

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 434 107**

21 Número de solicitud: 201290015

51 Int. Cl.:

H02H 3/00

(2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A2

22 Fecha de presentación:

16.09.2010

30 Prioridad:

17.09.2009 US 12/561,962

43 Fecha de publicación de la solicitud:

13.12.2013

71 Solicitantes:

**SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES,
INC. (100.0%)
2350 NE Hopkins Court
99163 Pullman US**

72 Inventor/es:

**KASZTENNY, Bogdan Z. y
FISCHER, Normann**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

54 Título: **Procedimiento para la protección diferencial de transformadores**

57 Resumen:

Se proporciona un procedimiento para la protección diferencial de transformador midiendo una pluralidad de corrientes correspondientes a un primer conjunto de bobinados y a un segundo conjunto de bobinados de un transformador, y compensando las corrientes en base a sus respectivos flujos a través del primer conjunto de bobinados, o bien a través del segundo conjunto de bobinados. Las corrientes compensadas pueden aumentarse intencionalmente para compensar condiciones de corriente de magnetización y/o de sobre-excitación estática, asociadas al transformador. El aumento basado en la sobre-excitación estática, por ejemplo, puede basarse bien en la restricción de armónicos o bien en una adición de una razón V/Hz a una señal restrictiva. Se calcula una razón compleja de corrientes correspondiente a la pluralidad de corrientes compensadas. La razón compleja de corrientes puede basarse en un aparato de suministro eléctrico equivalente de dos terminales. Luego, se aplica un análisis de plano alfa a la razón compleja de corrientes. En base al análisis de plano alfa, se activa selectivamente un aparato de suministro eléctrico que incluye el transformador.

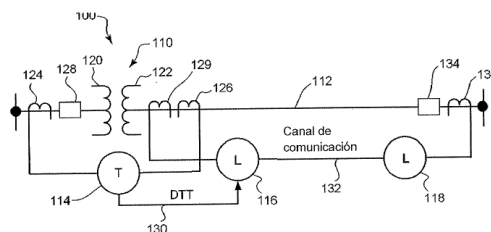


FIG. 1

DESCRIPCIÓN

Procedimiento para la Protección diferencial de transformadores

Objeto de la invención

5 Esta invención se refiere a sistemas de protección diferencial. Más específicamente, esta invención incluye sistemas y procedimientos para la protección diferencial de transformadores, usando un análisis de plano alfa, restricción de armónicos y / o restricción de sobre-excitación en base a una medición de voltios por hercio (V/Hz).

Antecedentes de la invención

10 La protección diferencial de transformadores se basa en la comparación de variables medidas asociadas a un transformador. Por ejemplo, la protección diferencial de transformadores puede incluir comparar los valores instantáneos de las corrientes de fase en extremos distintos del transformador (o en extremos distintos de una línea de suministro eléctrico u otro aparato de suministro eléctrico que incluya un transformador). La comparación de corriente incluye tanto el valor absoluto (magnitud) como la fase de los valores medidos.

15 Antes de que se comparen las corrientes de los bobinados individuales de transformadores, se compensan para las conexiones de bobinado (p. ej., usando el emparejamiento de grupos vectoriales, el emparejamiento de razones y el emparejamiento de secuencias cero) según la técnica de protección diferencial de transformadores. Por ejemplo, las corrientes en los extremos individuales de un aparato de suministro eléctrico que incluye un transformador de energía pueden emparejarse con respecto a transformaciones de valores absolutos, resultantes de razones calificadas de transformación del transformador y de un transformador de corriente. Debido a que la fase de las variables medidas también está incluida en la comparación de corriente, las relaciones de fase de las corrientes de fase emparejadas por amplitud también se emparejan de acuerdo a un respectivo grupo vectorial.

20 Después de que se han emparejado las corrientes de los extremos individuales, el aparato de suministro eléctrico que incluye el transformador puede verse como un nodo de corriente, en el cual la suma de las corrientes de todos los extremos (p. ej., una corriente diferencial) es igual a cero en la operación libre de fallos, en condiciones idealizadas. En otras palabras, en condiciones ideales, solamente un fallo interno causa que la corriente diferencial difiera del cero. En la práctica, sin embargo, la corriente de magnetización y las condiciones de sobre-excitación asociadas al transformador, junto con otras condiciones asociadas al aparato de suministro eléctrico (p. ej., errores de medición) causan que la corriente diferencial difiera de cero. Por tanto, las determinaciones de fallos internos no se basan únicamente en el valor de la corriente diferencial. En cambio, las determinaciones de fallos internos también se basan en una función de una corriente restrictiva, que representa una corriente de paso del aparato de suministro eléctrico que se está protegiendo, y en un análisis más exhaustivo de la corriente diferencial.

25 En un sistema de distribución de suministro eléctrico, por ejemplo, las líneas de sub-transmisión pueden operarse con transformadores en línea, sin un interruptor entre la línea y el transformador. Estos dos recursos pueden protegerse con una única zona de protección. Si se usa un relé diferencial de corriente para la protección, las funciones diferenciales de corriente del relé deberían compensar las conexiones de bobinado del transformador, y proporcionar una seguridad adecuada durante la magnetización y las condiciones de sobre-excitación. La corriente de magnetización de un transformador de energía se hace presente como una señal diferencial espuria y (sin bloqueo o restricción adecuados) puede causar una operación de retransmisión no deseada. La sobre-excitación estática del núcleo del transformador, debido al alto voltaje y / o a la baja frecuencia, también puede crear una falsa corriente diferencial, y debería asimismo bloquearse o restringirse.

30 El bloqueo de armónicos por magnetización y sobre-excitación puede llevarse a cabo midiendo los armónicos segundo y quinto en la corriente diferencial y comparándolos con umbrales del usuario. El bloqueo de fase cruzada o el cuarto armónico también puede usarse, según el diseño de relés y las preferencias del usuario.

35 Un problema del uso del quinto armónico para la restricción estática de la sobre-excitación es que la tasa de muestreo del relé diferencial de corriente de línea puede ser demasiado baja para medir adecuadamente el quinto armónico de la corriente diferencial. Desde una perspectiva de diseño de relé, el operar con un canal de comunicación de un ancho de banda limitado es una restricción general de un sistema diferencial de corriente de línea basado en microprocesadores. Históricamente, y prácticamente hasta hoy, los relés diferenciales de corriente funcionan con canales de 64 kbps. Incluso aunque las conexiones de fibra de punto a punto permiten anchos de banda en la gama de las decenas de megabits por segundo, y que los canales multiplexados pueden solicitarse con un ancho de banda de Nx64 kbps, el ancho de banda de 64 kbps continúa siendo un escenario común de aplicación.

40 La protección diferencial de corriente puede llevarse a cabo usando bien un principio porcentual de protección diferencial o bien un principio de protección de plano alfa (expuesto en detalle más adelante) para detectar fallos. El principio porcentual de protección diferencial compara la magnitud de una corriente diferencial con un cierto porcentaje de una corriente restrictiva. El principio de protección de plano alfa mitiga los problemas con la sincronización basada en las comunicaciones, entre múltiples relés en un sistema diferencial de corriente. En general, sin embargo, el principio de protección del plano alfa carece de

soporte para el concepto de restricción de armónicos, que puede usarse para tratar las corrientes de magnetización y las condiciones de sobre-excitación del núcleo asociadas a los transformadores.

Un sistema de protección de plano alfa se revela en la Patente Estadounidense N° 6.518.767, titulada "Sistema de protección diferencial de línea para una línea de alta tensión", que está cedida al cesionario de la presente descripción, y que se incorpora por tanto a la presente memoria a todos los efectos. El principio de protección diferencial de corriente de plano alfa (o principio de plano alfa) revelado en la Patente Estadounidense N° 6.518.767 proporciona un sistema de protección diferencial de línea que, si bien aún depende de un canal de comunicación, incluye mejoras significativas con respecto a otras consideraciones de sistema, incluso una alta cobertura de resistencia a fallos y características operativas y sensibilidad mejoradas, manteniendo a la vez la seguridad del sistema de suministro eléctrico.

10 **Descripción de la invención**

La presente invención se refiere a un procedimiento para la protección diferencial de transformadores, que comprende:

- medir una pluralidad de corrientes correspondientes a un primer conjunto de bobinados y a un segundo conjunto de bobinados de un transformador;
- compensar la pluralidad de corrientes medidas en base a sus respectivos flujos a través del primer conjunto de bobinados, o bien a través del segundo conjunto de bobinados, en donde la compensación se basa en un modelo de un nodo de corriente ideal, teniendo el modelo igual flujo de corriente hacia y desde el nodo de corriente en el funcionamiento libre de fallos;
- calcular una razón compleja de corrientes correspondiente a la pluralidad de corrientes compensadas;
- aplicar un análisis de plano alfa a la razón compleja de corrientes; y
- activar selectivamente, en base al análisis de plano alfa, un aparato de suministro eléctrico que incluye el transformador.

Otro aspecto de la invención se refiere a un procedimiento para la protección diferencial de transformadores que comprende:

- medir una pluralidad de corrientes correspondientes a un primer conjunto de bobinados y a un segundo conjunto de bobinados de un transformador;
- compensar la pluralidad de corrientes medidas en base a sus respectivos flujos a través del primer conjunto de bobinados, o bien a través del segundo conjunto de bobinados, en donde la compensación se basa en un modelo de un nodo de corriente ideal, teniendo el modelo igual flujo de corriente hacia y desde el nodo de corriente, en el funcionamiento libre de fallos;
- calcular una corriente diferencial que comprende una suma de las corrientes compensadas;
- calcular una corriente restrictiva correspondiente a las corrientes compensadas;
- determinar un voltaje y una frecuencia aplicados al transformador;
- calcular una razón de voltios por hercio (V/Hz) en base al voltaje y frecuencia determinados aplicados al transformador;
- comparar la razón V/Hz con un valor de umbral;
- en respuesta a la comparación, aumentar selectivamente la corriente restrictiva añadiendo un valor basado en la razón V/Hz a la corriente restrictiva; y
- activar selectivamente un aparato de suministro eléctrico que incluye el transformador en base a un análisis diferencial de corriente de línea que usa la corriente diferencial y la corriente restrictiva aumentada.

Breve descripción de los dibujos

Se describen realizaciones no limitadoras y no exhaustivas de la invención, incluyendo diversas realizaciones de la invención con referencia a las figuras, en las cuales:

la FIG. 1 es un diagrama de bloques de un aparato de suministro eléctrico que incluye un transformador en línea y una línea de transmisión protegida por dos zonas de protección, según una realización;

la FIG. 2 es un diagrama de bloques del aparato de suministro eléctrico mostrado en la FIG. 1, protegido por una única zona de protección, según una realización;

la FIG. 3 es un diagrama de flujo de un procedimiento para la protección diferencial de transformadores, usando el plano alfa,

según una realización;

la FIG. 4 es un diagrama de bloques de un módulo para la determinación de corrientes diferenciales parciales y restrictivas parciales, según una realización;

5 la FIG. 5 es un diagrama de flujo de un procedimiento para la protección diferencial de transformadores, con restricción de armónicos, según una realización;

la FIG. 6 es un diagrama de flujo de un procedimiento para la protección diferencial de transformadores que incluye el aumento de corrientes diferenciales parciales y / o de corrientes restrictivas parciales, según una realización;

la FIG. 7 es un diagrama de flujo de un procedimiento para la protección diferencial de transformadores, usando restricción de sobre-excitación estática, según una realización;

10 la FIG. 8 es un diagrama simplificado de un plano alfa (de ratio o razones de corrientes);

la FIG. 9 ilustra gráficamente una región restrictiva y una región operativa en un plano alfa, usadas según una realización para decisiones de determinación de fallos;

la FIG. 10 ilustra esquemáticamente una zona diferencial general de N terminales de protección, según una realización;

la FIG. 11 ilustra esquemáticamente una zona equivalente de dos terminales de protección, según una realización;

15 la FIG. 12A es un diagrama de flujo de un procedimiento para la protección diferencial de corrientes de un aparato de suministro eléctrico multi-terminal, según una realización;

la FIG. 12B es un diagrama de flujo de un procedimiento para convertir una corriente diferencial y una corriente restrictiva en las corrientes equivalentes, según una realización;

la FIG. 13A ilustra gráficamente un plano alfa para una aplicación de tres terminales (N=3), según una realización ejemplar;

20 la FIG. 13B ilustra gráficamente un plano alfa para el equivalente de dos terminales de la realización mostrada en la FIG. 13A, según una realización;

las FIGS. 14A y 14B ilustran gráficamente los respectivos planos alfa para el caso de un fallo interno, según una realización;

la FIG. 15 ilustra esquemáticamente una configuración de línea de interruptor dual de tres terminales, según una realización;

25 la FIG. 16 ilustra gráficos de diversas señales durante un fallo AB externo en la configuración mostrada en la FIG. 15, según una realización;

la FIG. 17 es un diagrama en bloques de un aparato de suministro eléctrico que incluye un transformador de dos bobinados conectados en línea entre una línea de transmisión y un bus, según una realización;

la FIG. 18 es un diagrama en bloques de un aparato de suministro eléctrico que incluye un transformador de tres bobinados, conectado en línea a una línea de transmisión, según una realización; y

30 la FIG. 19 es un diagrama en bloques de un aparato de suministro eléctrico que incluye un transformador de dos bobinados y una línea de transmisión derivada, según una realización.

Descripción detallada de realizaciones preferidas

Según ciertas realizaciones reveladas en el presente documento, se proporciona un plano alfa que permite la restricción de armónicos para la protección diferencial de transformadores. En tales realizaciones, los armónicos de interés (p. ej., los armónicos segundo, cuarto y / o quinto) en la corriente diferencial se añaden a términos de restricción, usando multiplicadores adecuados, según los principios de la restricción de armónicos. Por ejemplo, la restricción de la corriente de magnetización se implementa, según ciertas realizaciones, calculando armónicos en la corriente diferencial, habitualmente el segundo armónico y el cuarto armónico, y añadiendo magnitudes de los armónicos a la señal restrictiva, con el uso de coeficientes de mezcla configurables por el usuario. De esta manera, la corriente restrictiva se estimula lo bastante como para que las corrientes del plano alfa obtenidas de la corriente restrictiva caigan en la región de bloqueo de la característica, lo que logra el objetivo de restringir la función diferencial del plano alfa durante las condiciones de magnetización.

Además, o en otras realizaciones, la corriente restrictiva se aumenta en base a la sobre-excitación asociada al transformador. En una tal realización, la restricción estática de la sobre-excitación se logra determinando la magnitud del quinto armónico de la corriente diferencial, que se añade luego (con un coeficiente de mezcla) a la corriente restrictiva. Este añadido aumenta la restricción y empuja el plano alfa hacia la región de bloqueo, de manera similar a la restricción de corriente de magnetización descrita anteriormente.

Así, en otra realización, se proporciona la restricción estática de sobre-excitación sin usar el quinto armónico de la corriente diferencial y sin aumentar esencialmente la carga útil de comunicación entre relés remotamente situados. Según lo expuesto anteriormente, la sobre-excitación se debe a aplicar un voltaje demasiado alto y / o demasiado bajo de una frecuencia al transformador, que causa que el núcleo del transformador absorba más corriente. Así, en una realización, cada relé con acceso a una fuente de voltaje calcula una razón de voltios por hercio (V/Hz), lo que puede ser responsable del sobreflujo del núcleo del transformador. Cada relé compara su medición de V/Hz con un valor umbral. Si la razón V/Hz medida es demasiado alta (habitualmente por encima del 110% de su valor nominal), el relé añade un valor basado en la razón V/Hz a su corriente restrictiva local (lo que representa un valor parcial de la corriente restrictiva global).

El relé envía entonces su corriente restrictiva local, junto con una indicación de si ha aumentado o no su corriente restrictiva local, en base a su valor de V/Hz. Análogamente, el relé recibe señales desde los otros relés, con indicaciones de si han compensado o no sus respectivas corrientes restrictivas, en base a sus propias determinaciones de valores de V/Hz. Como se expone en detalle más adelante, el efecto neto es un estímulo en la corriente restrictiva que puede usarse, bien con el principio porcentual de protección diferencial, o bien con el principio de protección del plano alfa. Al usar el principio del plano alfa, por ejemplo, la corriente restrictiva estimulada empuja el plano alfa equivalente hacia su región de bloqueo, logrando así el objetivo de restringir durante las condiciones de sobre-excitación.

Los sistemas y procedimientos revelados en el presente documento pueden usarse para proporcionar protección diferencial de corriente a una amplia variedad de transformadores, incluyendo transformadores de energía, autotransformadores, transformadores desplazadores de fase u otros tipos de transformadores. Con fines ilustrativos, ciertas realizaciones ejemplares reveladas en el presente documento proporcionan protección para un transformador en línea de una línea de alta tensión. Un experto apreciará, a partir de la descripción en el presente documento, sin embargo, que los principios revelados pueden aplicarse a cualquier planta protegida o aparato de suministro eléctrico que incluya un transformador. Según se usa en el presente documento, un "aparato de suministro eléctrico" es un término amplio que incluye su significado normal y habitual y que puede incluir, por ejemplo, una línea de alta tensión, un bus de suministro eléctrico, un gran motor, un generador, un transformador, una combinación de los anteriores, o cualquier otro dispositivo o dispositivos que puedan ser retirados de un sistema de suministro eléctrico (p. ej., usando interruptores y / o relés) cuando se detecta un fallo. Un sistema de suministro eléctrico, por ejemplo, puede dividirse en zonas de protección para permitir la retirada de una cantidad mínima de equipos del sistema de suministro eléctrico durante una condición de fallo. Cada zona puede asociarse a su propio sistema de protección, de modo tal que un fallo dentro de una zona específica cause que funcione el correspondiente sistema de protección, mientras que un fallo en otra zona no causará que funcione el sistema de protección. Las fronteras de zonas pueden definirse por la ubicación de los puntos de medición (p. ej., transformadores de corriente (CT)) y los interruptores de circuito que funcionan para aislar la zona.

Las realizaciones de la invención se entenderán mejor con referencia a los dibujos, en los cuales los elementos idénticos están indicados por números idénticos en toda su extensión. En la siguiente descripción, se proporcionan numerosos detalles específicos para una comprensión exhaustiva de las realizaciones descritas en el presente documento. Sin embargo, los expertos en la técnica apreciarán que pueden omitirse uno o más de los detalles específicos, o bien pueden usarse otros procedimientos, componentes o materiales. En algunos casos, las operaciones no se muestran o describen en detalle.

Además, los rasgos, operaciones o características descritos pueden combinarse de cualquier forma adecuada en una o más realizaciones. También se entenderá fácilmente que el orden de las etapas o acciones de los procedimientos descritos con respecto a las realizaciones reveladas puede cambiarse, como será evidente para los expertos en la técnica. Así, cualquier orden en los dibujos o la descripción detallada es solamente a fines ilustrativos y no está concebido para implicar un orden requerido, a menos que se especifique que se requiere un orden.

Las realizaciones pueden incluir varias etapas, que pueden realizarse en instrucciones ejecutables por máquina, para ser ejecutadas por un procesador u ordenador de propósito general o de propósito especial (u otro dispositivo electrónico). Alternativamente, las etapas pueden ser llevadas a cabo por componentes de hardware que incluyen lógica específica para realizar las etapas, o por una combinación de hardware, software y / o firmware.

Las realizaciones también pueden proporcionarse como un producto de programa de ordenador que incluye un medio legible por máquina con instrucciones almacenadas en el mismo, que pueden ser usadas para programar un ordenador (u otro dispositivo electrónico) a fin de llevar a cabo los procesos descritos en el presente documento. El medio legible por máquina puede incluir, pero no se limita a, controladores de disco rígido, disquetes flexibles, discos ópticos, CD-ROM, DVD-ROM, memorias RAM, memorias EPROM, memorias EEPROM, tarjetas magnéticas u ópticas, dispositivos de memoria de estado sólido, u otros tipos de medios legibles por ordenador o por medios, adecuados para almacenar instrucciones electrónicas.

