

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 383 137**

51 Int. Cl.:
H02J 3/18

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **06719761 .6**

96 Fecha de presentación: **30.01.2006**

97 Número de publicación de la solicitud: **1851777**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **07.11.2007**

54 Título: **Sistemas y procedimientos para la compensación en serie distribuida de líneas eléctricas usando dispositivos pasivos**

30 Prioridad:
31.01.2005 US 648466 P

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
18.06.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
18.06.2012

73 Titular/es:
**GEORGIA TECH RESEARCH CORPORATION
505 TENTH STREET, NW
ATLANTA, GA 30332-0415, US**

72 Inventor/es:
**DIVAN, Deepakraj, Malhar y
JOHAL, Harjeet**

74 Agente/Representante:
Carpintero López, Mario

ES 2 383 137 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

Sistemas y procedimientos para la compensación en serie distribuida de líneas eléctricas usando dispositivos pasivos

Referencia cruzada a solicitud relacionada

- 5 La presente solicitud reivindica prioridad con respecto a la solicitud provisional estadounidense, en tramitación como la presente, titulada "Systems and Methods for Determining Power System Transmission Line Information", con el número de serie 60/648.466, presentada el 31 de enero de 2005, que se incorpora en su integridad al presente documento por referencia.

Campo técnico

- 10 La presente revelación versa en general acerca del control del flujo de potencia en una red de transmisión y, más en particular, acerca de la inserción de una impedancia en serie distribuida en las líneas de alta tensión para reducir el flujo de corriente en las líneas seleccionadas.

Antecedentes de la invención

- 15 De los retos a los que se enfrentan las compañías eléctricas, un problema fundamental es la eliminación de limitaciones y cuellos de botella en la transmisión. Un problema significativo en términos de la utilización de la red es el control del flujo de potencia activa. Los clientes de la compañía eléctrica compran potencia real, megavatios y MW-h, no tensión ni potencia reactiva. Así, el control de cómo y en qué lugar fluye la potencia real en la red resulta de vital importancia. Las redes congestionadas limitan la fiabilidad del sistema y restringen la capacidad de que generadores de bajo coste proporcionen a los clientes interesados potencia de bajo coste. La situación se agrava
20 considerablemente cuando uno ve que líneas de alta tensión vecinas operan por debajo de su capacidad, pero no pueden ser utilizadas, mientras que los "flujos en bucle" dan como resultado sobrecargas en las líneas existentes. El control del flujo de potencia activa requiere soluciones rentables de "VAR en serie" que puedan alterar la impedancia de las líneas de alta tensión o cambiar el ángulo de la tensión aplicada en la línea, controlando así el flujo de potencia. Rara vez se ha usado la compensación reactiva en serie, salvo en líneas de transmisión de gran longitud,
25 principalmente debido a los costes elevados y a la complejidad de la consecución de un aislamiento de la tensión y de problemas relacionados con la gestión de fallos.

- Hay un consenso general en que las futuras redes de distribución eléctrica tendrán que ser inteligentes y conscientes de sí mismas, tolerantes a fallos y autorregenerativas, controlables dinámica y estáticamente, y
30 eficientes en disponibilidad y energía. El enfoque aceptado y técnicamente probado para realizar una red inteligente, en particular logrando el control del flujo de potencia activa en la red, ha sido a través del uso de sistemas de transmisión flexible de CA, o FACTS. Los dispositivos FACTS típicos pueden operar hasta a 345 kV y pueden estar especificados hasta para 200 MVA. Aunque la tecnología FACTS está técnicamente probada, no ha visto una aceptación comercial generalizada debido a varias razones: 1) las elevadas potencias nominales del sistema requieren el uso de dispositivos a medida GTO o GCT de alta potencia con un esfuerzo de diseño, lo que eleva el
35 coste inicial; 2) las corrientes elevadas de fallo (60.000 amperios) y los requisitos básicos de aislamiento (1000 kV) someten a esfuerzo al sistema electrónico de alta tensión, especialmente para sistemas en serie que se requieren para el control del flujo de potencia; 3) las empresas de servicio público requieren niveles mayores de fiabilidad que los que han experimentado hasta ahora con dispositivos FACTS; 4) la fuerza requerida de mano de obra especializada en la especialidad para mantener y operar el sistema no está normalmente dentro de la competencia central de una compañía eléctrica; 5) el elevado coste total de la propiedad; por ejemplo, el compensador estático convertible (CSC) Marcy cuesta 54 millones de dólares.

- El uso de transformadores de núcleo dividido para realizar acopladores de alta tensión "flotantes" es bien conocido. La técnica ha sido propuesta para acoplar potencia de un cable aislado para la transferencia subacuática de potencia, y para la transferencia de potencia sin contactos a maquinaria minera. El uso de instrumentación de líneas
45 de alta tensión que esté flotando en líneas de alta tensión y que extraiga potencia de la propia línea es también bien conocido y lleva mucho tiempo en uso comercial. El uso de acopladores flotantes para realizar la comunicación por una línea de alta tensión, incluyendo la banda ancha sobre línea de alta tensión (BPL) es también bien conocido. El uso de transformadores acoplados en serie para inyectar tensión de cuadratura en la línea, como en un SSSC, un UPFC o un filtro activo también es bien conocido.

- 50 El uso de impedancias pasivas en serie distribuidas ha sido propuesto por Hydro-Quebec, insertando condensadores conmutables en serie en líneas de transmisión de gran longitud para cambiar la impedancia de la línea. Los conmutadores son generalmente controlados desde un controlador central. Sin embargo, la línea está construida especialmente para la impedancia deseada con un coste significativo y una flexibilidad reducida. La impedancia deseada no puede ser fijada fácilmente a una línea existente, y no puede ser desplegada nuevamente
55 en una fecha posterior. Además, los condensadores solo puede disminuir la impedancia de la línea y se usan fundamentalmente para reducir la impedancia de líneas de transmisión de gran longitud elevadas.

El uso de módulos de impedancia "activa" en serie distribuidos ha sido propuesto en la solicitud de patente estadounidense titulada "Distributed Floating Series Active Impedances For Power Transmission Systems", con el número de serie 10/678.966 y presentada el 3 de octubre de 2003, que se incorpora en su integridad al presente documento por referencia. La solicitud propone el uso de inversores electrónicos de potencia distribuidos a lo largo de la línea para ser usados colectivamente para inyectar una tensión de cuadratura en la línea para controlar el flujo de corriente. La técnica propuesta requiere una infraestructura de comunicaciones de banda ancha elevada que se usa para dar órdenes sobre la impedancia requerida de los módulos individuales. La orden debe ser generada por un controlador a nivel de red que tenga visibilidad para la corriente en todas las líneas de alta tensión y puede calcular el valor óptimo para las impedancias de línea individuales. Esta orden es entonces comunicada a los módulos individuales para su ejecución.

La complejidad del modo de operación descrito en lo que antecede añade un costo y una complejidad significativos al sistema de alta tensión. El coste de los propios convertidores de potencia, especialmente cuando están diseñados para operar en las condiciones medioambientales adversas encontradas en una línea de alta tensión, es probable que sea un factor limitante. Además, la operación de convertidores electrónicos de potencia durante periodos de tiempo prolongados (objetivo de 30 años) cuando están suspendidos en una línea de alta tensión y sometidos a condiciones medioambientales adversas creará problemas de fiabilidad y disponibilidad para las compañías eléctricas que desplieguen tal tecnología. Estos problemas apuntan a la necesidad de un enfoque alternativo que tenga un coste menor, sea más simple y no dependa de la disponibilidad de una infraestructura de comunicaciones de banda ancha elevada. La solicitud de PCT publicada con el número de publicación internacional WO 01/11751 A1 da a conocer un sistema y un procedimiento de implementación de un control de sobrecargas de línea insertando una impedancia en serie que incluye una reactancia en serie distribuida. Un devanado con un cambiador mecánico de tomas está conectado entre dos líneas de transmisión. La solicitud de PCT publicada con el número de publicación internacional WO 02/41459 A1 da a conocer una línea de fase que comprende n conductores eléctricos cortocircuitados en dos extremos de la sección. Cada conductor eléctrico incluye un componente pasivo y un conmutador para conectar o desconectar selectivamente el componente pasivo.

Existe, entonces, la necesidad de un enfoque distribuido que realice dispositivos pasivos, en particular dispositivos pasivos en serie para la impedancia en serie distribuida.

