

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 445 290**

21 Número de solicitud: 201290017

51 Int. Cl.:

H02H 3/08

(2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A2

22 Fecha de presentación:

16.09.2010

30 Prioridad:

17.09.2009 US 12/561,972

43 Fecha de publicación de la solicitud:

28.02.2014

71 Solicitantes:

**SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES,
INC. (100.0%)**

**2350 NE Hopkins Court
99163 - Pullman WASHINGTON US**

72 Inventor/es:

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

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

54 Título: **Procedimiento y sistema para la protección diferencial de corriente**

57 Resumen:

Se proporciona protección diferencial de corriente con compensación de corriente de carga para un aparato de suministro eléctrico, tal como una línea de alta tensión. Los terminales individuales determinan dinámicamente sus respectivas contribuciones, si las hubiera, al valor de compensación de corriente de carga según cambia dinámicamente la disponibilidad de una o más fuentes de voltaje dentro del aparato de suministro eléctrico. Los respectivos terminales calculan contribuciones locales a un valor de compensación de corriente de carga en base a mediciones locales de voltaje. Una pérdida de una fuente de voltaje se aborda ajustando coeficientes para los restantes puntos de compensación, a fin de reflejar la corriente de carga total. Una contribución local se suprime cuando la fuente local de voltaje ya no está disponible. Después de aplicar las contribuciones locales, puede usarse un análisis de plano alfa para determinar cuándo activar el aparato de suministro eléctrico.

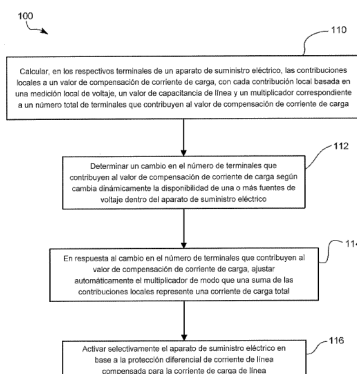


FIG 1

DESCRIPCIÓN

Procedimiento y sistema para la protección diferencial de corriente.

5 Campo técnico

La presente invención se refiere a sistemas de protección diferencial. Más específicamente, la invención describe sistemas y procedimientos para la protección diferencial de corriente de línea con compensación de corriente de carga que sea tolerante a la pérdida de una o más fuentes de entrada de voltaje.

10 Antecedentes de la invención

La compensación de corriente de carga es una función útil de un relé diferencial de corriente de línea. Las líneas aéreas de alta tensión pueden derivar alrededor de 1A por cada km de longitud (alrededor de 1,6A por milla). Para cables de alta tensión y líneas aéreas de ultra alta tensión, la corriente total de carga puede añadir cientos de amperios primarios. En algunos casos, la corriente de carga puede ser comparable con la corriente de falta, corriente de fuga.

En general, la corriente de carga se presenta como una señal diferencial espuria en un sistema de protección diferencial de corriente y puede afectar tanto a la seguridad como a la sensibilidad de la protección diferencial cuando se aplica a líneas o cables largos. Con respecto a la seguridad, puede ser necesario insensibilizar intencionalmente una función de protección diferencial fijando su umbral de activación por encima de la corriente de carga total de la línea, para garantizar el no funcionamiento en la condición de alimentación de extremo único. Esto afecta a la sensibilidad. En otro aspecto, la corriente de carga capacitiva reduce la corriente de falta inductiva en las entradas medidas por el relé durante fallos internos, reduciendo la sensibilidad de otra manera distinta.

La corriente de carga de línea puede afectar a la fase y a los elementos diferenciales de secuencia tanto en el estado estable como durante las corrientes transitorias. Sin embargo, la corriente de carga de línea puede afectar a un elemento diferencial de fase más de lo que afecta a un elemento de secuencia (p. ej., un elemento de secuencia negativa o un elemento de secuencia cero). Considérese, por ejemplo, la excitación de la línea, los fallos externos y los fallos internos en el contexto de la corriente de carga de línea. Durante la excitación de la línea de un aparato de suministro eléctrico que incluye una línea de transmisión, un terminal energizador deriva la corriente de carga total. Si el voltaje energizador es equilibrado y la línea está bien traspuesta, la corriente de carga es de secuencia positiva y afecta solamente a los elementos de fase.

