

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 405 758**

51 Int. Cl.:

H02J 3/18 (2006.01)

H01F 30/16 (2006.01)

H01F 38/14 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.09.2004** **E 04809790 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.02.2013** **EP 1668756**

54 Título: **Impedancias activos en series flotantes distribuidas para sistemas de transmisión de energía**

30 Prioridad:

03.10.2003 US 678966

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

03.06.2013

73 Titular/es:

**SAI ADVANCED POWER SOLUTIONS, INC.
(100.0%)
618 W Lamont Rd.
Elmhurst IL 60126, US**

72 Inventor/es:

**DIVAN, DEEPAKRAJ M.;
SCHNEIDER, ROBERT y
BRUMSICKLE, WILLIAM E.**

74 Agente/Representante:

UNGRÍA LÓPEZ, Javier

ES 2 405 758 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

Impedancias activos en series flotantes distribuidas para sistemas de transmisión de energía

- 5 Esta invención se refiere, en general, al campo de los sistemas de transmisión de energía eléctrica y, en particular, al control del flujo de energía en los sistemas de transmisión de energía.

10 Los sistemas de distribución de energía eléctrica se forman de un complejo sistema interconectado de plantas generadoras, subestaciones, y líneas de transmisión y de distribución. Los grandes sistemas de energía, tales como los de Estados Unidos y Canadá son de gran complejidad y pueden ser vulnerables a eventos interrupción de energía que se propagan a través del sistema. Para satisfacer la creciente demanda de energía eléctrica y para reducir la vulnerabilidad de los sistemas de energía a las perturbaciones, será necesario aumentar sustancialmente la capacidad de transmisión. La construcción de nuevas líneas de transmisión es costosa y requiere mucho tiempo, requiriéndose generalmente varios años para completar la adquisición de terrenos, permisos, y los procesos de construcción.

15 Las líneas transmisión y de distribución son normalmente sistemas pasivos, que utilizan diseños que datan de hace muchos años. Los sistemas de transmisión pasivos existentes, por lo general, no están bien adaptados para controlar el flujo de energía desde un sitio de generación hasta un cliente en particular. Los sistemas existentes se someten también a "flujo de bucle", donde la energía fluye a lo largo de su ruta de menor impedancia y no a lo largo de una ruta de contrato deseada, lo que resulta en la congestión de la línea de transmisión, pérdidas en la transmisión de energía, incapacidad para cumplir con los contratos de suministro de energía, y solicitudes de alivio de la carga de transmisión (TLR) cada vez mayores. Añadir nuevas redes de generación a las de transmisión existentes puede causar también flujos en bucle y problemas de coordinación de la protección contra fallos, con el resultado de la mala utilización tanto de los activos de generación como de los de transmisión.

20 Por otra parte, los sistemas de transmisión de energía CA se someten inherentemente a pérdidas relativamente altas durante la transmisión de energía a través de distancias muy largas - varios cientos a 1.000 millas o más - lo que ha resultado en el uso limitado de líneas de transmisión de energía CC de alta tensión y propuestas para el uso de líneas de superconductores en el futuro. Sin embargo, dichas propuestas alternativas para las líneas de transmisión de CA tienen un sentido práctico incierto y, si es posible en absoluto, requerirían inversiones muy grandes y no estarían en funcionamiento durante varios años.

25 Por lo tanto, en el corto plazo, sería muy deseable ser capaz de mejorar la capacidad de la infraestructura de transmisión de CA existente a un coste razonable. Líneas de transmisión de CA funcionan típicamente muy por debajo de los límites térmicos debido a los límites impuestos por las consideraciones de fiabilidad o de estabilidad, de modo que las líneas existentes podrían transportar potencialmente mucha más energía si no se tuvieran que reducir las limitaciones térmicas.

30 Diversas soluciones técnicas se han propuesto para aumentar la capacidad de los sistemas de transmisión de CA existentes. La mayoría de estas propuestas se refieren a lo que se conoce como "Sistemas de transmisión de CA flexibles" (FACTS). Aunque técnicamente viable, los sistemas FACTS no han sido comercialmente viables hasta la fecha debido a los altos costes de estos sistemas. Estos altos costes se deben a diversos factores, que incluyen altas tasas de energía (20 a 100 MVA), que requieren el uso de dispositivos GTO de gran potencia en diseños personalizados, haciendo que el sistema en general sea costoso de diseñar, construir, poner en servicio y hacerse funcionar. Las tasas de alta tensión (de hasta 345 kV) requieren costosos requisitos de aislamiento y aislantes y los requisitos de coordinación de protección contra fallos crean grandes tensiones en los componentes, resultando nuevamente en el sistema de alto coste. Los sistemas FACTS propuestos han implicado generalmente una única instalación, o más de un puñado de instalaciones, de tamaño relativamente grande (similar a una subestación) que producen un solo punto de fallo crítico, con la escasa fiabilidad y la no disponibilidad potencial resultante. En consecuencia, el enfoque de los FACTS no se ha aplicado en una forma comercial generalizada. El documento US 4.829.295 describe un módulo conectable a una línea de transmisión para detectar parámetros y transmitirlos a una caseta de control a nivel del suelo.

35 De acuerdo con la invención, módulos de impedancia activo flotante se forman para conectarse a líneas de transmisión de energía sin interrumpir las líneas, de tal manera que la línea eléctrica forma uno secundario de un transformador principal del módulo. Cada uno de los módulos de impedancia activo incluye un circuito de conmutación conectado al primario de un transformador monofásico formado para conectarse a una línea de transmisión de energía sin interrumpir la línea. El circuito de conmutación tiene conmutadores controlados por compuertas conectados a un dispositivo de almacenamiento de energía eléctrica, con la conmutación de los conmutadores así controlada como para alcanzar una característica de impedancia no disipada esencialmente deseada en la línea de transmisión. Los módulos activos pueden comprender un condensador de almacenamiento de energía eléctrica, y un convertidor de fase única conectado al condensador para intercambiar energía con el mismo y conectado por sus líneas de salida a al devanado primario del transformador principal. Un controlador conectado al convertidor controla la conmutación del convertidor para proporcionar una transferencia de energía instantánea seleccionado entre el devanado primario del transformador principal y el dispositivo de almacenamiento

de energía eléctrica para proporcionar una impedancia seleccionada acoplado a la línea de transmisión a través del devanado primario del transformador principal. La impedancia efectiva que se inyecta en la línea de transmisión en el transformador es esencialmente no disipativa y puede ser una inductancia positiva, una inductancia negativa o una capacitancia, alcanzada a través de la inyección de una tensión en o cerca de un ángulo de fase en cuadratura con la corriente lineal. El módulo activo se aísla preferentemente eléctricamente de la tierra y de otras líneas de fase del sistema de transmisión. Por lo tanto, el convertidor flota en la tensión lineal y no necesita una referencia potencial.

