutación se disparen simultáneamente de tal manera que el efecto del momento debido a la aceleración y la desaceleración de la masa de lanzadera del primer disyuntor de conmutación se contrarreste por el efecto del momento de aceleración y desaceleración de la masa de lanzadera del segundo disyuntor de conmutación de manera que el momento que debe transferirse al sistema de montaje para el par de disyuntores de conmutación se reduce considerablemente.

A veces también puede desearse colocar dos disyuntores de conmutación separados en una única lanzadera común. Por ejemplo, el disyuntor axial de dos etapas de la figura 5 puede modificarse fácilmente para interrumpir dos circuitos simultáneamente eliminando la conexión entre las dos etapas 182 y cablear las ahora dos mitades eléctricamente independientes para interrumpir simultáneamente el circuito en el lado positivo y el lado negativo del circuito de CC. Del mismo modo, un disyuntor de conmutación rotatorio también puede diseñarse para abrir simultáneamente dos circuitos. Un disyuntor de 2 polos rotatorio de este tipo no puede usar un eje conductor que esté en el circuito, como en las figuras 17 y 18, sino que en su lugar necesita mantener la separación eléctrica entre las etapas, similar a la figura 6. Las tres etapas de conmutación en la figura 6 pueden también adaptarse para interrumpir simultáneamente las tres fases de un circuito de CA trifásico, eliminando los cables de conexión en serie 236 y 256 y en su lugar conectar cada etapa a una fase del circuito trifásico.

Se han descrito una serie de realizaciones. Sin embargo, hay muchas otras implementaciones que no se han descrito en detalle lo que será evidente para un experto en la materia que caen dentro del alcance de las reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un disyuntor de conmutación (100) para uso en un circuito eléctrico que define una línea eléctrica, en donde la corriente fluye a través del disyuntor de conmutación (100) cuando está en un estado encendido, comprendiendo el disyuntor de conmutación (100):
- 5 un estátor (107) que tiene uno o más electrodos de estátor (105, 115);
una lanzadera (109) que tiene uno o más electrodos de lanzadera, pudiendo moverse la lanzadera (109) con respecto al estátor (107) y estando configurada de tal manera que durante tal movimiento los electrodos de lanzadera se deslizan contra los electrodos de estátor (105, 115); y
10 un sistema de lanzamiento (119, 121) dispuesto para mover la lanzadera (109) con respecto al estátor (107) entre una posición de estado encendido donde el disyuntor de conmutación (100) presenta una resistencia eléctrica relativamente baja en el circuito eléctrico, y una posición abierta donde el disyuntor de conmutación (100) presenta una resistencia eléctrica muy alta en el circuito eléctrico;
- 15 **caracterizado por que** al menos uno de los electrodos de estátor (105, 115) y de los electrodos de lanzadera tiene una resistividad creciente a lo largo de su longitud, con una resistividad mayor en un borde trasero que comprende una parte de un electrodo que toca a otro electrodo cuando la lanzadera (109) se mueve en relación al estátor (107); y
hay un número de resistencias (111, 112, 113) acopladas eléctricamente a uno o ambos de entre el estátor (107) y la lanzadera (109);
20 en donde, cuando la lanzadera (109) se mueve entre la posición de estado encendido y la posición abierta, la corriente que fluye a través del disyuntor de conmutación (100) se deriva en líneas de resistencia creciente, incluyendo las líneas las resistencias (111, 112, 113).
- 25 2. El disyuntor de conmutación de la reivindicación 1, en el que al menos algunos de los electrodos de lanzadera y de estátor están rodeados sustancialmente por un material aislante de tal manera que no haya huecos entre los electrodos de lanzadera y los electrodos de estátor a medida que se mueve la lanzadera en relación al estátor.
3. El disyuntor de conmutación de la reivindicación 2, en el que todos los electrodos de lanzadera y de estátor están rodeados sustancialmente por sólidos aislantes.
- 30 4. El disyuntor de conmutación de cualquier reivindicación anterior, que comprende además un fluido eléctricamente aislante presurizado que rodea la lanzadera.
- 35 5. El disyuntor de conmutación de cualquier reivindicación anterior, en el que la alimentación pasa sobre la lanzadera a través de una primera serie de electrodos de estátor que definen una serie de líneas con resistencia creciente a medida que se mueve la lanzadera, a un electrodo de lanzadera que está en la superficie exterior de la lanzadera, a través de una línea aislada a un segundo electrodo de lanzadera en una parte diferente de la lanzadera, pero rodeado por un aislante en la superficie de la lanzadera, y apagando a continuación la lanzadera de dicho segundo electrodo de lanzadera a una segunda serie de electrodos de estátor que conectan la alimentación a través de una serie de líneas con resistencia creciente a medida que se mueve la lanzadera.
- 40 6. El disyuntor de conmutación de cualquier reivindicación anterior, en donde el disyuntor está dispuesto en un circuito de alimentación en paralelo con un interruptor de conmutación rápida que se usa para realizar una primera conmutación de la corriente al disyuntor a un nivel de resistencia inicial que es capaz de controlar la irrupción de la corriente en un cortocircuito perfecto.
- 45 7. El disyuntor de conmutación de cualquier reivindicación anterior, en el que la lanzadera comprende una pluralidad de etapas que están acopladas eléctricamente en serie y se mueven mecánicamente juntas como un cuerpo rígido.
- 50 8. El disyuntor de conmutación de cualquier reivindicación anterior, en el que el estátor comprende además un material de alta resistencia dieléctrica y de baja fricción que crea una fuerza contra la lanzadera mediante un miembro elástico.
- 55 9. El disyuntor de conmutación de cualquier reivindicación anterior, que comprende además un mecanismo de enganche de lanzadera que comprende unos accionadores piezoeléctricos que alivian la fuerza en una interfaz de materiales de alto módulo para lograr un accionamiento muy rápido del inicio de movimiento de la lanzadera.
- 60 10. El disyuntor de conmutación de cualquier reivindicación anterior, que comprende además unos dominios magnéticos correlacionados en la lanzadera y el estátor que están construidos y dispuestos para mantener la lanzadera en una posición relativa al estátor.
- 65 11. El disyuntor de conmutación de cualquier reivindicación anterior, en el que la lanzadera se mueve de una manera lineal con la alimentación que entra en la lanzadera a través de una conexión, apagando a continuación la lanzadera a través de un electrodo de lanzadera que conecta con una serie de electrodos de estátor que conectan la alimentación a través de una serie de líneas con resistencia creciente a medida que se mueve la lanzadera.

12. El disyuntor de conmutación de la reivindicación 11, en el que la lanzadera es en general cilíndrica y hay una pluralidad de zonas de conmutación a lo largo del eje longitudinal de la lanzadera.
- 5 13. El disyuntor de conmutación de cualquiera de las reivindicaciones 1-10, en el que la lanzadera se mueve de manera rotatoria circular, entrando la alimentación en la lanzadera a través de una primera conexión eléctrica, a continuación se apaga la lanzadera a través de una segunda conexión eléctrica que está conectada eléctricamente a dicha primera conexión eléctrica, pero rodeada por un aislamiento en la superficie de la lanzadera, y que conecta con una serie de electrodos de estátor a medida que rota la lanzadera.
- 10 14. El disyuntor de conmutación de la reivindicación 13, en el que la lanzadera se mueve en un arco circular de menos de 180 grados y conmuta la alimentación a través de una pluralidad de secuencias de resistencias conectadas en serie.
- 15 15. El disyuntor de conmutación de cualquier reivindicación anterior, en el que al menos algunos de los electrodos de lanzadera y de estátor comprenden molibdeno.