Si la línea y/o el voltaje de suministro están desequilibrados, puede fluir una corriente de carga desequilibrada. Según la corriente de carga se suministra desde un terminal solamente, parece como una corriente de alimentación única y, como tal, generalmente no puede ser abordada usando los procedimientos restrictivos conocidos. Aumentar la activación permanentemente por encima de la corriente de carga, o usar el estado del interruptor remoto para estimular temporalmente la seguridad, son formas de tratar la corriente de carga de la línea durante la excitación.

Si la línea no está bien traspuesta y la corriente de carga total es alta, puede ser necesario aumentar la activación de las funciones de secuencia negativa y de secuencia cero considerablemente, disminuyendo potencialmente su alta sensibilidad natural de protección.

Durante los fallos externos, los cambios en los voltajes inducen corriente de carga extra. Esto incluye tanto el comienzo como el despeje del fallo. Como los voltajes de fallo son desequilibrados, pueden inducirse corrientes de carga simétricas, lo que puede afectar a las funciones de secuencia negativa y de secuencia cero. Esta situación puede no ser una preocupación mayor, sin embargo, ya que la corriente de fallo externo produce restricciones para las tres funciones diferenciales (fase, secuencia negativa y secuencia cero). Estos términos restrictivos permiten contrapesar el componente de corriente de carga en la corriente diferencial. Los sistemas débiles pueden presentar algún desafío, ya que no generan grandes corrientes que estimulen las restricciones, pero permiten que los voltajes se reduzcan considerablemente, creando mayores corrientes de carga.

Durante los fallos internos, la corriente de carga causada por el cambio en los voltajes se resta de la corriente de falta, reduciendo potencialmente la sensibilidad de la protección aplicada. Habitualmente, esto no es una preocupación mayor para las funciones de secuencia negativa y de secuencia cero, porque la alta sensibilidad se requiere durante los fallos de tierra de alta resistencia, y estos fallos generalmente no cambian mucho los voltajes. Por lo tanto, solamente se generan pequeñas corrientes de carga de secuencia cero y negativa durante los fallos de alta resistencia. Sin embargo, si las configuraciones de activación se aumentan para tratar la excitación de una línea débilmente traspuesta, la sensibilidad puede verse afectada.

La corriente de carga de línea puede no ser una preocupación mayor para las funciones de secuencia negativa y de secuencia cero, a menos que la línea no esté bien traspuesta o funcione bajo un considerable desequilibrio, por ejemplo, causado por el funcionamiento de un reactor de fase única. Si se requiere alta sensibilidad de la función diferencial de fase, la corriente de carga de línea, sin embargo, es una preocupación significativa.

En general, puede calcularse un valor de la corriente de carga de línea en base a los voltajes medidos y a la capacitancia equivalente de la línea protegida. El uso de voltajes para compensar la función diferencial de corriente crea una dependencia sobre las mediciones de voltaje, lo que compromete la fiabilidad de la protección cuando las entradas de voltaje quedan no disponibles, tal como ante la pérdida de condiciones potenciales, o cuando se usan VT (transformadores de voltaje) del lado del bus y se abre la línea (desconectada del bus mediante un interruptor abierto o un conmutador de desconexión).

Por otro lado, la Patente Estadounidense N° 6.518.767, titulada "Sistema de protección diferencial de línea para una línea de alta tensión", y cedida al cesionario de la presente invención, describe un sistema de protección de plano alfa. El principio de protección diferencial de corriente de plano alfa (o principio de plano alfa) descrito en dicha 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.

Descripción de la invención

La presente invención describe un procedimiento y un sistema para la protección diferencial de corriente. Así, según ciertas realizaciones descritas más adelante en el presente documento, un sistema diferencial de corriente de línea compensa la corriente de carga de línea incluso cuando algunas fuentes de voltaje quedan no disponibles. El sistema continúa compensando la corriente de carga de línea mientras esté disponible una única medición de voltaje en uno de los terminales de un aparato multi-terminal que incluye una línea de transmisión bajo protección.