Protección de transformadores usando el plano alfa

Como se ha expuesto anteriormente, ciertas realizaciones ejemplares incluyen la protección de un transformador en línea. Una línea de alta tensión y un transformador pueden instalarse sin un interruptor en medio para separar los dos equipos. Esto puede ser gobernado por la economía, especialmente en casos donde la línea no está derivada ni es multi-terminal y el transformador no alimenta ninguna otra carga. De esta manera, instalar un interruptor separador no añade ninguna flexibilidad

operativa. La falta de un interruptor separador pone tanto a la línea como al transformador en la misma zona de activación, independientemente de qué elemento requiere efectivamente aislamiento del resto del sistema. Como se expone más adelante, hay muchas configuraciones posibles para medir corrientes que fluyen a través de un aparato de suministro eléctrico que incluye un transformador en línea. Las realizaciones reveladas proporcionan un análisis del plano alfa para determinar fallos internos, independientemente de la configuración específica o del número de corrientes medidas.

En ciertas realizaciones, por ejemplo, se usan dos zonas de protección incluso si cada zona activa tanto la línea como el transformador. Por ejemplo, la FIG. 1 es un diagrama en bloques de un aparato 100 de suministro eléctrico que incluye un transformador 110 en línea y una línea 112 de transmisión protegida por dos zonas de protección, según una realización. En esta realización ejemplar, un relé 114 diferencial de corriente de transformador corresponde a la primera zona de protección que se basa en medir corrientes de bobinado que fluyen a través de un primer conjunto de bobinados 120 y un segundo conjunto de bobinados 122 del transformador 110. Un experto comprenderá que las realizaciones reveladas en el presente documento pueden aplicarse a realizaciones con más de dos conjuntos de bobinados. Un primer relé diferencial 116 de corriente de línea y un segundo relé diferencial 118 de corriente de línea corresponden a una segunda zona de protección que se basa en medir corrientes en cada extremo de la línea 112 de transmisión. Como se expone en detalle más adelante, cualquiera de los relés diferenciales 114, 116, 118 de corriente puede activar selectivamente el aparato 100 de suministro eléctrico (p. ej., aislando el transformador 110 y la línea 112 de transmisión de una carga o de otras partes de un sistema de distribución de suministro eléctrico) en base a un análisis de plano alfa.

Según se muestra en la FIG. 1, un terminal local del aparato 100 de suministro eléctrico incluye el transformador 110, el relé diferencial 114 de corriente de transformador, un primer transformador 124 de corriente (CT) configurado para medir corrientes de bobinado correspondientes al primer conjunto de bobinados 120, un segundo CT 126 configurado para medir corrientes de bobinado correspondientes al segundo conjunto de bobinados 122, un primer interruptor 128 eléctricamente acoplado al primer conjunto de bobinados 120, el primer relé diferencial 116 de corriente de línea y un tercer CT configurado para medir corrientes que fluyen a través de un primer extremo de la línea 112 de transmisión. Un experto apreciará, a partir de la descripción en el presente documento, que, debido a que el primer extremo de la línea 112 de transmisión está eléctricamente conectado con el segundo bobinado 122 del transformador dentro del terminal local, el segundo CT 126 y el tercer CT 129 pueden combinarse, en ciertas realizaciones, en un único CT. Según se muestra, en ciertas realizaciones el relé diferencial 114 de corriente de transformador puede operar el interruptor remoto mediante el primer relé diferencial 116 de corriente de línea, en donde el relé diferencial 114 de corriente de transformador proporciona un comando de activación al primer relé diferencial 116 de corriente de línea a través de una señal de activación de transferencia directa (DTT) 130. Un terminal remoto del aparato 100 de suministro eléctrico incluye el segundo relé diferencial 118 de corriente de línea que está en comunicación con el primer relé diferencial 116 de corriente de línea a través de un canal 132 de comunicación, un segundo interruptor 134 y un cuarto CT 136 configurado para medir corrientes que fluyen a través de un segundo extremo de la línea 112 de transmisión.

Para la primera zona de protección, el relé diferencial 114 de corriente de transformador recibe un primer valor de corriente desde el primer CT 124 y un segundo valor de corriente desde el segundo CT 126. En base a los valores de corriente primero y segundo, el relé diferencial 114 de corriente de transformador usa los procedimientos revelados en el presente documento para supervisar el aparato 100 de suministro eléctrico en busca de fallos dentro del transformador 110. Cuando el sistema detecta una condición de fallo, el relé diferencial 114 de corriente de transformador envía un comando de activación usando la señal DTT 130 al primer relé diferencial 116 de corriente de línea, que se comunica a través del canal 132 de comunicación con el segundo relé diferencial 118 de corriente de línea para activar el segundo interruptor 134. Así, el relé diferencial 114 de corriente de transformador puede aislar al transformador 110 y a la línea 112 de transmisión.

Para la segunda zona de protección, el primer relé diferencial 116 de corriente de línea recibe un tercer valor de corriente desde el tercer CT 129 y el segundo relé diferencial 118 de corriente de línea recibe un cuarto valor de corriente desde el cuarto CT 136. Como se expone más adelante, los relés diferenciales 116, 118 de corriente de línea primero y segundo intercambian información correspondiente a sus corrientes, respectivamente medidas, para supervisar el aparato 100 de suministro eléctrico en busca de fallos internos. Cuando el sistema detecta una condición de fallo interno, los relés diferenciales 116, 118 de corriente de línea cooperan para activar los interruptores 128, 134 primero y segundo. Así, los relés diferenciales 116, 118 de corriente de línea primero y segundo cooperan para aislar al transformador 110 y a la línea 112 de transmisión.

Usando relés diseñados para un tipo dado de aparato, puede aumentarse el rendimiento global del sistema de protección. Por ejemplo, usando el relé diferencial 114 de corriente de transformador, puede aumentarse la sensibilidad a fallos de transformador.

En ciertas realizaciones, sin embargo, las dos zonas de medición se combinan en un relé diferencial de corriente de línea que incluye una característica de transformador en línea. Por ejemplo, la FIG. 2 es un diagrama en bloques del aparato 100 de suministro eléctrico mostrado en la FIG. 1, protegido por una única zona de protección, según una realización. En esta realización ejemplar, tanto un primer relé diferencial 210 de corriente de línea como un segundo relé diferencial de corriente de línea están configurados para proporcionar protección diferencial de transformador. En el terminal local, el primer relé

diferencial de corriente de línea recibe valores de corriente desde el CT 124, correspondiente al primer conjunto de bobinados 120. De manera similar, en el segundo terminal, el segundo relé diferencial 212 de corriente de línea recibe valores de corriente desde el CT 136, correspondiente al segundo bobinado 122. Los relés diferenciales 210, 212 de corriente de línea primero y segundo procesan sus respectivas corrientes y se comunican entre sí a través del canal 132 de comunicación, según se expone en detalle más adelante, para supervisar el aparato 100 de suministro eléctrico en busca de fallos internos. Cuando se detecta un fallo interno, los relés diferenciales 210, 212 de corriente de línea primero y segundo activan sus respectivos interruptores 128, 134 para aislar al transformador 110 y a la línea 112 de transmisión de las cargas o de otras partes del sistema de transmisión de suministro eléctrico. En comparación con la realización ilustrada en la FIG. 1, la realización de la FIG. 2 simplifica la protección del aparato 100 de suministro eléctrico usando menos relés, usando menos cables y usando menos trabajo para establecer y mantener el sistema de protección. Otros ejemplos de configuraciones de sistemas de protección se exponen más adelante. Un experto comprenderá, a partir de la descripción en el presente documento, que las realizaciones de protección de transformadores reveladas en el presente documento pueden usarse con cualquier número de zonas de protección, con cualquier tipo de transformador y / o con cualquier tipo de aparato de suministro eléctrico (incluso un aparato de suministro eléctrico que solamente incluya un transformador de energía).

La FIG. 3 es un diagrama de flujo de un procedimiento 300 para la protección diferencial de transformadores que usa el plano alfa, según una realización. El procedimiento 300 incluye medir 310 corrientes correspondientes a bobinados de transformador y compensar 312 las corrientes medidas en base a sus respectivos flujos a través de los bobinados del transformador y a un modelo de un nodo de corriente ideal. Según se ha expuesto anteriormente, las corrientes de bobinado se compensan por las conexiones de transformador, para guiarse por la técnica de la protección diferencial de transformadores. Usualmente denominadas emparejamiento de ratios o razones (derivaciones), eliminación de secuencias cero y compensación de grupos vectoriales, las ecuaciones de corriente diferencial efectivamente aparean ciclos de amperios para un transformador sano. Por ejemplo, para un tipo de transformador delta/estrella, las siguientes ecuaciones describen la corriente diferencial I_{DIF} :

$$I_{DIF(1)} = k_{\Delta} \cdot I_{\Delta A} + k_Y \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (I_{YA} - I_{YB}), \quad (1A)$$

$$I_{DIF(2)} = k_{\Delta} \cdot I_{\Delta B} + k_Y \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (I_{YB} - I_{YC}), \quad (1B)$$

$$I_{DIF(3)} = k_{\Delta} \cdot I_{\Delta C} + k_Y \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (I_{YC} - I_{YA}). \quad (1C)$$

En las ecuaciones (1A), (1B) y (1C), denominadas colectivamente la ecuación (1), las corrientes I son fasores o valores instantáneos, las derivaciones k_{Δ} (correspondientes al bobinado delta) y k_Y (correspondientes al bobinado estrella) se basan en el CT y los ratios de transformadores, los índices A, B y C, respectivamente, se refieren a la fase A, la fase B y la fase C de un sistema trifásico, y los índices 1, 2 y 3 se refieren a los bucles o "fases" de la función diferencial.

Como se ha expuesto anteriormente, la corriente restrictiva brinda una noción de la corriente que fluye a través de una zona de protección. Así, según la aplicación específica, la corriente restrictiva I_{RST} puede definirse como la máxima corriente medida (p. ej., allí donde la mayor corriente corresponde a una corriente de fallo externo), una suma de amplitudes de corriente, una suma de corrientes que está dividida entre el número total de corrientes (p. ej., la corriente media) o un producto de corrientes. En las realizaciones ejemplares reveladas en el presente documento, la corriente restrictiva I_{RST} se define como una suma de amplitudes de corriente. Por tanto, continuando con el ejemplo de la ecuación (1), las siguientes ecuaciones describen la corriente restrictiva I_{RST} :

$$I_{RST(1)} = k_{\Delta} \cdot |I_{\Delta A}| + k_Y \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot |I_{YA} - I_{YB}|, \quad (2A)$$

$$I_{RST(2)} = k_{\Delta} \cdot |I_{\Delta B}| + k_Y \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot |I_{YB} - I_{YC}|, \quad (2B)$$

$$I_{RST(3)} = k_{\Delta} \cdot |I_{\Delta C}| + k_Y \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot |I_{YC} - I_{YA}|, \quad (2C)$$

donde $|I|$ representa una magnitud de una corriente I .

Las ecuaciones (2A), (2B) y (2C) pueden denominarse colectivamente la ecuación (2). Un experto apreciará, a partir de la descripción en el presente documento, que la compensación para distintos tipos de transformadores (p. ej., transformadores de dos bobinados, transformadores delta/delta, transformadores estrella/estrella y otras configuraciones de transformadores) dará como resultado distintas corrientes diferenciales y restrictivas. Un experto comprenderá adicionalmente que hay otras maneras de compensar las corrientes de bobinado de un transformador delta/estrella. Por consiguiente, las corrientes diferenciales y restrictivas proporcionadas en la ecuación (1) y la ecuación (2) se proporcionan solamente a modo de ejemplo,

y no como limitación.

Volviendo a la FIG. 3, después de compensar 312 las corrientes medidas, el procedimiento calcula 314 una razón compleja de corrientes en base a las corrientes compensadas. Como se expone en detalle más adelante, el principio del plano alfa determina la presencia de fallos internos analizando una razón compleja k de corrientes entre dos corrientes. Un fallo interno está probablemente presente si la razón compleja k de corrientes está en una región operativa del plano alfa. Por otra parte, un fallo interno es improbable si la razón compleja de corrientes está en una región restrictiva del plano alfa. Así, el procedimiento 300 incluye adicionalmente activar 316 selectivamente un aparato de suministro eléctrico que comprende el transformador (p. ej., el aparato 100 de suministro eléctrico mostrado en las FIGS. 1 y 2), en base a un análisis de plano alfa de la razón compleja de corrientes.

10 **Uso de corrientes diferenciales parciales y corrientes restrictivas parciales**

Para un caso general de un transformador de N bobinados, las corrientes diferenciales y restrictivas son sumas de corrientes de bobinado apareadas por razones y compensadas vectorialmente. Así, una realización determina corrientes diferenciales parciales y restrictivas parciales en cada relé o terminal del aparato de suministro eléctrico compensando las corrientes individuales por conexiones de transformador, en base a la posición de las corrientes con respecto a los diversos bobinados de transformador. Cada terminal o relé transmite entonces sus respectivas corrientes diferenciales parciales y restrictivas parciales a los otros relés del sistema diferencial que protege el aparato de suministro eléctrico. Así, cada relé puede determinar las corrientes diferenciales y restrictivas globales.

Según se expone más adelante, las corrientes diferenciales parciales y restrictivas parciales, y / o las corrientes diferenciales y restrictivas globales, pueden aumentarse antes de ser usadas en un análisis diferencial porcentual o un análisis de plano alfa. En ciertas realizaciones, según se expone más adelante, las corrientes diferenciales y restrictivas globales se usan para determinar corrientes equivalentes de un aparato de suministro eléctrico equivalente de dos terminales, para su uso con el análisis de plano alfa.

Volviendo al ejemplo de transformador delta/estrella asociado a las ecuaciones (1) y (2) anteriores, un terminal de línea asociado al bobinado delta puede llevar a cabo las siguientes operaciones a fin de obtener sus corrientes diferenciales parciales para su transmisión:

$$I_{DIF(1\Delta)} = k_{\Delta} \cdot I_{\Delta A}, \quad (3A)$$

$$I_{DIF(2\Delta)} = k_{\Delta} \cdot I_{\Delta B}, \quad (3B)$$

$$I_{DIF(3\Delta)} = k_{\Delta} \cdot I_{\Delta C}. \quad (3C)$$

Las ecuaciones (3A), (3B) y (3C) pueden denominarse colectivamente ecuación (3). Además, un terminal asociado al bobinado estrella puede llevar a cabo las siguientes operaciones a fin de obtener sus corrientes diferenciales parciales para su transmisión:

$$I_{DIF(1Y)} = k_Y \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (I_{YA} - I_{YB}), \quad (4A)$$

$$I_{DIF(2Y)} = k_Y \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (I_{YB} - I_{YC}), \quad (4B)$$

$$I_{DIF(3Y)} = k_Y \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (I_{YC} - I_{YA}). \quad (4C)$$

Las ecuaciones (4A), (4B) y (4C) pueden denominarse colectivamente ecuación (4). Después de que un terminal ha transmitido sus valores de corriente, recibido valores de señal desde los otros terminales y alineado los valores de corriente, el terminal puede luego determinar las corrientes diferenciales globales sumando las corrientes diferenciales parciales adecuadas. Por ejemplo, $I_{DIF(1)}$ de la ecuación (1A) es la suma de $I_{DIF(1\Delta)}$ de la ecuación (3A) e $I_{DIF(1Y)}$ de la ecuación (4A). De manera similar, las corrientes restrictivas parciales pueden calcularse como las magnitudes de las corrientes correspondientes en las ecuaciones (3) y (4), y combinarse después de la transmisión y la alineación para determinar las corrientes restrictivas globales de la ecuación (2).

Una vez que cada terminal determina sus propias corrientes diferenciales parciales y restrictivas parciales, según ciertas realizaciones, los terminales pueden procesar las corrientes resultantes como si no hubiera ningún transformador en línea. En una realización, por ejemplo, cada terminal resta una contribución local a una corriente de carga de línea a su corriente diferencial parcial. Además o en otras realizaciones, cada terminal puede calcular términos restrictivos de secuencia. Además, o en otras realizaciones, cada terminal puede realizar el bloqueo de armónicos y / o la restricción de armónicos, expuestos más adelante.

La FIG. 4 es un diagrama en bloques de un módulo 400 para determinar corrientes diferenciales parciales y restrictivas parciales, según una realización. El módulo 400 incluye una pluralidad de componentes 410 de derivación y de compensación vectorial. Cada componente 410 de derivación y de compensación vectorial está configurado para procesar una pluralidad de corrientes (I_{1ABC} , I_{2ABC} , ... I_{PABC}) correspondientes a un respectivo conjunto de bobinados de transformador. Los componentes 410 de derivación y de compensación vectorial proporcionan el emparejamiento (derivación) de ratios, la eliminación de secuencias cero y la compensación de grupos vectoriales expuestos anteriormente.

El módulo 400 también incluye una pluralidad de módulos 412 de magnitud para determinar valores absolutos de las corrientes compensadas, incluso valores absolutos de corrientes correspondientes a corrientes A, B y C de fase, y corrientes G, Q de tierra y de secuencia negativa. Un primer componente 414 sumador suma las corrientes compensadas producidas por cada uno de los componentes 410 de derivación y de compensación vectorial, a fin de determinar corrientes diferenciales parciales $I_{DIF(1A)}$, $I_{DIF(1B)}$, $I_{DIF(1C)}$. Un segundo componente 416 sumador suma los valores absolutos generados por los módulos 412 de magnitud a fin de determinar las corrientes restrictivas parciales $I_{AR(1)}$, $I_{BR(1)}$, $I_{AR(1)}$, $I_{QR(1)}$, $I_{GR(1)}$.

Tratamiento de condiciones de magnetización y sobre-excitación

Después de compensar las conexiones de transformador, ciertas realizaciones abordan las condiciones de magnetización y sobre-excitación asociadas a los transformadores. El bloqueo de armónicos de la corriente de magnetización y sobre-excitación puede realizarse midiendo los armónicos segundo y quinto en la corriente diferencial y comprándolos con umbrales del usuario. También puede usarse el bloqueo de fases cruzadas o el cuarto armónico.

Además, o en otras realizaciones, también puede usarse la restricción de armónicos para afrontar condiciones de magnetización y sobre-excitación. Los armónicos de interés en la corriente diferencial (segundo, cuarto y quinto) se añaden a los términos restrictivos de frecuencia fundamental usando multiplicadores adecuados, según los principios de restricción de armónicos. A continuación, se ejecutan los cálculos de plano alfa expuestos más adelante. Si los términos restrictivos se aumentan suficientemente con los armónicos en la señal diferencial, la restricción estimulada desplazará el plano alfa hacia el punto de bloqueo y restringirá la función diferencial durante las condiciones de magnetización.

La FIG. 5 es un diagrama de flujo de un procedimiento 500 para la protección diferencial de transformadores con restricción de armónicos, según una realización. Después de compensar las corrientes de bobinado según lo expuesto anteriormente, el procedimiento 500 incluye calcular 510 una corriente diferencial como una suma de las corrientes compensadas y calcular 512 una corriente restrictiva correspondiente a las corrientes compensadas. El procedimiento 500 también incluye aplicar 514 la restricción de corriente de magnetización. En una realización, la restricción de corriente de magnetización se implementa determinando armónicos en la corriente diferencial, tales como el segundo armónico y el cuarto armónico, y sumando las magnitudes de los armónicos a la corriente restrictiva total con coeficientes de mezcla seleccionados por el usuario.

El procedimiento 500 también incluye aplicar 516 la restricción de sobre-excitación estática. En una realización, la restricción de sobre-excitación se implementa calculando el quinto armónico de la corriente diferencial y sumando la magnitud del quinto armónico a la corriente restrictiva total, usando coeficientes de mezcla seleccionados por el usuario. En otra realización, se calcula una razón V/Hz y se compara con un valor de umbral. En una realización, el valor de umbral está en un intervalo entre aproximadamente el 110% y aproximadamente el 115% de un valor nominal para la razón V/Hz. Si la razón V/Hz supera el valor de umbral, se añade un valor auxiliar basado en la razón V/Hz a la corriente restrictiva. En una realización, el valor auxiliar añadido a la corriente restrictiva es $g(V/Hz)^2$, donde g es un factor de ajuste a escala que puede seleccionarse en base a la característica magnetizadora del transformador protegido. El factor g de ajuste a escala puede ser el mismo para todos los transformadores. En otras realizaciones, el valor del factor g de ajuste a escala puede diferir para transformadores específicos o aplicaciones específicas de transformadores, porque el factor g de ajuste a escala factoriza razones de CT y de transformadores, o incluso razones de VT si el voltaje está en voltios secundarios. La corriente restrictiva aumentada puede usarse bien con el principio de protección diferencial porcentual o bien con el principio de protección del plano alfa.