Figura 1

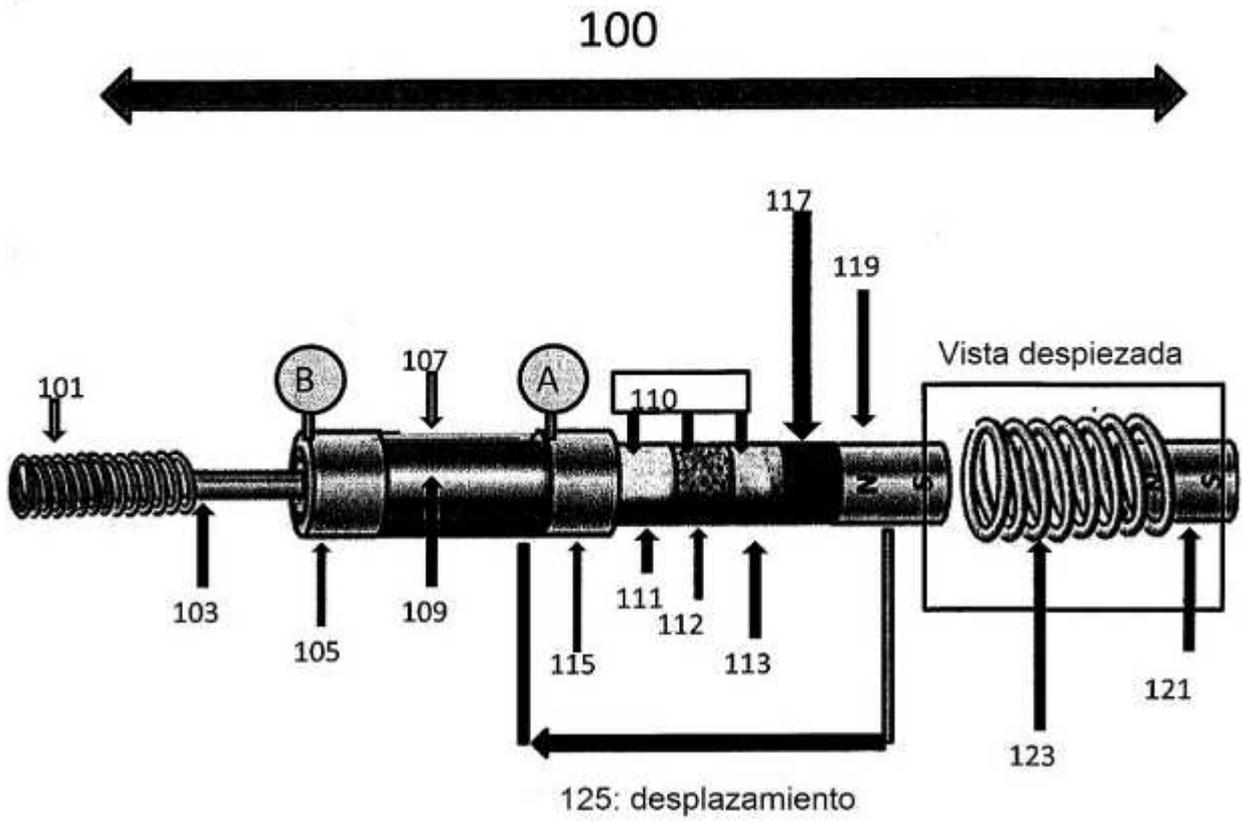


Figura 2

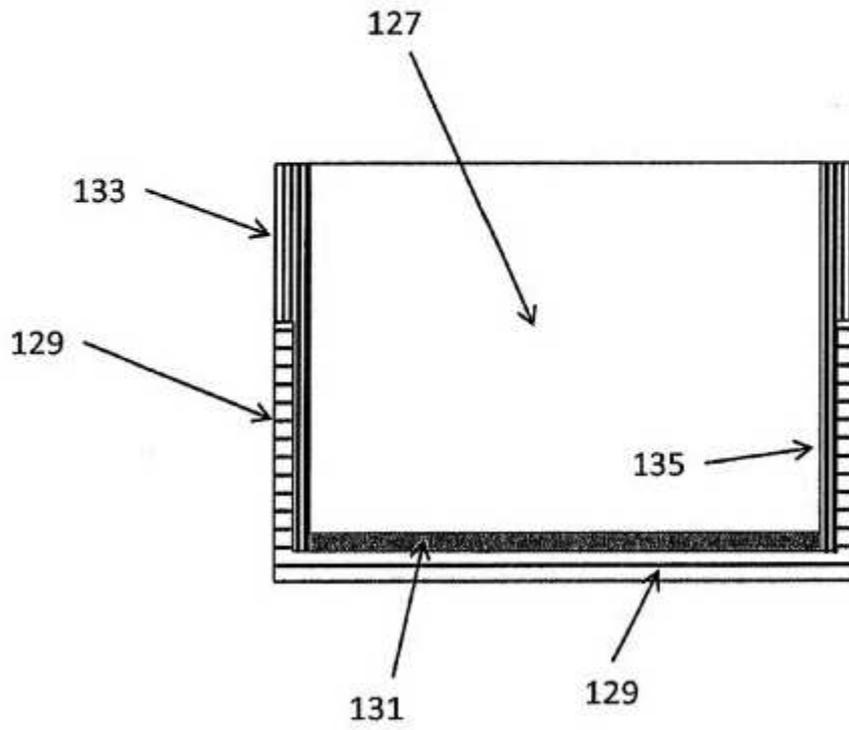


Figura 3

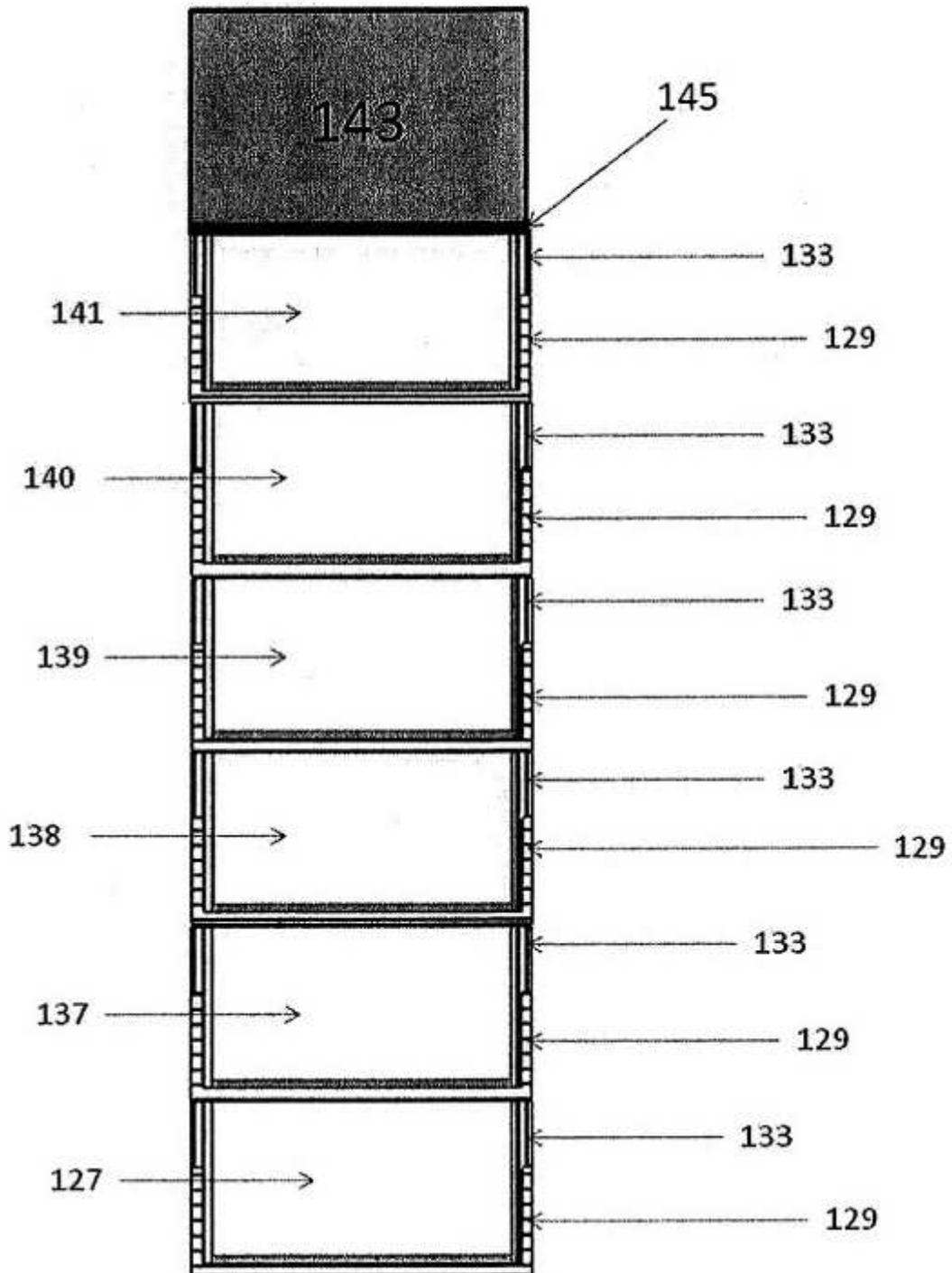