En una realización, según se expone en detalle más adelante, cada relé de un sistema de protección diferencial de línea, que normalmente tiene acceso al voltaje, calcula corrientes de carga de fase en base a los voltajes de fase medidos y las capacitancias de la línea de transmisión. Un relé puede calcular las corrientes de carga, por ejemplo, usando valores instantáneos del voltaje y calculando valores instantáneos de la corriente en base al principio dv/dt , que es la tasa instantánea del cambio de voltaje con respecto al tiempo, usado al aplicar la ley de Ohm a las capacitancias. En otras realizaciones, el relé puede usar fasores para calcular las corrientes de carga. La capacitancia de línea puede representarse por los valores de secuencia positiva y cero o, con más precisión (p. ej., para líneas no traspuestas), por una matriz de 3x3 que describe la relación entre el voltaje y la corriente de carga para una línea trifásica.

Cada terminal determina una adecuación de su voltaje local para su uso en la compensación de la corriente de carga. Por ejemplo, el voltaje se marca como inadecuado tras la pérdida de potencial (p. ej., un transformador de voltaje (VT) falla), o cuando se usa un VT del bus pero la línea está desconectada del bus. Si el voltaje se marca como inadecuado, el relé suspende la operación de restar su porción de la corriente de carga. A la vez, el relé activa un indicador que informa a otros relés del sistema diferencial de línea que este terminal no está compensando. El indicador puede denominarse en el presente documento un indicador de compensación de corriente de carga (CCC).

Mientras el sistema diferencial de corriente de línea mida un voltaje en uno o más terminales de línea, el sistema diferencial de corriente de línea continúa proporcionando compensación de corriente de carga. Cada terminal envía un paquete con la corriente de carga restada ($CCC = 1$) o no restada en las corrientes transmitidas ($CCC = 0$). Cualquier terminal receptor sabe si sus pares aplicaron su porción de compensación y ajusta su porción en consecuencia (p. ej., cambiando un coeficiente), de modo tal que la corriente diferencial total continúe compensándose para la capacitancia total de línea.

Cuando los coeficientes se conmutan debido a un cambio en el número de terminales que contribuyen a la compensación de corriente de carga, puede ocurrir una breve condición de carrera, debido a latencias de comunicación, donde la suma de todos los coeficientes en el sistema puede diferir de un valor normal de 1,00. Además, puede haber un retardo (fracción de un ciclo de suministro eléctrico) cuando se detecta una pérdida de condición potencial que da como resultado el uso de un voltaje erróneo para cálculos de corriente de carga durante un periodo de tiempo. Así, ciertas realizaciones reveladas en el presente documento compensan estas condiciones de carrera.

Por ejemplo, para compensar las condiciones de carrera, una realización añade un término extra a la restricción tras conmutar el coeficiente. Este término extra puede ser proporcional al error cometido al conmutar los coeficientes. Por ejemplo, el término extra puede ser el valor absoluto de $\text{abs}(1/M_{\text{NUEVO}} - 1/M_{\text{VIEJO}}) * I_{\text{MAG_TOTAL_CARGA}}$, donde M_{NUEVO} es el nuevo coeficiente, M_{VIEJO} es el viejo coeficiente e $I_{\text{MAG_TOTAL_CARGA}}$ es la magnitud de la corriente total de carga. Por ejemplo, al conmutar el coeficiente de $1/3$ a $1/2$, o viceversa, el valor absoluto de $(1/2 - 1/3) = 1/6$ de la magnitud de la corriente de carga total se añade a la restricción. El término extra se mantiene en su sitio durante un periodo de tiempo predefinido (p. ej., dos ciclos) de modo tal que el sistema conmute sin fisuras desde un conjunto de relés de compensación a un conjunto distinto.

Además, o en otras realizaciones, se usa la compensación de corriente de carga de línea con un plano alfa, para determinar fallos internos. Después de que se resta la corriente de carga de línea de la corriente diferencial, se usan la corriente diferencial ajustada y una corriente restrictiva, según se expone en detalle más adelante, para calcular una primera corriente equivalente y una segunda corriente equivalente de un aparato de suministro eléctrico equivalente de

dos terminales. Se aplican luego una razón compleja de corrientes, entre la primera corriente equivalente y la segunda corriente equivalente, al plano alfa.