Resumen de la invención

Se describen brevemente sistemas y procedimientos de implementación de un control de sobrecargas de línea insertando una impedancia en serie distribuida en los conductores de la línea de transmisión. Un sistema ejemplar, entre otros, comprende al menos una reactancia en serie distribuida (DSR), comprendiendo la al menos una DSR un transformador de una sola espira fijado en torno a un conductor, y un controlador configurado para insertar una inductancia de magnetización en el conductor cuando la corriente de línea del conductor alcanza un valor predeterminado. El controlador puede estar configurado, además, para retirar la inductancia de magnetización cuando la corriente de línea del conductor cae por debajo del valor predeterminado.

Un procedimiento ejemplar, entre otros, comprende implementar el control de sobrecargas proporcionando una inductancia de magnetización por medio de una reactancia en serie distribuida y hacer que la inductancia de magnetización se inserte en un conductor cuando la corriente de línea del conductor alcance un valor predeterminado. El procedimiento puede contemplar, además, retirar la inductancia de magnetización cuando la corriente de línea del conductor cae por debajo del valor predeterminado.

Otros sistemas, otros procedimientos, otras características y otras ventajas de la presente invención serán o se volverán evidentes a una persona con dominio de la técnica tras el estudio de los siguientes dibujos y de la descripción detallada. Se pretende que todos los sistemas, los procedimientos, las características y las ventajas tales estén incluidos dentro de esta descripción, que estén dentro del alcance de la presente invención y que estén protegidos por las reivindicaciones adjuntas.

Breve descripción de los dibujos

Muchos aspectos de la presente invención pueden ser mejor comprendidos con referencia a los siguientes dibujos. Los componentes de los dibujos no están necesariamente a escala; se hace hincapié más bien en ilustrar claramente los principios de la presente invención. además, en los dibujos, los números de referencia similares designan partes correspondientes en las varias vistas.

La FIG. 1 muestra una realización de una reactancia en serie distribuida en un sistema de energía eléctrica.

La FIG. 2 muestra un sistema simple de energía eléctrica con dos líneas de transmisión a título de ilustración.

La FIG. 3 es un esquema funcional de una reactancia en serie distribuida para su uso en el sistema de alta tensión de la FIG. 2.

La FIG. 4 es un gráfico que ilustra el aumento en la inductancia de la línea a medida que se conectan reactancias en serie distribuidas según la FIG. 3 debido al aumento en la corriente de línea.

La FIG. 5A muestra una vista lateral de la reactancia en serie distribuida según la FIG. 3.

La FIG. 5B muestra una vista frontal de la reactancia en serie distribuida según la FIG. 3.

5 La FIG. 6 es un esquema funcional de un circuito equivalente de los devanados de transformador de la reactancia en serie distribuida de la FIG. 3.

La FIG. 7 muestra una realización alternativa de la reactancia en serie distribuida con un núcleo ajustable.

La FIG. 8 es un diagrama de flujo que ilustra la inserción de una impedancia distribuida en una línea de un conductor mediante la reactancia en serie distribuida según la FIG. 3.

10 La FIG. 9 es un esquema que ilustra el despliegue de la reactancia en serie distribuida según la FIG. 3 en un sistema de alta tensión de 4 nodos.

La FIG. 10 ilustra la potencia máxima transferida por medio de la red según la FIG. 9 con las unidades de reactancia en serie distribuidas puenteadas.

Descripción detallada de la realización preferente

15 La FIG. 1 ilustra una realización de una reactancia en serie distribuida (DSR), denotada por el número de referencia 100, para el control de sobrecargas en línea mediante la inserción de una impedancia en serie distribuida en un conductor 108 de un sistema 102 de energía eléctrica. El sistema 102 de energía eléctrica tiene una fuente 104 de energía eléctrica y una carga 106 conectadas por al menos un y normalmente por múltiples conductores 108. Por supuesto, el sistema 102 de energía eléctrica puede tener múltiples fuentes 104 de energía y múltiples cargas 106.

20 La DSR 100 es fijada a un conductor 108 de línea de transmisión, preferentemente, aunque no necesariamente, cerca de un aislador 110. Tal como se expone más abajo, los módulos de la DSR 100 están formados para fijarse al conductor 108 sin requerir una ruptura ni ninguna otra modificación física de la línea de alta tensión. Además, la DSR 100 opera sin la necesidad de información relativa a las corrientes que fluyen en el resto de la red, sin un controlador central, y sin una infraestructura de comunicaciones que, normalmente, se requiere para la debida

25 operación del sistema.

La primera línea de transmisión eléctrica en una red interconectada que alcance un límite térmico limita la capacidad de transferencia de energía de toda la red, aunque todas las demás líneas, en ese momento, puedan estar operando significativamente por debajo de su límite térmico. En tales condiciones, si pudiera aumentarse la impedancia para la línea que se aproxima al límite térmico, fluiría la corriente a las otras líneas que aún no han alcanzado su límite

30 térmico. Esto, en esencia, aumentaría la cantidad de corriente que fluye por la red sin causar una sobrecarga en ninguna línea. Así, la impedancia de la línea puede ser controlada con base en parámetros locales únicamente, es decir, en la corriente en la línea de alta tensión, y no requiere información de ninguna otra línea de la red.

La implementación de tal control de sobrecargas requiere únicamente un aumento de la impedancia de la línea más allá de su valor nominal. Cuando la corriente se aproxima a su valor límite térmico, aumenta la impedancia de la

35 línea, provocando una redistribución de la corriente en la red, de tal modo que las líneas con baja carga se vean obligadas a transportar niveles adicionales de corriente que los que transportarían normalmente.

Además, para lograr una impedancia en serie distribuida no es necesario variar la impedancia de cada módulo en todo el intervalo. Antes bien, cada módulo puede conmutar entre un número limitado de valores diferenciados, y la conmutación de todos los módulos puede ser coordinada usando puntos de ajuste a priori para realizar la variación

40 de la impedancia de la línea en un intervalo deseado.

La DSR 100 permite que una inductancia pasiva conmutable distribuida sea insertada gradualmente en un conductor 108, aumentando así de manera efectiva la impedancia de la línea y haciendo que la corriente se dirija a otras líneas que tienen capacidad adicional. Un dispositivo de impedancia en serie distribuida tal como la DSR 100 puede ser fijado en torno a un conductor 108 usando un transformador de una sola espira (STT). Tal como se expone más

45 abajo, el STT tiene un entrehierro diseñado para insertar una inductancia deseada de magnetización en el conductor 108. Los circuitos de potencia y de control se simplifican, disminuyendo así el peso, el costo y la fiabilidad de la DSR 100. El uso de componentes fundamentalmente pasivos da como resultado un diseño mejorado para entornos adversos, temperaturas extremas y sobrecargas eléctricas en condiciones de fallo. El uso de módulos redundantes de DSR 100 mejora la fiabilidad del sistema. La monitorización de la inductancia de la línea como función de la

50 corriente de la línea también posibilita identificar la ubicación de un módulo de DSR 100 con fallo.

La FIG. 2 ilustra un ejemplo de un sistema de alta tensión que tiene dos líneas de transmisión. La primera línea 116 tiene 32,2 km de longitud y tiene una impedancia de $3,4 + j16$ ohmios y una corriente de 170 amperios. La segunda línea 118 tiene 48,3 km de longitud y tiene una impedancia de $5,1 + j24$ ohmios y una corriente de 513,5 amperios. La fuente 112 de alimentación tiene una tensión de 138 $\angle 0^\circ$ kV. La carga 114 está a una tensión de 138 $\angle 9,07^\circ$ kV.

La línea 116 alcanza el límite térmico antes que la línea 118. En ese momento, no puede transferirse más energía sin sobrecargar la línea 116, aunque la línea 118 tenga una capacidad adicional no utilizada.

5 Para controlar el flujo de potencia en las líneas de transmisión, los elementos en serie tienen el potencial y el impacto máximos. El flujo de potencia real y reactiva, P y Q, a lo largo de la línea de transmisión que conecta dos nodos de tensión está gobernado por las dos magnitudes de tensión V_1 y V_2 y por la diferencia del ángulo de fase de tensión $\delta = \delta_1 - \delta_2$.

$$P_{12} = \frac{V_1 V_2 \sin \delta}{X_L} \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$Q_{12} = \frac{V_1^2 - V_1 V_2 \cos \delta}{X_L} \quad \text{Ecuación (2)}$$

siendo X_L la impedancia de la línea, que se supone que es puramente inductiva.