En funcionamiento, el módulo de impedancia activo de la invención puede derivar inicialmente energía de control utilizando un transformador de corriente hasta que la operación del convertidor se inicie. Con el funcionamiento del convertidor, la energía de control se puede extraer del bus CC del convertidor. Debido a que el controlador se aísla de la tierra y de otras líneas de transmisión, el aislamiento de alta tensión no es necesario para el controlador, incluso para su uso con líneas de transmisión de muy alta tensión. Debido a que el módulo se aísla eléctricamente, la energía neta promedio de entrada y salida del módulo es igual a cero (aparte de las pérdidas en el circuito y en el transformador). El módulo es capaz de funcionar en varios modos: una impedancia reactiva (inductancia o capacitancia positiva); una impedancia activa (una inductancia o capacitancia negativa), o una fuente de tensión que es ortogonal a la corriente en la línea de transmisión. De acuerdo con la invención, múltiples módulos se pueden instalar en ubicaciones distribuidas en un sistema de transmisión para permitir el flujo de energía a través del sistema de transmisión que tiene que controlarse. El funcionamiento de los módulos individuales se puede controlar y coordinar utilizando un enlace de comunicaciones aislado tal como un receptor de radio (y, preferentemente, un transmisor) incorporado en cada módulo, o mediante el uso de otros sistemas de comunicaciones disponibles en el mercado, tales como las comunicaciones por líneas eléctricas. Además, para las condiciones transitorias o de fallo que requieren una respuesta rápida, o en caso de fallo del canal de comunicaciones, el módulo puede funcionar autónomamente con una estrategia de control que favorece las operaciones globales del sistema, tales como proporcionar impedancia inductiva eficaz en la línea de transmisión durante las condiciones de fallos para limitar la corriente de fallo o producir una impedancia arbitraria que sea dependiente de la magnitud de la corriente en la línea.

Como un ejemplo del funcionamiento de los módulos de impedancia activos de la invención, bajo las condiciones normales del sistema, los módulos se pueden controlar para inyectar una inductancia negativa en la línea para compensar la impedancia en la línea, con lo que se aumenta la capacidad de producción de energía de la línea de modo que la línea de transmisión puede funcionar más cerca de sus límites térmicos. Esta inyección de impedancia activa es preferible a las soluciones convencionales, tales como la compensación de condensadores en serie, dado que la instalación del módulo de impedancia no requiera interrumpir o, de otro modo, cambiar físicamente la línea de transmisión, y se pueden evitar los problemas de estabilidad del sistema que pueden conducir a una resonancia subsíncrona cuando se utiliza la compensación de condensadores en serie. La inyección de inductancia positiva o negativa se puede utilizar para ayudar a dirigir las corrientes en direcciones en los puntos de interconexión de varios conjuntos de líneas de transmisión, o dentro de una red mallada. Cuando se controla un módulo para inyectar una inductancia positiva en una línea de transmisión, la corriente se "empujada" eficazmente de la línea a otras partes de la red de transmisión. Cuando el módulo se controla para inyectar una inductancia negativa, la corriente se "tira" eficazmente desde otras partes de la red. Tras la detección de un fallo en la línea de transmisión (caracterizado por un fuerte aumento de corriente a niveles de corriente de fallos), el módulo se puede hacer funcionar para inyectar automáticamente una inductancia positiva en la línea para ayudar a limitar las corrientes de fallo.

La invención se puede implementar para controlar los flujos de bucle, reduciendo de este modo la congestión en las líneas existentes para que pueda transmitir eficazmente más energía. El control apropiado de los módulos se puede utilizar para guiar la corriente a lo largo de una ruta preferente a través de la red de transmisión. Además de la eficiencia de optimización de la red de transporte, la invención se puede utilizar para equilibrar las corrientes de fase y para inyectar tensión armónica para ayudar a bloquear los flujos de corrientes armónicas.

La presente invención se puede utilizar a un coste sustancialmente menor que los sistemas FACTS convencionales debido a la eliminación de la necesidad de aislamiento de alta tensión y debido a la instalación y puesta en marcha de módulos relativamente simples. La utilización de un gran número de módulos estandarizados permite el uso de técnicas de fabricación en masa y que se reduzca el coste de producción de los módulos individuales. Se puede lograr una fiabilidad muy alta debido a que un gran número de los módulos de impedancia activos (sobre los cientos o más) se pueden utilizar, de modo que el fallo de uno o de unos pocos módulos tendrá un efecto mínimo sobre el sistema en su conjunto, y se puede compensar por el control adecuado de los módulos restantes. Por el contrario, cuando "N" módulos están en posición, "M" módulos adicionales se pueden desplegar para lograr un nivel de fiabilidad $N + M$ deseado. El uso de los módulos activos, de acuerdo con la invención permite un aumento en la capacidad de la línea en el estado estable al tiempo que permite el control del flujo de energía y el control de las corrientes de fallo. Debido a que los módulos se pueden instalar fácilmente sin tener que alterar físicamente líneas eléctricas existentes, y se pueden instalar eficazmente de forma incremental, el despliegue de los módulos activos se puede realizar con poco o ningún riesgo para el sistema de transmisión de energía, permitiendo el juicio y validación del sistema a bajo coste y bajo riesgo. Estas características permiten también que el número de unidades desplegadas aumente como lo permita la economía. Además, los módulos individuales son portátiles y se pueden desacoplar de una línea de transmisión, y volver a instalarse en otra ubicación más ventajosa, si se desea.

Otros objetos, características y ventajas de la invención serán evidentes a partir de la siguiente descripción detallada tomada junto con los dibujos adjuntos.

En los dibujos:

5 La Figura 1 es una vista en perspectiva de un conjunto típico de líneas de transmisión trifásicas que ilustra la instalación de los módulos de impedancia activos de acuerdo con la invención.

La Figura 2 es una vista aislada de uno de los módulos instalado en una línea de transmisión.

10 La Figura 3 es una vista en perspectiva de un módulo de impedancia activo ejemplar de la invención.

La Figura 4 es una vista de extremo del módulo de impedancia activo de la Figura 3.

15 La Figura 5 es una vista en perspectiva del módulo de impedancia activo de la Figura 3 que se muestra con el módulo en su posición abierta, lo que permite que el devanado primario del transformador del módulo se sujete sobre una línea de transmisión.

20 La Figura 6 es un diagrama esquemático de un sistema de transmisión de energía con una impedancia activa de acuerdo con la invención.

La Figura 7 es una vista ilustrativa de un núcleo primario del transformador dividido que se puede utilizar en el módulo de la Figura 3.

25 La Figura 8 es un diagrama de bloques funcionales de un ejemplo de un sistema de módulos de impedancia activos de acuerdo con la invención.

La Figura 9 es un diagrama esquemático de un ejemplo de un convertidor y controlador que se pueden utilizar en el módulo de impedancia activo de la invención.

30 La Figura 10 es un diagrama esquemático funcional de otro ejemplo de un módulo de impedancia activo de acuerdo con la invención.

35 Con referencia a los dibujos, la Figura 1 ilustra un conjunto 20 de líneas de transmisión de energía compuesto por tres líneas conductoras 21 soportadas de manera convencional por miembros aislantes 23 en torres de soporte que se muestran ilustrativamente en 25. Las líneas de transmisión individuales 21 pueden conducir corriente para cada fase de un sistema de transmisión de energía trifásico de manera convencional, y puede funcionar a altas tensiones típicas de los sistemas de transmisión de largas distancia, por ejemplo, de 138 kV a 750 kV. De acuerdo con la presente invención, un módulo de impedancia activo 30 se conecta a cada una de las líneas de transmisión 21
40 preferentemente, pero no necesariamente, cerca de los miembros aislantes 23 que soportan las líneas eléctricas 21. Como se describe más adelante, los módulos activos 30 se forman para conectarse a una línea de transmisión de energía sin requerir ninguna modificación física o interrupción en la línea eléctrica. Como se ilustra en las Figuras 1 y 2, los módulos de impedancia 30 se soportan preferentemente únicamente por las líneas eléctricas 21 y no se conectan físicamente, ni se conectan eléctricamente, a tierra ni a otras líneas eléctricas. Por lo tanto, los módulos 30 se aíslan totalmente eléctricamente y flotan eficazmente a la tensión de la línea eléctrica 21 a la que se conectan.
45 Como alternativa, si se desea, los módulos 30 se pueden soportar por los miembros aislantes 23 y pueden servir de apoyo a las líneas eléctricas en las torres de apoyo 25.