Figura 4

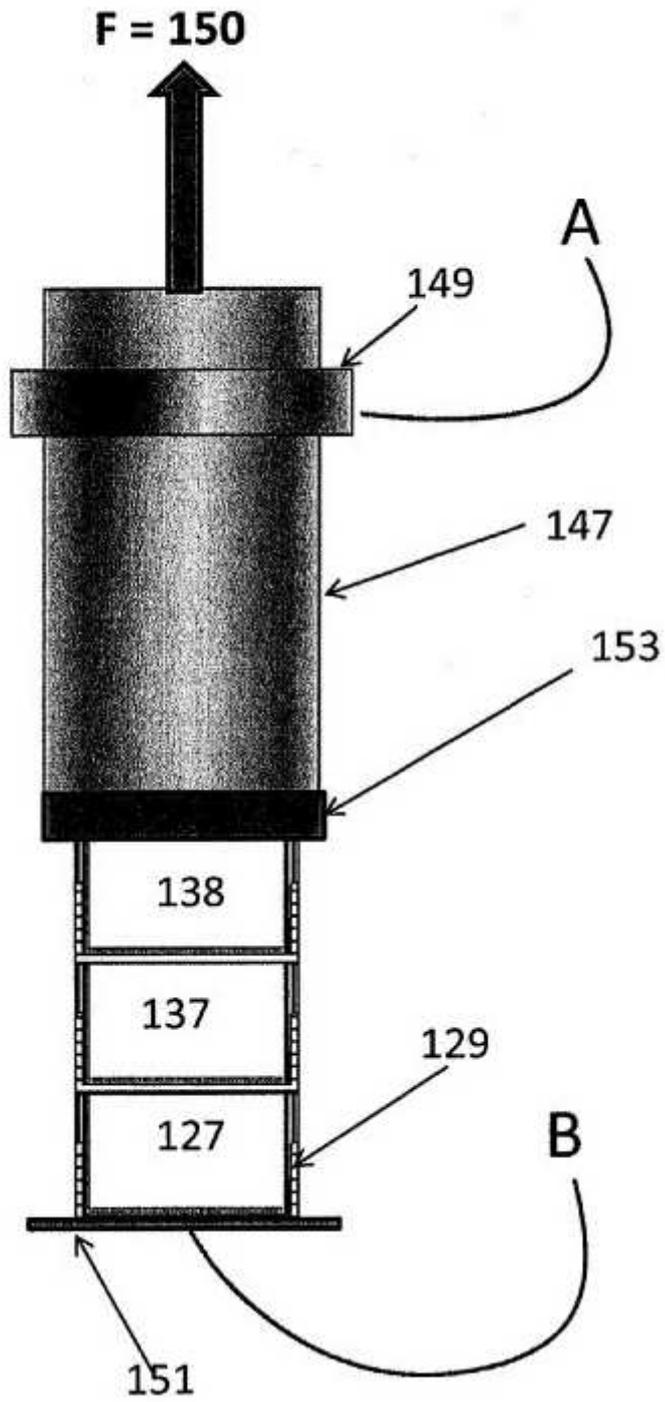


Figura 5

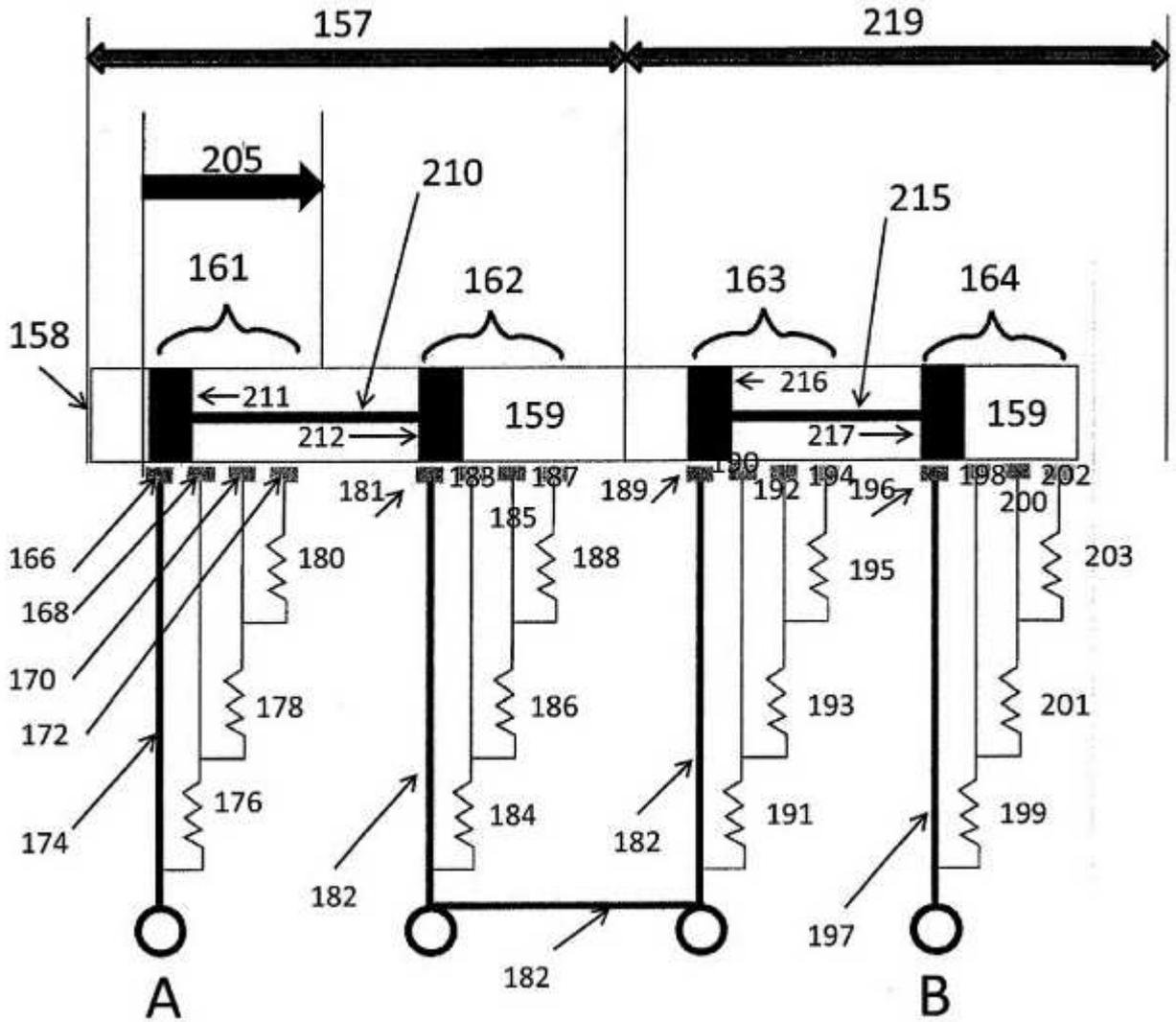
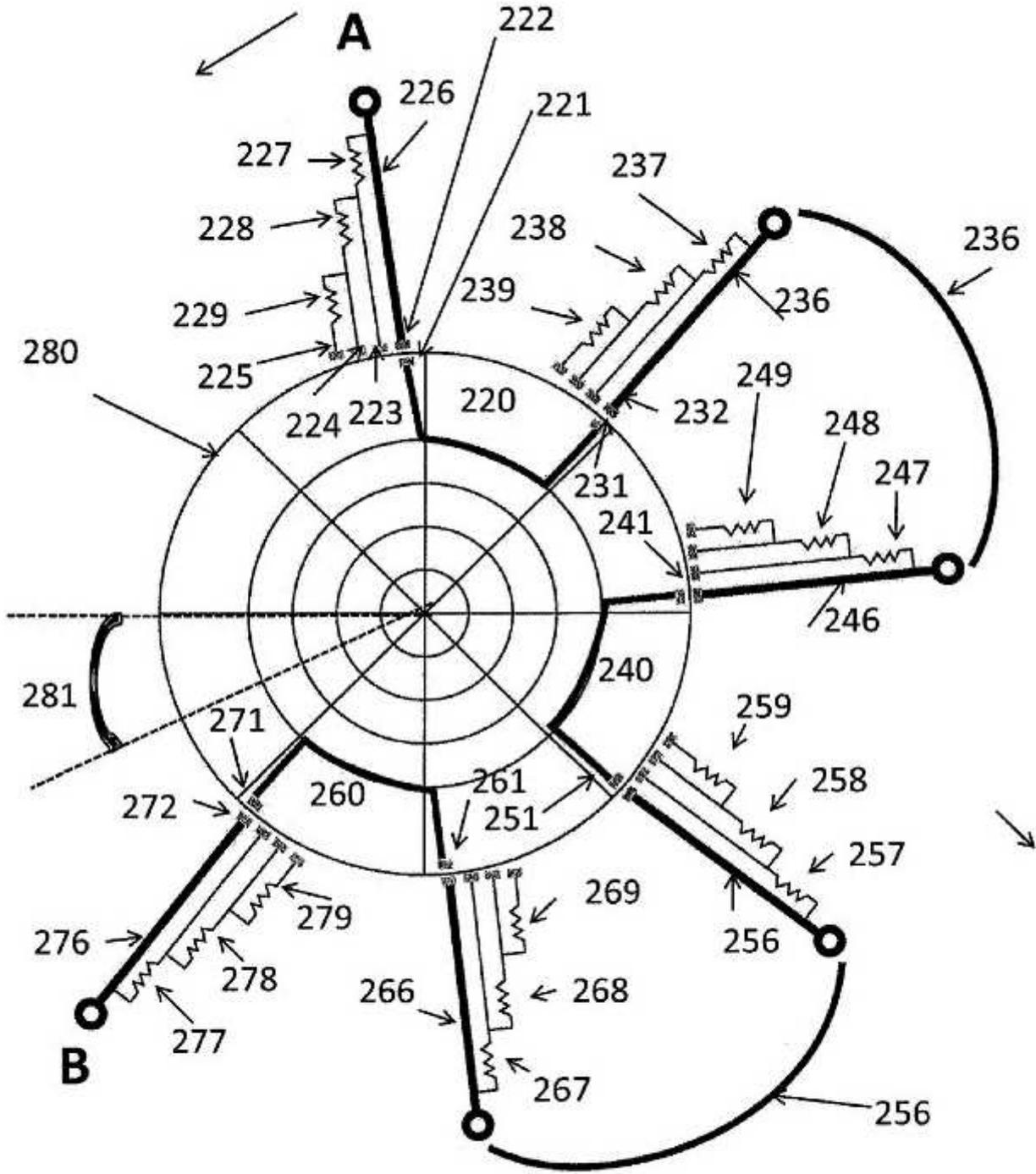