El plano alfa equivalente puede usarse con la compensación de corriente de carga de línea, independientemente del procedimiento usado para determinar el valor de la corriente de carga de línea. En otras palabras, las realizaciones reveladas en el presente documento para mitigar la dependencia de la disponibilidad de fuentes de voltaje no se requieren en toda realización que use el plano alfa equivalente con compensación de corriente de carga. De manera similar, un experto reconocerá, a partir de la presente invención que las realizaciones descritas en el presente documento para determinar la corriente de carga de línea con dependencia mitigada de fuentes de voltaje pueden usarse con una función diferencial porcentual, en lugar de usar el plano alfa equivalente.

Las realizaciones reveladas en el presente documento permiten a un usuario configurar fácilmente un sistema diferencial de corriente de línea para proporcionar compensación de corriente de carga que funcione cuando las señales de voltaje quedan permanente o temporalmente no disponibles, sin necesidad de intervención adicional del usuario. En cualquier momento dado, cada terminal sabe cuántos terminales compensan y ajusta su coeficiente en consecuencia.

Con fines ilustrativos, ciertas realizaciones ejemplares reveladas en el presente documento proporcionan protección para un aparato de suministro eléctrico que incluye una línea de alta tensión. Un experto apreciará, a partir de la presente invención, que los principios revelados pueden aplicarse a cualquier planta protegida o aparato de suministro eléctrico multi-terminal que genere una corriente de carga. 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 o un cable subterráneo, un bus de suministro eléctrico, un gran motor, un generador, un transformador, una combinación de los precedentes, 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) y los interruptores de circuito que funcionan para aislar la zona.

Breve descripción de los dibujos

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

la FIG. 1 es un diagrama de flujo de un procedimiento para la protección diferencial de corriente que usa compensación de corriente de carga, según una realización;

la FIG. 2 ilustra esquemáticamente un modelo de capacitancia distribuido de una línea de transmisión de tres terminales que puede usarse con ciertas realizaciones;

la FIG. 3 ilustra esquemáticamente un modelo de parámetros concentrados de la línea de transmisión en la FIG. 2 que puede usarse en ciertas realizaciones;

la FIG. 4 es un diagrama de flujo de un procedimiento para la compensación de corriente de carga efectuada por un terminal local en un sistema de protección diferencial de corriente, según una realización;

la FIG. 5A ilustra gráficamente ondas de voltajes y la FIG. 5B ilustra gráficamente formas de onda de porciones calculadas de la correspondiente corriente de carga para un primer terminal en una simulación de ejemplo de realización;

la FIG. 6A ilustra gráficamente formas de onda de voltajes y la FIG. 6B ilustra gráficamente formas de onda de porciones calculadas de la correspondiente corriente de carga para un segundo terminal en la simulación del ejemplo de realización mostrado en las FIGS. 5A y 5B;

la FIG. 7A ilustra gráficamente voltajes de formas de onda y la FIG. 7B ilustra gráficamente formas de onda de porciones calculadas de la correspondiente corriente de carga para un tercer terminal en la simulación del ejemplo de realización mostrado en las FIGS. 5A, 5B, 6A y 6B;

la FIG. 8A ilustra gráficamente formas de onda de corrientes de carga efectivas y la FIG. 8B ilustra gráficamente formas de onda de corrientes de carga calculadas para la simulación del ejemplo de realización mostrado en las FIGS. 5A, 5B, 6A, 6B, 7A y 7B;

la FIG. 9A ilustra gráficamente una forma de onda de corriente diferencial sin compensación y una forma de onda diferencial con compensación para la fase A, según el ejemplo de realización mostrado en las FIGS. 5A, 5B, 6A, 6B, 7A y 7B;