50 Una construcción mecánica ejemplar para los módulos de impedancia activos 30 se muestra en las Figuras 3-5. El módulo ejemplar 30 de las Figuras 3-5 tiene un alojamiento exterior 31 con aberturas 32 en cada extremo de la carcasa a través de la que se hace pasar una línea de transmisión 21 (no mostrado en las Figuras 3-5). Una porción 34 de la carcasa rodea y contiene un devanado primario 35 del transformador principal (descrito más adelante) mientras que otra porción 37 de la carcasa encierra la electrónica de energía y otros componentes del sistema, como se describe más adelante. Los módulos pueden incluir también aletas 40 del disipador de calor para disipar el calor de los componentes electrónicos dentro de la carcasa y una antena 41 para recibir señales de radio que permiten el control del funcionamiento del módulo 30 y, si se desea, la transmisión de datos sobre el estado del módulo y de la línea eléctrica a la que se conecta. Los componentes electrónicos dentro de la carcasa 31 se protegen preferentemente de los altos campos eléctricos de las líneas de energía (por ejemplo, con un escudo Faraday que rodea a la electrónica en la carcasa).

60 Una construcción ejemplar del módulo de impedancia activo 30 para permitir su conexión a una línea eléctrica 21 sin perturbar físicamente la línea se muestra en la Figura 5. Como se ilustra en la misma, la carcasa 31 se forma en dos mitades 31a y 31b que pueden conectarse para pivotar alrededor de una bisagra 44 en la parte inferior de la carcasa 31. El devanado primario 35 del transformador principal se enrolla en un núcleo 36 de material magnético adecuado (por ejemplo, hierro dulce o acero laminado) formado por dos mitades 36a y 36b, con cada mitad del núcleo del transformador primario teniendo preferentemente una ranura semicilíndrica 46 formada en su interior, que se
65

extiende entre las dos aberturas de extremo 32 de la carcasa y que está dimensionada y formada para encajar en la línea eléctrica 21 a la que se tiene que conectar el módulo. Otras geometrías se pueden utilizar para que el núcleo acomode la línea eléctrica dentro del núcleo. Se puede utilizar módulos separados para cada alambre de las líneas de fase multicables, o se puede formar un solo módulo para acoplarse a cada uno de los alambres en la fase.

5 Aislamiento o material de relleno se puede utilizar para cubrir el núcleo 36 y los alambres del devanado 35 dentro de la ranura 46 para separar los alambres del contacto con la línea eléctrica 21. Para instalar el módulo como se muestra en la Figura 5 en una línea eléctrica 21, el módulo en su posición abierta se eleva hasta la posición de la línea eléctrica 21, y las dos mitades 31a y 31 b de la carcasa se cierran juntas para acoplar las dos mitades 36a y 36b del núcleo del primario del transformador entre sí, de modo que la línea eléctrica se ajusta dentro de la abertura
10 definida por las ranuras 46. De acuerdo con la invención, la línea eléctrica 21 se rodea por el devanado primario 35 y el núcleo 36, y forma el devanado secundario del transformador principal. El módulo 30 se puede bloquear en su posición cerrada acoplado sobre la línea eléctrica 21 que utiliza un bloqueo de acoplamiento a presión, una banda, un tornillo de bloqueo, o cualquier otra estructura para sujetar firmemente las dos mitades del módulo entre sí y en acoplamiento con la línea eléctrica 21. Por ejemplo solamente, como se muestra en la Figura 5, la carcasa 31 puede
15 incluir collares 47 divididos en cada extremo de la carcasa que se sujeten a la línea eléctrica cuando la carcasa está cerrada, y bridas de acoplamiento 48 en la parte superior de cada mitad de alojamiento 31a y 31b que pueden fijarse entre sí con tornillos.

20 En la presente invención, los módulos de impedancia activos 30 se montan preferentemente en muchas posiciones distribuidas sobre un conjunto de líneas de transmisión de energía, para proporcionar un gran número de impedancias activas distribuidas que se pueden controlar para cambiar la impedancia efectiva de las líneas de transmisión energía para diversos fines. Para los sistemas de transmisión de energía que tienen varios conjuntos de líneas que se extienden sobre cientos de millas, varios cientos o miles de los módulos 30 se pueden montar en las posiciones apropiadas en las líneas de transmisión. Como se ilustra en la Figura 6, cada uno de los módulos 30 se
25 comunica con un controlador de sistema central 50 a través de, por ejemplo, un enlace de radiofrecuencia entre la antena 41 de los módulos de impedancia y una antena 51 del sistema controlador 50. El enlace de radiofrecuencia puede ser, por ejemplo, un sistema convencional de telefonía celular, tales como CDMA (acceso múltiple por división de código) o una red inalámbrica patentada. Otras comunicaciones tecnología de enlace, tales como las comunicaciones de línea eléctrica, se pueden utilizar también, aunque se prefiere que no haya conexión física entre los módulos individuales o entre los módulos 30 y el sistema de control 50. El sistema de control 50 se puede
30 implementar con un control central que proporciona comandos a un controlador regional que es responsable de controlar una red local. El estado del sistema de energía se puede controlar y evaluar con el tiempo, por ejemplo, utilizando monitores distribuidos tales como los utilizados en el I-Grid[®] System proporcionado por Soft Switching Technologies, Inc. de Middleton, Wisconsin. Como se ilustra en la Figura 6, el sistema de transmisión de energía puede incluir múltiples conjuntos de líneas eléctricas como se ilustra esquemáticamente en 55, 56 y 57 (cada uno de los cuales comprende un conjunto de líneas de transmisión de corriente trifásica y el soporte asociado, etc.), agrupándose los conjuntos de líneas eléctricas 55, 56 y 57 en una intersección 59. Por ejemplo, la energía se puede
35 generar en una planta de generación distante y proporcionada en el conjunto de líneas eléctricas 55 y se transmite después a los consumidores a través de los conjuntos de líneas eléctricas 56 y 57. Mediante el control adecuado de los módulos de impedancia activos 30, el flujo de energía de las líneas 55 a las líneas 56 y 57 se puede controlar a
40 para desviar parcialmente la energía de uno de los conjuntos de líneas 56 o 57 al otro conjunto de líneas.

Una realización ilustrativa del devanado primario 35 del transformador principal y del núcleo 36 se ilustra en la Figura 7. Los alambres del devanado 35 enrollado en las dos mitades 36a y 36b del núcleo se conectan entre las líneas conductoras 60 y 61, con un alambre conductor 62 conectando las porciones del devanado 35 que se enrollan en las
45 dos mitades 36a y 36b del núcleo del transformador. Cuando las dos mitades 36a y 36b del núcleo se acoplan entre sí, el devanado 35 conforma un devanado de forma toroidal, que se extiende alrededor de la abertura cilíndrica formada por las dos ranuras 46 semi-cilíndricas a través de las que se hace pasar la línea eléctrica 21. El devanado 35 tiene múltiples vueltas de alambre conductor que se puede enrollar alrededor del núcleo 36, con cada vuelta teniendo las secciones longitudinales 64 del alambre conductor que se extiende longitudinalmente en una dirección
50 paralela a la longitud de la línea eléctrica 21, y conectando las secciones extremas 65 de los hilos conductores las secciones longitudinales de los devanados, formando eficazmente un transformador de devanado coaxial en el que la línea de transmisión forma el secundaria. Se pueden utilizar diversas proporciones de vueltas entre el devanado primario 35 y la línea de transmisión de una sola vuelta secundaria, siendo un ejemplo 50:1, pero se puede utilizar cualquier proporción de vueltas. Cada una de las mitades de núcleo 36a y 36b se puede formar como una sola
55 unidad, o las dos mitades se pueden formar de varios segmentos de núcleo individuales 67. Otras configuraciones de bobinado se pueden utilizar también, incluyendo un toroide que tiene una única región dividida que puede ampliarse para permitir que la bobina toroidal se ajuste sobre un alambre, o una bobina toroidal total que se puede colgar en una línea de transmisión, donde el acceso a un extremo de la línea de transmisión está disponible.