Figura 6



El estator entero es 290

Figura 7

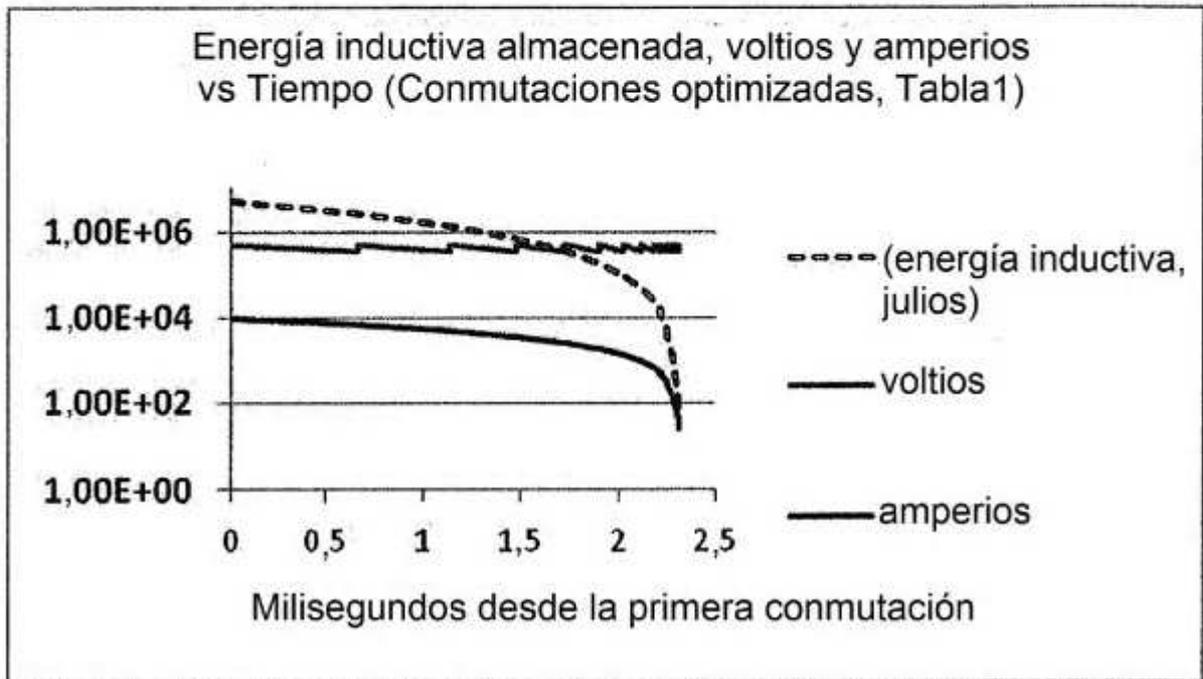


Figura 8

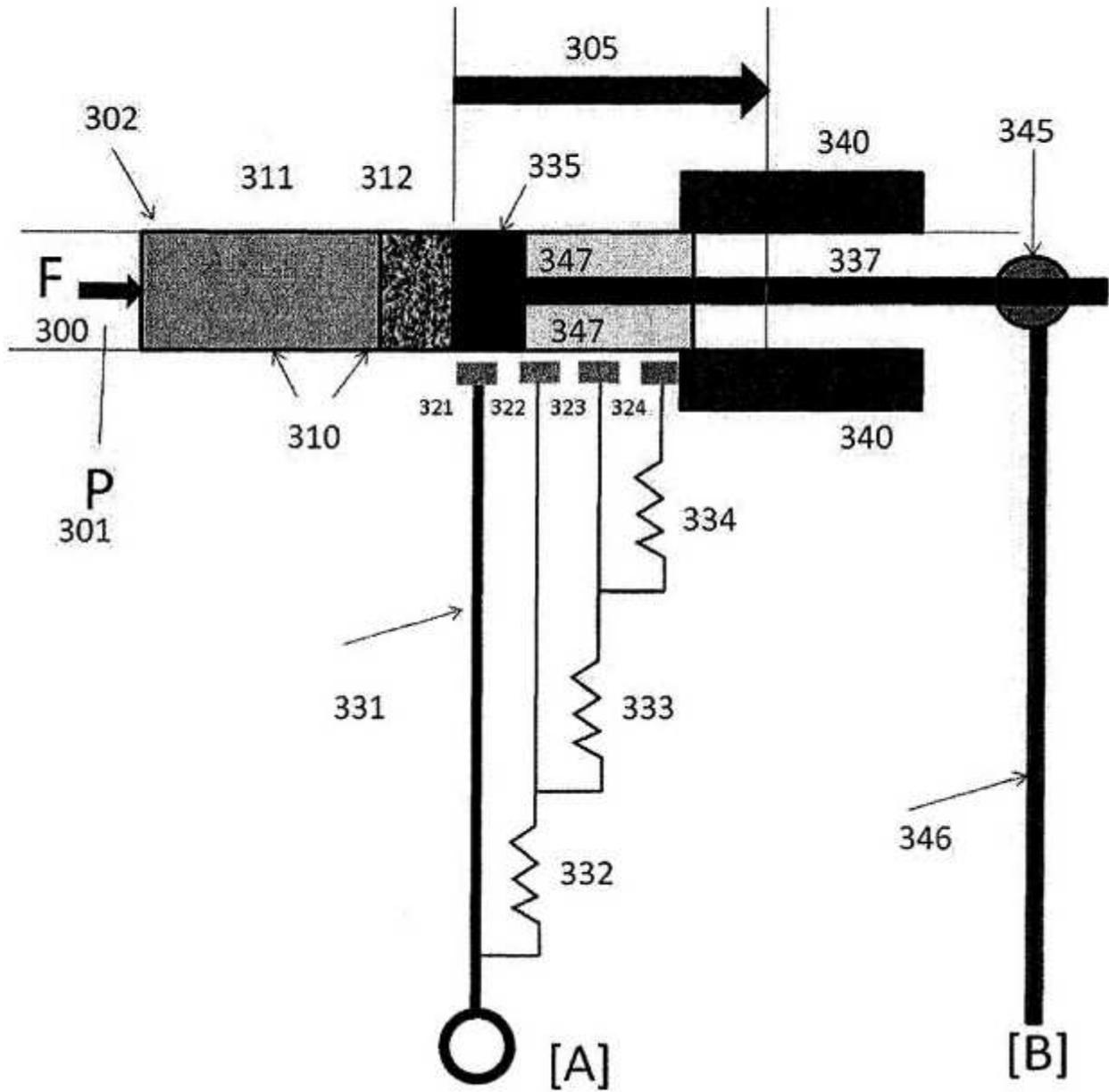


Figura 9