- la FIG. 9B ilustra gráficamente una forma de onda de corriente diferencial sin compensación y una forma de onda diferencial con compensación para la fase B, según el ejemplo de realización mostrado en las FIGS. 5A, 5B, 6A, 6B, 7A y 7B;
- 5 la FIG. 9C ilustra gráficamente una forma de onda de corriente diferencial sin compensación y una forma de onda diferencial con compensación para la fase C, según el ejemplo de realización mostrado en las FIGS. 5A, 5B, 6A, 6B, 7A y 7B;
- 10 la FIG. 10 ilustra gráficamente una respuesta de frecuencia de una admitancia de una línea aérea de muestra para unas pocas longitudes distintas de línea sobrepuestas a una respuesta de frecuencia del modelo de parámetros concentrados, según una realización;
- 15 la FIG. 11 es un diagrama en bloques de un módulo para generar un término restrictivo extra a partir del espectro de alta frecuencia en la corriente diferencial, según una realización;
- la FIG. 12 ilustra esquemáticamente una línea de alta tensión con un reactor de desvío, según una realización;
- 20 la FIG. 13 es un diagrama de flujo de un procedimiento para la protección diferencial de corriente con compensación de corriente de carga que usa el plano alfa, según una realización;
- la FIG. 14 es un diagrama de flujo de un procedimiento para la compensación de corriente de carga con corriente restrictiva intencionalmente aumentada que usa un plano alfa equivalente, según una realización;
- 25 la FIG. 15 es un diagrama de flujo de un procedimiento para la protección diferencial de corriente de línea que incluye aumentar las corrientes diferenciales parciales y / o las corrientes restrictivas parciales, según una realización;
- la FIG. 16 es un diagrama simplificado de un plano alfa (razones de corrientes);
- 30 la FIG. 17 ilustra gráficamente una región restrictiva y una región operativa en un plano alfa, usado según una realización, para decisiones de determinación de fallos;
- la FIG. 18 ilustra esquemáticamente una zona de protección diferencial general de N terminales, según una realización;
- 35 la FIG. 19 ilustra esquemáticamente una zona de protección equivalente de dos terminales, según una realización.
- la FIG. 20A es un diagrama de flujo de un procedimiento para la protección diferencial de corriente de un aparato de suministro eléctrico multi-terminal, según una realización;
- 40 la FIG. 20B 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. 21A ilustra gráficamente un plano alfa para una aplicación de tres terminales ($N=3$) según una realización ejemplar;
- 45 la FIG. 21B ilustra gráficamente un plano alfa para el equivalente de dos terminales de la realización mostrada en la FIG. 6A, según una realización;
- 50 las FIGS. 22A y 22B ilustran gráficamente los respectivos planos alfa para el caso de un fallo interno, según una realización;
- la FIG. 23 ilustra esquemáticamente una configuración de línea de interruptor dual de tres terminales, según una realización; y
- 55 la FIG. 24 ilustra gráficos de diversas señales durante un fallo AB externo en la configuración mostrada en la FIG. 8, según una realización.

Descripción detallada de las realizaciones preferidas

- 60 Las realizaciones aquí descritas 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.
- 65

Además, los rasgos, operaciones o características descritos pueden combinarse de cualquier forma adecuada en una o más realizaciones. También se entenderá inmediatamente 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.

Compensación de corriente de carga en condiciones que cambian dinámicamente

Como se ha expuesto en lo que antecede, la compensación de corriente de carga retira la corriente de carga de la señal diferencial. El procedimiento aplicado para la compensación de corriente de carga debería funcionar en condiciones equilibradas y desequilibradas, para líneas traspuestas y no traspuestas, durante la excitación, durante fallos externos e internos y durante otros sucesos. En una realización, un sistema diferencial de corriente de línea compensa la corriente de carga de línea según las fuentes de voltaje quedan dinámicamente no disponibles, o disponibles para el esquema de protección de un aparato de suministro eléctrico. Por ejemplo, las fuentes de voltaje pueden quedar “no disponibles” o inadecuadas de otra manera para su uso en la determinación de la corriente de carga de línea durante una pérdida de condición potencial, o cuando se usan transformadores potenciales del lado del bus y se abre la línea (desconectada del bus mediante un interruptor abierto o conmutador de desconexión).

En una realización, un sistema de protección diferencial de corriente proporciona una compensación de corriente de carga en la cual las fracciones de la corriente de carga son estimadas por cada relé del sistema de protección, en base solamente a voltajes locales. El sistema aborda la pérdida de una fuente de voltaje usando los restantes voltajes del sistema y ajustando los coeficientes usados en los restantes puntos de compensación para reflejar la corriente de carga total. La fracción local de compensación se suprime cuando la fuente de voltaje local no está disponible. Cada terminal ajusta su coeficiente para su fracción local de la corriente de carga, en base a la información de estado incluida en los paquetes de comunicación intercambiados que indican cuáles de las corrientes remotas están compensadas para la corriente de carga.