Según se expone en detalle más adelante, el procedimiento 500 también incluye convertir 518 las corrientes diferenciales y restrictivas en una primera corriente equivalente y una segunda corriente equivalente de un aparato de suministro eléctrico equivalente de dos terminales, y determinar 520 la razón compleja de corrientes entre la primera corriente equivalente y la segunda corriente 520 equivalente.

La FIG. 6 es un diagrama de flujo de un procedimiento 600 para la protección diferencial de transformadores que incluye aumentar las corrientes diferenciales parciales y / o las corrientes restrictivas parciales, según una realización. El procedimiento 600 incluye medir 610 una o más corrientes locales correspondientes a un bobinado de transformador. Según se ha expuesto anteriormente, el procedimiento también incluye compensar 612 las corrientes medidas y determinar corrientes diferenciales parciales locales y corrientes restrictivas parciales locales. El procedimiento 600 incluye adicionalmente aumentar 614 las corrientes diferenciales parciales locales y / o las corrientes restrictivas parciales locales en base a corrientes y / o voltajes medidos localmente. Por ejemplo, un terminal local puede restar una parte local de una corriente de carga a la corriente diferencial parcial local. Además, o en otra realización, el terminal local puede aumentar la corriente restrictiva local en base a armónicos de la corriente diferencial local, a fin de implementar la restricción de corriente de magnetización y / o la restricción de sobre-excitación estática.

El procedimiento 600 incluye adicionalmente transmitir 616 las corrientes diferenciales parciales locales y las corrientes restrictivas parciales locales a uno o más terminales remotos, y recibir 618 una o más corrientes diferenciales parciales remotas y una o más corrientes restrictivas parciales remotas desde dicho(s) terminal(es) remoto(s). En base a la información intercambiada, el procedimiento 600 incluye adicionalmente determinar 620 corrientes diferenciales globales y corrientes restrictivas globales.

En este punto, el procedimiento 600 también puede incluir efectuar 622 el aumento adicional, si lo hubiera, de las corrientes diferenciales globales y / o las corrientes restrictivas globales. Por ejemplo, en una realización, las respectivas corrientes restrictivas parciales pueden aumentarse en base a la restricción de sobre-excitación estática (p. ej., para evitar la resolución necesaria para determinar el quinto armónico de la corriente diferencial), pero al menos una entre la compensación de carga de línea y la restricción de corriente de magnetización se aplica a las corrientes diferenciales globales y / o a las corrientes restrictivas globales.

Según se expone en detalle más adelante, el procedimiento 600 también incluye usar 624 las corrientes diferenciales globales y las corrientes restrictivas globales en un análisis de plano alfa.

La FIG. 7 es un diagrama de flujo de un procedimiento 700 para la protección diferencial de transformadores que usa restricción de sobre-excitación estática, según una realización. En esta realización, se usan los voltajes disponibles en uno o más terminales para aumentar la corriente restrictiva. Si bien el procedimiento 700 puede ser llevado a cabo por un terminal local, un experto apreciará, a partir de la descripción en el presente documento, que el procedimiento 700 puede ser realizado por cada terminal en un sistema de protección.

El terminal local determina 710 una corriente restrictiva parcial local, según se expone más adelante, y recibe 712 corrientes restrictivas parciales remotas e indicadores remotos asociados desde uno o más terminales remotos. Los indicadores remotos indican si los correspondientes terminales remotos tienen o no acceso a una fuente de voltaje disponible. Una fuente de voltaje puede quedar indisponible para un terminal específico, por ejemplo, ante la pérdida de condiciones potenciales, o cuando se usan los VT del lado del bus y se abre la línea (se desconecta del bus mediante un interruptor abierto o conmutador de desconexión). En este ejemplo, un indicador fijado en cero indica que el correspondiente terminal no tiene acceso a una fuente válida de voltaje, mientras que un indicador fijado en uno indica que el terminal correspondiente tiene acceso a una fuente válida de voltaje.

El terminal local determina 714 si está disponible o no una fuente de voltaje local. Si está disponible una fuente válida de voltaje local, el terminal local fija 716 un indicador local en uno, mide 718 el voltaje local y una frecuencia, y determina 720 una razón entre voltaje local y hercios (V/Hz), o una razón V/Hz remota estimada. Si dicho(s) VT se usa(n) para medir el voltaje local en un bobinado de transformador, entonces se usa el valor del voltaje local medido para la razón V/Hz. Sin embargo, si dicho(s) VT usado(s) para medir el voltaje local se halla(n) lejos del correspondiente bobinado de transformador (p. ej., el transformador se halla en una ubicación remota del terminal local), entonces el voltaje medido localmente puede ser distinto al voltaje efectivo aplicado al correspondiente bobinado de transformador. La frecuencia es una variable global que puede ser esencialmente la misma en todos los terminales del aparato de suministro eléctrico. Los voltajes, sin embargo, pueden variar entre los diversos terminales. Por ejemplo, un voltaje medido en un terminal remoto donde se encuentra el transformador puede ser, aproximadamente entre y 5% y 10%, distinto a un voltaje medido por un terminal local. Estas diferencias de voltaje pueden producir una gran diferencia en la magnitud de la sobre-excitación esperada en el transformador y en la magnitud de la restricción de V/Hz usada para abordar la condición.

Así, en algunas realizaciones, el terminal local calcula un voltaje remoto V_{Remoto} que es responsable del sobreflujo del núcleo del transformador. El terminal local puede determinar el voltaje remoto V_{Remoto} como

$$V_{Remoto} = V_{Local} - I_{Local} * Z_{Linea}, \quad (5)$$

donde Z_{Linea} es la impedancia de la línea de transmisión entre los terminales local y remoto, V_{Local} es un voltaje local medido e I_{Local} es una corriente local medida. La corriente local puede usar el valor V_{Remoto} calculado en la razón V/Hz para los posteriores cálculos de restricción de sobre-excitación estática.

Después de determinar la razón V/Hz, el terminal local compara 722 la razón V/Hz con un valor de umbral, y consulta 724 si la razón V/Hz supera el valor de umbral. Si el valor de umbral es superado por la razón V/Hz, el terminal local fija 726 el multiplicador local como una inversa de una suma de indicadores locales y remotos, que se fijan en uno. Por ejemplo, si el terminal local y dos terminales remotos tienen ambos acceso a una fuente válida de voltaje, entonces el multiplicador local (así como los multiplicadores usados en los terminales remotos) serían iguales a 1/3. Si una de las fuentes de voltaje quedara posteriormente no disponible para uno de los terminales remotos (causando que el correspondiente indicador remoto cambie de uno a cero), entonces el multiplicador local cambiaría a 1/2. De manera similar, si ambos terminales remotos perdieran acceso a sus respectivas fuentes de voltaje, entonces el multiplicador local cambiaría a uno. Si el valor de umbral no es superado por la razón V/Hz, entonces el terminal local fija 728 el multiplicador local en cero. Por tanto, si uno o más de los

voltajes fallan, el voltaje, o los voltajes, restante(s) puede(n) continuar usándose para proporcionar la restricción. Esto permite que la función de restricción tolere problemas en las fuentes de voltaje usando múltiples fuentes situadas en distintos terminales de línea y usando adaptablemente las fuentes de voltaje que están disponibles.

Si el terminal local determina 714 que la fuente de voltaje local no está disponible, entonces el terminal local fija 730 el indicador local en cero y fija 728 el multiplicador local en cero.

El terminal local añade 732 entonces un valor proporcional a la razón V/Hz, multiplicada por el multiplicador local, a la corriente restrictiva parcial local. Según se ha expuesto anteriormente, el valor añadido a la corriente restrictiva parcial local, según una realización, es $g \cdot V/Hz$, aunque también pueden usarse otros valores basados en la razón V/Hz. Si el multiplicador local es cero, entonces no se añade un valor proporcional a la razón V/Hz a la corriente restrictiva parcial local. El terminal local también envía 734 el indicador local y la corriente restrictiva parcial local a dicho(s) terminal(es) remoto(s). Así, cada uno de los terminales remotos puede ajustar su propio multiplicador, usado con su razón V/Hz en base, al menos en parte, al indicador del terminal local. Como se ha expuesto anteriormente, el terminal local también puede enviar una corriente diferencial parcial local, que puede haber sido ajustada para la corriente de carga de línea. El terminal local determina 736 entonces una corriente restrictiva global en base a cada una de las corrientes restrictivas parciales. Así, esta restricción de sobre-excitación basada en voltaje se aplica sin enviar valores de voltaje entre los terminales del aparato de suministro eléctrico.

Panorama del plano alfa para dos terminales

Como se ha expuesto anteriormente, las corrientes de bobinado se compensan en base a sus respectivos flujos a través de bobinados de transformador, y las corrientes compensadas pueden usarse para calcular una razón compleja de corrientes usada en un análisis de plano alfa para determinar selectivamente cuándo activar un aparato de suministro eléctrico que incluye el transformador. La descripción a continuación expone detalles del principio del plano alfa y una zona de protección equivalente de dos terminales para aplicar el plano alfa para un aparato de suministro eléctrico multi-terminal. Como se revela en el presente documento, la protección diferencial del transformador, usando el plano alfa equivalente, se proporciona para un aparato de suministro eléctrico que incluye un transformador de energía.

Para una zona de protección, el principio del plano alfa compara individualmente magnitudes y ángulos de corrientes dentro de la zona. El principio del plano alfa se aplica naturalmente a dos líneas terminales en una zona de protección, donde se compara la razón de las magnitudes, así como el ángulo relativo entre las dos corrientes. En la determinación de fallos, se calcula una razón compleja k de corrientes y se sitúa en el plano alfa, que es una representación gráfica de la razón vectorial entre la primera corriente I_1 (p. ej., corriente remota) y la segunda corriente I_2 (p. ej., corriente local). Los valores de corriente de línea del primer relé (p. ej., relé remoto) y del segundo relé (p. ej., relé local) se combinan en una razón de valores de corriente. Esta razón k tiene una magnitud y un ángulo y puede representarse gráficamente en el plano de razones complejas de corriente con ejes real e imaginario. Se entiende que la direccionalidad de ambas corrientes es coherente con respecto a la línea protegida: ambas se miden dentro o fuera de la línea.

La FIG. 8 es un diagrama simplificado de un plano alfa (ratio o razón de corrientes). Las marcas para los dos ejes del plano, a y jb , se obtienen de la siguiente manera

$$k = \frac{\overline{I_1}}{I_2} = r e^{j\theta} = a + jb, \quad (6)$$

$$a = \operatorname{Re} \left(\frac{\overline{I_1}}{I_2} \right), \quad (7)$$

$$b = \operatorname{Im} \left(\frac{\overline{I_1}}{I_2} \right), \quad (8)$$

donde Re e Im se refieren a las partes real e imaginaria de la razón de corrientes.

Idealmente, la corriente de paso aparece en valores iguales pero opuestos en los dos relés, por lo cual, para fallos de carga y externos,

$$k = \frac{I_1}{I_2} = 1 \angle 180^\circ, \quad (9)$$

que está representado por el punto marcado con 810 en la FIG. 8.

Con respecto a los fallos internos, la corriente del fallo es igual en ambos extremos de la línea solamente cuando la línea es homogénea y las contribuciones al fallo desde ambos extremos de la línea son iguales, p. ej., cuando las dos fuentes tienen

igual potencia y el fallo está en el punto medio de la línea. En tal caso,

$$k = \frac{I_1}{I_2} = 1 \angle 0^\circ. \quad (10)$$

Sin embargo, según el fallo interno avanza hacia el segundo relé (local), I_2 aumentará y el punto 812 en el plano alfa avanzará hacia el origen cuando se vea desde el segundo relé (local). Para grandes corrientes remotas, cuando se comparan con la corriente local, el punto se alejará del origen, según se ve desde el relé local. Según el fallo se aleja del segundo relé (local), I_2 disminuirá y el punto se moverá.

Debería entenderse que existiría una representación individual del plano alfa para cada una de las tres corrientes I_A , I_B e I_C de fase. Además, en ciertas realizaciones, puede proporcionarse una representación del plano alfa por separado para corrientes de secuencia cero, corrientes de secuencia negativa, corrientes de secuencia positiva, o combinaciones de las anteriores. Por ejemplo, una representación de plano alfa puede incluir una corriente que es una combinación de una corriente de secuencia cero (p. ej., el 25%) y una corriente de secuencia negativa (p. ej., el 75%).

Diversos factores de sistema, que incluyen los sistemas de suministro eléctrico no homogénea, causan que el ángulo de la corriente del fallo en el plano alfa en cada terminal sea distinto, lo que da como resultado que el punto de razón para un fallo interno se mueva hacia arriba o hacia abajo en el plano alfa a lo largo de un arco que se mueve a través del eje "a". Diversos otros factores, que incluyen los errores de medición de línea, la corriente de carga de línea, los efectos de saturación del CT (transformador de corriente), los efectos transitorios en los condensadores de compensación del sistema de suministro eléctrico, y otros aspectos del sistema de relés, pueden causar que la razón k de corriente para fallos externos se aleje del punto 810 mostrado en la FIG. 8. Para fallos internos, tales factores darán como resultado que la razón de corriente se desplace por el plano alfa.

El movimiento desde el punto 810 en el plano alfa para fallos externos (p. ej., desde el fallo o carga externos ideales) complica la decisión del sistema diferencial de línea para (1) declarar un fallo en la línea protegida y disparar el interruptor de circuito asociado en la línea o (2) restringir la acción de declaración de fallo porque la razón de corriente se debe a la carga o a un fallo externo o a factores y / o errores del sistema.

Hay una región definida en el plano alfa que es una región (bloque) de "restricción", y una región que es una región de "operación" (activación), para permitir la toma adecuada de decisiones con respecto a las opciones de restricción y de operación. En la presente invención, todos los puntos en el plano alfa que no deberían dar como resultado una acción de activación por parte del elemento diferencial de línea definen una región de restricción para la cual no hay ninguna señal de activación, mientras que las partes restantes en el plano alfa están en la región de operación, para la cual se permite normalmente una señal de activación.

La FIG. 9 ilustra gráficamente una región 910 de restricción y una región 911 de operación en un plano alfa usado, según una realización, para decisiones de determinación de fallos. Con fines ilustrativos, la región 910 de restricción se muestra como encerrada dentro de líneas continuas. Nuevamente, la región 911 de operación puede incluir todos los puntos en el plano alfa que no estén en la región 910 de restricción. La región 910 de restricción en el plano alfa ilustrado en la FIG. 9 está situada alrededor del punto 912 de fallo externo ideal. La región 910 de restricción está definida por un ángulo (de bloqueo) de razón de corrientes seleccionado por el usuario (mostrado como las líneas radiales 913 y 914 por encima y por debajo del eje "a"), cuya gama de valores admite los valores de razones de corriente afectadas por diversos factores del sistema, que incluyen los valores de corriente de carga de línea, la saturación del CT y los errores de tiempo de muestreo y de alineación de datos. La región 910 de restricción está adicionalmente definida por una magnitud, seleccionada por el usuario, de la razón de corriente (mostrada como las líneas curvas 915, 916), cuya gama de valores admite la saturación del CT, entre otros factores. En general, un usuario selecciona un radio R para la línea 916 curva externa, lo que da como resultado que la curva interna se fije como $1/R$. El principio del plano alfa admite la modelación de la región 910 de restricción con más control del usuario, en comparación con el tradicional principio diferencial restringido por porcentaje.

Los circuitos lógicos (no mostrados) pueden usar una serie de comparaciones lógicas y otras funciones para determinar dónde está situada la razón k de corrientes en el plano alfa y, específicamente, si la razón k de corrientes está dentro de la región 910 de restricción, en cuyo caso no hay ninguna señal de activación. Cuando la razón k de corrientes está fuera de la región 910 de restricción, en la región 911 de operación, se produce una señal de activación si los valores medidos de corriente han satisfecho ciertas características de umbral, y otras.

Análisis de plano alfa multi-terminal

Aun siendo intuitivo e inmediato en aplicaciones de dos terminales, el plano alfa es menos natural en un caso general de N terminales. Pueden encontrarse patrones complejos del flujo de corriente, tales como una corriente circulante: una corriente que abandona la zona en un terminal para reingresar a ella en el otro. Estos patrones deberían analizarse cuidadosamente a fin de evitar una falta de activación respondiendo, bien a la corriente que fluye fuera de la zona para alimentar una carga, o

bien a su circulación al otro terminal de línea. Muchas posibles permutaciones de razones entre muchas posibles corrientes complicarían la comprensión, implementación, prueba y análisis posterior de los relés al aplicar el plano alfa a múltiples terminales.

Así, ciertas realizaciones reveladas en el presente documento incluyen un concepto generalizado de plano alfa de N terminales. Este procedimiento de protección calcula un equivalente de dos terminales para un caso general de N terminales, y aplica el principio del plano alfa a dos corrientes equivalentes, en lugar de a la multitud de las corrientes medidas.

La FIG. 10 ilustra esquemáticamente una zona diferencial general 1000 de protección de N terminales, según una realización. En este ejemplo, la zona 1000 de N terminales incluye las corrientes $I_1, I_2, I_3, I_4, \dots, I_N$, correspondientes, cada una, a un respectivo terminal. Un experto apreciará a partir de la descripción en el presente documento que puede usarse cualquier número de corrientes mayor que uno para la zona 1000 de N terminales. Por ejemplo, si $N = 3$ para un sistema de tres terminales, entonces solamente las corrientes I_1, I_2 e I_3 corresponderían a la zona 1000 de N terminales. El principio diferencial obtendría la siguiente corriente diferencial $I_{DIF(N)}$ y la corriente restrictiva $I_{RST(N)}$ para la zona 1000 de N terminales:

$$I_{DIF(N)} = \sum_{k=1}^N I_k, \quad (11)$$

$$I_{RST(N)} = \sum_{k=1}^N |I_k|. \quad (12)$$

En esta realización ejemplar, la corriente restrictiva $I_{RST(N)}$ es una suma de amplitudes de corriente. Un experto apreciará, sin embargo, que la corriente restrictiva $I_{RST(N)}$ puede determinarse de una gran variedad de maneras distintas. Como se ha expuesto anteriormente, la corriente restrictiva $I_{RST(N)}$ se usa para proporcionar una noción de la corriente que fluye a través de la zona 1000. Así, según la aplicación específica, la corriente restrictiva $I_{RST(N)}$ puede definirse como la máxima corriente medida (p. ej., allí donde la corriente más alta corresponde a una corriente de fallo externo), una suma de amplitudes de corriente (como se usa en la ecuación (21) y la solución ejemplar proporcionada en el presente documento), una suma de corrientes que está dividida entre el número total de corrientes (p. ej., la corriente promedio), o un producto de corrientes.

La FIG. 11 ilustra esquemáticamente una zona equivalente 1100 de dos terminales de protección, según una realización. Como se ha expuesto en lo que antecede, una zona de dos terminales es la aplicación natural para el plano alfa. La zona equivalente 1100 de dos terminales mostrada en la FIG. 11 incluye dos corrientes virtuales I_S, I_T que proporcionan una representación equivalente de las corrientes $I_1, I_2, I_3, I_4, \dots, I_N$ de la zona 1000 de N terminales mostrada en la FIG. 10. El principio diferencial puede aplicarse a las dos corrientes virtuales I_S, I_T para obtener una corriente diferencial $I_{DIF(2)}$ y una corriente restrictiva $I_{RST(2)}$ para la zona equivalente 1100 de dos terminales.

Las dos corrientes virtuales I_S, I_T en la zona equivalente 1100 de dos terminales se buscan de modo tal que se determinen la misma corriente diferencial y las mismas corrientes restrictivas en la zona equivalente 1100 de dos terminales, como en la zona efectiva 1000 de N terminales:

$$I_{DIF(2)} = I_{DIF(N)}, \quad (13)$$

$$I_{RST(2)} = I_{RST(N)}. \quad (14)$$

Las dos corrientes I_S, I_T del equivalente de dos terminales tienen un total de cuatro grados de libertad (dos magnitudes y dos ángulos), mientras que hay un total de tres ecuaciones fronterizas: las partes real e imaginaria de la corriente diferencial (ecuación (13)) y la magnitud de la corriente restrictiva (ecuación (14)). Por tanto, hay tres ecuaciones y cuatro incógnitas.