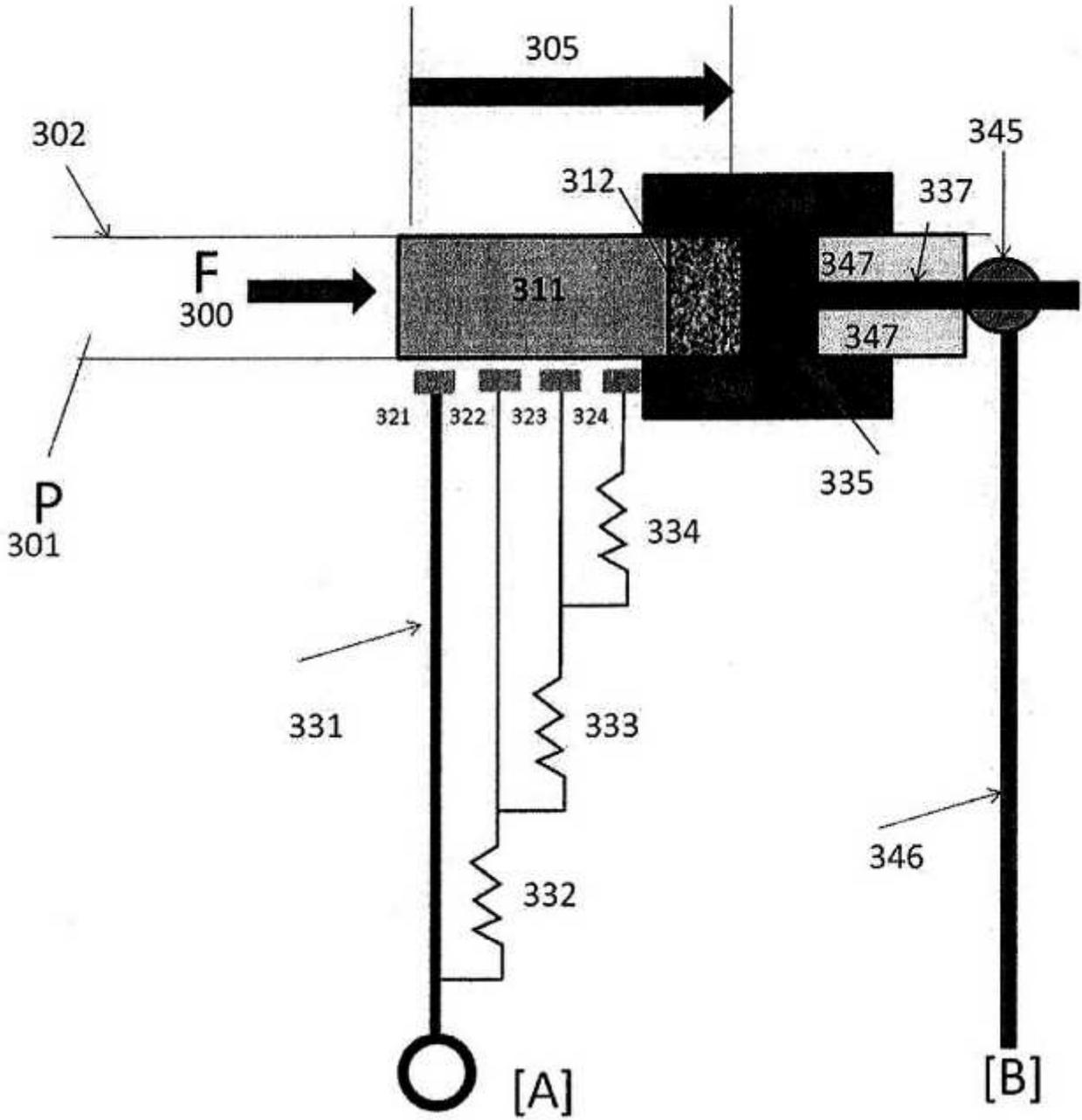


Figura 10

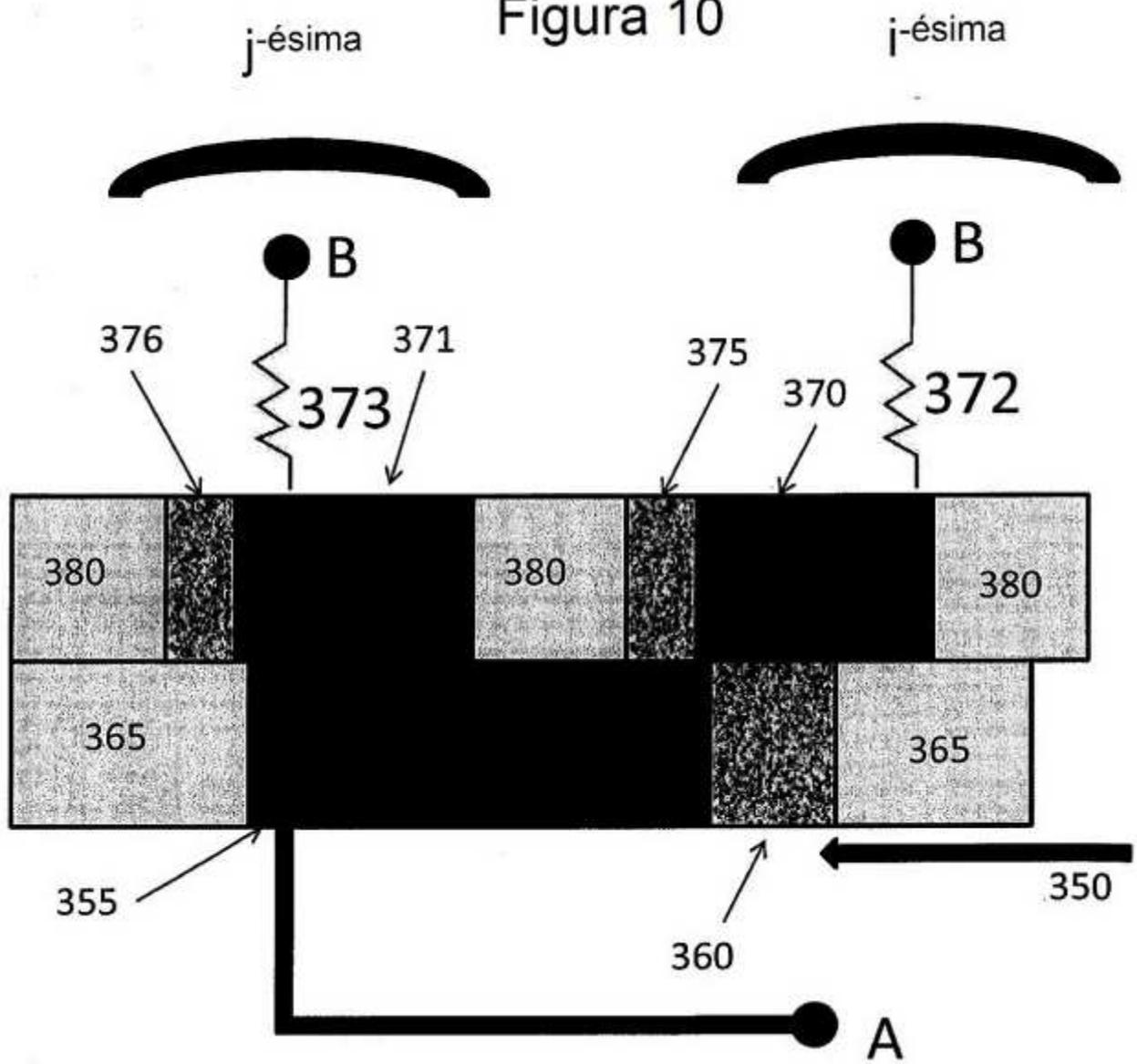


Figura 11

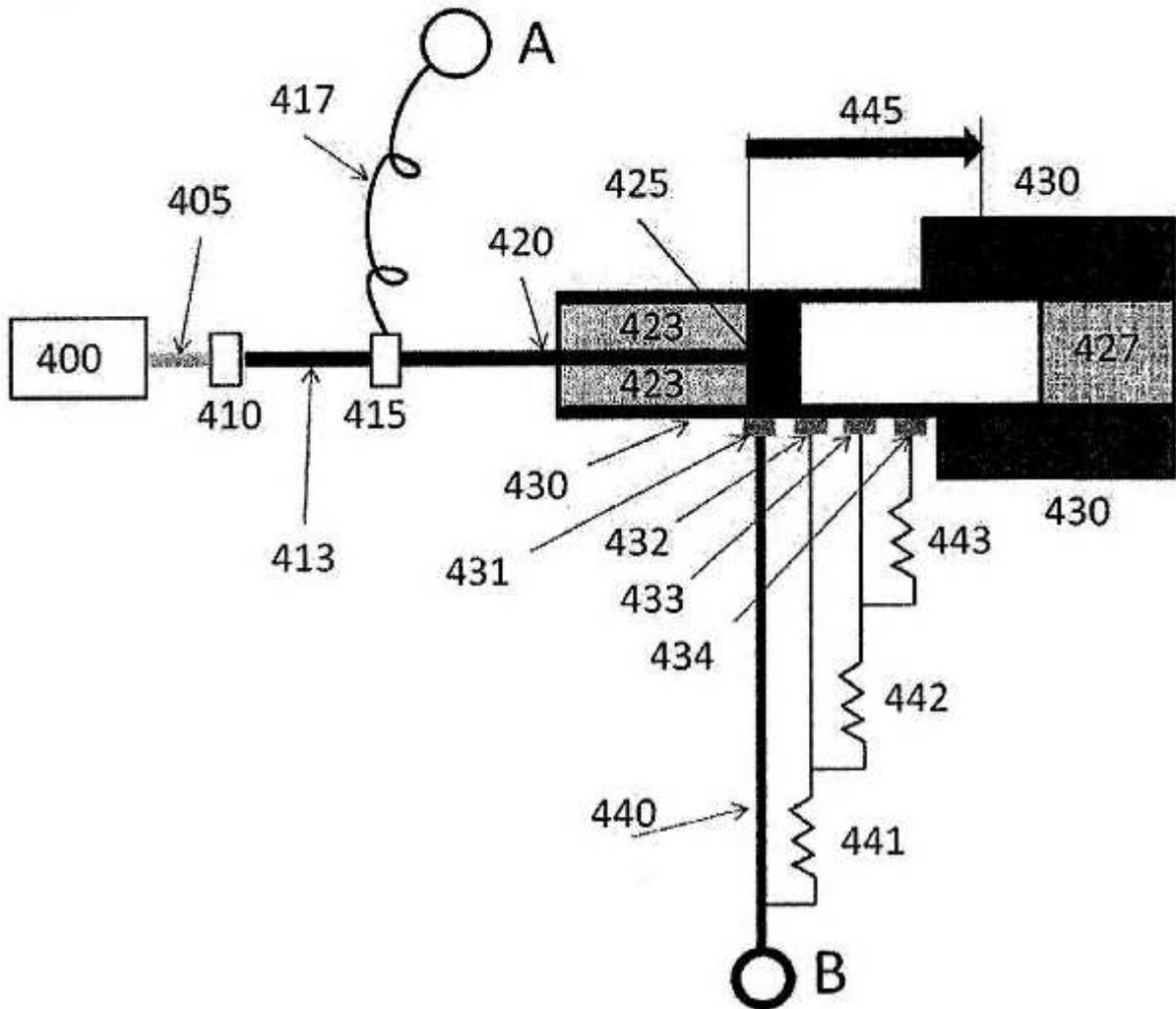


Figura 12