10 Así, el control del flujo de potencia real en la línea implica el cambio del ángulo δ , o de la impedancia X_L de la línea. Por supuesto, el flujo de potencia reactiva también se ve afectado por el cambio de la impedancia de la línea. Puede usarse un transformador desfasador para controlar el ángulo δ . Esta es una solución cara y no permite una capacidad de control dinámico. Alternativamente, puede usarse un compensador en serie para aumentar o disminuir la impedancia reactiva efectiva X_L de la línea, permitiendo así el control del flujo de potencia real entre los dos nodos. El cambio de impedancia puede ser efectuado mediante la inyección en serie de un elemento pasivo capacitivo o inductivo en la línea. Alternativamente, puede usarse un inversor estático para realizar un elemento activo controlable sin pérdidas, tal como un inductor negativo o positivo o una tensión fundamental síncrona que sea ortogonal a la corriente de línea.

15 Con referencia a la FIG. 2, los sistemas de transmisión y subtransmisión tienden a estar crecientemente combinados e interconectados. La capacidad de desconectar líneas con fallos sin causar un impacto en el servicio tiene un enorme impacto en la fiabilidad del sistema. Sin embargo, en tales sistemas interconectados, el flujo de corriente es determinado por la impedancia de las líneas, y el operador del sistema tiene una capacidad muy limitada para controlar el lugar al que fluyen las corrientes en la red. En tales sistemas, la primera línea en alcanzar la capacidad térmica limita la capacidad de toda la red, aunque otras líneas permanezcan considerablemente infrutilizadas. Por ejemplo, si se aplicase una compensación reactiva en serie al sistema 100 de dos líneas de la FIG. 2, podría fluir corriente adicional por la línea 118 y podrían transferirse 52 MW adicionales de potencia entre los dos nodos cambiando las reactancias de línea en 20 por ciento, tal como se muestra en la TABLA A.

TABLA A				
Aumento de transferencia de potencia por cambio de la reactancia de línea				
Reactancia de línea (Ω)	Corrientes de línea (A)	Ángulo de carga (grad.)	Potencia de línea (MW)	Potencia transferida (MW)
$X_{116} = 16$ $X_{118} = 24$	$I_{116} = 770$ $I_{118} = 513,5$	$\delta = 9,07^\circ$	$P_{116} = 176,5$ $P_{118} = 117,7$	294,2
$X_{116} = 19,2$ $X_{118} = 19,2$	$I_{116} = 770$ $I_{118} = 756$	$\delta = 10,81^\circ$	$P_{116} = 177$ $P_{118} = 169,4$	346,4

30 Dispositivos FACTS en serie pueden controlar el flujo de potencia variando los parámetros de la Ecuación (1). Típicamente, tales dispositivos requieren una ruptura en la línea y una plataforma de alta tensión, lo que añade adicionalmente al costo y la complejidad. Una impedancia en serie distribuida que utilice dispositivos pasivos ofrece la promesa de un dispositivo de impedancia en serie rentable, escalable y controlable que puede ser desplegado de manera incremental y que también presente una fiabilidad y una disponibilidad elevadas.

35 La impedancia típica X_L de una línea de alta tensión es de aproximadamente 0,49 ohmios/kilómetro. Correspondiéndose la capacidad térmica de la línea de 770 amperios a 184 MVA de flujo de potencia, la caída de tensión por la impedancia de la línea es, así, de 377,80 voltios/kilómetro. Un cambio del dos por ciento en la impedancia de la línea requeriría, así, la inyección de 7,56 voltios, o 0,00982 ohmios/kilómetro. Esto se traduce en un valor de impedancia de 26,10 μH o 5,74 kVAR (7,46 voltios a 770 amperios). Este es un valor de impedancia sorprendentemente pequeño para que tenga un impacto significativo en la capacidad de la línea de alta tensión y podría lograr con un solo módulo de 5,74 kVAR desplegado cada kilómetro de línea. Tal módulo podría ser lo suficientemente pequeño y ligero como para ser suspendido de la línea de alta tensión, flotando tanto eléctrica como

mecánicamente en la propia línea. Esto también suscita la posibilidad de implementar una impedancia en serie distribuida usando un gran número de tales módulos que puedan ser fijados en torno a un conductor existente de línea de alta tensión.

5 La inyección en serie de impedancia o tensión en cada módulo puede lograrse usando un transformador de una sola espira (STT) que use el propio conductor de la línea como un devanado del transformador. Haciendo flotar el dispositivo sobre el cable se evitan todos los problemas de tensión nominal y de aislamiento.

10 La redundancia permite una operación ininterrumpida en caso de un fallo de la unidad, dando una fiabilidad y una disponibilidad mayores. El STT permite gestionar mayores niveles de corriente de fallo, típicamente un problema desafiante para dispositivos conectados en serie. La potencia nominal diana de aproximadamente 5,74 kVA permite el uso de componentes y tecnologías de fabricación de bajo coste, volumen elevado y fácilmente disponibles para realizar un módulo unitario de muy bajo coste. Los dispositivos pueden ser desplegados de forma incremental según se necesiten, proporcionando un mayor nivel de escalabilidad. Por último, el dispositivo puede ser fijado en una línea existente de alta tensión, simplificando la instalación y el procedimiento de puesta en servicio.

15 La FIG. 3 muestra una realización de una reactancia en serie distribuida (DSR), denotada por el número de referencia 100, para el control de sobrecargas de línea insertando una impedancia en serie distribuida en un conductor. Pueden desplegarse uno o más dispositivos de DSR 100, aunque, preferentemente, se desplegarán al menos dos dispositivos de DSR 100 en redes de alta tensión interconectadas o combinadas. Los dispositivos de DSR 100 pueden ser controlados de forma autónoma a nivel del módulo individual, usando una estrategia de control simple, sin comunicaciones, aumentando así tremendamente la capacidad de toda la red de alta tensión.

20 La DSR 100 comprende un STT 120, un acoplador transformador de alta tensión de núcleo dividido con un conmutador que se fija en torno a la línea o el conductor 108 de transmisión. En una implementación preferente, el STT 120, en su posición fijada, tiene un entrehierro diseñado de tal manera que la inductancia de magnetización es sustancialmente igual a la inductancia deseada de inserción. El devanado del STT 120 se cortocircuita usando un conmutador 122 de contacto normalmente cerrado. Debería resultar evidente que el conmutador de contacto podría ser, por ejemplo, un conmutador electromecánico. El conmutador 122 de contacto puentea el módulo cuando no está activado. Una pequeña fuente 128 de alimentación deriva energía de la corriente de la línea por medio de un transformador 126 de corriente. La fuente 128 de alimentación proporciona energía al controlador 130. El controlador 130 monitoriza la corriente de línea y abre el conmutador 122 de contacto cuando la corriente de la línea alcanza un nivel predeterminado. Con el conmutador 122 de contacto abierto, un tiristor 124 controla la inserción de la reactancia en serie. Con el tiristor 124 cerrado, se inserta en el conductor 108 un nivel mínimo de reactancia correspondiente a la reactancia de fuga del STT 120. Con el tiristor 124 abierto, se inserta en la línea la inductancia de magnetización del STT, regulada al valor deseado configurando el entrehierro. Los expertos en la técnica reconocerán que el tiristor 124 no resulta vital para el diseño. Si se omite el tiristor 124, entonces la apertura del conmutador 122 de contacto insertará la inductancia de magnetización en el conductor 108.

35 El conmutador 122 cerrado cortocircuita el devanado del transformador, insertando una inductancia virtualmente de cero en la línea o el conductor 108. Cuando se abre el conmutador 1022, se inserta la inductancia de magnetización en el conductor 108 y se implementa una reactancia en serie distribuida. Entonces pueden usarse múltiples módulos de DSR 100 a niveles predeterminados y diferentes para realizar el intervalo de control requerido de la impedancia de la línea de alta tensión, implementando así un sistema de control de sobrecargas en líneas de alta tensión. El sistema 102 de alta tensión opera sin la necesidad de una infraestructura de comunicaciones y realiza un costo reducido y una mayor fiabilidad con la implementación de módulos de DSR 100.

45 Al mismo nivel, cuando la corriente en una línea particular supera un valor predeterminado, se conectan números crecientes de módulos de DSR 100, aumentando gradualmente la impedancia de la línea y desviando la corriente a líneas infrutilizadas. Dado que el objetivo global del control es salvaguardar a las líneas de una sobrecarga térmica, se percibe que la estrategia de control es muy simple. El algoritmo de control para la operación modular de la DSR 100 se define en la Ecuación (3).

$$L_{iny} = L_f \frac{(I - I_0)}{(I_{t\acute{e}rmica} - I_0)} \quad \text{Ecuación (3)}$$

en la que L_{iny} es la inductancia de línea inyectada,
 L_f es el valor final de la inductancia con todos los módulos de DSR en la línea activos,
 I_0 es el valor desencadenante de la corriente para un módulo,
 $I_{t\acute{e}rmica}$ es el límite térmico más allá del cual no hay inyección.