Para despejar las cuatro incógnitas, según ciertas realizaciones, se proporciona una cuarta ecuación de equilibrio (o bien se reduce a tres el número de incógnitas) asignando un atributo de una de las N corrientes medidas $I_1, I_2, I_3, I_4, \dots, I_N$ de zona a cualquiera de las dos corrientes equivalentes I_S, I_T . Por ejemplo, la corriente $I_1, I_2, I_3, I_4, \dots, I_N$ de zona con la mayor amplitud puede seleccionarse para la magnitud de una de las corrientes virtuales I_S, I_T .

En otra realización, la cuarta ecuación de equilibrio requiere que una de las dos corrientes equivalentes I_S, I_T esté en fase con una corriente I_p de zona específica seleccionada entre las N corrientes $I_1, I_2, I_3, I_4, \dots, I_N$ de zona.

En una realización ejemplar, la corriente I_p específica de zona se selecciona como la corriente $I_1, I_2, I_3, I_4, \dots, I_N$ de zona que es la mayor después de la proyección sobre la línea de la corriente diferencial $I_{DIF(N)}$. Un criterio racional tras esta elección es que durante los fallos externos con saturación del CT, la señal diferencial espuria, si es significativa, estará situada aproximadamente a lo largo de la línea de la corriente del fallo. Por lo tanto, seleccionando la corriente I_p de referencia que esté más cerca en fase a la corriente diferencial, la conversión sitúa las dos corrientes I_S, I_T equivalentes del plano alfa a lo largo de las líneas de la corriente que fluye hacia y desde la zona 1000.

Para seleccionar la corriente I_P de referencia, según una realización, se calculan primero los siguientes números auxiliares R_k :

$$R_k = |\text{real}(I_k \cdot I_{DN}^*)|, \quad k = 1..N, \quad (15)$$

donde I_{DN}^* representa la conjugada compleja de la corriente diferencial $I_{DIF(N)}$ de la zona 1000 de N terminales.

La corriente con el mayor valor de R se convierte en la corriente I_P de referencia. Indicando el ángulo de esta corriente como β :

$$\beta = \text{ángulo}(I_P). \quad (16)$$

La corriente diferencial $I_{DIF(N)}$ se desplaza para simplificar los cálculos posteriores, según lo siguiente:

$$I_X = I_{DIF(N)} \cdot 1\angle(-\beta). \quad (17)$$

Las dos corrientes I_S , I_T de la zona equivalente 1100 de dos terminales se calculan ahora de la siguiente manera:

$$I_T = \left(\frac{\text{Im}(I_X)^2 - (I_{RST(N)} - \text{Re}(I_X))^2}{2 \cdot (I_{RST(N)} - \text{Re}(I_X))} + j \cdot \text{Im}(I_X) \right) \cdot 1\angle\beta, \quad (18)$$

$$I_S = (I_{RST(N)} - |I_T|) \cdot 1\angle\beta. \quad (19)$$

El principio de protección del plano alfa de dos terminales continúa a partir de aquí, trabajando con las corrientes I_S e I_T . Así, I_S e I_T pueden usarse para calcular la razón compleja k de corrientes como:

$$\frac{I_S}{I_T} = k = k_{mag} \angle \alpha. \quad (20)$$

Una aplicación del proceso expuesto en lo que antecede es convertir un aparato de suministro eléctrico multi-terminal que incluye tres o más terminales en un aparato equivalente de suministro eléctrico de dos terminales, para su uso con el plano alfa. Un experto apreciará, a partir de la descripción en el presente documento, que el procedimiento también puede usarse para un aparato de suministro eléctrico de dos terminales. En otras palabras, el mismo proceso puede usarse para un aparato de suministro eléctrico de dos terminales y un aparato de suministro eléctrico que tenga tres o más terminales. Cuando las ecuaciones anteriores se aplican a un aparato de suministro eléctrico de dos terminales con una primera corriente medida I_1 y una segunda corriente I_2 medida, por ejemplo, el resultado es que las corrientes equivalentes I_S , I_T coinciden respectivamente con las corrientes medidas I_1 , I_2 .

El principio diferencial ha sido usado en el procedimiento expuesto en lo que antecede como una herramienta de transformación matemática para proyectar el caso general de la zona diferencial 1000 de N terminales a la zona equivalente 1100 de dos terminales, requiriendo que la corriente diferencial $I_{DIF(N)}$ y la corriente restrictiva $I_{RST(N)}$ sean idénticas entre la aplicación de N terminales y su equivalente de dos terminales. El procedimiento puede aplicarse a elementos diferenciales de fase, secuencia negativa y / o tierra, con corrientes filtradas diferenciales y restrictivas, a partir de términos parciales (expuestos en detalle más adelante) comunicados entre los diversos relés del sistema de N terminales.

La FIG. 12A es un diagrama de flujo de un procedimiento 1200 para la protección diferencial de la corriente de un aparato de suministro eléctrico multi-terminal según una realización. El procedimiento 1200 incluye medir 1210 una corriente I_1 , I_2 , ..., I_N en cada terminal, respectivamente. El procedimiento 1200 también incluye calcular 1212 una corriente diferencial $I_{DIF(N)}$ como una suma de las corrientes medidas I_1 , I_2 , ..., I_N y calcular 1214 una corriente restrictiva $I_{RST(N)}$, correspondiente a las corrientes I_1 , I_2 , ..., I_N . Como se ha expuesto anteriormente, en una realización, la corriente restrictiva $I_{RST(N)}$ se calcula como una suma de los valores absolutos (amplitudes) de las corrientes medidas I_1 , I_2 , ..., I_N . Luego, el procedimiento 1200 incluye convertir 1216 la corriente diferencial $I_{DIF(N)}$ y la corriente restrictiva $I_{RST(N)}$ en corrientes equivalentes I_S , I_T , de modo tal que $I_{DIF(2)} = I_{DIF(N)}$ e $I_{RST(2)} = I_{RST(N)}$. Como se expone en detalle más adelante, en algunas realizaciones la corriente diferencial $I_{DIF(N)}$ y / o la corriente restrictiva $I_{RST(N)}$ pueden aumentarse intencionalmente antes de ser convertidas 1216 en las corrientes equivalentes I_S , I_T . El aumento puede basarse en una condición física del aparato de suministro eléctrico multi-terminal. El procedimiento 1200 incluye adicionalmente calcular 1218 a y k_{mag} usando las corrientes equivalentes I_S , I_T (véase la ecuación (20) anteriormente), y aplicar 1220 el plano alfa usando a y k_{mag} .

La FIG. 12B es un diagrama de flujo de un procedimiento 1216 para convertir la corriente diferencial $I_{DIF(N)}$ y la corriente

restrictiva $I_{RST(N)}$ en las corrientes equivalentes I_S , I_T , según una realización. El procedimiento 1216 incluye calcular 1222 números auxiliares R_k como la proyección de una respectiva corriente $I_1, I_2, \dots, I_N$ sobre la línea de la corriente diferencial $I_{DIF(N)}$, seleccionando 1224 una corriente I_P de referencia como la corriente correspondiente al mayor valor de R , desplazando 1226 la corriente diferencial $I_{DIF(N)}$ en el ángulo β de la corriente I_P de referencia y calculando 1228 las corrientes equivalentes I_S , I_T a partir de I_P , $I_{DIF(N)}$ e $I_{RST(N)}$.

El plano alfa generalizado permite la implementación del principio de dos terminales a líneas multi-terminales, manteniendo las ventajas y habilitando a la vez nuevas aplicaciones. Obsérvese lo siguiente:

(1) Como se ha expuesto anteriormente, el principio generalizado es transparente en aplicaciones de dos terminales. En otras palabras, las dos corrientes equivalentes igualan las dos corrientes efectivas.

(2) Cualquier caso con una corriente diferencial equilibrada y una corriente restrictiva no nula produce un punto ideal de bloqueo en el plano alfa ($1 \angle 180^\circ$). La reducción de la corriente diferencial, tal como mediante compensación de corriente de carga de línea (expuesta más adelante), acerca el punto del plano alfa a la posición de bloqueo ideal.

(3) Cualquier caso con corriente restrictiva mayor bajo una corriente diferencial dada acerca el punto del plano alfa al punto de bloqueo ideal. El procedimiento admite aplicaciones donde el término restrictivo se aumenta artificialmente, tal como cuando se usa la restricción de armónicos en la protección del transformador.

(4) El principio funciona bien sin necesidad de comunicar todas las corrientes locales individualmente desde todos los terminales. Los términos diferenciales parciales y restrictivos en el paquete de comunicación revelado se transforman bien en el plano alfa generalizado.

(5) El principio funciona bien durante un fallo externo bajo saturación del CT. En primer lugar, al depender del término restrictivo auténtico, el punto del plano alfa calculado muestra una fuerte tendencia bloqueadora. En segundo lugar, se añade seguridad extra por parte de la naturaleza del mismo plano alfa.

(6) El principio funciona muy bien para elementos que implementan funciones diferenciales de tierra (p. ej., 87LG) y de secuencia negativa (p. ej., 87LQ). En caso de fallos internos, las corrientes de los elementos están cercanos en la fase, y difieren solamente en los ángulos de no homogeneidad del sistema. El plano alfa generalizado devuelve una potente indicación de desbloqueo en este caso, independientemente de las magnitudes de las corrientes comparadas. En caso de fallos externos, incluso fallos que no produzcan ninguna restricción natural (fallos de fase a fase para el 87LG, por ejemplo), puede usarse una restricción entre fases cruzadas al detectar un fallo externo por parte de otros elementos del circuito lógico, tal como un detector de fallos externos (EFD). Con la restricción aumentada, el punto equivalente del plano alfa se desplaza con seguridad hacia el bloqueo.

(7) Reduciendo una zona diferencial de protección con cualquier número de terminales a un único punto operativo en el plano alfa, el principio simplifica la implementación, la prueba y el análisis posterior.

Un experto apreciará otras ventajas a partir de las realizaciones reveladas en el presente documento.

Ejemplos de plano alfa multi-terminal

Las siguientes realizaciones numéricas del análisis del plano alfa multi-terminal se proporcionan solamente a modo de ejemplo, y no como limitación. Un experto apreciará, a partir de la descripción en el presente documento, que pueden usarse valores de corriente cualesquiera y / o que puede usarse cualquier número de terminales, incluso dos terminales. Además, los números usados en estos ejemplos pueden ser aproximaciones.

La FIG. 13A ilustra gráficamente un plano alfa para una aplicación de tres terminales ($N=3$) según una realización ejemplar. En este ejemplo, las tres corrientes I_1, I_2, I_3 medidas en los tres terminales respectivos son:

$$I_1 = 10,0A \angle 160^\circ,$$

$$I_2 = 8,0A \angle -175^\circ,$$

$$I_3 = 12,0A \angle 30^\circ.$$

Las tres corrientes medidas I_1, I_2, I_3 están representadas gráficamente en el plano alfa mostrado en la FIG. 13A. Usando la ecuación (11), la corriente diferencial $I_{DIF(N)} = 11,2A \angle 128^\circ$. Usando la ecuación (12), la corriente restrictiva $I_{RST(N)} = 30,0$. Las

corrientes medidas I_1 , I_2 , I_3 se muestran como líneas continuas en la FIG. 13A. Si bien la corriente diferencial $I_{DIF(N)}$ y la corriente restrictiva $I_{RST(N)}$ no se muestran generalmente en el plano alfa, con fines ilustrativos, la corriente diferencial $I_{DIF(N)}$ se muestra como una línea discontinua y la corriente restrictiva $I_{RST(N)}$ se muestra como un círculo discontinuo en la FIG. 13A.

5 Siguiendo los procedimientos expuestos anteriormente e ilustrados en las FIGS. 12A y 12B, la ecuación (15) proporciona los números auxiliares R_k como;

$$R_1 = 97,37A^2,$$

$$R_2 = 49,50A^2,$$

$$R_3 = 20,14A^2.$$

Como R_1 es el mayor de los tres números auxiliares, la primera corriente correspondiente I_1 se selecciona como la corriente I_p de referencia = $10,0A \angle 160^\circ$. Esto significa que una de las corrientes equivalentes estará situada sobre la línea de 160° o -20° .

15 Despejando el equivalente de dos corrientes en las ecuaciones (17), (18) y (19), se obtiene:

$$I_T = 11,1A \angle 11,7^\circ \text{ y}$$

$$I_S = 18,9A \angle 160^\circ.$$

20 La FIG. 13B ilustra gráficamente un plano alfa para el equivalente de dos terminales de la realización mostrada en la FIG. 13A, según una realización. Usando la ecuación (11), la corriente diferencial equivalente $I_{DIF(2)} = 11,2A \angle 128^\circ$. Usando la ecuación (12), la corriente restrictiva equivalente $I_{RST(2)} = 30,0$. Las corrientes equivalentes I_S , I_T se muestran como líneas continuas en la FIG. 13B. Con fines ilustrativos, la corriente diferencial equivalente $I_{DIF(2)}$ se muestra como una línea discontinua y la corriente restrictiva equivalente $I_{RST(2)}$ se muestra como un círculo discontinuo en la FIG. 13B. Obsérvese que, cuando se calcula para este equivalente de dos terminales, la corriente diferencial equivalente $I_{DIF(2)}$ y la corriente restrictiva equivalente $I_{RST(2)}$ son las mismas que las calculadas en el sistema original de tres terminales.

Usando la ecuación (20), las dos corrientes equivalentes I_S , I_T dan el punto operativo en el plano alfa de $k = 1,71 \angle 148,3^\circ$, que no se muestra en las FIGS. 13A y 13B. Debido a que este ejemplo no incluye los límites de una región restrictiva, no se determina si este punto operativo k daría como resultado la habilitación de una señal de activación. Si el punto operativo k está fuera de la región restrictiva, sin embargo, el plano alfa en la FIG. 13A indica que esto es probablemente el resultado de un fallo externo, porque la tercera corriente I_3 está cerca de los 180° a partir de la suma de las corrientes I_1 , I_2 primera y segunda. De manera similar, la FIG. 13B indica que una condición de fallo sería un fallo externo, porque la diferencia de fase entre las corrientes equivalentes I_S , I_T está cerca de los 180° y la razón de las magnitudes no está lejos de 1.

35 A modo de contraste con el ejemplo mostrado en las FIGS. 13A y 13B, las FIGS. 14A y 14B ilustran gráficamente respectivos planos alfa para el caso de un fallo interno, según una realización. La FIG. 14A ilustra el plano alfa para un aparato de suministro eléctrico de cinco terminales, donde las cinco corrientes medidas I_1 , I_2 , I_3 , I_4 , I_5 son aproximadamente iguales en magnitud, pero fluyen en la misma dirección general, con alguna dispersión angular limitada, lo que indica un fallo interno. La FIG. 14B ilustra el plano alfa para el equivalente de dos terminales de la realización mostrada en la FIG. 14A. Una gran diferencia entre las magnitudes de las corrientes equivalentes I_S , I_T (según se muestra en la FIG. 14B) indica el fallo interno, lo que da como resultado la habilitación de una señal de activación.

Los ejemplos mostrados en las FIGS. 13A, 13B, 14A y 14B son estáticos, en cuanto a que representan corrientes medidas en un instante específico. El siguiente ejemplo es dinámico, en cuanto a que ilustra cambios en la corriente a lo largo del tiempo. En este ejemplo, se usan terminales de interruptor dual. Los modernos relés de protección de línea pueden dar soporte a dos conjuntos trifásicos de entradas de corriente y medir las dos corrientes independientemente, facilitando aplicaciones a las líneas terminadas mediante dos interruptores de circuito. Tal paquete de protección integrado funciona con la corriente internamente sumada para la principal función de protección — la distancia, la sobrecorriente direccional a tierra en un esquema asistido por piloto, o el diferencial de corriente de línea. A la vez, proporciona dos funciones independientes de fallo de interruptor, dos auto-reclausuradores independientes, medición, registro y resguardo coordinado en el tiempo, todo ello en respuesta a las corrientes interruptoras individuales.

La FIG. 15 ilustra esquemáticamente una configuración de línea de interruptor dual de tres terminales, según una realización. Un primer terminal T1 incluye dos interruptores con transformadores CT-1, CT-2 de corriente asociados, que miden las corrientes i_{CT-1} , i_{CT-2} . Un segundo terminal incluye dos interruptores con transformadores CT-3, CT-4 de corriente asociados, que miden las corrientes i_{CT-3} , i_{CT-4} . Un tercer terminal incluye dos interruptores con transformadores CT-5, CT-6 de corriente asociados, que miden las corrientes i_{CT-5} , i_{CT-6} . La FIG. 16 ilustra gráficos de diversas señales durante un fallo AB externo en la configuración mostrada en la FIG. 15, según una realización. Cada señal está representada gráficamente con respecto al tiempo. El gráfico superior muestra la corriente interna i_{CT-1} del primer terminal T1. El siguiente gráfico muestra la corriente interna i_{CT-2} del primer terminal T1. El siguiente gráfico muestra la corriente diferencial $I_{DIF(N)}$ y la corriente restrictiva $I_{RST(N)}$. Los dos gráficos inferiores muestran la magnitud k_{mag} y el ángulo α , respectivamente, del plano alfa equivalente. Según se muestra, poco después del comienzo del fallo externo, el plano alfa equivalente produce un punto operativo de alrededor de $0,5 \angle 170^\circ$, que está (correctamente) dentro de una típica región de bloqueo del plano alfa. Obsérvese que en este caso la corriente I_p de referencia se selecciona con alguna aproximación, ya que el sistema diferencial de corriente de línea puede no funcionar directamente con las corrientes individuales en el terminal con fallos, sino con términos diferenciales y restrictivos parciales, explicados más adelante y relacionados con las sumas $i_{CT-1} + i_{CT-2}$, $i_{CT-3} + i_{CT-4}$ e $i_{CT-5} + i_{CT-6}$. Sin embargo, el gran término restrictivo, en comparación con el diferencial espurio, mantiene el plano alfa equivalente en la región de bloqueo.

Ejemplos de protección diferencial de transformadores usando el plano alfa equivalente de dos terminales

Las siguientes realizaciones de la protección diferencial de transformadores, usando el plano alfa equivalente de dos terminales, anteriormente expuesto, se proporcionan solamente a modo de ejemplo, y no de limitación. Un experto apreciará, a partir de la descripción en el presente documento, que cualquier tipo de transformador usado para transmitir energía puede ser protegido por las realizaciones reveladas en el presente documento. Un experto también apreciará, a partir de la descripción en el presente documento, que las revelaciones en el presente documento pueden aplicarse a cualquier tipo de aparato de suministro eléctrico que incluya un transformador.

La FIG. 17 es un diagrama en bloques de un aparato 1700 de suministro eléctrico que incluye un transformador 1708 de dos bobinados, conectado entre una línea 1712 de transmisión y un bus 1714, según una realización. El transformador 1708 incluye un primer conjunto de bobinados 1709 conectados al bus 1714 y un segundo conjunto de bobinados 1710 conectados con la línea 1710 de transmisión. En esta realización ejemplar, la protección diferencial está proporcionada por un primer relé 1702, un segundo relé 1704, un tercer relé 1706, una pluralidad de interruptores 1716, 1718, 1720, 1720, una pluralidad de transformadores de corriente (CT) 1728, 1730, 1732, 1734, 1736, 1738, y dos transformadores de voltaje (VT) 1740, 1742. Cada relé 1702, 1704, 1706 en este ejemplo recibe dos mediciones de corriente local (a través de las entradas IW e IX) y una medición de voltaje local (a través de la entrada VY).

En un primer extremo del aparato 1700 de suministro eléctrico, el primer relé 1702 mide dos conjuntos de corrientes de bobinado (correspondiendo cada conjunto a tres fases) que atraviesan los respectivos interruptores 1716, 1718 conectados con el bus 1714, usando los CT 1728, 1730. De manera similar, el segundo relé 1704 mide dos conjuntos de corrientes de bobinado que atraviesan los respectivos interruptores 1720, 1722 conectados con el bus 1714, usando los CT 1732, 1734. Tanto el primer relé 1702 como el segundo relé 1704 miden un voltaje en un primer extremo de la línea 1712 de transmisión (conectada con el segundo conjunto de bobinados 1710), usando el VT 1740.

Un segundo extremo de la línea 1712 de transmisión está terminado en un terminal de interruptor dual que incluye los interruptores 1724, 1726. El tercer relé 1706 mide dos conjuntos de corrientes de bobinado que atraviesan los respectivos interruptores 1724, 1726, usando los CT 1736, 1738. El tercer relé 1706 también mide un voltaje en el segundo extremo de la línea 1712 de transmisión, usando el VT 1740.