60 Un diagrama de bloques que ilustra los componentes funcionales eléctricos y electrónicos de una realización del módulo activo 30 se muestra en la Figura 8. El devanado primario 35 del transformador principal se conecta por las líneas 70 a un circuito de conmutación configurado como un convertidor 71 que es en sí mismo conectado por las líneas 72 a un dispositivo de almacenamiento de energía 74. El convertidor 71 recibe señales de control desde un controlador 76 en las líneas 77. El controlador 76 controla la conmutación de los dispositivos de conmutación en el
65 convertidor 71 para proporcionar una tensión a través del transformador primario 35 que está en una fase y

frecuencia seleccionada para acoplarse a la línea de transmisión de energía 21 como una impedancia aparente de un valor seleccionado. El controlador recibe la tensión a través del transformador 35 de las líneas 79 y recibe una señal por la línea 80 procedente de un sensor de corriente 81 que se puede conectar a la línea de transmisión 21 o al devanado del transformador principal para detectar la *corriente que fluye a través de la línea de transmisión*. Un devanado auxiliar del *transformador de corriente* 83 se puede acoplar a la línea 21 (por separado o en el devanado del transformador principal) para recibir la misma energía, que se transmite a través de las líneas 84 al controlador 76 para proporcionar la puesta en marcha inicial de energía al controlador, después de lo que el controlador puede recibir la energía del dispositivo de almacenamiento de energía 74 a través de las líneas 86 para proporcionar energía de control. Las líneas 86 proporcionan también retroalimentación al controlador 76 del estado del dispositivo de almacenamiento de energía 74 de tal manera que el controlador puede controlar la conmutación del convertidor 71 para mantener una tensión o corriente regulada en el dispositivo de almacenamiento de energía. Un receptor de radio/transmisor 88 se conecta a la antena 41 y proporciona señales de control en las líneas de señal 90 al controlador 76. El controlador 76 puede proporcionar también señales al receptor/transmisor 88 que representa, por ejemplo, el estado del módulo 30 y las condiciones en la línea eléctrica 21, tales como la magnitud y la frecuencia de corriente detectada por el sensor de corriente 81. Un conmutador de derivación 92 se conecta entre las líneas 70 para interrumpir el circuito del transformador primario 35 cuando el módulo 30 no está funcionando a fin de proporcionar una impedancia mínima acoplada a la línea de transmisión 21 cuando el módulo está inactivo.

La Figura 9 es un diagrama de circuito esquemático que ilustra una implementación del convertidor y del controlador de la Figura 8. Se entiende que esta es una implementación ejemplar del convertidor y del controlador y que cualquier otra implementación se puede utilizar en una forma de acuerdo con la invención. Como se muestra en la Figura 9, el convertidor 71 es un convertidor de fase única formado en una configuración de puente en H de los dispositivos de conmutación 94 controlables por compuertas que, como se muestra en la Figura 9, pueden comprender transistores bipolares de compuerta aislada (IGBT), con un diodo anti-paralelo 95 conectado a través de cada uno de los IGBT 94. El puente de conmutadores 94 se conecta a través de las líneas 72, que en esta configuración comprenden líneas de bus CC que se conectan a un condensador de almacenamiento de energía 74 como el dispositivo de almacenamiento de energía. Los dispositivos de conmutación 94 se conectan para transferir la energía de las líneas del bus CC 72 y para transferir la energía CA en las líneas de salida del convertidor 70. Un filtro de salida compuesto de un inductor en serie 96 y un condensador en paralelo 97 se puede conectar a las líneas de salida 70 para filtrar la corriente de salida proporcionada al devanado del transformador 35. El controlador 76 proporciona las señales de conmutación del control por compuerta para los dispositivos de conmutación 94 en las líneas 77. Como se muestra en la Figura 9, el controlador 76 recibe una señal de tensión que es proporcional a la corriente de línea en la línea 80 procedente del sensor 81, y señal que se hace pasar a través de un filtro de segundo orden formado de un amplificador operacional 100 con resistencias y condensadores asociados. Aunque no se muestra, el transformador de corriente (sensor) 81 se puede terminar en un par de series de resistencias de carga para proporcionar tanto una señal positiva como invertida proporcional a la corriente de línea. El filtro de segundo orden se utiliza para eliminar de las altas frecuencias de la señal y el ruido que se encuentran fuera del rango de control deseado del sistema. La señal de salida del filtro se alimenta en una línea 101 a un circuito diferenciador formado con un amplificador 103 y condensadores y resistencias asociados. El circuito diferenciador

proporciona una señal de referencia en una línea 105 que imita la tensión inductor $\left(L \frac{di}{dt} \right)$. La señal de referencia

se alimenta a un multiplicador 107, que también recibe una tensión o comando magnitud de la impedancia en una línea 108 de un circuito de comando de referencia 109 que se puede proporcionar a través del receptor/transmisor 88. El punto de referencia se puede proporcionar a través del enlace de RF al receptor 88 o se puede programar de forma autónoma como una función de los parámetros locales. La salida del multiplicador 107 se proporciona en una línea 110 a un sumador 112, que también recibe la señal de retroalimentación de tensión primaria del transformador principal en una línea 114 proporcionada por un devanado terciario 115 a través de un amplificador de aislamiento 116. La realimentación del devanado terciario 115 acoplado a la línea de transmisión 21 se utiliza para cerrar el bucle de tensión de salida. El controlador utiliza un esquema de control de proporcional-integral (PI) con una amortiguación del filtro de salida activo para regular la tensión producida por el convertidor de puente en H 71. La salida del sumador 112 (error de tensión) se proporciona al controlador PI 117, cuya salida se proporciona a un sumador 118. El sumador 118 recibe también una señal proporcional en una línea 119 a partir de un sensor de corriente 120 conectado en serie con el condensador de filtro de salida 97 para cerrar el bucle de amortiguación. La salida del sumador 118 (el comando modulador de tensión) se proporciona a un comparador 121 que recibe también una señal portadora (por ejemplo, a 12 kHz) de un generador de onda triangular 123 para proporcionar una señal de salida modulada en anchura de impulso a las líneas de control 77 para cambiar los dispositivos de conmutación 94. Para proporcionar la regulación de tensión del bus DC, la tensión a través de las líneas del bus CC 72 se proporciona a un amplificador de aislamiento 125, cuya salida se suministra como la salida negativa a un sumador 127 que recibe como una entrada positiva de una tensión de referencia CC V_{DCRef} . La salida del sumador 127 correspondiente al error del bus CC, se proporciona a un controlador proporcional-integral 128 que suministra su salida a un multiplicador 130. El multiplicador 130 recibe también la salida de un generador de onda sinusoidal sincrónica 131. El generador de onda sinusoidal 131 recibe la señal de salida filtrada 101 procedente del amplificador 100 para proporcionar una referencia de onda sinusoidal fija sincronizada con la componente de 60 Hz de la línea de transmisión actual. La salida del multiplicador 130 corresponde a la componente "real" del comando de tensión del

convertidor de tal manera la energía puede ser absorbida desde la corriente en la línea para mantener la tensión del bus CC constante, es decir, para transferir energía desde la línea eléctrica para cubrir las pérdidas en el convertidor, en el transformador y la electrónica de control. Esta señal de salida se suministra a otra entrada del sumador 118.