50 Diferentes módulos en una línea tienen niveles de conmutación predeterminados (con base en la corriente de la línea) que proporcionan colectivamente una inductancia de la línea que aumenta a medida que aumenta la corriente de la línea por encima de un umbral definido, tal como se ilustra en la FIG. 4. La FIG. 4 muestra un gráfico 400 que ilustra el aumento en inductancia de la línea por encima de la L_{nat} 402 a medida que aumenta la corriente de la línea.

Por ejemplo, cuando la corriente de la línea alcance cierto nivel I_0 406, se activará la primera DSR 100 para insertar un nivel deseado de reactancia en la línea de transmisión por encima de la L_{nat} 402 inicial. La mayor reactancia hará que parte de la corriente se desvíe a líneas de transmisión alternativas. A medida que sigue creciendo la corriente I de la línea, denotada por el número de referencia 408, se alcanza un siguiente nivel de activación, haciendo así que la siguiente DSR 100 se active e inserte un nivel deseado adicional de reactancia en la línea de transmisión. La mayor reactancia hará que más corriente se desvíe a líneas de transmisión alternativas. La inserción de impedancia en serie distribuida continuará según se necesite mientras aumente la corriente de la línea, provocando que módulos adicionales de DSR 100 se activen. Cuando todos los módulos de DSR de la línea estén activados, la inductancia alcanza su valor final L_f 404. El valor final de L_f 404 puede fijarse según el límite térmico del conductor y, así, de la corriente $I_{térmica}$ 410 más allá de la cual no ocurrirá ninguna inyección de inductancia.

Las líneas preseleccionadas que es probable que vean condiciones de sobrecarga en ciertos momentos del día o bajo condiciones definidas de contingencia pueden ser modificadas con módulos de DSR 100 para gestionar automáticamente la congestión cuando ocurre y para tener un impacto mínimo en el sistema en condiciones operativas normales. Del despliegue de módulos de DSR 100 en una línea de alta tensión puede contribuir así a realizar el concepto de un conductor limitador de la corriente.

El control de los módulos de DSR 100, cuando se implementa en múltiples líneas, infiere que no ocurren oscilaciones ni interacciones de ningún tipo. Se usa un estimador exponencialmente decreciente, según se muestra en la Ecuación (4), dentro de cada módulo para minimizar las interacciones entre módulos y líneas.

$$L_{exp} = \left(L_{iny} - L_{prev} \right) \left(1 - \exp^{-t-t_0} \right) + L_{prev} \quad \text{Ecuación (4)}$$

válido en el intervalo $t_0 \leq t \leq t_0 + \Delta t$.

L_{exp} corresponde a la demanda real de inyección en cada instante de muestreo.

Contar con muchos módulos de DSR 100 en las líneas de transmisión de una red de alta tensión con todos los módulos de DSR 100 configurados para activarse a niveles específicos de corriente crea una velocidad muy gradual de cambio de la impedancia. Esto crea de forma efectiva lo que aparece como un cambio lineal de la impedancia en lo que al sistema respecta y no requiere comunicación entre los dispositivos. Cada DSR 100 está programada para conectarse y desconectarse a niveles ligeramente diferentes. Debería recalarse también que, cuando la corriente vuelve a caer por debajo del nivel predeterminado, el tiristor permite que la reactancia añadida sea retirada de la línea y que el sistema vuelva a su estado normal de operación. Debería recalarse que el sistema se regula solo y que la línea vuelve a su condición original cuando ya no están presentes las condiciones de sobrecarga térmica. Debería recalarse, además, que, aunque no es necesaria la comunicación para la operación de la DSR 100, pueden usarse comunicaciones para mejorar el rendimiento. El control se basa en parámetros locales a la DSR 100. Se controlan múltiples unidades en secuencia para crear un continuo en términos de parámetros de impedancia.

Por ejemplo, con cien módulos de DSR 100 desplegados, es posible cambiar la inductancia de la línea con una resolución del uno por ciento. La conmutación de los módulos de DSR 100 necesitaría incorporar filtrado de ruido, histéresis y otros mecanismos de protección, como es bien sabido por los expertos en la técnica. Sin embargo, sigue siendo evidente que no se requiere ninguna comunicación para la operación de la DSR 100.

Puede entenderse el módulo de DSR 100 como un cable limitante de la corriente. Cuando la corriente del cable se aproxima a su capacidad térmica, aumenta la impedancia, obligando así a la corriente a fluir a otras partes relativamente descargadas de la red. Esto ocurre de una manera previsible y permite que los operadores del sistema utilicen mejor la capacidad de transmisión disponible del sistema.

La FIG. 5A enfatiza la porción del STT 120 de una DSR 100. El STT 120 se fija en torno a un conductor 108 e incluye dos secciones 132 de núcleo dividido, un devanado 134 y un conmutador 122 de contacto normalmente cerrado. Las secciones 132 de núcleo dividido son las porciones del STT 120 que están fijadas en torno al conductor 108. Además, puede usarse un segundo conmutador 136 de contacto si se desea utilizar devanados 134 separados en cada una de las dos secciones 132 de núcleo dividido. Debería hacerse notar que los conmutadores de contacto podrían ser, por ejemplo, conmutadores electromecánicos.

La FIG. 5B ilustra una vista de un extremo de la porción del STT 120 de la DSR 100. El controlador 130 opera el conmutador 122 de contacto. El controlador cierra el conmutador 122 de contacto para cortocircuitar los devanados 134, puenteando así la DSR 100. El controlador 130 abre el conmutador 122 de contacto para utilizar la DSR 100. El entrehierro 138 está diseñado de tal manera que la DSR 100 produzca la inductancia deseada cuando el controlador 130 ponga la inductancia de magnetización en el conductor 350.

Con el conmutador 122 de contacto y el tiristor 124 abiertos, se inserta la inductancia de magnetización en el cable. El entrehierro 138 está diseñado de tal forma que se inserte el nivel debido de inductancia. Esto simplifica la construcción del dispositivo de núcleo partido, reduciendo así el coste. Puede resultar deseable usar dos mitades idénticas que estén acopladas entre sí para realizar un transformador completo. Alternativamente, todos los

devanados pueden estar en un segmento del núcleo, utilizándose un solo segmento de núcleo para completar el circuito magnético. En este caso, habría un solo conmutador 122 de contacto.

Debería recalarse que la DSR 100, en su realización preferente, es un sistema conmutable completamente pasivo para el control de sobrecargas insertando una inductancia en serie distribuida en un conductor 108. La DSR 100 opera en su realización preferente, sin comunicaciones y requisitos simplificados de interfaz del sistema. Aunque podría utilizarse un semiconductor de potencia para llevar a cabo la función de conmutación, es preferible el conmutador 122 de contacto de contactor electromecánico. Tal como se ha hecho notar previamente, el uso de componentes fundamentalmente pasivos mejora el diseño para entornos adversos, temperaturas extremas y sobrecargas eléctricas en condiciones de fallo. El sistema puede usarse para seleccionar líneas que tienen peligro de sobrecarga en ciertas condiciones del sistema de alta tensión. El sistema puede aumentar de forma efectiva la impedancia de la línea y hacer que la corriente se desvíe a líneas que tienen capacidad adicional. Podría evitarse que las líneas seleccionadas se sobrecarguen y, además, pueden evitarse llamadas de mitigación de carga de transmisión y disparos de línea.

De nuevo, debería recalarse que no es necesaria ninguna comunicación exterior para la operación de la DSR 100. Sin embargo, los expertos en la técnica deberían entender que podrían utilizarse comunicaciones para permitir a un operador del sistema mayor capacidad de programación del controlador 130. Podría permitirse que la DSR 100 se comunicara con otros módulos de DSR 100. Además, el operador del sistema podría reprogramar uno o más controladores 130 a través de enlaces de comunicaciones (no mostrados). Además, los controladores 130 podrían ser reprogramados a través, por ejemplo, de un control remoto de corto alcance.

La FIG. 6 ilustra un circuito equivalente de los devanados del transformador. Con el conmutador 122 de contacto cerrado, el transformador se desconecta cortocircuitándolo y se inserta la reactancia L_R de fuga en serie con el conductor. Esta reactancia de fuga es del orden de $0,8 \mu\text{H}$, que es desdeñablemente pequeña en esta circunstancia. El controlador 130 monitoriza la línea de corriente y la temperatura del cable para optimizar la capacidad térmica. Con base en la estrategia global de control, el conmutador 122 de contacto se abre, insertando así la inductancia de magnetización L_m en el circuito cuando se requiere un aumento de la inductancia de la línea. Con un gran número de unidades en serie, sería preciso usar una técnica de conmutación escalonada.