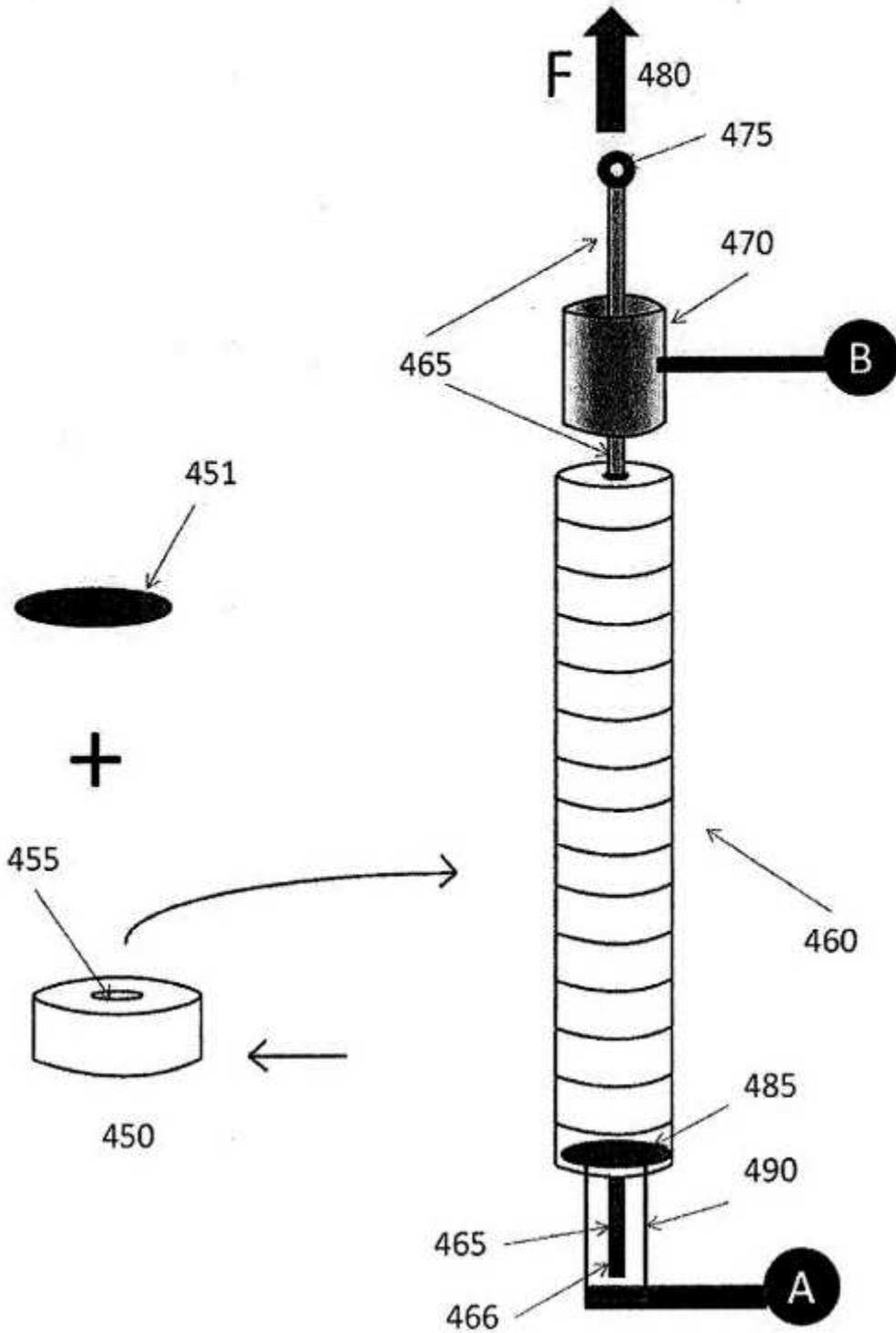


Figura 13

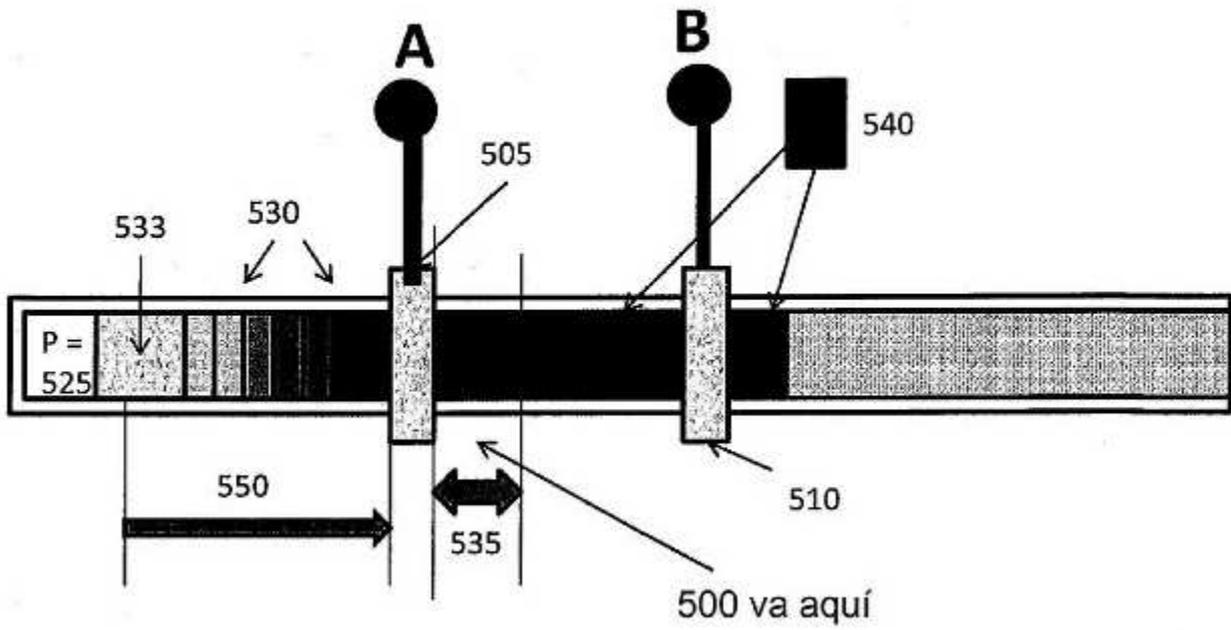


Figura 14

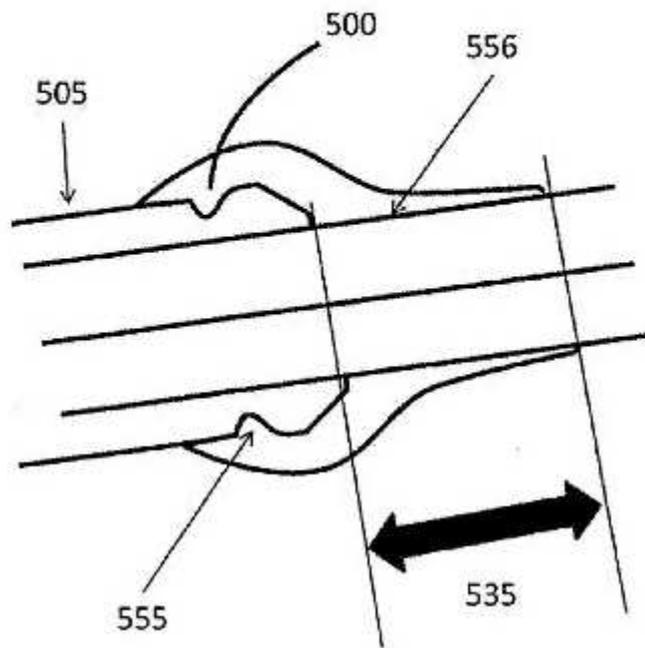


Figura 15