5 Un módulo de impedancia activo 30 de la presente invención se puede implementar también, si se desea, para proporcionar un funcionamiento simplificado con una elección más limitada de impedancia que puede ser proporcionada a la línea eléctrica a través del módulo. Un ejemplo de los componentes funcionales eléctricos y electrónicos, de tal módulo se muestra en la Figura 10. El primario del transformador 35 se acopla a la línea eléctrica 21 (como el secundario, por ejemplo, como se ha descrito anteriormente), y las líneas 60 y 61 del primario 35 se conectan a un circuito de conmutación 140 compuesto de un conmutador en serie bidireccional 141 y un conmutador paralelo bidireccional 143. Los conmutadores 141 y 143 se pueden formar, por ejemplo, de los IGBT espalda con espalda, cada uno con diodos anti-paralelo, como se muestra en la Figura 10, o con cualquier otra aplicación adecuada. Un inductor 145 de impedancia Z_L se conecta a través del conmutador en paralelo 143 y funciona como un dispositivo de almacenamiento de energía eléctrica. Un condensador de filtro de salida 147 se puede conectar a través de las líneas del transformador 60 y 61. Un controlador 148 se conecta a las compuertas de los IGBT en los conmutadores 141 y 143, y que se puede conectar para recibir una señal procedente de un sensor de línea de transmisión de corriente 81 y para recibir la tensión a través de las líneas 60 y 61 del devanado primario. Un transformador de corriente 83 se puede conectar al controlador para proporcionar energía al mismo, como se ha descrito anteriormente, y un transformador de corriente 150 se puede conectar por las líneas 1 a 51 del controlador para permitir el monitoreo de la corriente a través del inductor 145. El controlador proporciona señales para activar y desactivar los conmutadores 141 y 143 alternativamente, de modo que cuando el conmutador en serie 141 se activa (conductor) el conmutador paralelo 143 está desactivado (no conductor) y viceversa. Por lo tanto, si el ciclo de trabajo (proporción de tiempo con respecto a un ciclo completo) del conmutador 141 es d , el ciclo de trabajo del conmutador en paralelo 143 es $(1-d)$. El controlador se puede implementar como un generador de impulsos de ciclo de trabajo de impulsos d , con la señal de salida de impulsos proporcionada directamente al conmutador en serie 141 y a través de un amplificador de inversión al conmutador en paralelo 143. La impedancia efectiva inyectada en la

línea 21 es, por tanto, $Z_{eq} = \frac{Z_L}{d}$, tal como se refleja a través de la relación de vueltas del primario del

transformador 35. El controlador 148 puede, por tanto, controlar el ciclo de trabajo para controlar la inductancia efectiva inyecta en la línea eléctrica 21, ya sea en respuesta a los comandos a través de un enlace de comunicaciones desde un control central como se ha descrito anteriormente, o en respuesta a la corriente en la línea 21 como se detecta por el sensor de corriente 81 (por ejemplo, para inyectar inductancia máxima durante una condición de fallo). Otras reactancias se pueden utilizar como el dispositivo de almacenamiento de energía si se desea. Un conmutador de derivación 154 se puede conectar a través del primario 35 para minimizar la impedancia que se aplica a la línea eléctrica 21 cuando el módulo está desactivado.

35 Se entiende que la invención no se limita a las realizaciones particulares expuestas en este documento de forma ilustrativa, sino que abarca todas las formas de las mismas que estén dentro del alcance de las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un módulo activo (30) para su conexión a una línea de transmisión de energía (21) de un sistema de transmisión que comprende:

5 (a) un primario del transformador principal de una sola fase (35) formado para conectarse a una línea de transmisión de energía (21) sin interrumpir la línea, de tal manera que la línea eléctrica forma el secundario del transformador principal;

(b) un dispositivo de almacenamiento de energía eléctrica (74);

10 (c) un circuito de conmutación (140) formado por dispositivos de conmutación (94) controlados por compuertas conectados al dispositivo de almacenamiento de energía eléctrica (74) para intercambiar energía con el mismo y que tiene líneas de salida conectadas al primario del transformador principal (35),

caracterizado por

15 (s) un controlador (76) conectado a los dispositivos de conmutación en el circuito de conmutación (140) para controlar la conmutación de los dispositivos de conmutación para la transferencia de energía entre el primario del transformador principal (35) y el dispositivo de almacenamiento de energía eléctrica (74) para proporcionar una impedancia seleccionada inyectada en la línea de transmisión acoplada a través del primario del transformador principal (35), estando el módulo eléctricamente aislado de la tierra y de otras líneas de fase del sistema de transmisión; y

20 (e) un conmutador de derivación (92) configurado para cortocircuitar el primario del transformador principal (35) cuando el módulo activo (30) no está en funcionamiento.

2. El módulo activo (30) de la reivindicación 1, donde el primario del transformador principal (35) tiene un devanado que comprende múltiples vueltas de alambre enrollado en una forma toroidal con secciones del alambre que se extienden en una dirección longitudinal paralela a la línea de transmisión cuando el primario del transformador devanado (35) está montado en la línea de transmisión (21).

25

3. El módulo activo (30) de la reivindicación 1, donde el circuito de conmutación (140) y el controlador (76) están contenidos en una carcasa (31) conectada con el devanado primario del transformador principal de modo que todos los componentes del módulo activo (30) están soportados por la línea de transmisión (21) en la que el devanado primario del transformador está montado, mientras están eléctricamente aislados de la tierra y de las líneas de transmisión adyacentes.

30

4. El módulo activo (30) de la reivindicación 1, donde el circuito de conmutación (140) es un convertidor (71) formado de dispositivos de conmutación (94) controlados por compuerta conectados en una configuración de puente, el convertidor (71) conectado entre líneas de bus CC (72) que se conectan con el dispositivo de almacenamiento de energía eléctrica (74).

35

5. El módulo activo (30) de la reivindicación 4, donde el dispositivo de almacenamiento de energía eléctrica (74) es un condensador.

40

6. El módulo activo (30) de la reivindicación 1, donde el dispositivo de almacenamiento de energía eléctrica (74) es un inductor (145), y donde el circuito de conmutación (140) comprende un conmutador en serie (141) conectado en serie entre el primario del transformador principal (35) y el inductor (145), y un conmutador en paralelo (143) conectado en paralelo con el inductor (145), el controlador (76) conectado con el conmutador en serie (141) y el conmutador en paralelo (143) para conmutarlos alternativamente con un ciclo de trabajo d para el conmutador en serie (141) y un ciclo de trabajo (1-d) para el conmutador en paralelo (143).

45

7. El módulo activo (30) de la reivindicación 6, donde el conmutador en serie (141) y el conmutador en paralelo (143) comprenden cada uno IGBT de espalda con espalda con un diodo anti-paralelo (95) conectado a través de cada IGBT.

50

8. El módulo activo (30) de la reivindicación 1, donde el primario del transformador principal (35) tiene un devanado que comprende múltiples vueltas de alambre con secciones del alambre que se extienden en una dirección longitudinal paralela a la línea de transmisión (21) cuando el devanado primario del transformador está montado en la línea de transmisión (21), donde el dispositivo de almacenamiento de energía eléctrica (74) comprende un condensador, y donde el circuito de conmutación (140) comprende un convertidor de fase única (71) conectado por líneas de bus CC (72) al condensador .

55

9. El módulo activo (30) de la reivindicación 8 donde el convertidor (71) y el controlador (76) están contenidos en una carcasa (31) conectada al devanado primario del transformador principal, de modo que todos los componentes del módulo de impedancia activo (30) están soportados por la línea de transmisión (21) en la que el primario del transformador está montado, mientras que están eléctricamente aislados de la tierra y de las líneas de transmisión adyacentes.