En este ejemplo, el primer relé 1702 y el segundo relé 1704 están situados en la misma subestación (local), y el tercer relé 1706 está situado en una ubicación remota. Un experto apreciará, a partir de la descripción en el presente documento, sin embargo, que los relés 1702, 1704 primero y segundo pueden combinarse en un único relé (configurado para medir al menos cuatro corrientes) dentro de la subestación local. Según se muestra en la FIG. 17, sin embargo, los relés 1702, 1704 primero y segundo se comunican entre sí a través de un canal 1744 de comunicación local, y los relés 1702, 1706 primero y tercero se comunican entre sí a través de un canal 1746 de comunicación remota. En tal realización, el primer relé 1702 puede funcionar en una modalidad de amo y los relés 1704, 1706 segundo y tercero pueden funcionar en una modalidad de esclavo para reducir el número de canales de comunicación remota usados (p. ej., un canal de relé remoto no se necesita directamente entre el segundo relé 1704 y el tercer relé 1706).

El primer relé 1702 compensa el conjunto de corrientes de bobinado medidas por el CT 1726 y el conjunto de corrientes de bobinado medidas por el CT 1730, para calcular primeras corrientes diferenciales parciales y primeras corrientes restrictivas parciales (p. ej., según lo expuesto anteriormente con respecto a las ecuaciones (1), (2), (3) y (4)). Los dos CT 1728, 1730 pueden tener distintas razones de bobinado, lo que da como resultado que se usen distintas derivaciones para la compensación. Así, en una realización, el primer relé compensa ambos conjuntos de corrientes de bobinado (p. ej., medidas respectivamente por el CT 1728 y el CT 1730) individualmente (p. ej., usando las ecuaciones (1) a (4)) y luego suma los resultados para obtener las primeras corrientes diferenciales parciales y las primeras corrientes restrictivas parciales. En otras realizaciones donde los CT 1728, 1730 tienen la misma razón, sus corrientes pueden sumarse antes de aplicar la

compensación. El primer relé 1702 puede restar una corriente de carga de línea a las primeras corrientes diferenciales parciales, y puede aumentar las primeras corrientes restrictivas parciales en base a la restricción de corriente de magnetización y / o a la restricción de sobre-excitación estática.

De manera similar, el segundo relé 1704 compensa el conjunto de corrientes de bobinado medidas por el CT 1732 y el conjunto de corrientes de bobinado medidas por el CT 1734 para calcular segundas corrientes diferenciales parciales y segundas corrientes restrictivas parciales, y lleva a cabo la compensación de corriente de línea, la restricción de corriente de magnetización y la restricción de sobre-excitación estática. Además, el tercer relé 1706 compensa el conjunto de corrientes de bobinado medidas por el CT 1736 y el conjunto de corrientes de bobinado medidas por el CT 1738 para calcular terceras corrientes diferenciales parciales y terceras corrientes restrictivas parciales, y lleva a cabo la compensación de corriente de línea, la restricción de corriente de magnetización y la restricción de sobre-excitación estática. Como se ha expuesto anteriormente, en una realización, la restricción de sobre-excitación estática puede basarse en la determinación de una razón V/Hz, donde el voltaje se determina usando los VT 1740, 1742.

Como se expone en el presente documento, los relés 1702, 1704, 1706 intercambian sus respectivas corrientes diferenciales parciales y restrictivas parciales. Así, para cada fase, cada relé 1702, 1704, 1706 tiene una primera corriente diferencial parcial y corriente restrictiva parcial, una segunda corriente diferencial parcial y corriente restrictiva parcial y una tercera corriente diferencial parcial y corriente restrictiva parcial. En consecuencia, debido a que la compensación ha tratado los bobinados de transformador, las corrientes diferenciales parciales y restrictivas parciales pueden tratarse como corrientes correspondientes a un aparato de suministro eléctrico de tres terminales (N=3). Así, cada relé 1702, 1704, 1706 efectúa las operaciones expuestas anteriormente para convertir las corrientes del aparato de suministro eléctrico de tres terminales en una primera corriente equivalente y una segunda corriente equivalente de un aparato de suministro eléctrico equivalente de dos terminales. Cada relé 1702, 1704, 1706 usa entonces un análisis de plano alfa en base a una razón de las corrientes equivalente primera y segunda para determinar cuándo activar el aparato 1700 de suministro eléctrico.

En esta realización ejemplar, cada relé 1702, 1704, 1706 compensa dos conjuntos de corrientes para obtener tres conjuntos de corrientes diferenciales parciales y restrictivas. En otras realizaciones, sin embargo, cada uno de los seis conjuntos de corrientes medidas por los seis CT 1728, 1730, 1732, 1734, 1736, 1738 puede compensarse por separado para obtener seis conjuntos de corrientes diferenciales y restrictivas parciales. En tal realización, las corrientes diferenciales parciales y las corrientes restrictivas parciales pueden tratarse como corrientes correspondientes a un aparato de suministro eléctrico de seis terminales (N=6), y las operaciones expuestas anteriormente pueden llevarse a cabo para convertir las corrientes del aparato de suministro eléctrico de seis terminales en una primera corriente equivalente y una segunda corriente equivalente de un aparato de suministro eléctrico equivalente de dos terminales.

La FIG. 18 es un diagrama en bloques de un aparato 1800 de suministro eléctrico que incluye un transformador 1810 de tres bobinados conectado en línea con una línea 1712 de transmisión, según una realización. El transformador 1810 en esta realización ejemplar incluye un primer conjunto de bobinados 1814 conectados con un terminal de interruptor dual controlado por el primer relé 1702, un segundo conjunto de bobinados 1816 conectados con un terminal de interruptor dual controlado por el segundo relé 1704 y un tercer conjunto de bobinados 1818 conectados con un primer extremo de la línea 1712 de transmisión. Los terminales de interruptor dual controlados por los relés 1702, 1704 primero y segundo pueden estar situados en la misma subestación. Como se ha expuesto anteriormente con respecto a la FIG. 17, un segundo extremo de la línea 1712 de transmisión termina en un terminal de interruptor dual controlado por el tercer relé 1706. El terminal de interruptor dual controlado por el primer relé incluye dos interruptores 1822, 1824 y dos CT 1824, 1826. El terminal de interruptor dual controlado por el segundo relé incluye dos interruptores 1828, 1830 y dos CT 1832, 1834.

Cada relé 1702, 1704, 1706 mostrado en la FIG. 18 compensa dos conjuntos de corrientes (medidas por sus respectivos CT), lleva a cabo la compensación de corriente de carga de línea, la restricción de corriente de magnetización y / o la restricción de sobre-excitación estática, e intercambia sus corrientes diferenciales parciales y restrictivas parciales con los otros terminales. Así, cada relé 1702, 1704, 1706 tiene tres conjuntos de corrientes diferenciales parciales y restrictivas parciales. Cada relé 1702, 1704, 1706 también convierte las tres corrientes diferenciales y restrictivas parciales en corrientes equivalentes primera y segunda, y efectúa un análisis de plano alfa usando las corrientes equivalentes primera y segunda.

La FIG. 19 es un diagrama en bloques de un aparato 1900 de suministro eléctrico que incluye un transformador 1910 de dos bobinados y una línea 1912 de transmisión derivada, según una realización. En esta realización ejemplar, cada dos extremos de línea están terminados en una conexión de interruptor dual y un tercer extremo de línea está terminado en una conexión de interruptor único. Cada terminal mostrado en la FIG. 18 puede estar situado, por ejemplo, en una subestación distinta de un sistema de distribución de suministro eléctrico. Así, la realización ejemplar mostrada en la FIG. 19 incluye canales 1914, 1916, 1918 de comunicación remota entre cada uno de los relés 1702, 1704, 1706.

El transformador 1910 en esta realización ejemplar incluye un primer conjunto de bobinados 1920 conectados con un terminal de interruptor dual controlado por el primer relé 1702, y un segundo conjunto de bobinados 1922 conectados tanto con un terminal de interruptor único controlado por el segundo relé 1704 como con el terminal de interruptor dual controlado por el tercer relé 1706, según se ha expuesto anteriormente. El terminal de interruptor dual controlado por el primer relé incluye dos interruptores 1924, 1926 y dos CT 1928, 1930. El primer relé 1702 mide un voltaje de la terminación de interruptor dual,

usando un VT 1932. El terminal de interruptor único controlado por el segundo relé 1704 incluye un interruptor 1934 y un CT 1936. El segundo relé 1704 mide un voltaje de línea usando un VT 1938.

Cada uno de los relés 1702, 1706 primero y tercero, mostrados en la FIG. 19, compensa dos conjuntos de corrientes (medidas por sus respectivos CT), y el segundo relé 1704 compensa un conjunto único de corrientes medidas por el CT 1936.

5 Cada relé 1702, 1704, 1706 lleva a cabo la compensación de corriente de carga, la restricción de corriente de magnetización y /o la restricción de sobre-excitación estática, e intercambia sus corrientes diferenciales parciales y restrictivas parciales con los otros terminales. Así, cada relé 1702, 1704, 1706 tiene tres conjuntos de corrientes diferenciales parciales y restrictivas parciales. Cada relé 1702, 1704, 1706 también convierte las tres corrientes diferenciales y restrictivas parciales en las corrientes equivalentes primera y segunda, y lleva a cabo un análisis de plano alfa usando las corrientes equivalentes primera
10 y segunda.

Los ejemplos anteriores ilustran que pueden usarse relés de entrada de CT individual y / o dual, capaces de aplicaciones multi-terminal, para proporcionar protección para muchas distintas combinaciones de líneas, transformadores, buses y / u otros elementos de un sistema de suministro eléctrico.

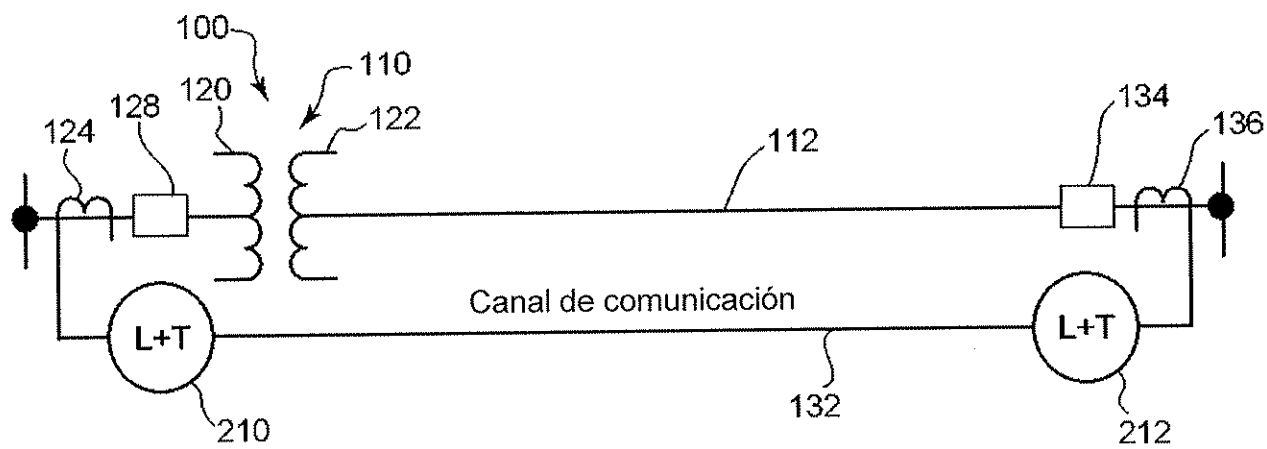
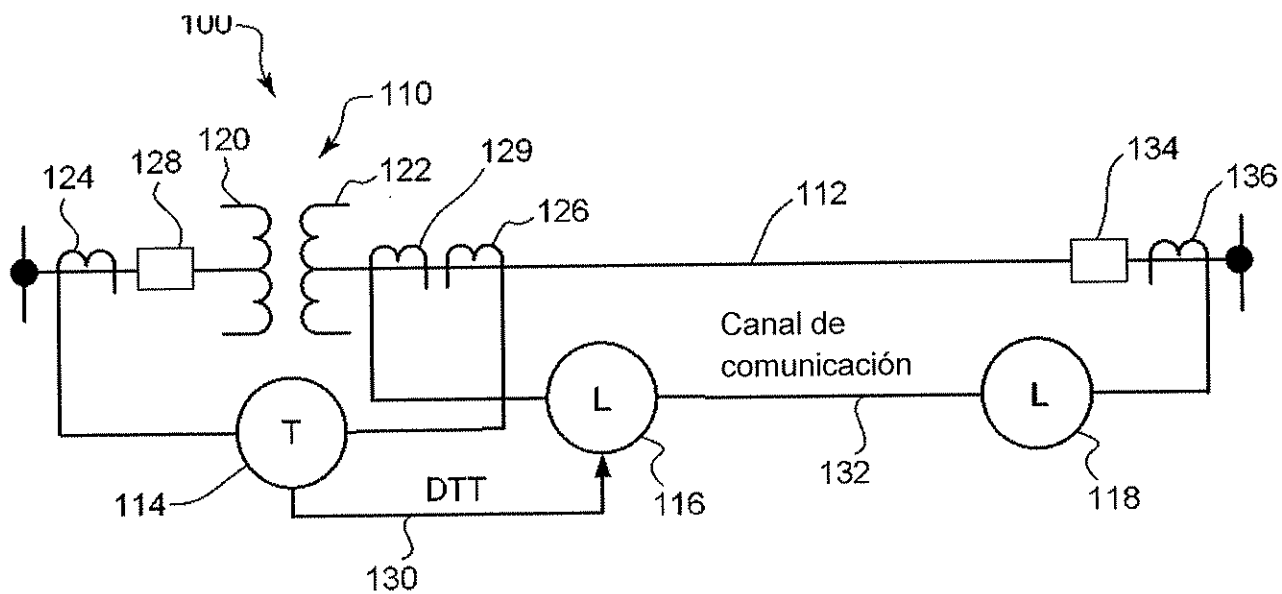
15 Los expertos en la técnica comprenderán que pueden hacerse muchos cambios en los detalles de las realizaciones descritas anteriormente sin apartarse de los principios subyacentes de la invención. El alcance de la presente invención, por lo tanto, debería estar determinado solamente por las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento para la protección diferencial de transformadores, caracterizado porque comprende:
medir una pluralidad de corrientes correspondientes a un primer conjunto de bobinados y a un segundo conjunto de bobinados de un transformador;
- 5 compensar la pluralidad de corrientes medidas en base a sus respectivos flujos a través del primer conjunto de bobinados, o bien a través del segundo conjunto de bobinados, en donde la compensación se basa en un modelo de un nodo de corriente ideal, teniendo el modelo igual flujo de corriente hacia y desde el nodo de corriente en el funcionamiento libre de fallos;
calcular una razón compleja de corrientes correspondiente a la pluralidad de corrientes compensadas;
aplicar un análisis de plano alfa a la razón compleja de corrientes; y
- 10 activar selectivamente, en base al análisis de plano alfa, un aparato de suministro eléctrico que incluye el transformador.
2. El procedimiento de la reivindicación 1, caracterizado porque la compensación de la pluralidad de corrientes medidas comprende:
realizar el emparejamiento de razones en base a las razones de transformación del transformador y a un transformador de corriente conectado; y
- 15 realizar la eliminación de secuencias cero y la compensación de grupos vectoriales.
3. El procedimiento de la reivindicación 2, caracterizado porque la compensación de la pluralidad de corrientes medidas comprende adicionalmente:
calcular una corriente diferencial que comprende una suma de las corrientes compensadas; y
calcular una corriente restrictiva correspondiente a las corrientes compensadas.
- 20 4. El procedimiento de la reivindicación 3, caracterizado porque comprende adicionalmente:
aumentar la corriente restrictiva en base a al menos una entre una corriente de magnetización y la sobre-excitación del transformador.
5. El procedimiento de la reivindicación 4, caracterizado porque aumento de la corriente restrictiva comprende:
determinar al menos un armónico de la corriente diferencial; y
- 25 añadir dicho(s) armónico(s) a los términos de corriente restrictiva usando uno o más multiplicadores seleccionados.
6. El procedimiento de la reivindicación 5, caracterizado porque el aumento de la corriente restrictiva en base a la corriente de magnetización asociada al transformador comprende:
añadir una magnitud de al menos uno entre un segundo y un cuarto armónico de la corriente diferencial a la corriente restrictiva, usando dicho(s) multiplicador(es) seleccionado(s).
- 30 7. El procedimiento de la reivindicación 5, caracterizado porque el aumento de la corriente restrictiva en base a la sobre-excitación del transformador comprende:
añadir una magnitud de un quinto armónico de la corriente diferencial a la corriente restrictiva usando dicho(s) multiplicador(es) seleccionado(s).
- 35 8. El procedimiento de la reivindicación 4, caracterizado porque el aumento de la corriente restrictiva en base a la sobre-excitación del transformador comprende:
determinar un voltaje y una frecuencia aplicados al transformador;
calcular una razón de voltios por hercio (V/Hz) en base al voltaje y frecuencia determinados aplicados al transformador;
comparar la razón V/Hz con un valor de umbral; y
en respuesta a la comparación, aumentar selectivamente la corriente restrictiva añadiendo un valor basado en la razón V/Hz a la corriente restrictiva.
- 40 9. El procedimiento de la reivindicación 8, caracterizado porque la determinación del voltaje comprende:

- medir un voltaje local en un terminal local;
- medir una corriente local en el terminal local; y
- calcular un voltaje remoto correspondiente a un terminal remoto donde está situado el transformador, siendo el voltaje remoto aproximadamente igual al voltaje local medido, menos un producto de la corriente local medida y una impedancia de una línea de transmisión entre el terminal local y el terminal remoto.
- 5
10. El procedimiento de la reivindicación 3, caracterizado porque el transformador es un transformador en línea del aparato de suministro eléctrico, en el cual el aparato de suministro eléctrico comprende una línea de transmisión eléctricamente conectada con uno de los conjuntos de bobinados del transformador en línea, comprendiendo adicionalmente el procedimiento:
- 10
- determinar una corriente de carga de línea; y
- restar la corriente de carga de línea determinada a la corriente diferencial.
11. El procedimiento de la reivindicación 3, caracterizado porque el cálculo de la razón compleja de corrientes comprende:
- convertir la corriente diferencial y la corriente restrictiva en una primera corriente equivalente de un aparato de suministro eléctrico equivalente de dos terminales y en una segunda corriente equivalente del aparato de suministro eléctrico equivalente de dos terminales,
- 15
- en donde una suma de la primera corriente equivalente y de la segunda corriente equivalente es esencialmente igual a la corriente diferencial calculada correspondiente a las corrientes compensadas, y
- en donde los valores de la primera corriente equivalente y de la segunda corriente equivalente producen esencialmente la corriente restrictiva calculada correspondiente a las corrientes compensadas; y
- 20
- calcular una razón compleja entre la primera corriente equivalente y la segunda corriente equivalente.
12. El procedimiento de la reivindicación 11, caracterizado porque la aplicación del análisis de plano alfa comprende:
- calcular un valor de magnitud de la razón compleja entre la primera corriente equivalente y la segunda corriente equivalente;
- calcular un valor de diferencia angular entre la primera corriente equivalente y la segunda corriente equivalente; y
- comparar el valor de la magnitud de la razón y el valor de la diferencia angular con valores preseleccionados que establecen una región de fases en un plano de razones de corriente,
- 25
- en donde, cuando el valor de la magnitud de la razón y el valor de la diferencia angular están fuera de la región establecida, se permite la activación, y
- en donde, cuando el valor de la magnitud de la razón y el valor de la diferencia angular están dentro de la región establecida, se bloquea la activación.
- 30
13. El procedimiento de la reivindicación 3, caracterizado porque el cálculo de la corriente restrictiva comprende realizar uno o más cálculos seleccionados entre el grupo que comprende:
- sumar valores absolutos de las tres o más corrientes medidas;
- seleccionar un valor máximo de las amplitudes de las tres o más corrientes medidas; y
- producir un producto de amplitudes de las tres o más corrientes medidas.
- 35
14. Un procedimiento para la protección diferencial de transformadores caracterizado porque comprende:
- medir una pluralidad de corrientes correspondientes a un primer conjunto de bobinados y a un segundo conjunto de bobinados de un transformador;
- compensar la pluralidad de corrientes medidas en base a sus respectivos flujos a través del primer conjunto de bobinados, o bien a través del segundo conjunto de bobinados, en donde la compensación se basa en un modelo de un nodo de corriente ideal, teniendo el modelo igual flujo de corriente hacia y desde el nodo de corriente, en el funcionamiento libre de fallos;
- 40
- calcular una corriente diferencial que comprende una suma de las corrientes compensadas;
- calcular una corriente restrictiva correspondiente a las corrientes compensadas;