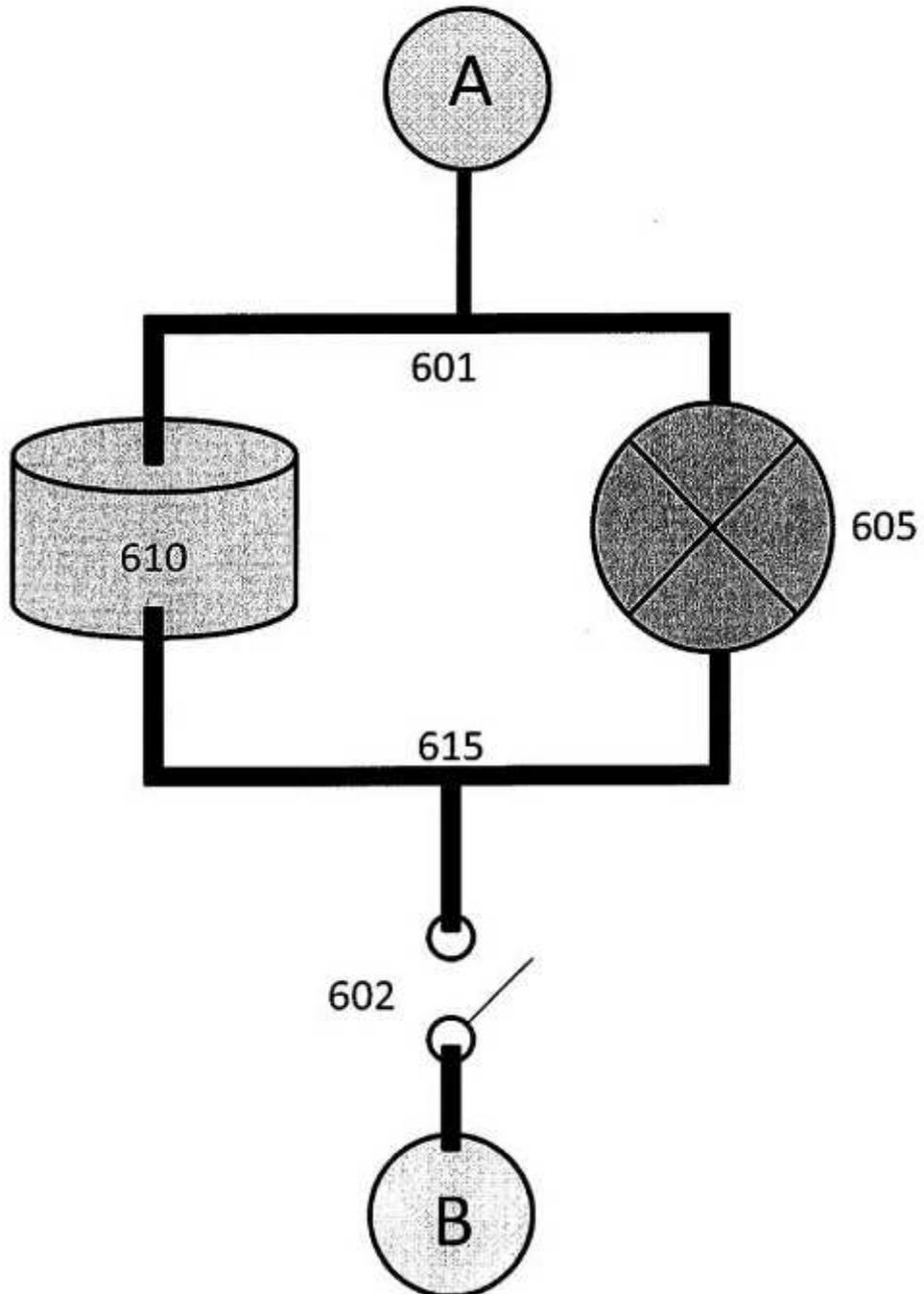


Figura 16

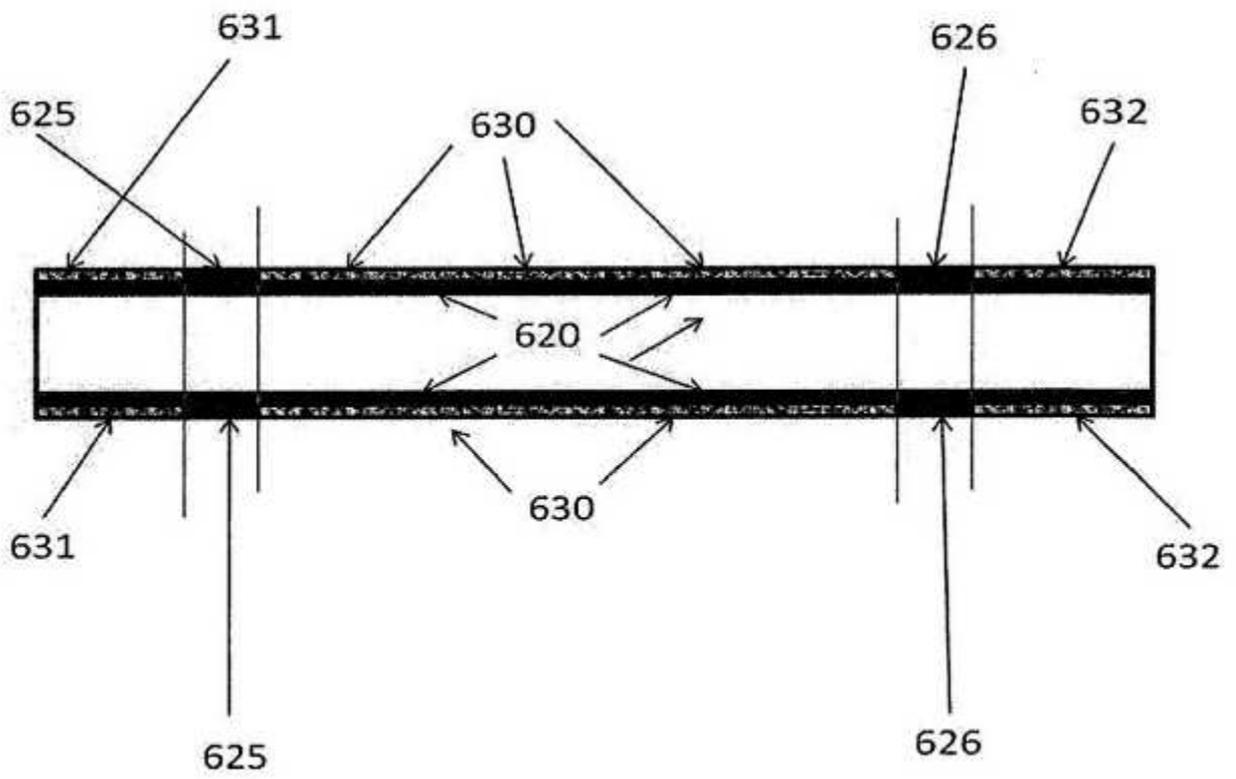


Figura 17

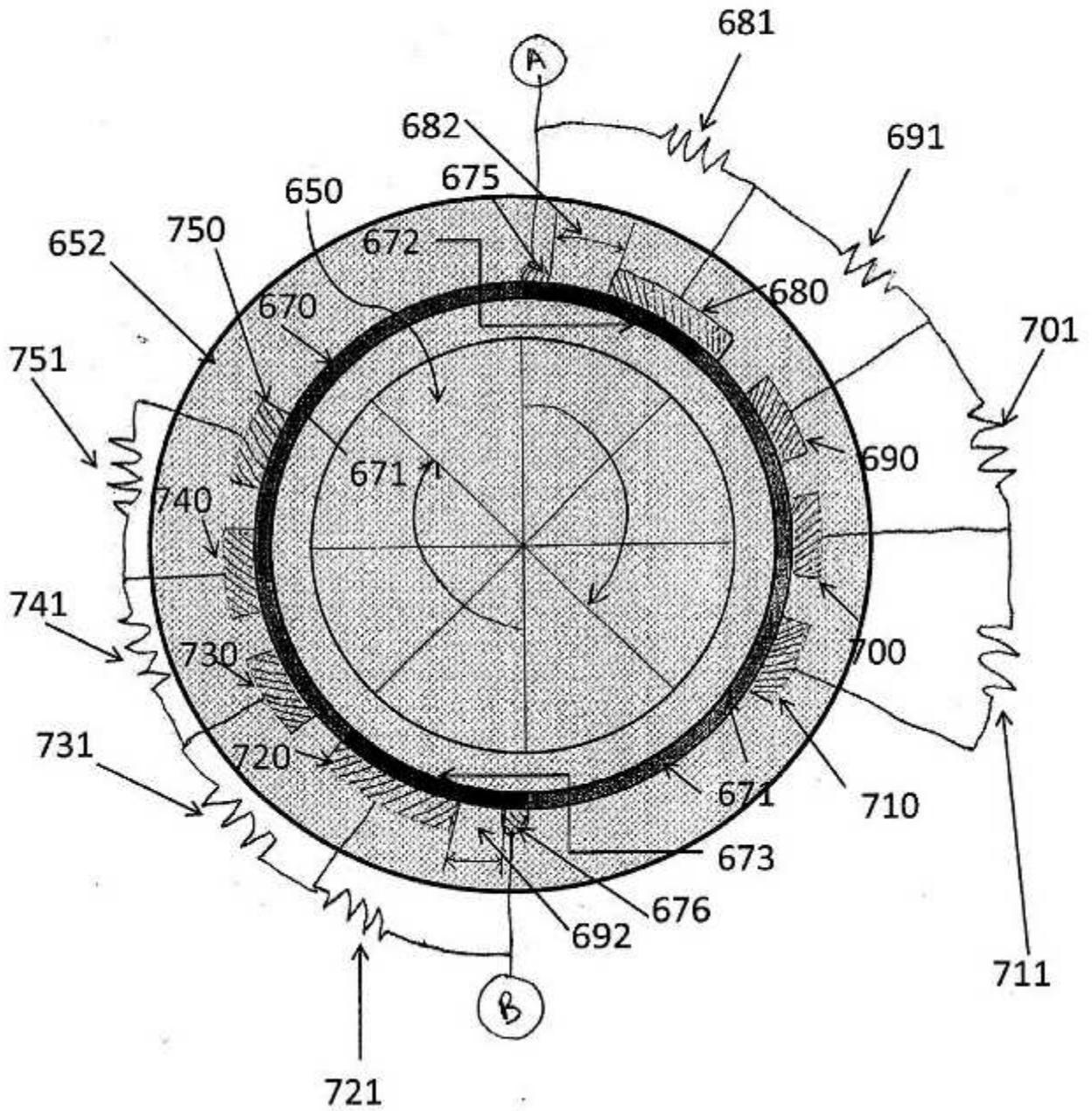


Figura 18