La FIG.1 es un diagrama de flujo de un procedimiento 100 para la protección diferencial de corriente, usando compensación de corriente de carga, según una realización. El procedimiento 100 incluye calcular 110, en los respectivos terminales de un aparato de suministro eléctrico, contribuciones locales a un valor de compensación de corriente de carga. Cada contribución local se basa en una medición de voltaje local, un valor de capacitancia de línea y un coeficiente correspondiente a un número total de terminales que contribuyen al valor de compensación de corriente de carga.

El procedimiento 100 incluye adicionalmente determinar 112 un cambio en el número de terminales que contribuyen al valor de compensación de corriente de carga, según cambia dinámicamente la disponibilidad de una o más fuentes de voltaje dentro del aparato de suministro eléctrico. En respuesta al cambio en el número de terminales que contribuyen al valor de compensación de corriente de carga, el procedimiento 100 ajusta automáticamente el coeficiente de modo tal que una suma de las contribuciones locales represente una corriente de carga total. El procedimiento 100 incluye adicionalmente activar 116 selectivamente el aparato de suministro eléctrico en base a la protección diferencial de corriente compensada para la corriente de carga de línea.

El valor de capacitancia de línea usado como parte del cálculo 110 de una contribución local a un valor de compensación de corriente de carga es una capacitancia de línea total estimada en base a un modelo de línea distribuida o a un modelo de línea de parámetros concentrados. Por ejemplo, la FIG. 2 ilustra esquemáticamente un modelo de capacitancia distribuida de una línea 200 de transmisión de tres terminales que puede usarse con ciertas realizaciones. Un primer voltaje v_1 se aplica a un primer terminal, un segundo voltaje v_2 se aplica a un segundo terminal y un tercer voltaje v_3 se aplica a un tercer terminal de la línea 200 de transmisión multi-terminal. Con fines ilustrativos, se muestra un modelo 210 de capacitancia distribuido a lo largo de la línea 200 de transmisión multi-terminal.

La línea 200 de transmisión multi-terminal deriva una corriente de carga a través de sus capacitancias distribuidas 210. La distribución exacta de esta corriente depende de parámetros de línea y de sistema, así como del perfil del voltaje a lo largo de la línea 200 de transmisión multi-terminal y de sus segmentos. Voltajes mayores derivan mayores corrientes de

carga. Las líneas de extremo abierto pueden desarrollar un exceso de voltaje en el extremo abierto, sin derivar ninguna corriente desde el extremo abierto. Durante los fallos (p. ej., fallos internos o externos), los voltajes cambian y se desequilibran, causando cambios en la corriente de carga, fluyendo la carga desde y hacia la línea 200 de transmisión multi-terminal.

Desde el punto de vista de la protección diferencial, sin embargo, la corriente de carga total puede tener más interés que los componentes de la corriente de carga total suministrados desde los terminales de línea individuales. Así, en ciertas realizaciones, la corriente total de carga de línea se aproxima como una corriente derivada por la capacitancia total de línea ante un voltaje medio de línea. La capacitancia total de línea es un parámetro conocido, o bien puede determinarse fácilmente en base al diseño de línea o a mediciones, y puede ser una configuración de usuario proporcionada al sistema de protección diferencial. El voltaje medio de la línea puede calcularse a partir de los voltajes medidos de terminales de línea.

La FIG. 3 ilustra esquemáticamente un modelo de parámetros concentrados de la línea 200 de transmisión mostrada en la FIG. 2 que puede usarse en ciertas realizaciones. Como se muestra en la FIG. 3, la capacitancia de línea puede representarse por un modelo 310, 312, 314 de parámetros concentrados de la línea 200 de transmisión multi-terminal, que permite al relé diferencial de corriente de línea medir el voltaje. Así, en una realización, la corriente i_{C_TOTAL} de carga se representa como:

$$i_{C_TOTAL} = C_{TOTAL} \cdot d / dt \cdot V_{PROMEDIO}, \quad (1)$$

donde C_{TOTAL} es la capacitancia total de línea y $V_{PROMEDIO}$ es el voltaje medio de línea calculado a partir de los voltajes medidos v_1, v_2, v_3 de terminales de línea.