60

65

10. El módulo activo (30) de la reivindicación 1 o de la reivindicación 8, donde el primario del transformador (35) tiene un núcleo (36) que se divide longitudinalmente en secciones (36a, 36b) de modo que se puede abrir para permitir que el primario del transformador acople más de una línea de transmisión y cerrar las secciones del núcleo primario del transformador entre sí para montar el primario del transformador en la línea de transmisión (21).
- 5 11. El módulo activo (30) de la reivindicación 3 o de la reivindicación 9, que incluye un receptor de radio (88) montado en la carcasa (31) y conectado al controlador (76) para proporcionar señales de comando al controlador (76) transmitidas a través de un enlace de radiocomunicaciones al receptor de radio (88).
- 10 12. El módulo activo (30) de la reivindicación 4 o de la reivindicación 8, donde los dispositivos de conmutación (4) controlados por compuertas son IGBT, e incluyen un diodo anti-paralelo (95) conectado a través de cada IGBT.
13. El módulo activo (30) de la reivindicación 4 o de la reivindicación 8, donde el controlador (76) está dispuesto para controlar el convertidor (71) para proporcionar una tensión acoplada a través del devanado primario del transformador a la línea de transmisión (21) que selectivamente aparece como inductancia positiva, inductancia negativa, o tensión en cuadratura en la tensión de la línea de transmisión en la posición del primario del transformador (35).
- 15 14. El módulo activo (30) de la reivindicación 13, donde el controlador (76) está dispuesto para hacer que el convertidor (71) extraiga energía de la línea de transmisión (21) para cubrir las pérdidas en el convertidor (71).
- 20 15. El módulo activo (30) de la reivindicación 4 o de la reivindicación 8, que incluye un devanado de transformador auxiliar (83) adaptado para acoplarse a una línea de transmisión (21) sin interrumpir la línea y para extraer energía de la misma y para suministrar energía en los terminales de salida de la misma al controlador (76).
- 25 16. El módulo activo (30) de la reivindicación 1 o de la reivindicación 8, donde el controlador (76) incluye un sensor para detectar la corriente a través de una línea de transmisión de energía (21), y donde en la detección de una corriente de fallo en la línea de transmisión de energía (21), el controlador (76) está dispuesto para controlar el convertidor (71) para inyectar una inductancia positiva en la línea de transmisión (21) para ayudar a limitar la corriente de fallos.
- 30 17. El módulo activo (30) de la reivindicación 1 o de la reivindicación 8, donde el devanado primario del transformador principal (35) tiene varias vueltas de alambre.
- 35 18. Un método de inyectar activamente una tensión en serie en una línea de transmisión (21) de un sistema de transmisión trifásico que comprende:
- (a) acoplar un devanado primario del transformador (35) a una de las líneas de fase de una línea de transmisión de energía de alta tensión sin interrumpir la línea, de modo que la línea de transmisión (21) constituye el secundario de un transformador que está aislado de las otras líneas de fase y de tierra, y **caracterizado por**
- 40 (b) aplicar selectivamente tensión alterna al devanado primario (35) del transformador para inyectar tensión en la línea de transmisión (21) en la posición del transformador para proporcionar eficazmente una impedancia en la línea de transmisión; y
- (c) utilizar un conmutador de derivación (92) para cortocircuitar el devanado primario del transformador (35)
- 45 cuando no se aplican selectivamente tensiones alternas al devanado primario.
19. El método de la reivindicación 18, donde las etapas (a), (b) y (c) se realizan en cada una de tres líneas de fase (21) del sistema de transmisión de energía trifásico.
- 50 20. El método de la reivindicación 18, donde las etapas (a), (b) y (c) se aplican en varias ubicaciones a través de una red de transmisión de energía del sistema.
21. El método de la reivindicación 20, que incluye controlar la tensión aplicada a los transformadores en múltiples localizaciones en una red de transmisión de energía que tiene múltiples conjuntos (20) de líneas de transmisión trifásicas para desviar parcialmente el flujo de energía de un conjunto de líneas de transmisión a otro conjunto de líneas de transmisión.
- 55 22. El método de la reivindicación 18, que incluye monitorear la corriente que fluye en la línea de transmisión (21) en el transformador para detectar las corrientes de fallo y, cuando una corriente de fallo es detectada, aplicar tensión CA al devanado primario del transformador (35) para proporcionar una inductancia efectiva positiva en la línea de transmisión (21) en el transformador para ayudar a limitar la corriente de fallo.
- 60 23. El método de la reivindicación 18, donde la etapa de aplicar tensión alterna al devanado primario del transformador (35) se realiza para proporcionar inductancia efectiva positiva o negativa en la línea de transmisión (21) en la posición del transformador.
- 65

24. El método de la reivindicación 18, donde la etapa de acoplamiento de un devanado primario del transformador (35) a una de las líneas de fase comprende proporcionar un devanado primario del transformador enrollado alrededor de un núcleo dividido (36) y acoplar el núcleo dividido sobre la línea de transmisión (21) para formar un devanado primario y el núcleo (76) que rodea la línea de transmisión (21).

5

25. El método de la reivindicación 18, que incluye transmitir una señal de radio frecuencia para controlar la etapa de aplicar selectivamente de tensión para cambiar la tensión alterna aplicada al devanado primario (35).