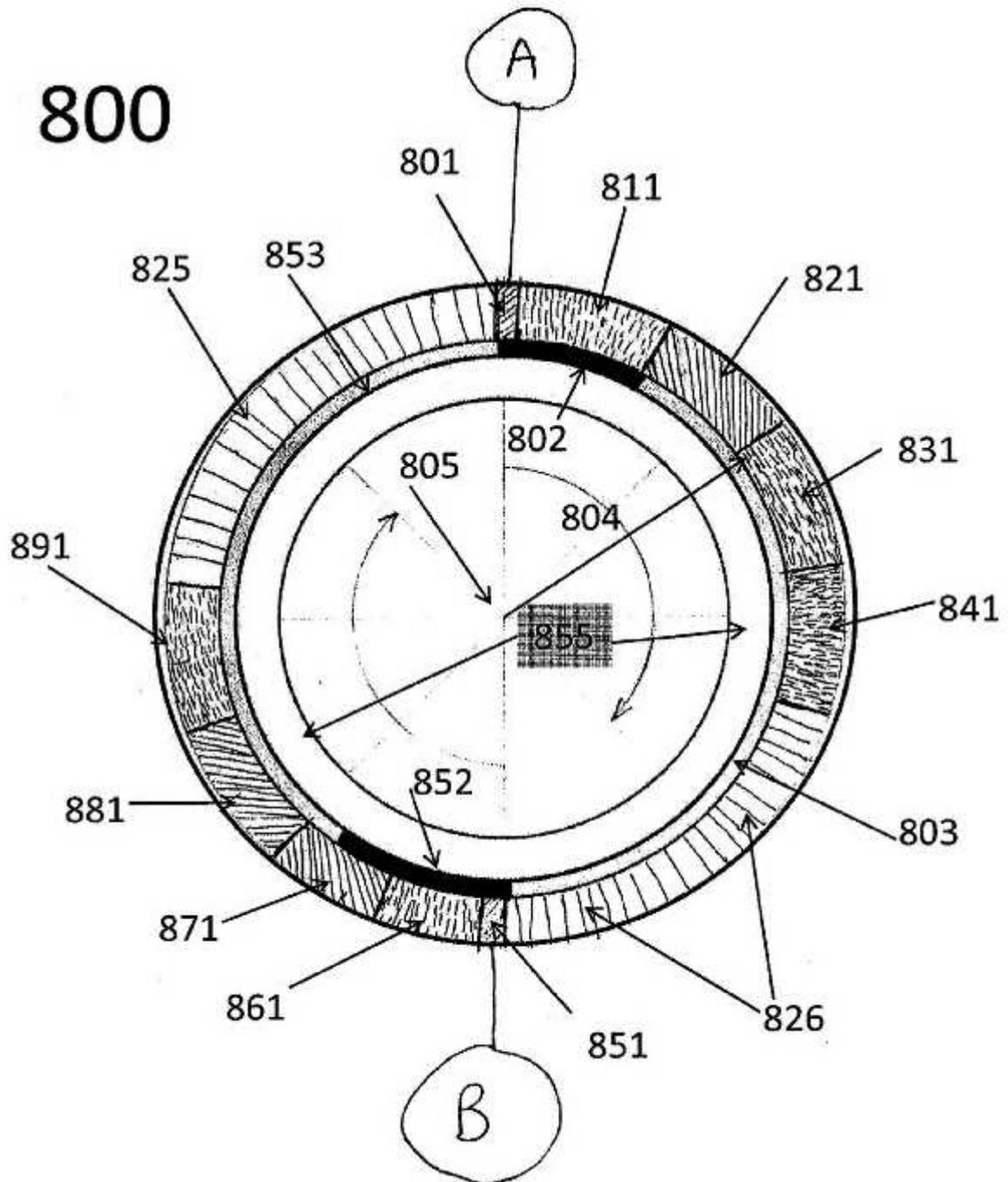


Figura 19

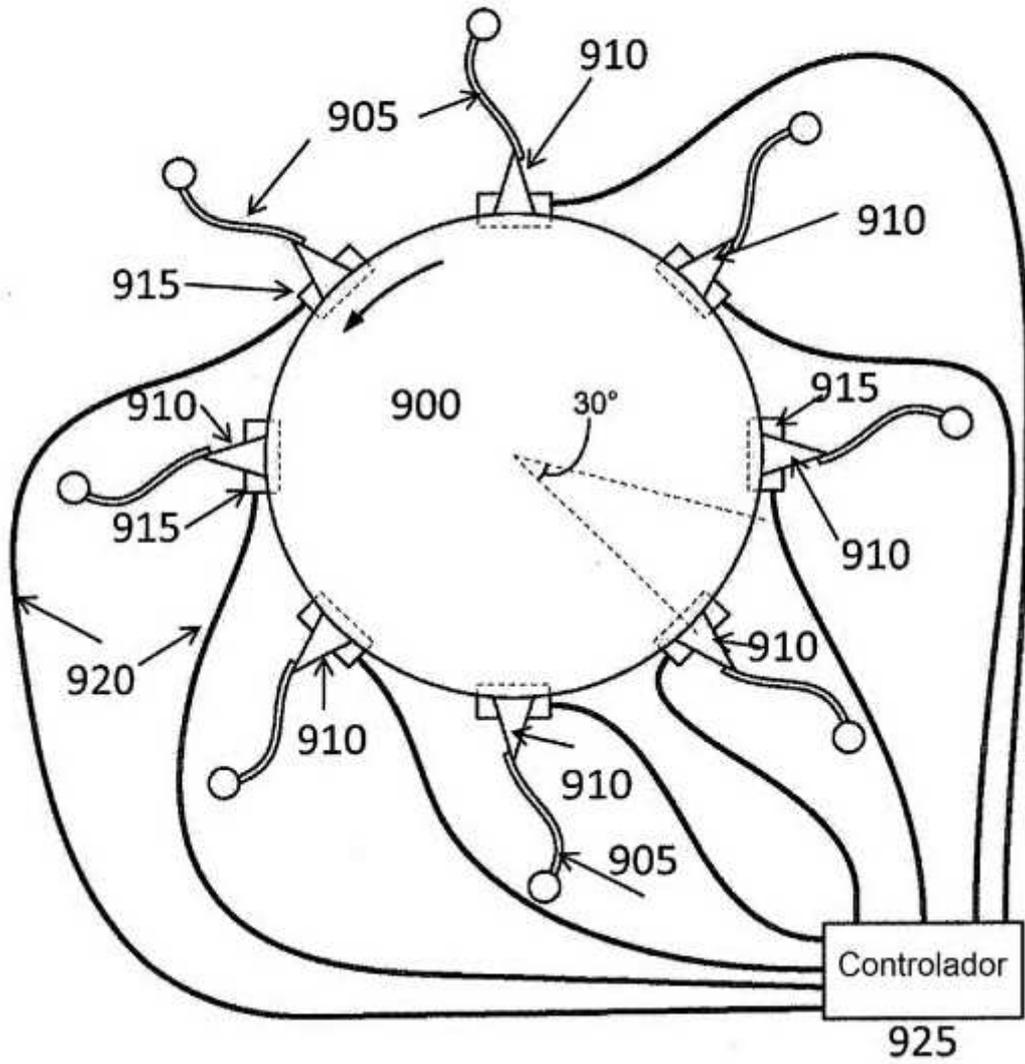


Figura 20

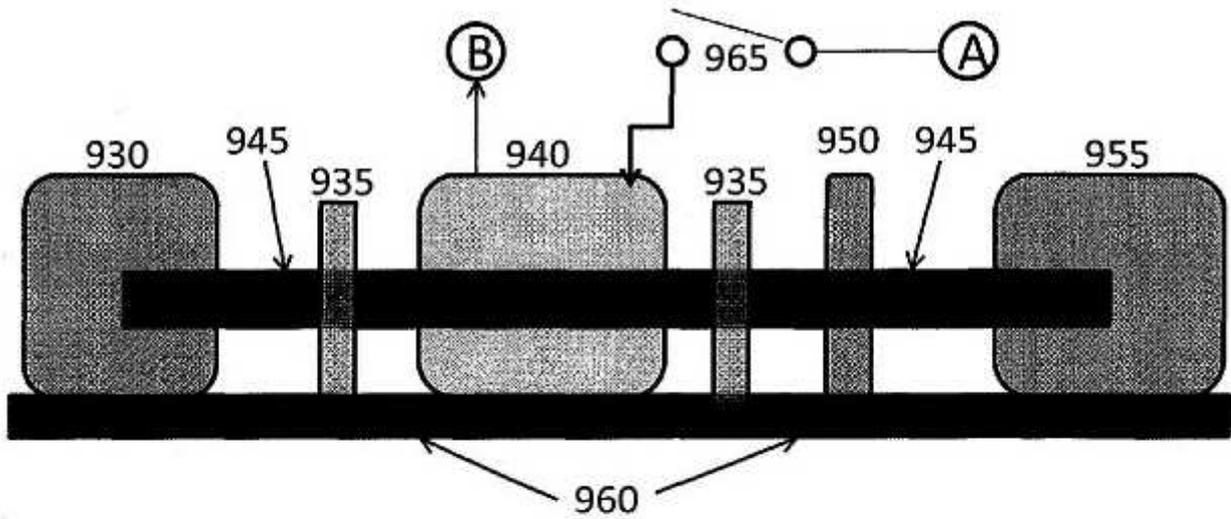


Figura 21