- determinar un voltaje y una frecuencia aplicados al transformador;
- calcular una razón de voltios por hercio (V/Hz) en base al voltaje y frecuencia determinados aplicados al transformador;
- comparar la razón V/Hz con un valor de umbral;
- 5 en respuesta a la comparación, aumentar selectivamente la corriente restrictiva añadiendo un valor basado en la razón V/Hz a la corriente restrictiva; y
- activar selectivamente un aparato de suministro eléctrico que incluye el transformador en base a un análisis diferencial de corriente de línea que usa la corriente diferencial y la corriente restrictiva aumentada.
15. El procedimiento de la reivindicación 14, caracterizado porque el análisis diferencial de corriente de línea comprende un análisis diferencial porcentual.
- 10 16. El procedimiento de la reivindicación 14, caracterizado porque el análisis diferencial de corriente de línea comprende un análisis de plano alfa.
17. El procedimiento de la reivindicación 16, caracterizado porque el análisis de plano alfa comprende:
- convertir la corriente diferencial y la corriente restrictiva aumentada en una primera corriente equivalente de un aparato de suministro eléctrico equivalente de dos terminales y en una segunda corriente equivalente del aparato de suministro eléctrico equivalente de dos terminales,
- 15 en donde una suma de la primera corriente equivalente y de la segunda corriente equivalente es esencialmente igual a la corriente diferencial calculada correspondiente a las corrientes compensadas, y
- en donde los valores de la primera corriente equivalente y de la segunda corriente equivalente producen esencialmente la corriente restrictiva calculada correspondiente a las corrientes compensadas; y
- 20 calcular una razón compleja entre la primera corriente equivalente y la segunda corriente equivalente.
18. El procedimiento de la reivindicación 17, caracterizado porque el análisis de plano alfa comprende adicionalmente:
- calcular un valor de magnitud de la razón compleja entre la primera corriente equivalente y la segunda corriente equivalente;
- calcular un valor de diferencia angular entre la primera corriente equivalente y la segunda corriente equivalente; y
- 25 comparar el valor de la magnitud de la razón y el valor de la diferencia angular con valores preseleccionados que establecen una región de fases en un plano de razones de corriente,
- en donde, cuando el valor de la magnitud de la razón y el valor de la diferencia angular están fuera de la región establecida, se permite la activación, y
- en donde, cuando el valor de la magnitud de la razón y el valor de la diferencia angular están dentro de la región establecida, se bloquea la activación.
- 30 19. El procedimiento de la reivindicación 14, caracterizado porque la determinación del voltaje comprende:
- medir un voltaje local en un terminal local;
- medir una corriente local en el terminal local; y
- calcular un voltaje remoto correspondiente a un terminal remoto donde está situado el transformador, siendo el voltaje remoto aproximadamente igual al voltaje local medido, menos un producto de la corriente local medida y una impedancia de una línea de transmisión entre el terminal local y el terminal remoto.
- 35