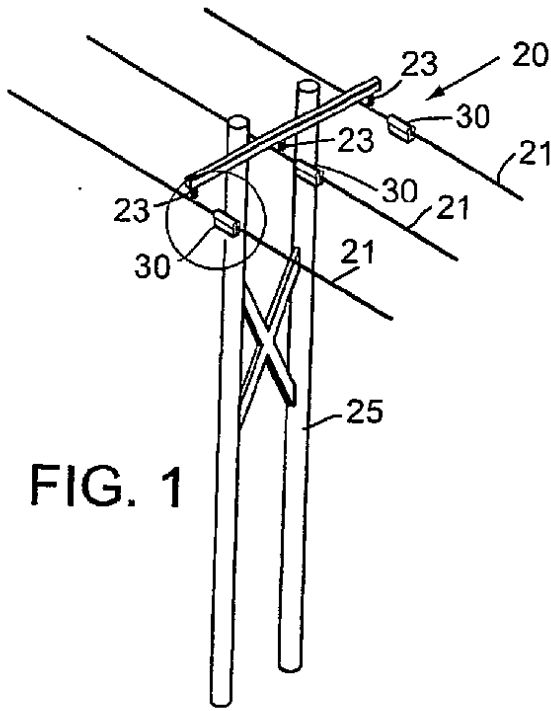


FIG. 1

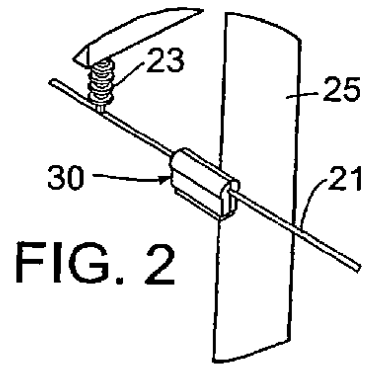


FIG. 2

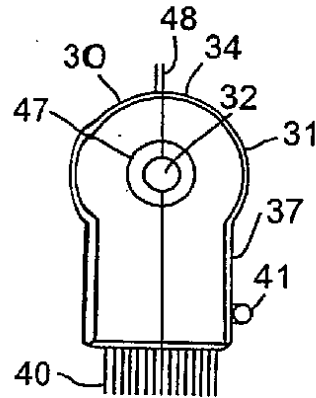


FIG. 4

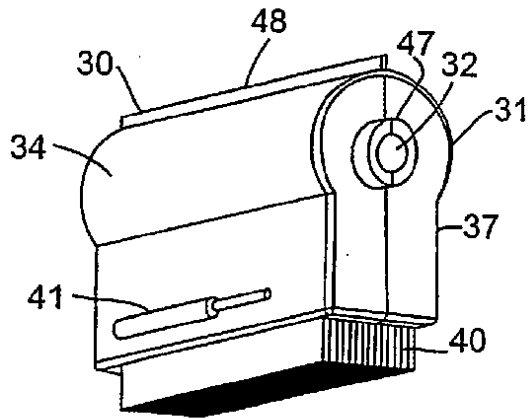


FIG. 3

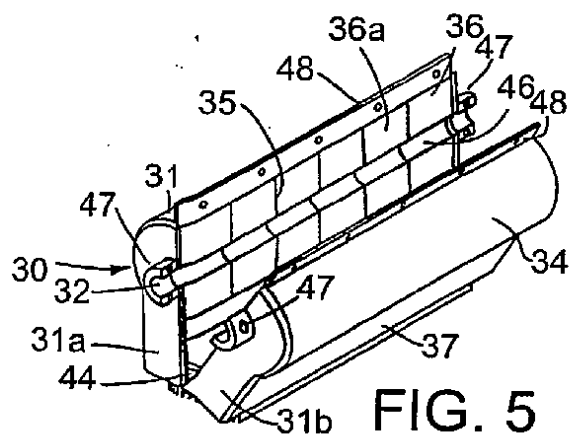
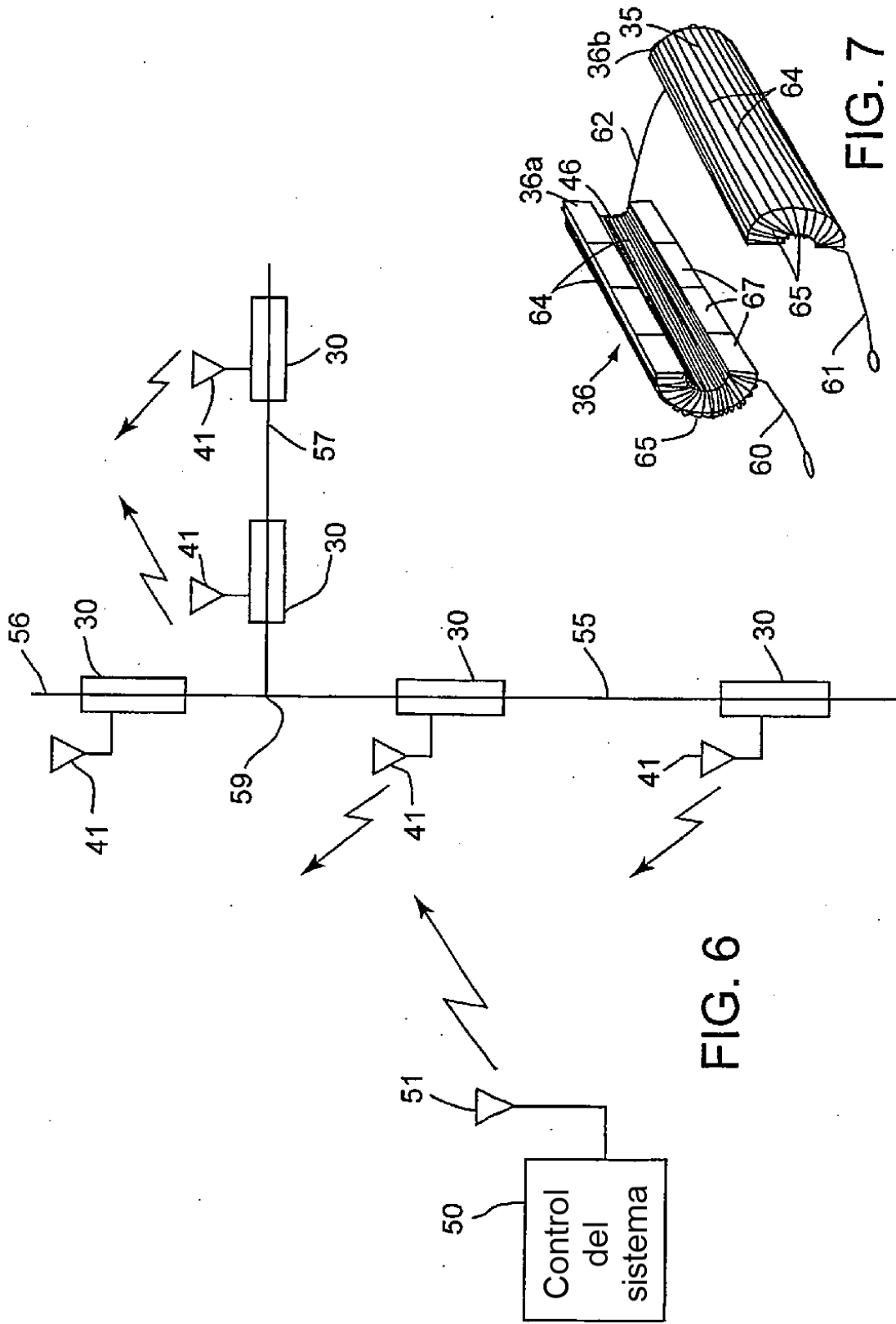