La FIG. 7 ilustra una realización alternativa de una DSR 700 que es puramente mecánica. Para insertar una inductancia en el conductor 108 puede usarse un núcleo que puede ser movido para que la inductancia efectiva varíe. Puede usarse un mecanismo para mantener las dos mitades 702 del núcleo separadas por una distancia específica en condiciones operativas normales, permitiendo que se acople una inductancia mínima al conductor 108. A medida que aumente la temperatura del cable, el entrehierro 704 disminuirá, aumentando efectivamente la inductancia. Una banda mecánica térmica que cambie de forma con la temperatura puede proporcionar una implementación completamente pasiva de tal dispositivo. Alternativamente, podría usarse un solenoide.

La FIG. 8 muestra un diagrama 800 de flujo que ilustra la operación de una DSR. Se proporciona una inductancia de magnetización en la etapa 810 por medio de un transformador de una sola espira fijado en torno a un conductor, estando diseñado el entrehierro para proporcionar la inductancia de magnetización. La etapa 820 ilustra la derivación de potencia, usada para operar el controlador. La potencia se deriva de la corriente de línea del conductor. La corriente de la línea es monitorizada en la etapa 830, de forma que, cuando la corriente de la línea alcance un valor predeterminado, el conmutador de contacto se abra en la etapa 840. Una vez que se ha abierto el conmutador de contacto, la corriente es monitorizada en la etapa 850 hasta que la corriente caiga por debajo del valor deseado. Cuando la corriente cae por debajo del valor deseado, el conmutador de contacto se cerrará, tal como se ilustra en la etapa 860. Como comprenderán los expertos en la técnica, el procedimiento mostrado en la FIG. 8 podría comprender más de un STT y típicamente así sería. Cada uno de los STT insertará entonces una inductancia de magnetización en el conductor en torno al cual está fijado con un valor predeterminado diferente de corriente de línea del conductor para efectuar un aumento gradual en la inductancia sobre el conductor, reduciendo así la sobrecarga y permitiendo que la corriente aumente en los conductores alternativos. De nuevo, debería recalarse que, aunque no se requieren comunicaciones para este procedimiento de utilización de la DSR, pueden usarse comunicaciones para mejorar las operaciones.

Se han simulado diversas implementaciones para insertar una impedancia en serie distribuida. El modelo de la DSR da por sentada una inyección de una inductancia en serie de $5,74 \text{ kVAR}$ con una corriente de 770 amperios . Con base en unidades experimentales de STT construidas y sometidas a ensayo, la inductancia de fuga es de $0,8 \mu\text{H}$, mientras que la inductancia insertada es de $0,042 \text{ mH}$.

La DSR fue usada, además, en un sistema 900 de cuatro nodos, tal como se muestra en la FIG. 9. La FIG. 9 representa un sistema 900 de cuatro nodos que tiene dos fuentes de alimentación: el Gen 1, denotado por el número de referencia 906, y el Gen 2, denotado por el número de referencia 907. La línea 1, denotada por el número de referencia 901, tiene una longitud de $64,4 \text{ kilómetros}$ y una impedancia de $6.752 + j0,08372 \Omega$. La línea 2, denotada por el número de referencia 902, tiene una longitud de $32,2 \text{ kilómetros}$ y una impedancia de $3.376 + j0,04186 \Omega$. La línea 3, denotada por el número de referencia 903, tiene una longitud de $48,3 \text{ kilómetros}$ y una impedancia de $5.084 + j0,06279 \Omega$. La línea 4, denotada por el número de referencia 904, tiene una longitud de $64,4 \text{ kilómetros}$ y una

5 impedancia de $6.752 + j0,08372 \Omega$. La línea 5, denotada por el número de referencia 905, tiene una longitud de 32,2 kilómetros y una impedancia de $3.376 + j0,04186 \Omega$. La carga 1 está denotada por el número de referencia 908 y la carga 2 está denotada por el número de referencia 909. Cuando se puentean las unidades de DSR, la potencia máxima que puede ser transferida a través de la red está limitada por la línea 2 y la línea 5, tal como se muestra con el gráfico 1000 en la FIG. 10. Con unidades adicionales de DSR, se ve que la envolvente permisible de ATC aumenta enormemente un mínimo del 37,6%.

10 Debería recalcar que las realizaciones de la presente revelación descritas en lo que antecede, en particular cualquier realización "preferente", son meramente posibles ejemplos de implementaciones, meramente enunciados para una clara comprensión de los principios de la revelación. Pueden efectuarse muchas variaciones y modificaciones a la realización o las realizaciones de la revelación descritas en lo que antecede sin apartarse sustancialmente del espíritu y los principios de la revelación. Se pretende que todas las modificaciones y las variaciones de ese tipo estén incluidas en el presente documento dentro del alcance de esta revelación y la presente revelación y protegidas por las reivindicaciones siguientes.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema de implementación de un control de sobrecarga de líneas que proporciona una impedancia en serie distribuida, comprendiendo el sistema:
 - 5 al menos una reactancia (100) en serie distribuida (DSR), **caracterizado porque** la al menos una DSR (100) comprende:
 - un transformador (120) de una sola espira (STT) fijado en torno a un conductor (108); y
 - un controlador (130) configurado para insertar una inductancia de magnetización en el conductor (108) cuando la corriente de línea del conductor alcanza un valor predeterminado.
2. El sistema de la reivindicación 1 en el que el STT (120) comprende, además:
 - 10 dos secciones (132) de núcleo dividido;
 - un devanado (134); y
 - un entrehierro (138), estando configurado el entrehierro (138) de tal manera que se produzca la inductancia de magnetización cuando las secciones (132) de núcleo dividido se fijen en torno al conductor (108).
3. El sistema de la reivindicación 1 que, además, comprende un conmutador (136) de contacto que cortocircuita el devanado cuando el conmutador (136) de contacto está en una condición cerrada.
4. El sistema de la reivindicación 1 que, además, comprende una fuente (128) de alimentación derivada de la corriente de línea del conductor.
5. El sistema de la reivindicación 3 en el que el controlador (130) está configurado, además, para permitir la inserción de la inductancia de magnetización abriendo el conmutador (136) de contacto.
- 20 6. El sistema de la reivindicación 1 en el que el controlador (130) está configurado, además, para retirar la inductancia de magnetización cuando la corriente de línea del conductor cae por debajo del valor predeterminado.
7. El sistema de la reivindicación 1 que, además, comprende un tiristor (124) que, cuando se abre, permite la inserción de la inductancia de magnetización en el conductor (108) y que, cuando se cierra, permite la inserción de una reactancia de fuga de STT en el conductor (108).
- 25 8. Un procedimiento de implementación de un control de sobrecarga de líneas mediante la inserción de una impedancia en serie en un conductor (108), comprendiendo el procedimiento:
 - 30 proporcionar una inductancia de magnetización mediante una reactancia (100) en serie distribuida (DSR); y hacer que la inductancia de magnetización se inserte en el conductor (108) cuando la corriente de línea del conductor alcance un valor predeterminado, **caracterizado porque** la DSR (100) comprende un transformador (120) de una sola espira (STT) fijado en torno a un conductor (108) en el que un entrehierro (138) está configurado para proporcionar la inductancia de magnetización.
9. El procedimiento de la reivindicación 8 que, además, comprende derivar potencia para un controlador (130) de la corriente de línea del conductor.