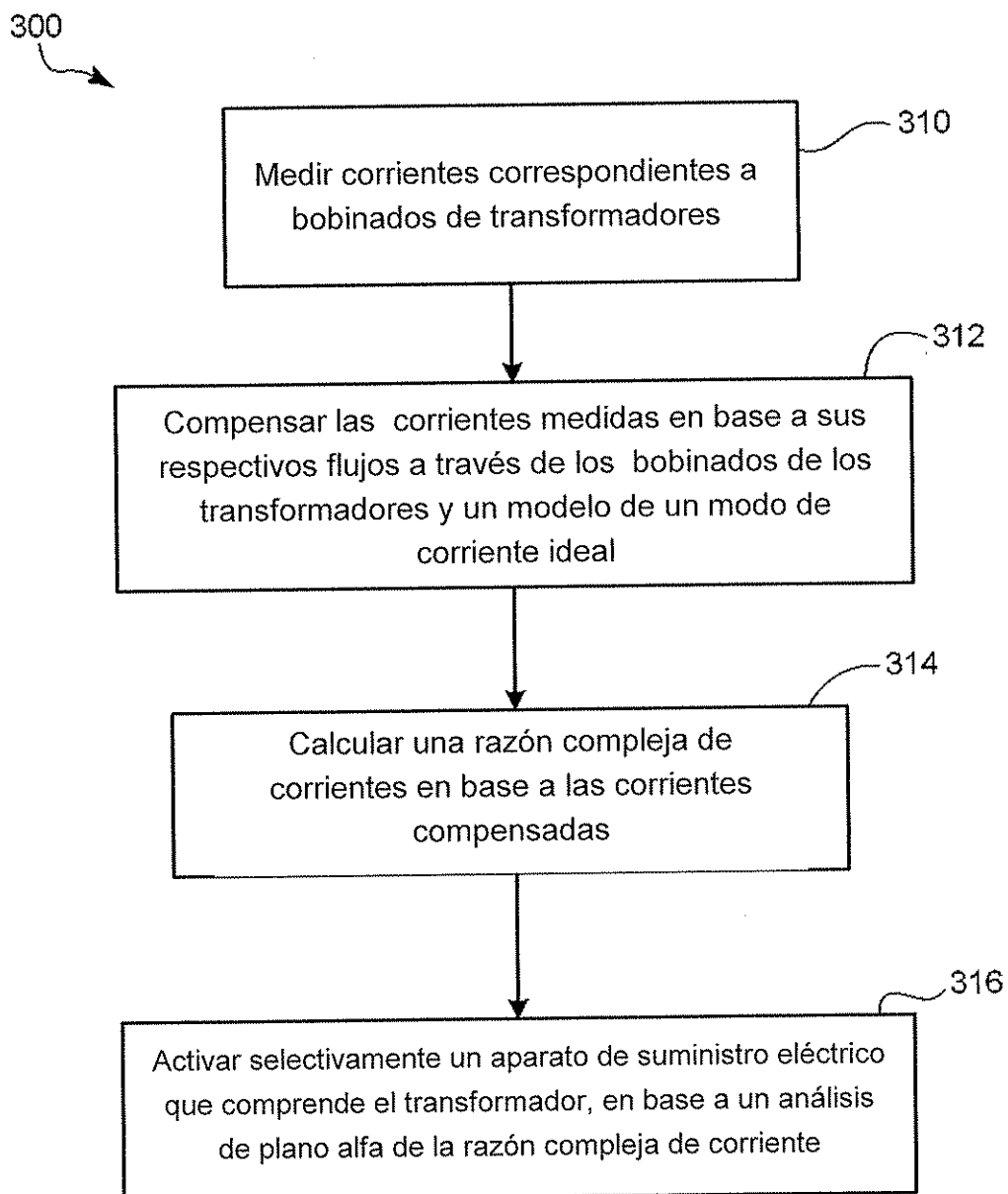


FIG. 3

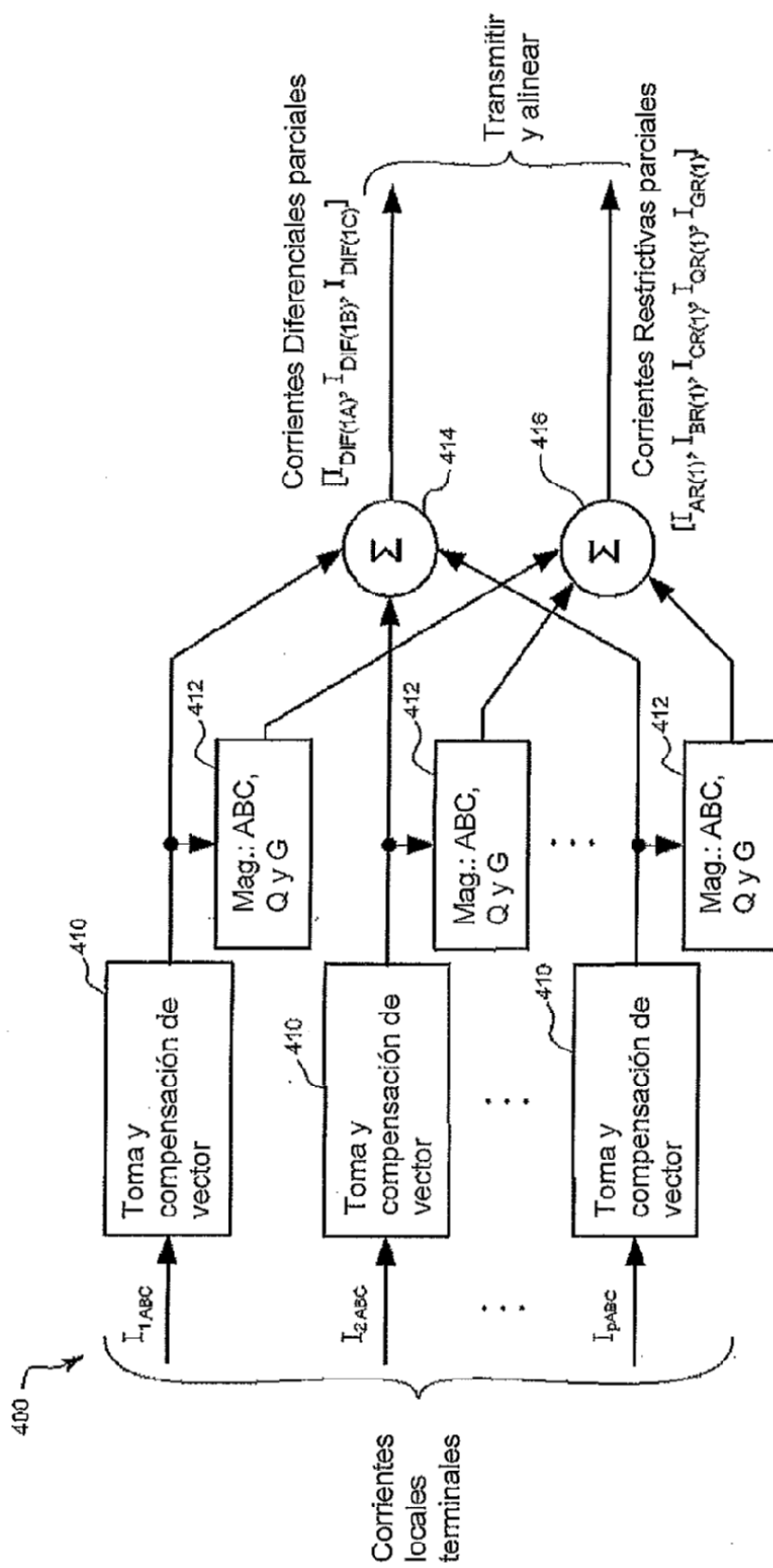


FIG. 4

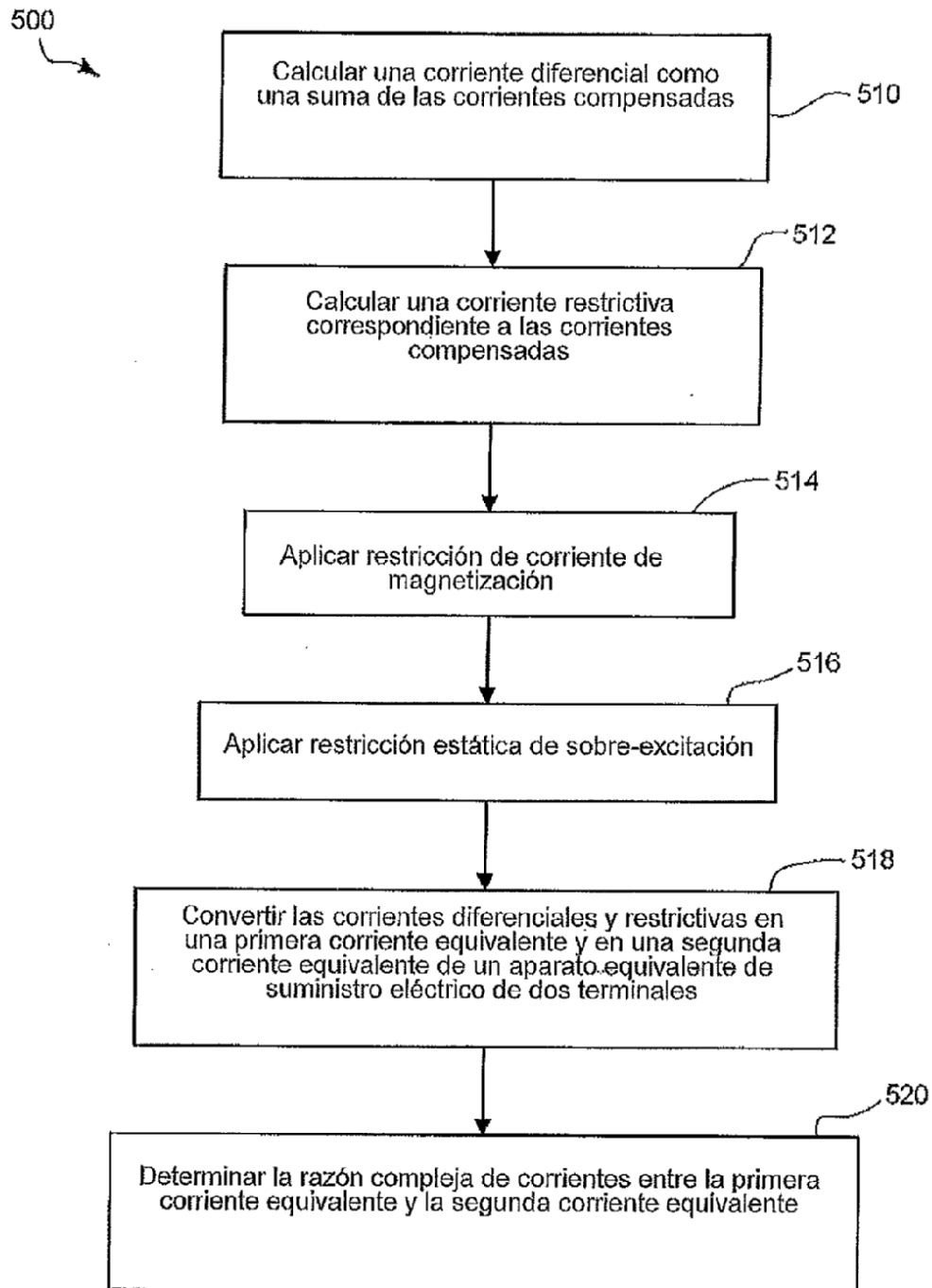


FIG. 5

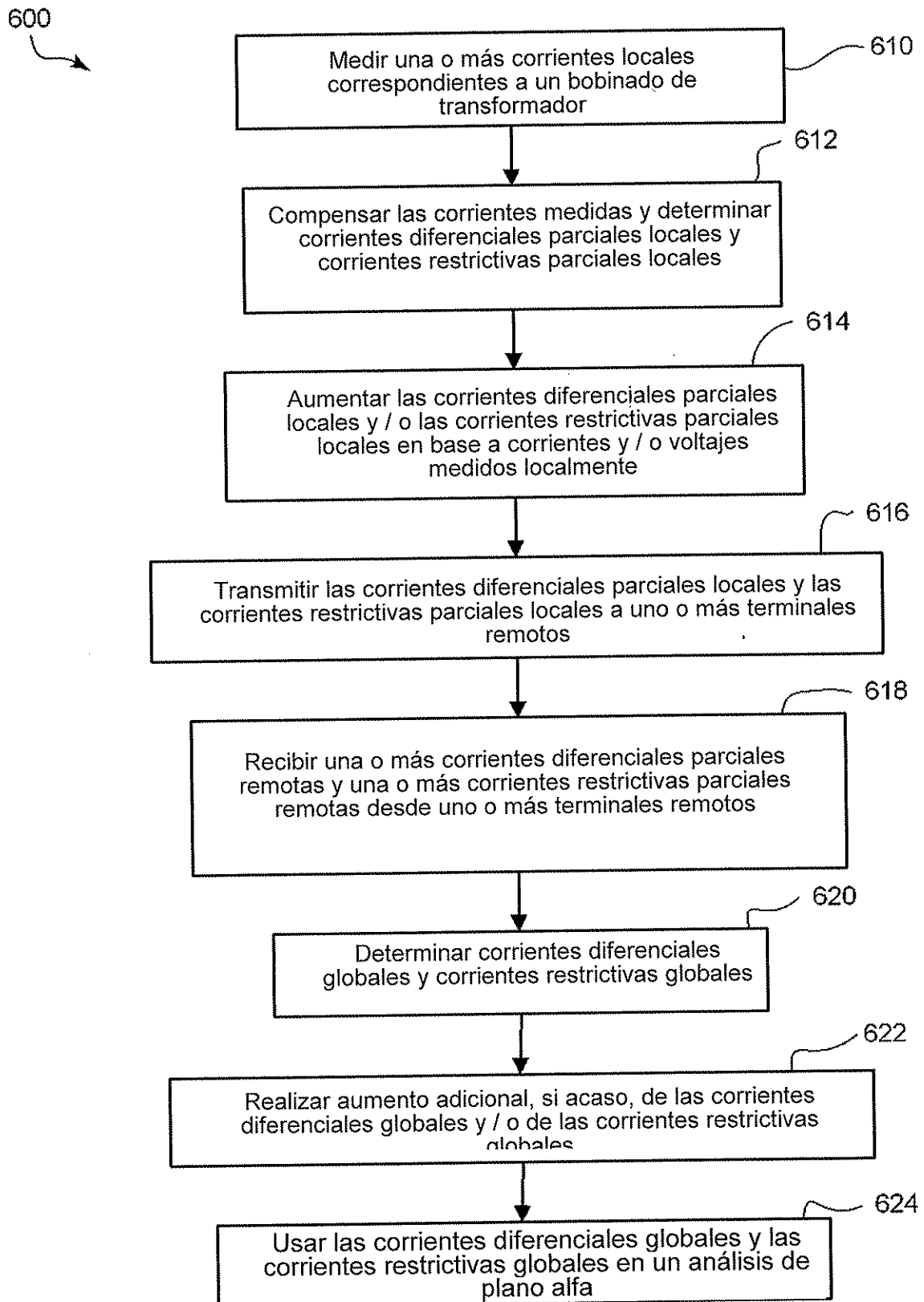


FIG. 6

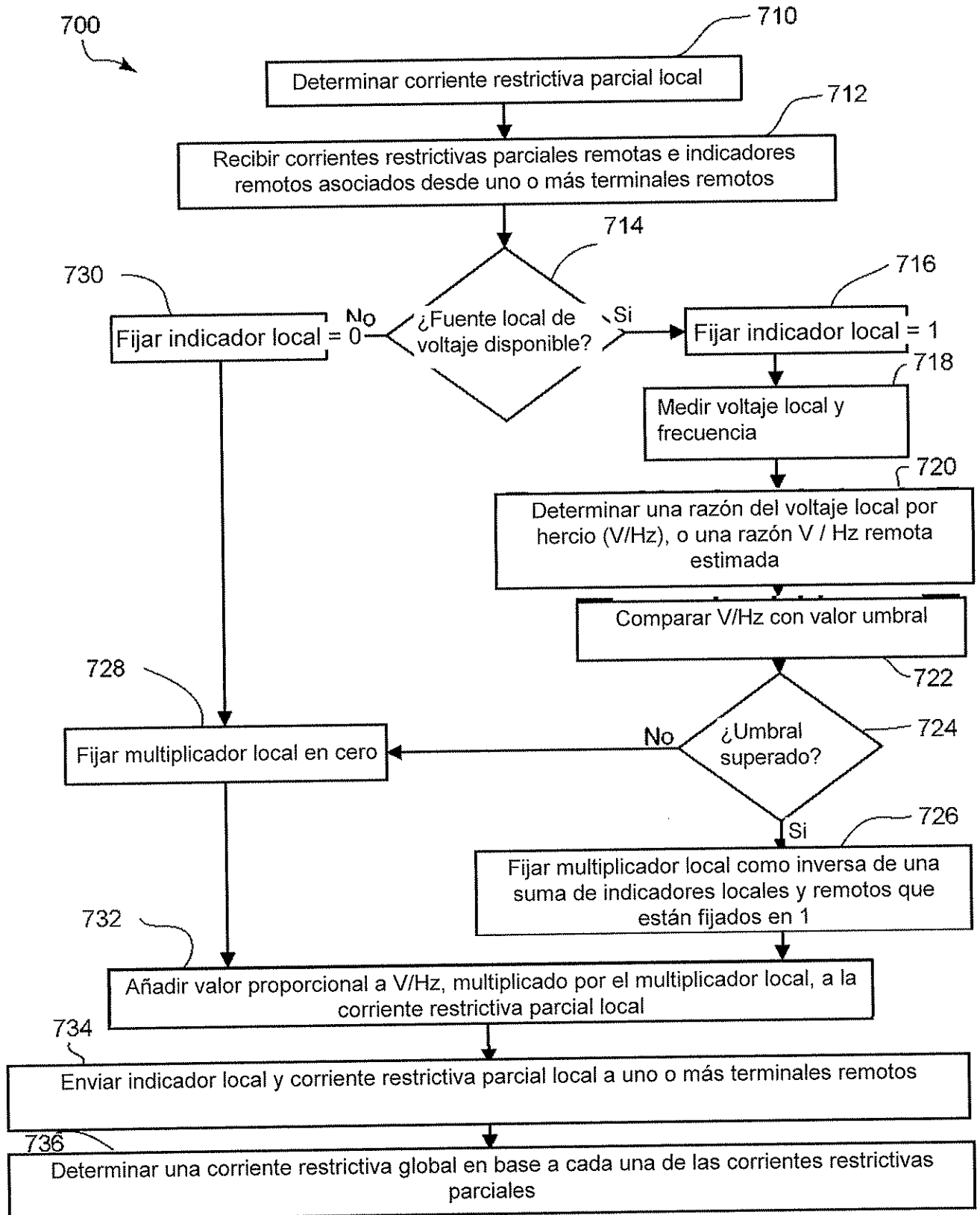


FIG. 7

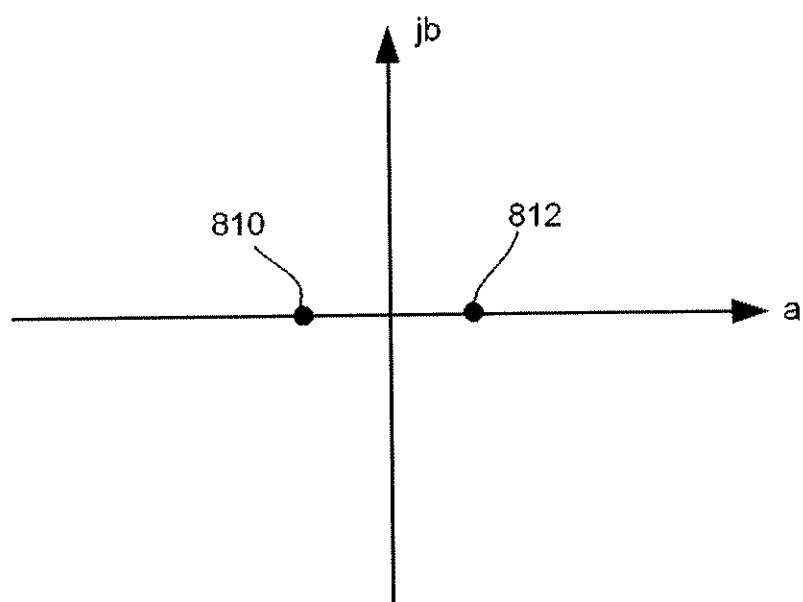


FIG. 8

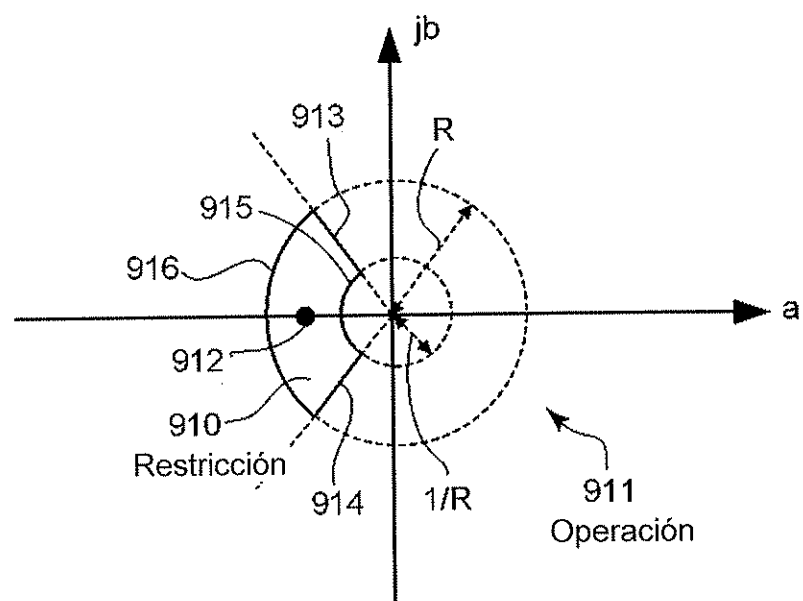


FIG. 9

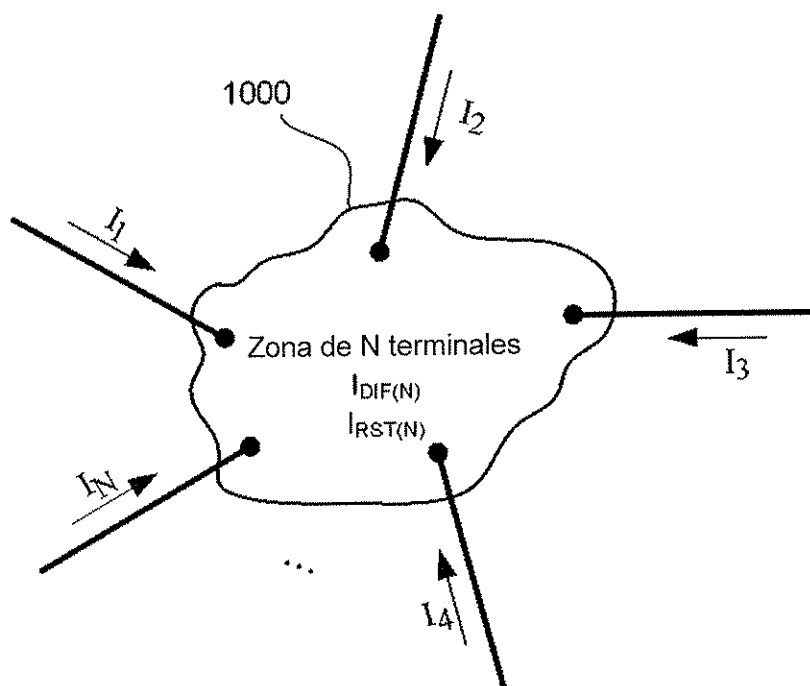


FIG. 10

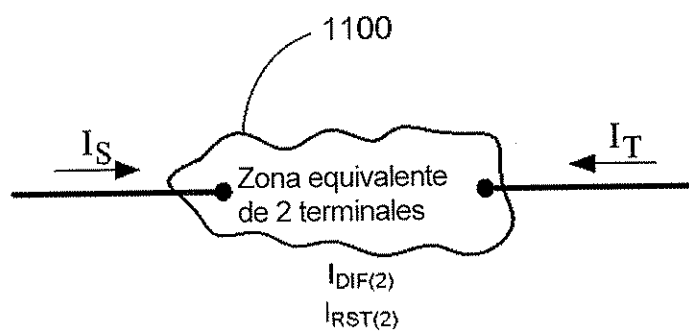


FIG. 11

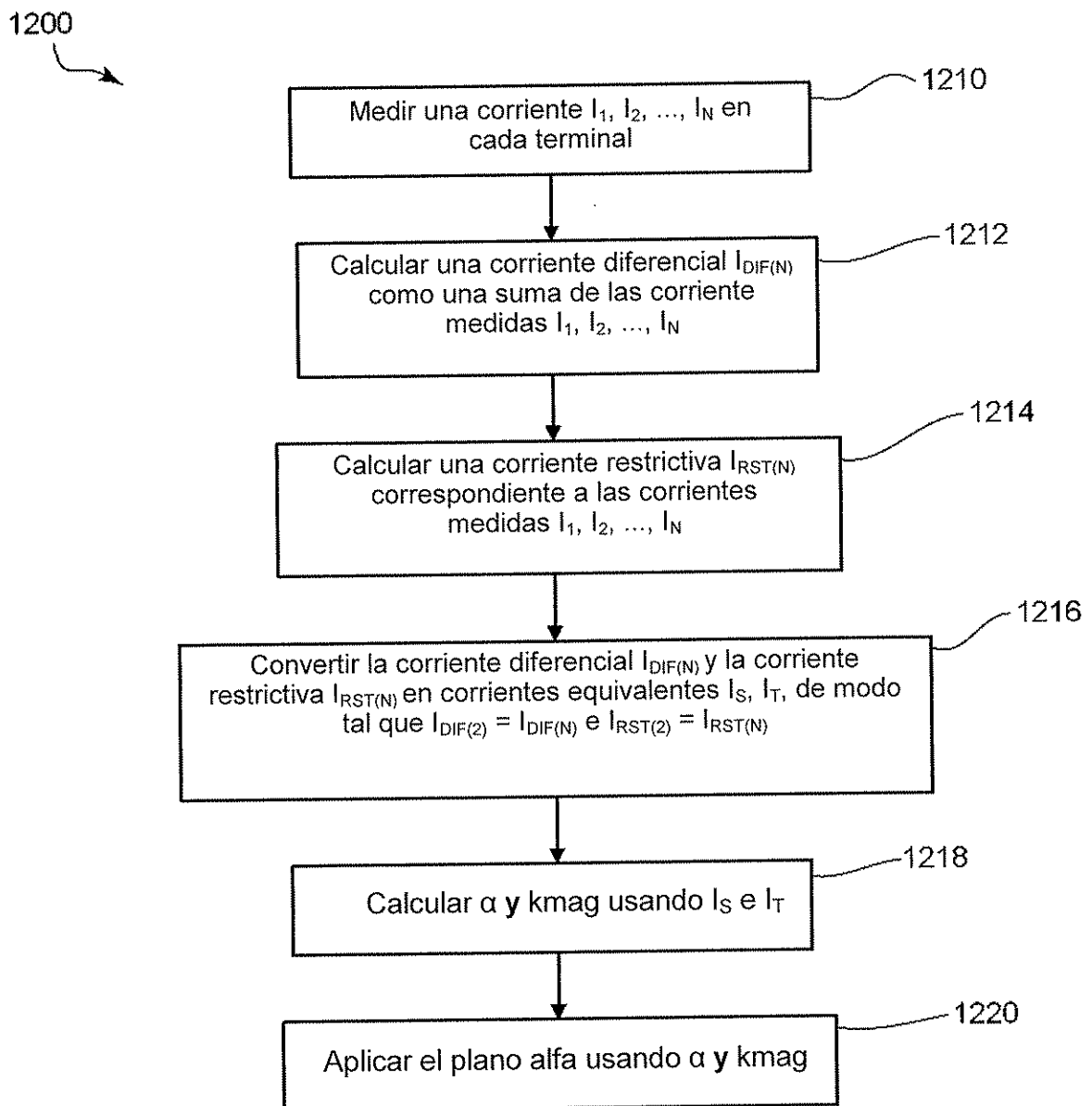


FIG. 12A