El voltaje medio de línea puede aproximarse por el voltaje medio de terminal y, por tanto:

$$i_{C_TOTAL} = C_{TOTAL} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{d}{dt} (v_1 + v_2 + v_3). \quad (2)$$

Reordenando:

$$i_{C_TOTAL} = \frac{1}{3} \cdot C_{TOTAL} \cdot \frac{d}{dt} v_1 + \frac{1}{3} \cdot C_{TOTAL} \cdot \frac{d}{dt} v_2 + \frac{1}{3} \cdot C_{TOTAL} \cdot \frac{d}{dt} v_3. \quad (3)$$

En otras palabras, la corriente de carga total es la suma de tres componentes:

$$i_{C_TOTAL} = i_{C1} + i_{C2} + i_{C3}, \quad (4)$$

cada uno obtenido de un voltaje terminal de línea individual:

$$i_{C1} = \frac{1}{3} \cdot C_{TOTAL} \cdot \frac{d}{dt} v_1, \quad (5)$$

$$i_{C2} = \frac{1}{3} \cdot C_{TOTAL} \cdot \frac{d}{dt} v_2, \quad (6)$$

$$i_{C3} = \frac{1}{3} \cdot C_{TOTAL} \cdot \frac{d}{dt} v_3. \quad (7)$$

Las ecuaciones (1) – (7) muestran cómo cada terminal calcula una porción de la corriente de carga total en base a un voltaje local y a una parte de la capacitancia total de línea, proporcional al número total de terminales de línea que realizan la compensación en cualquier momento dado. Estas porciones de la corriente de carga, cuando se suman en la corriente diferencial final, anulan esencialmente la corriente de carga efectiva.

En consecuencia, el sistema diferencial de corriente de línea calcula efectivamente la corriente de carga en base al voltaje promedio de todos los terminales de línea, sin enviar ningún voltaje entre los relés. En cambio, cada terminal resta su porción de la corriente de carga de la corriente medida y la envía a sus pares como:

$$i_{TX} = i_{MEDIDA} - i_C, \quad (8)$$

donde i_{TX} es la corriente transmitida por el terminal local a sus pares (p. ej., terminales remotos), i_{MEDIDA} es la corriente medida por el terminal local (que puede ser una corriente diferencial parcial) e i_C es la contribución local al valor de compensación de corriente de carga. Cada terminal también calcula la corriente diferencial global de línea, i_{DIF} , como:

$$i_{DIF} = i_{TX} + \sum i_{RX}, \quad (9)$$

donde i_{RX} es la corriente recibida desde un par.

Usando la FIG. 3 como un ejemplo, la corriente diferencial se calcula según lo siguiente:

$$i_{DIF} = (i_{MEDIDA1} - i_{C1}) + (i_{MEDIDA2} - i_{C2}) + (i_{MEDIDA3} - i_{C3}), \quad (10)$$

o bien

$$i_{DIF} = i_{MEDIDA1} + i_{MEDIDA2} + i_{MEDIDA3} - (i_{C1} + i_{C2} + i_{C3}), \quad (11)$$

o bien

$$i_{DIF} = i_{MEDIDA1} + i_{MEDIDA2} + i_{MEDIDA3} - i_{C_TOTAL}. \quad (12)$$

La porción de la corriente de carga estimada en un terminal dado puede no estar estrechamente relacionada con la corriente de carga efectiva suministrada por el terminal dado. En un extremo de línea abierto, por ejemplo, la corriente efectiva suministrada por el terminal abierto es cero, mientras que el terminal abierto estima su porción de la corriente de carga total en base al voltaje en el extremo abierto, siempre que estén instalados VT del lado de la línea. A la vez, un terminal cerrado subestimar su porción. Cuando se suman en los cálculos diferenciales, todas las estimaciones de la corriente de carga coinciden esencialmente con la corriente de carga total efectiva de la línea.

En general, para una línea con T terminales realizando la compensación de corriente de carga, donde T es un subconjunto del número total N de terminales (y T = N si todos los terminales miden un respectivo voltaje adecuado para su uso con compensación de corriente de carga), cada terminal usa 1/T de la capacitancia total de línea y su propio voltaje, para estimar su porción del valor de compensación de corriente de carga. Así, todos los coeficientes se suman en un total de alrededor de 1,00.