35

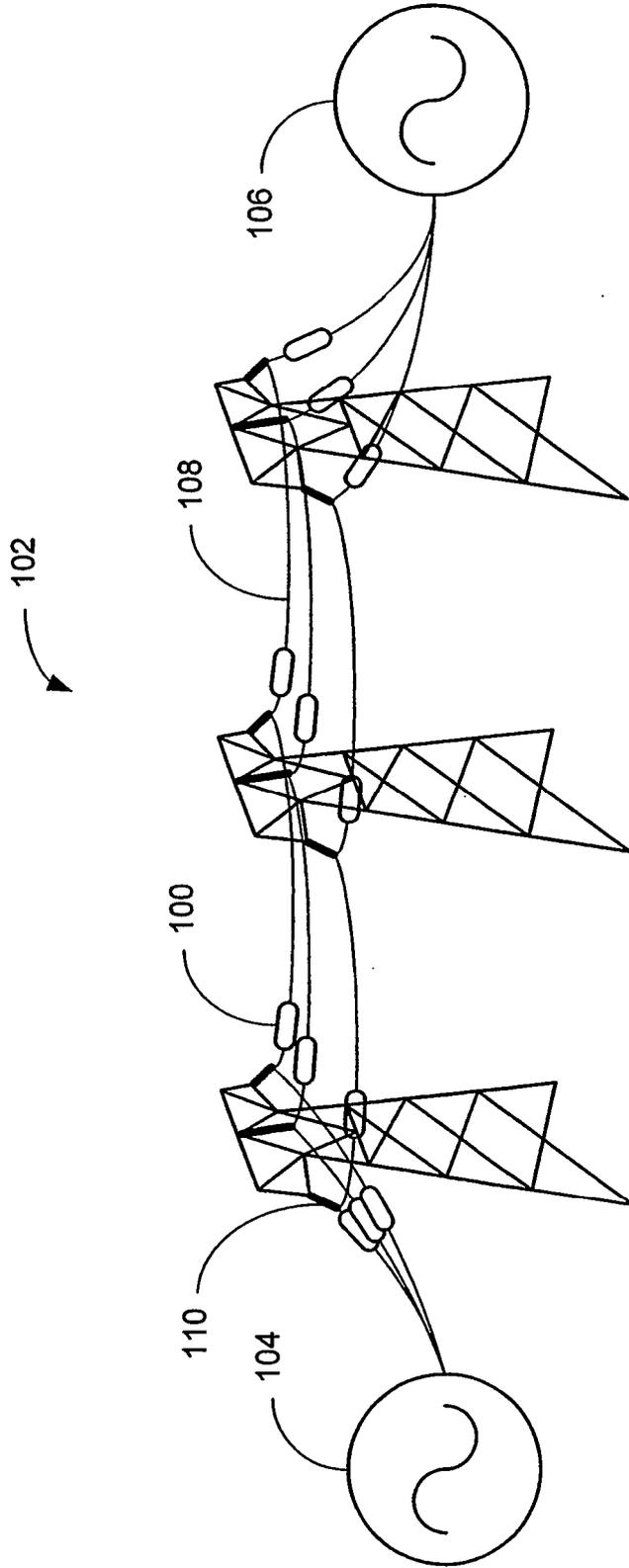


FIG. 1

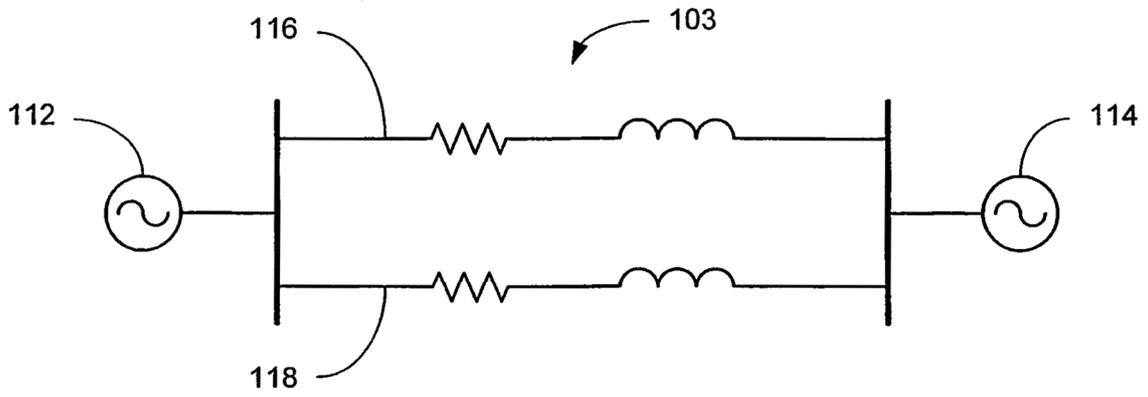


FIG. 2

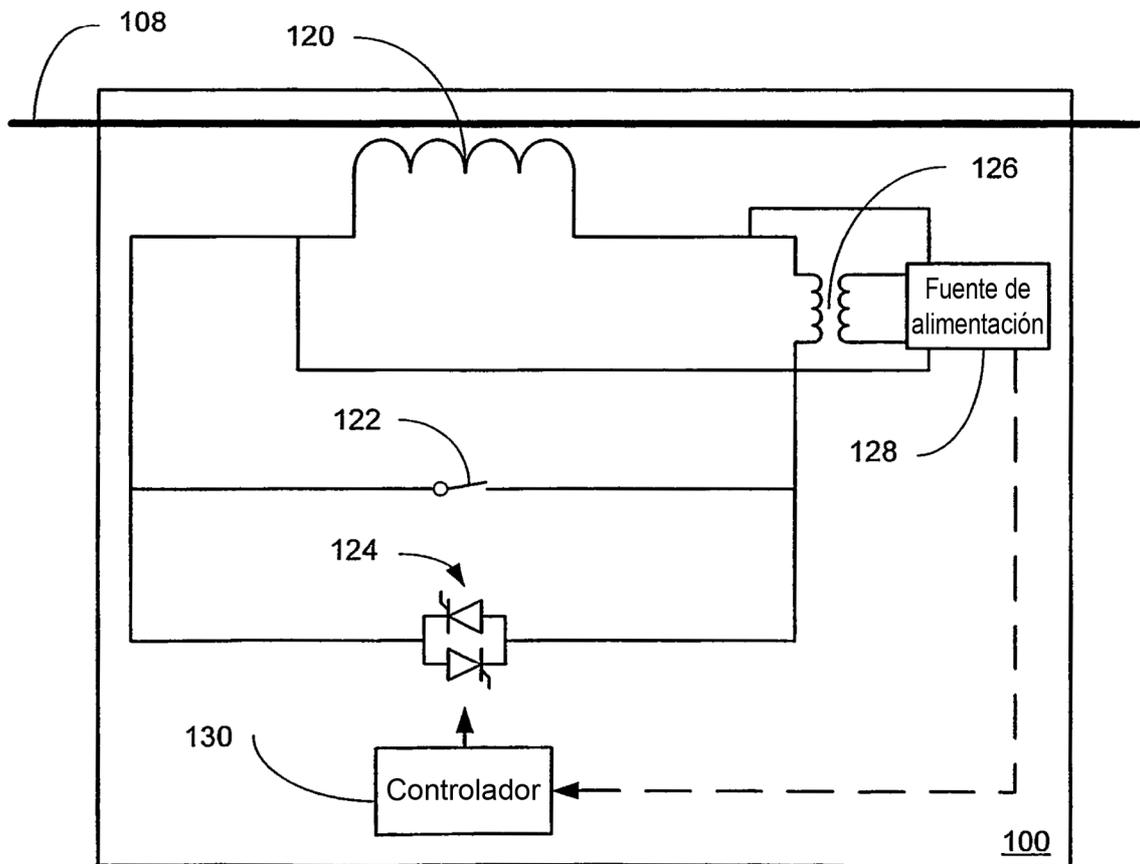


FIG. 3

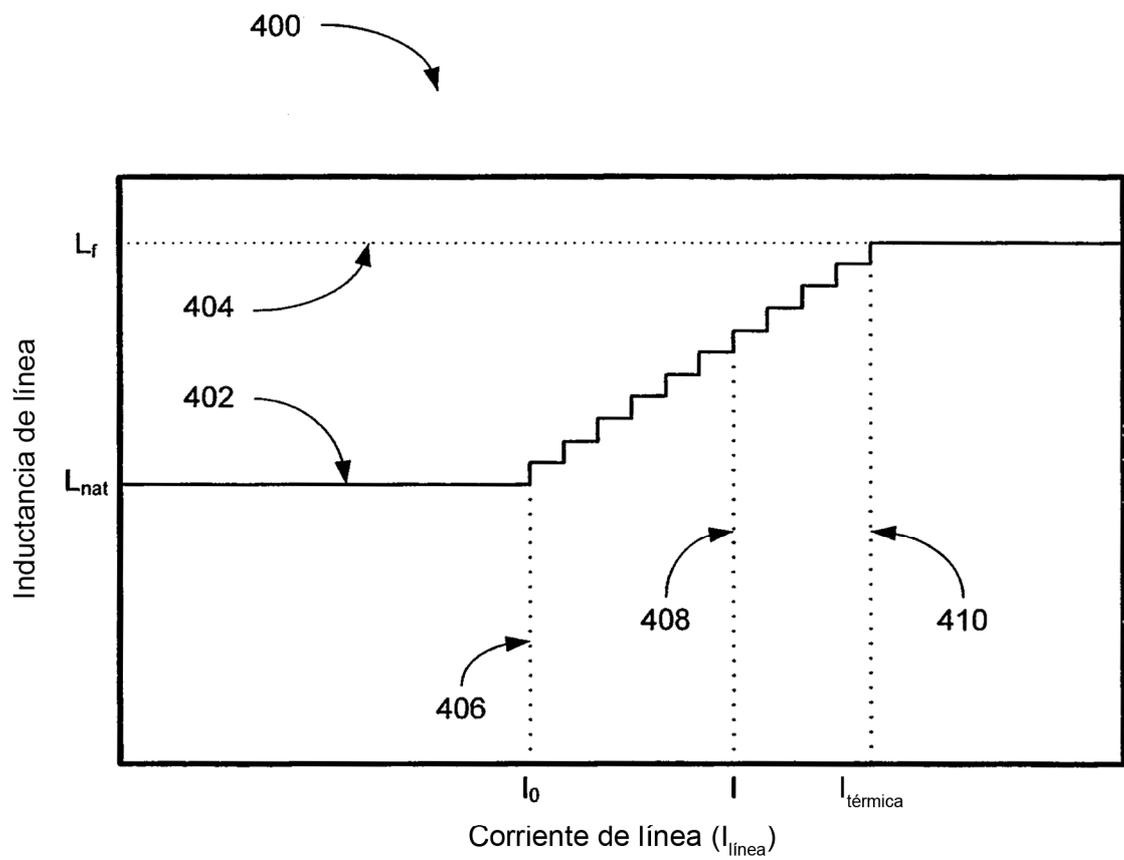