FIG. 5



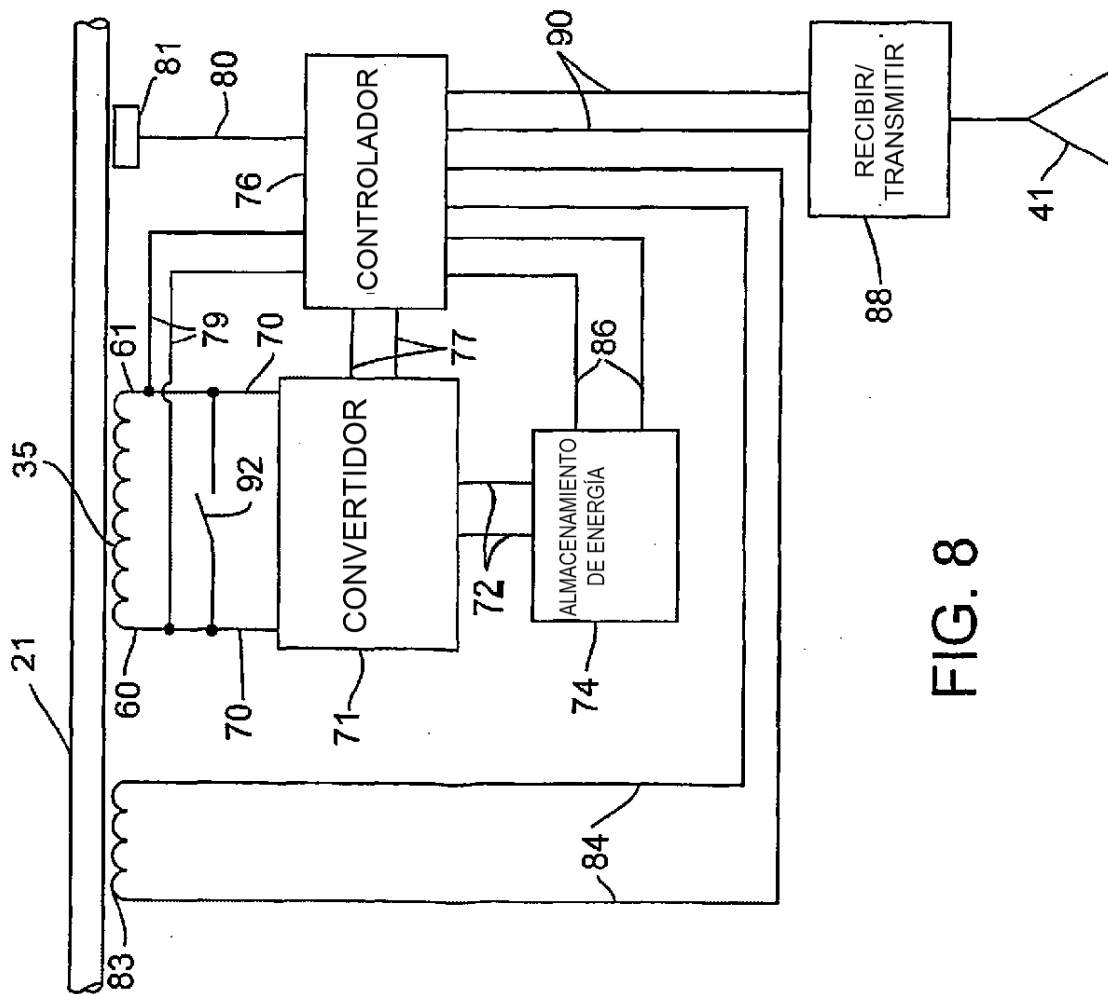


FIG. 8

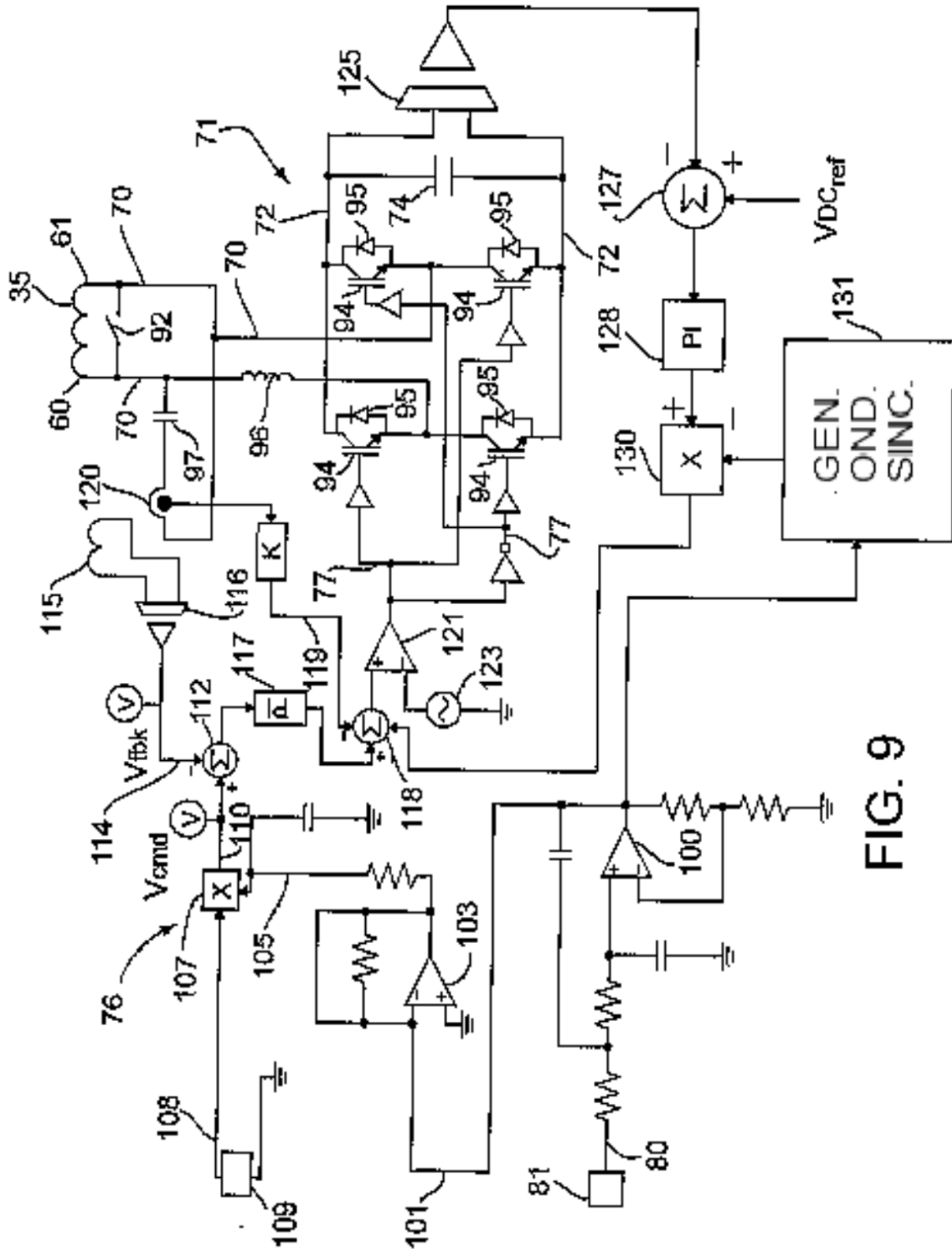


FIG. 9

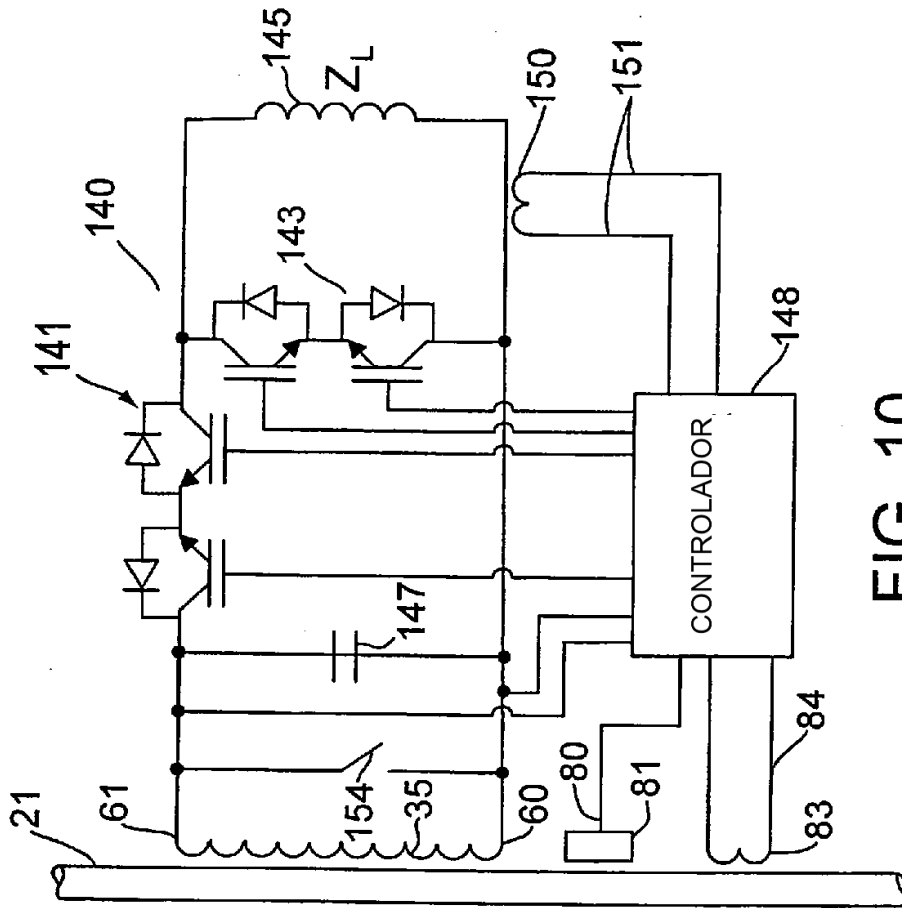


FIG. 10