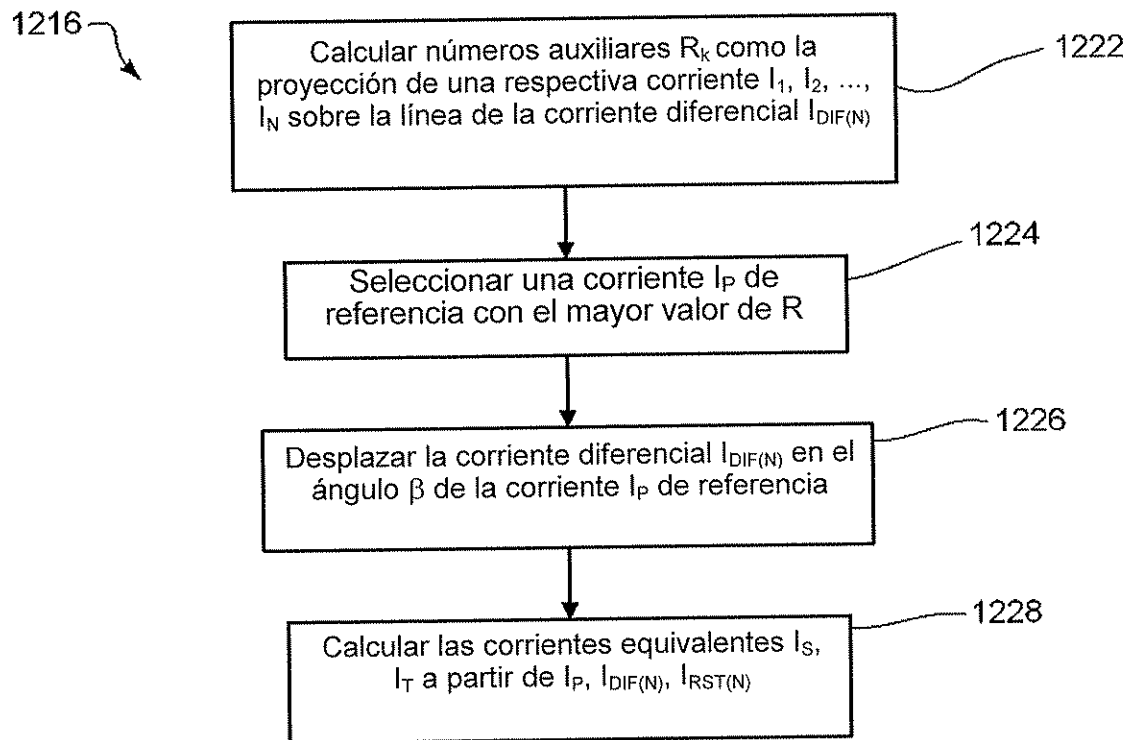


FIG. 12B

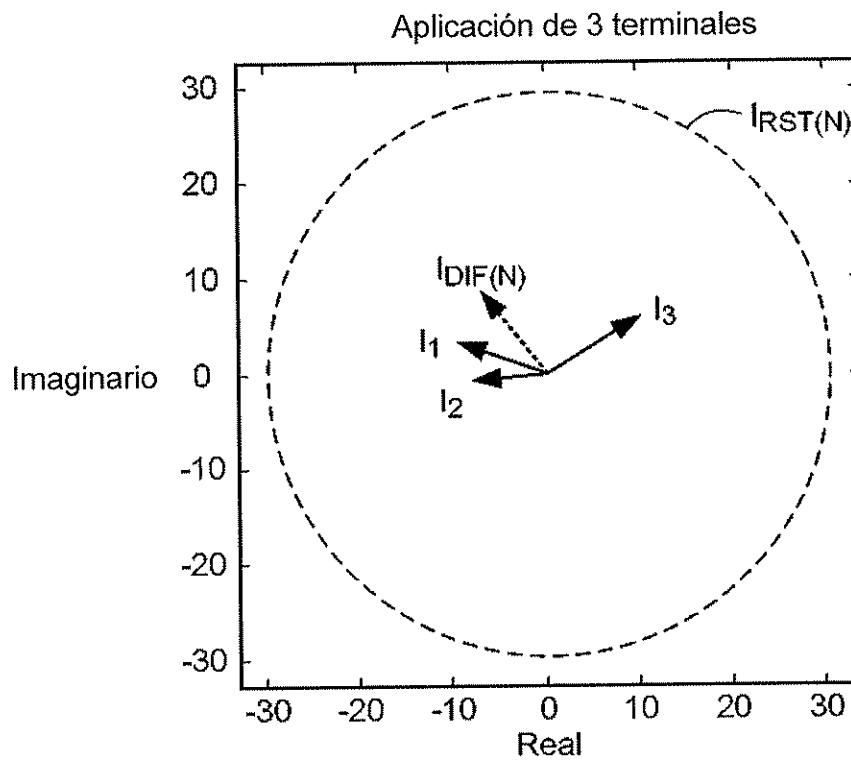


FIG. 13A

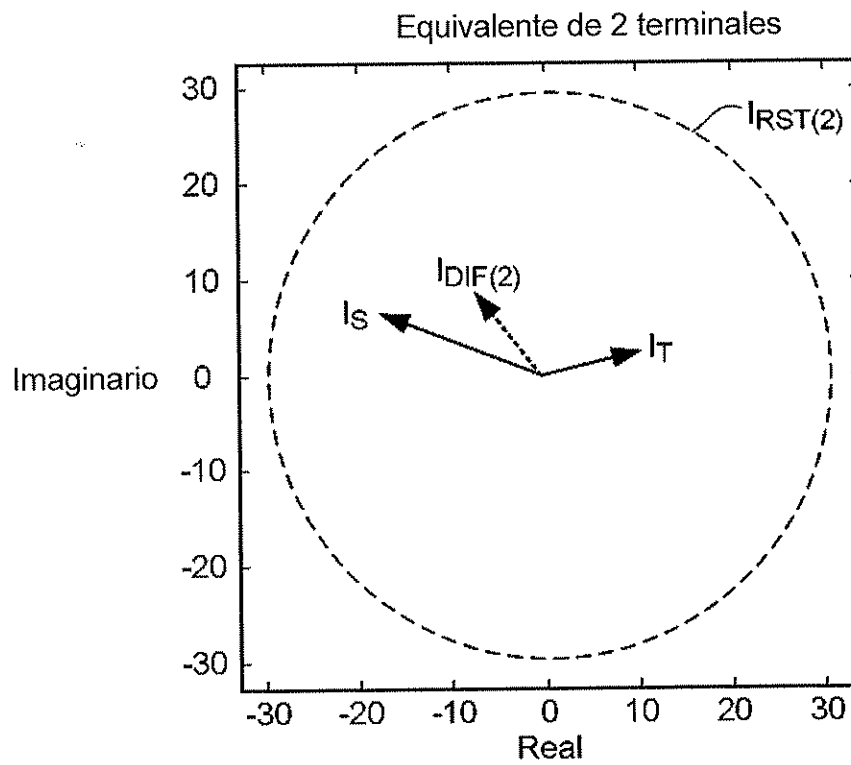


FIG. 13B

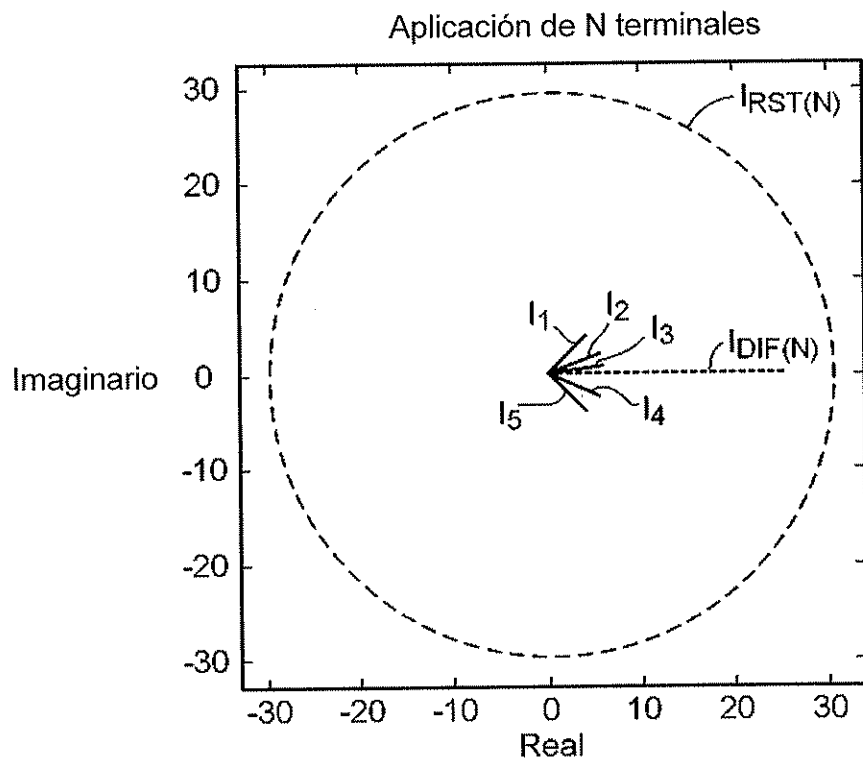


FIG. 14A

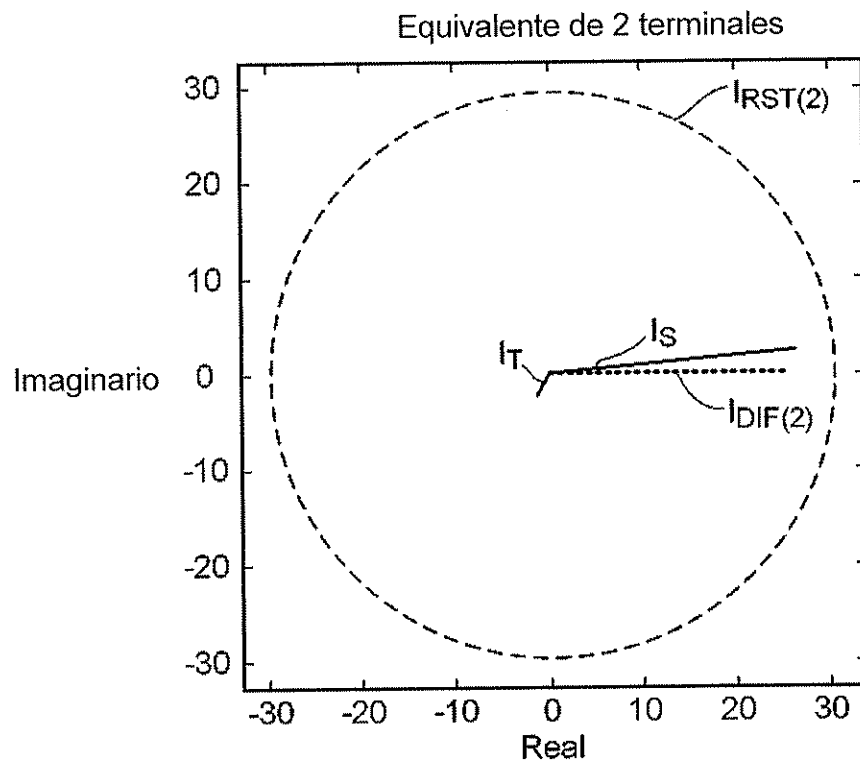


FIG. 14B

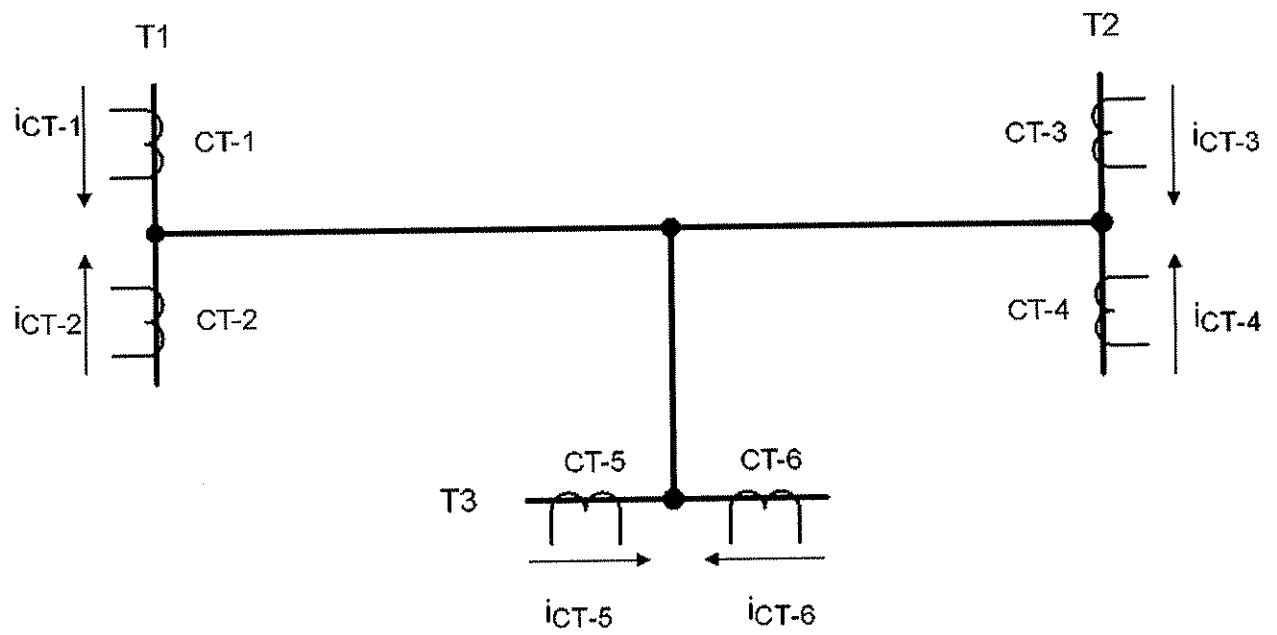


FIG. 15

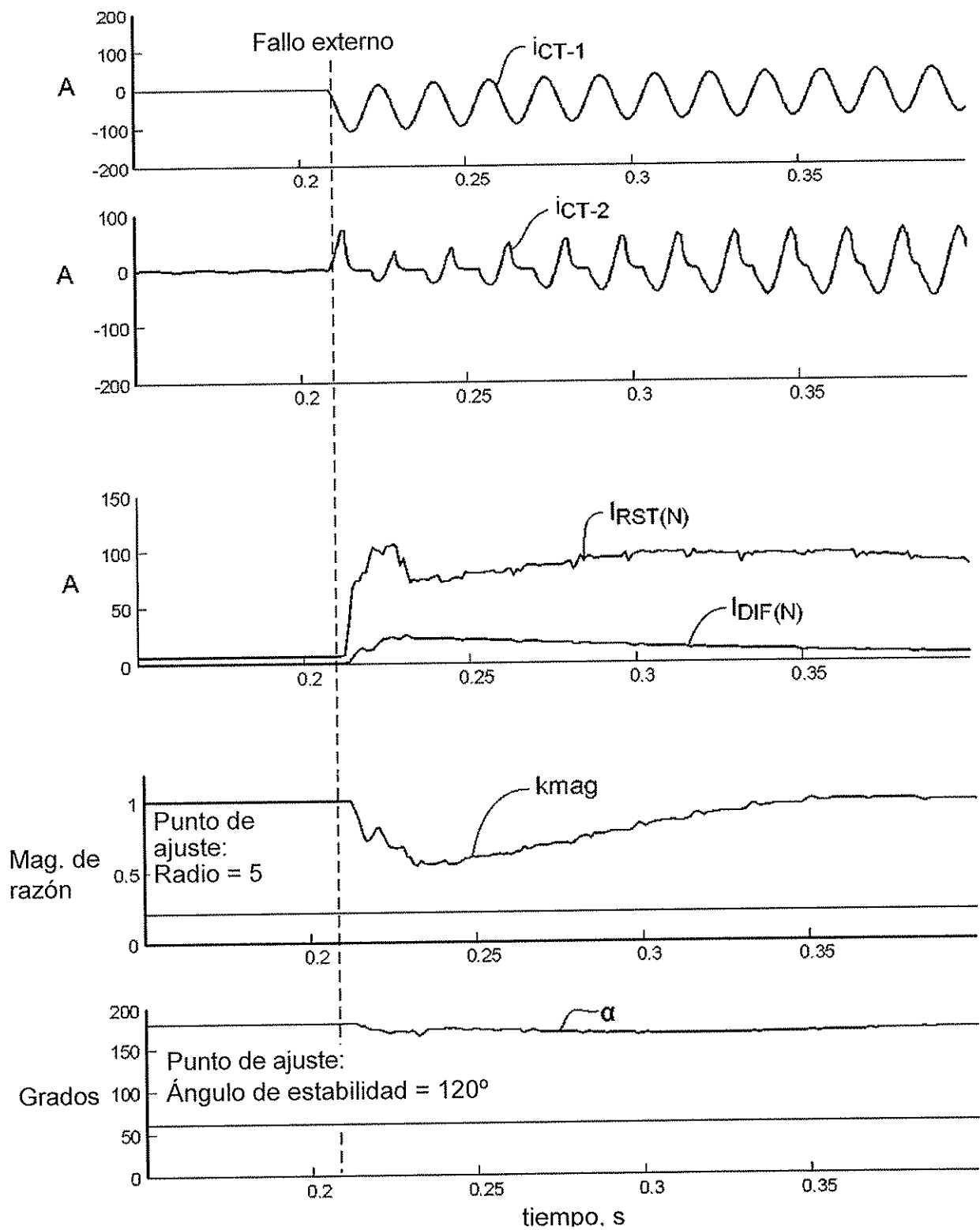


FIG. 16

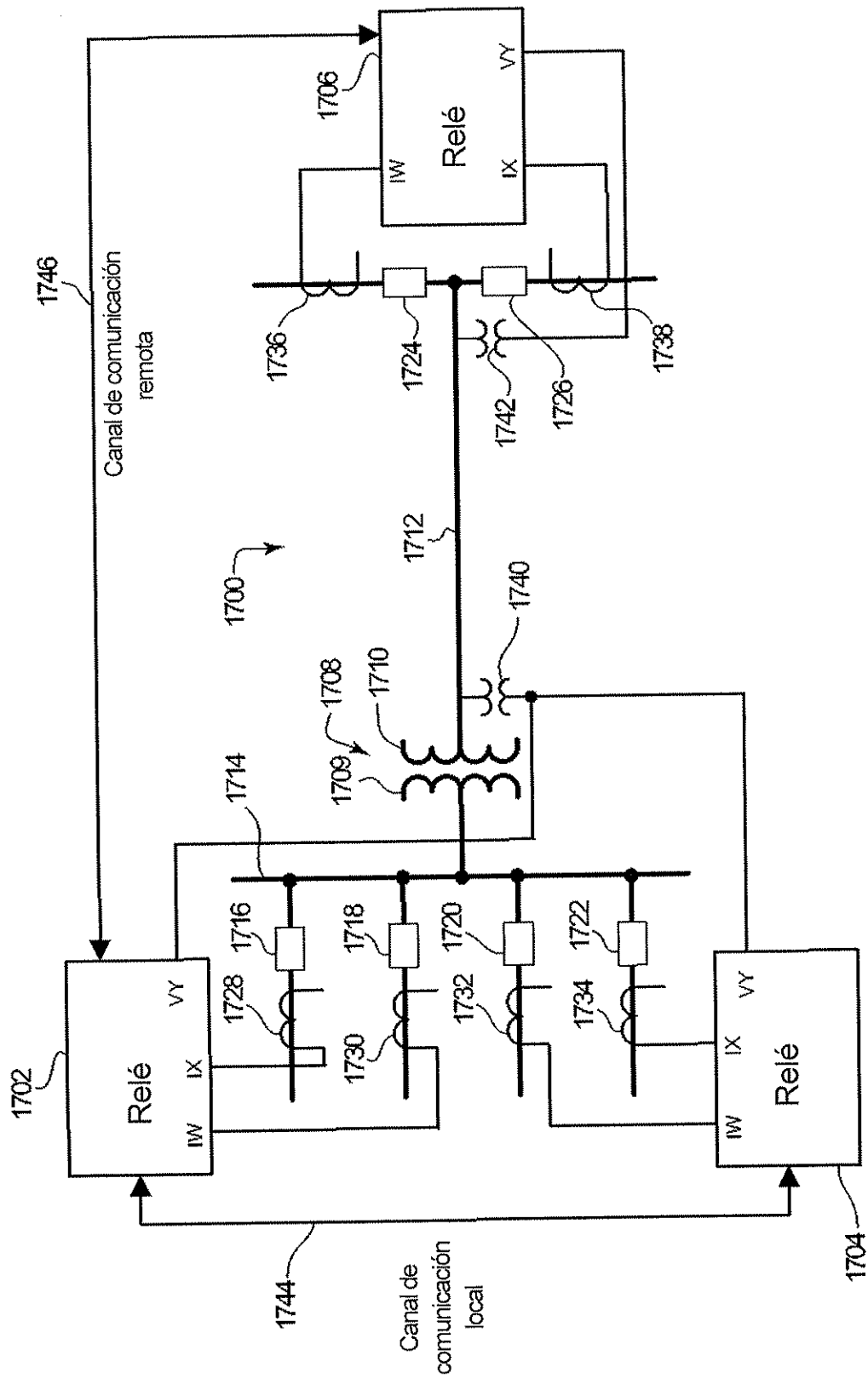


FIG. 17

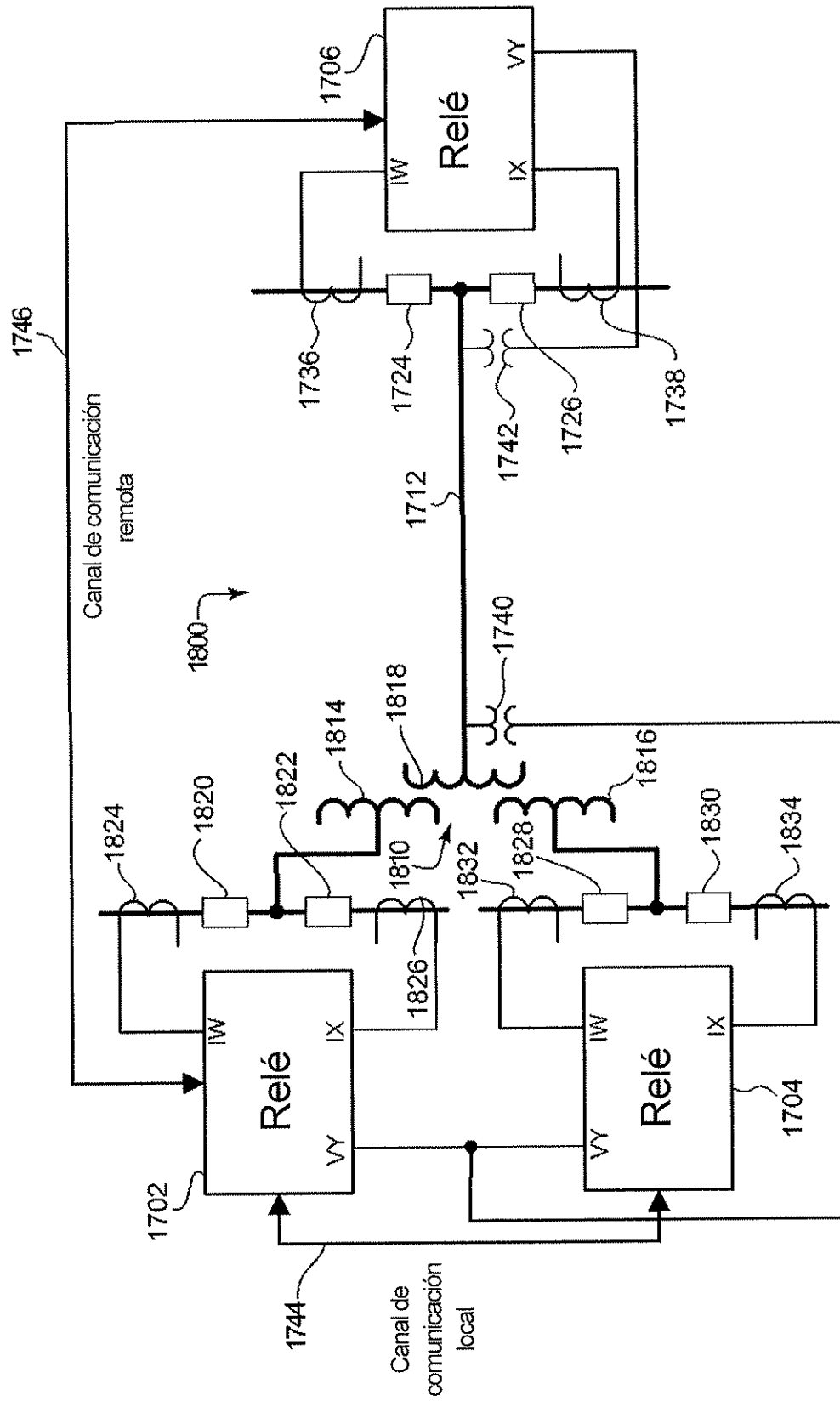


FIG. 18

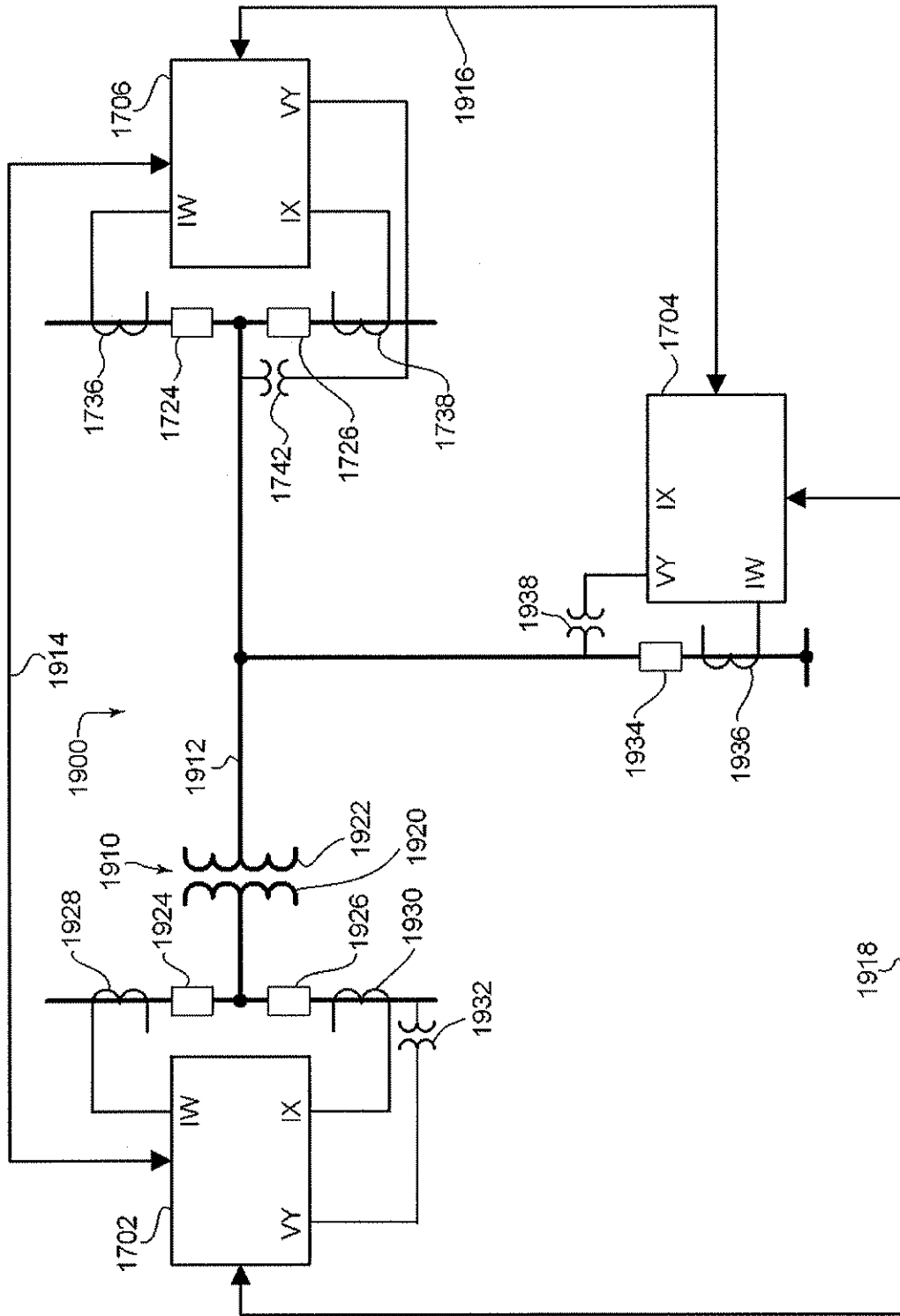


FIG. 19