FIG. 4

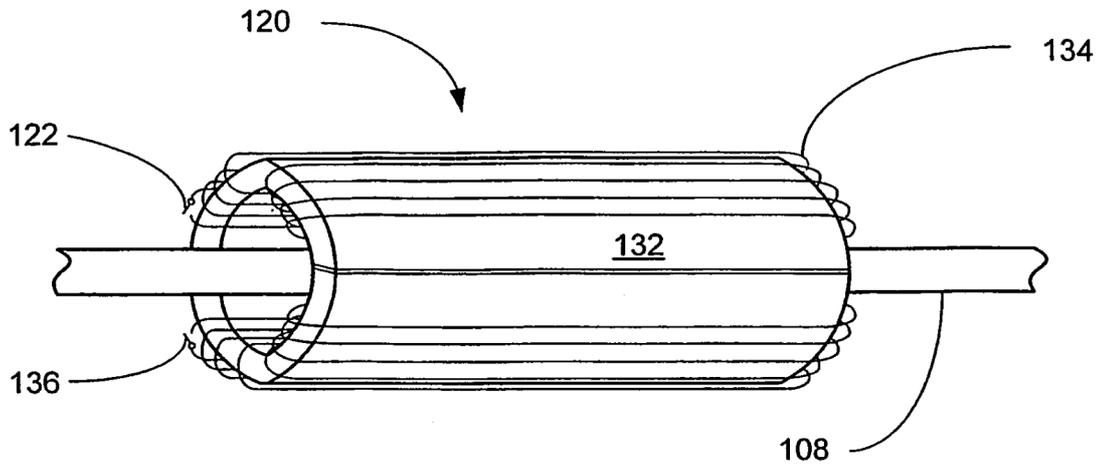


FIG. 5A

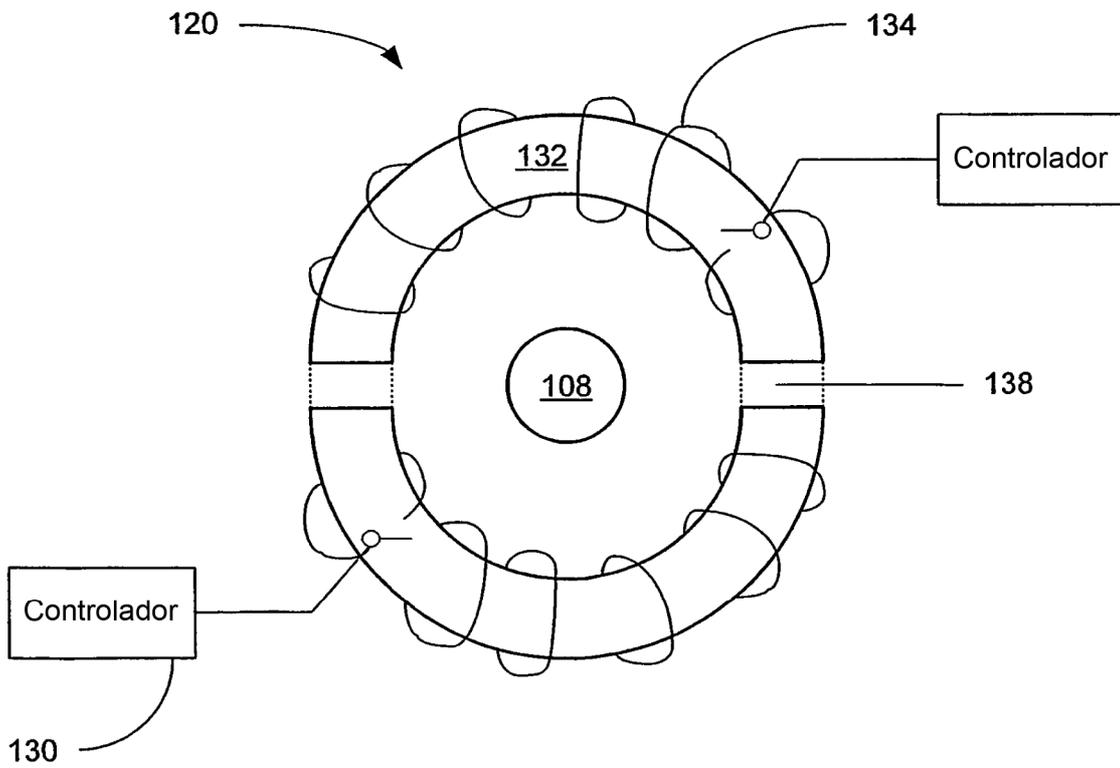


FIG. 5B

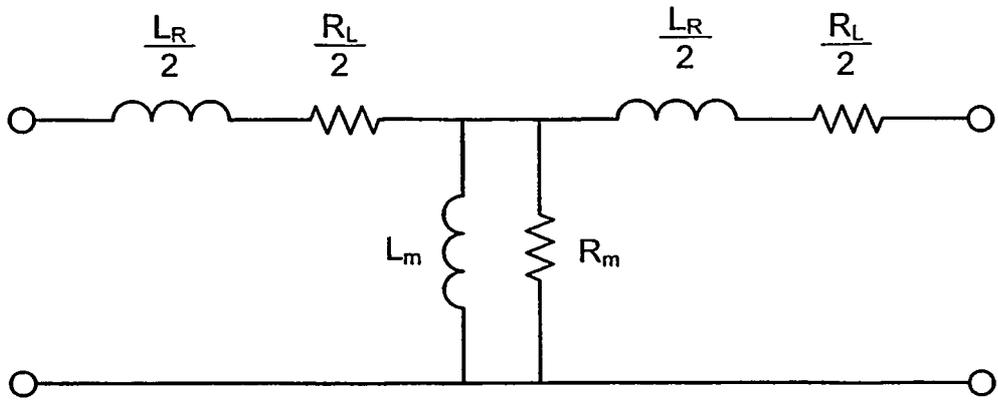


FIG. 6

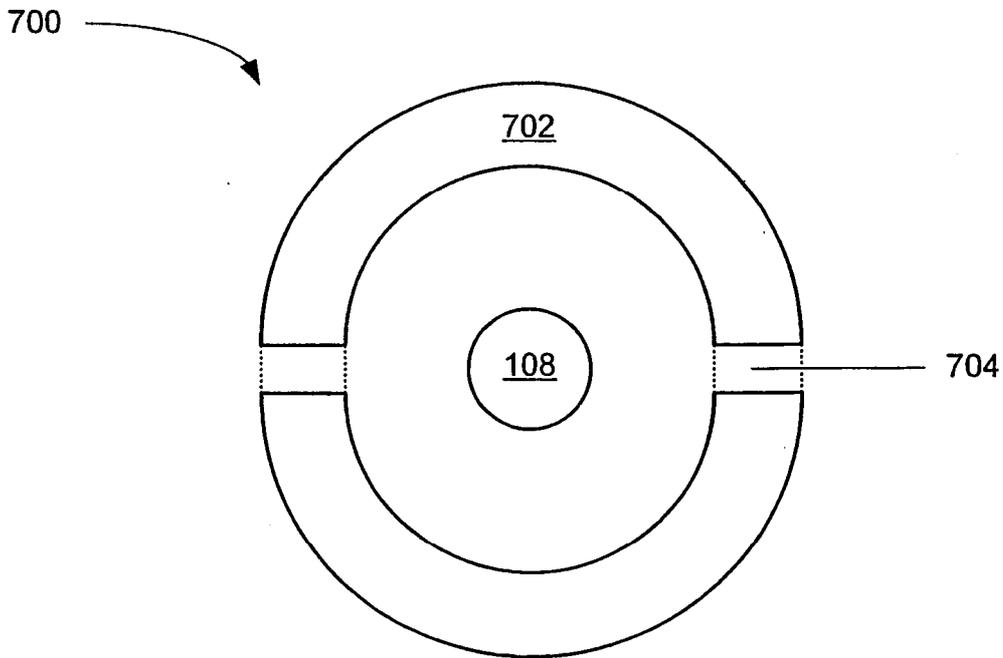


FIG. 7

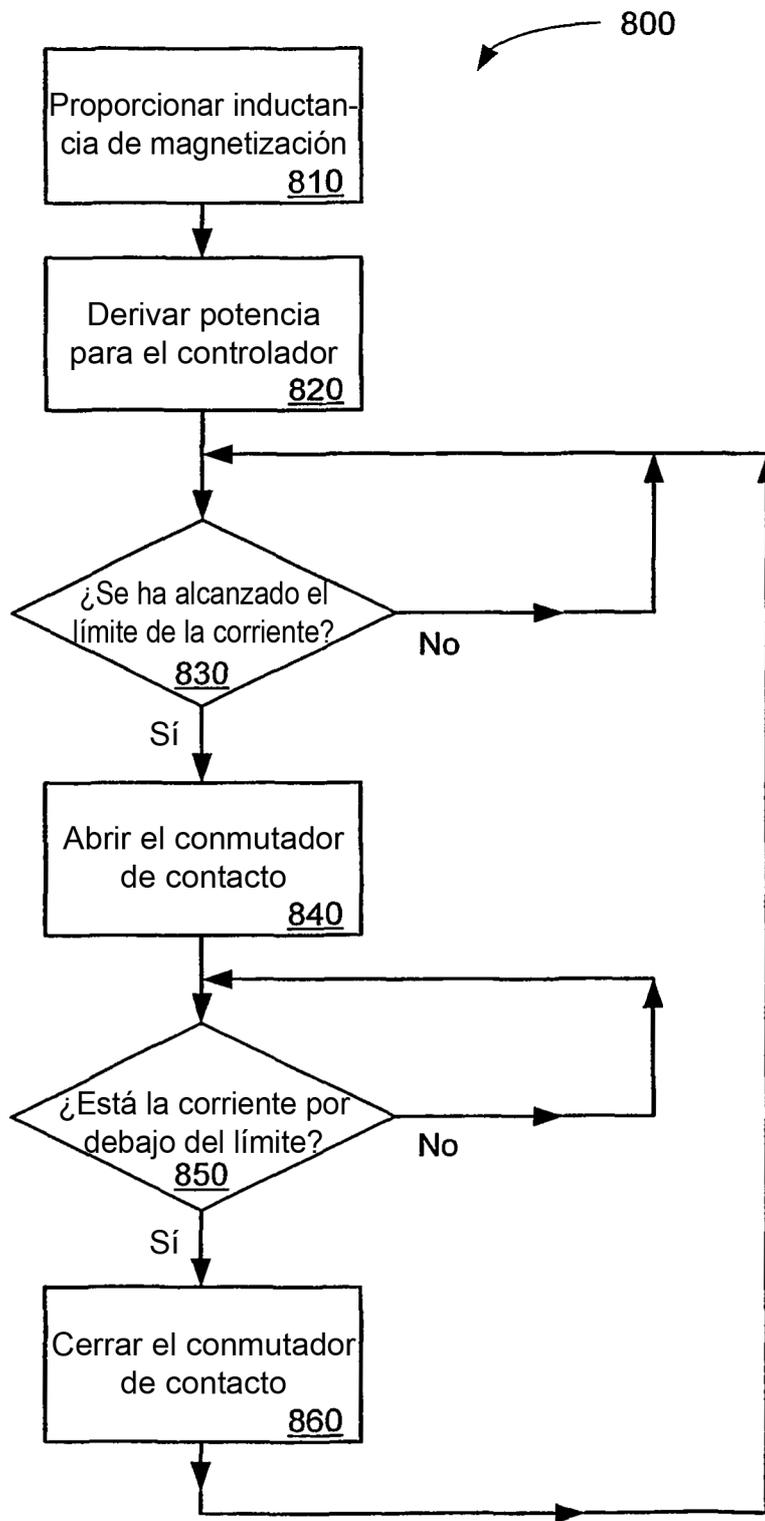


FIG. 8

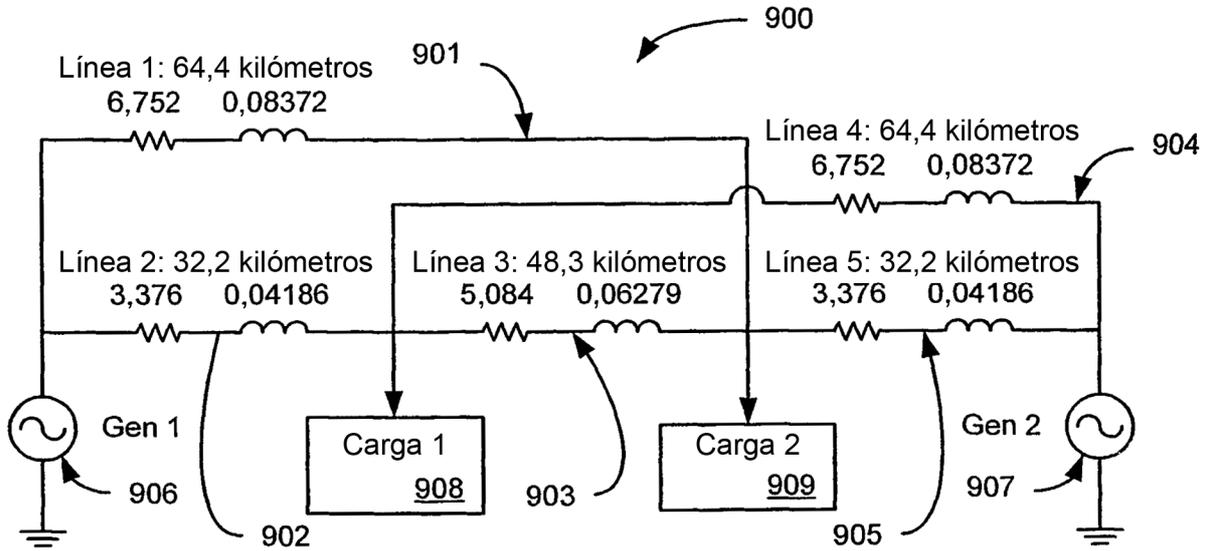


FIG. 9

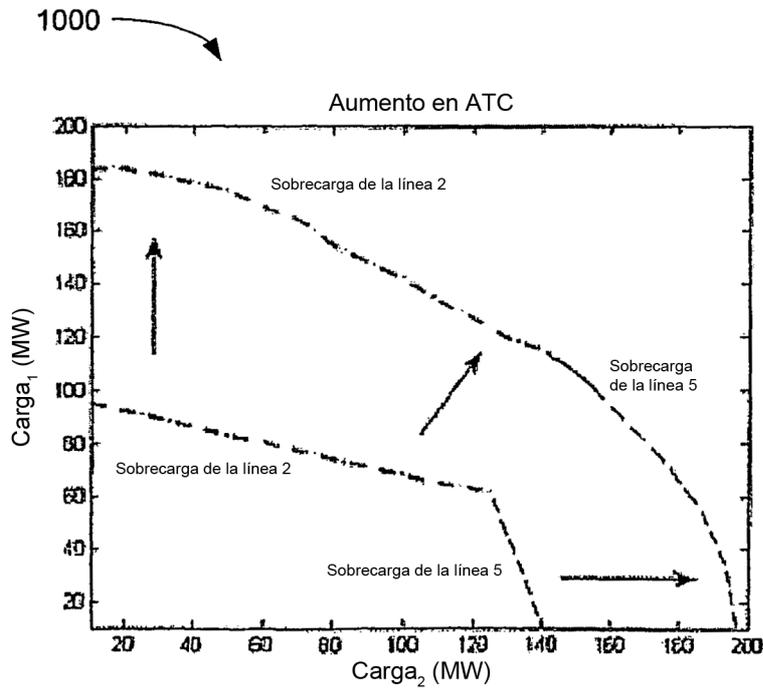


FIG. 10