En resumen, la FIG. 4 es un diagrama de flujo de un procedimiento 400 para la compensación de corriente de carga, realizado por un terminal local en un sistema de protección diferencial de corriente, según una realización. El procedimiento 400 incluye medir 410 una corriente local y recibir 412 corrientes remotas e indicadores de CCC remotos asociados desde uno o más terminales remotos. El terminal local luego consulta 414 si una fuente de voltaje local está disponible. Si la fuente de voltaje local está disponible, entonces el terminal local mide 416 un valor de voltaje local y fija 418 un coeficiente local como una inversa del número de terminales locales y remotos con fuentes de voltaje disponibles. El número de terminales remotos con fuentes de voltaje disponibles se determina a partir de los indicadores remotos de CCC. Sin embargo, si la fuente de voltaje local no está disponible, el terminal local fija 420 el coeficiente local en cero.

El terminal local calcula entonces 422 una contribución local al valor de compensación de corriente de carga en base al valor del voltaje local y al coeficiente local, y aumenta selectivamente 424 la corriente local medida restando la contribución local a la corriente local medida. Por ejemplo, si el multiplicador local es cero (porque la fuente de voltaje local no está disponible), entonces la contribución local se convierte en cero y no se resta nada del valor de corriente local medida. El terminal local transmite 426 entonces la corriente local y un indicador local de CCC a dicho(s) terminal(es) local(es). El indicador local de CCC indica si el terminal local contribuye o no a la compensación global de corriente de carga (p. ej., si el terminal local restó o no un valor no nulo al valor de corriente local transmitido). El terminal local aplica 428 entonces la protección diferencial de corriente en base, al menos en parte, a las corrientes remotas recibidas y a la corriente local. Como se expone más adelante, la protección diferencial de corriente de línea en una realización incluye un análisis de plano alfa equivalente.

Ejemplo de realización trifásica

Según lo indicado por las ecuaciones (1) – (3), la corriente de carga se calcula como una derivada de la señal de voltaje, suponiendo una capacitancia conocida de la línea. Un relé basado en microprocesador, según una realización, usa el filtrado digital para obtener numéricamente la derivada del tiempo. Por ejemplo, en una realización, se obtiene una réplica de corriente de carga de muestras en bruto de 8kHz, usando un diferenciador numérico en forma de un filtro de respuesta de impulso finito (FIR) de ventana corta. Tal realización puede estar bien adaptada, por ejemplo, para la implementación en una formación de compuertas programables en el terreno (FPGA). En una realización, el filtro de tres puntos usado (desde la muestra más reciente a la más antigua en la ventana):

$$h_{CC} = G * [3/2, -2, 1/2], \quad (13)$$

donde G se selecciona para dar una ganancia unitaria en una frecuencia fundamental. Por ejemplo, $G = 21,20497$ si la

frecuencia fundamental es 60 Hz, y $G = 25,45171$ si la frecuencia fundamental es 50Hz. Un experto reconocerá, a partir de la presente invención, que estos valores numéricos se proporcionan solamente a modo de ejemplo, y no como limitación. Además, pueden usarse otros tipos de filtrado digital. En ciertas realizaciones, es suficiente cualquier filtro que actúe como un diferenciador (derivada temporal) en una gama de frecuencias entre alrededor de 0Hz y alrededor de 400Hz.

En general, se usa la siguiente ecuación para calcular las corrientes de carga de fase para las fases A, B y C:

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}_C = \begin{bmatrix} C_{AA} & C_{AB} & C_{AC} \\ C_{BA} & C_{BB} & C_{BC} \\ C_{CA} & C_{CB} & C_{CC} \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} \quad (14)$$

Para líneas totalmente traspuestas, la matriz de capacitancia de dimensión 3x3 es simétrica e incluye las autocapacitancias y capacitancias mutuas calculadas a partir de las susceptancias de secuencia cero y positiva de la línea. Para líneas no traspuestas, la matriz de capacitancia no es simétrica y se usan configuraciones adicionales (además de las susceptancias de secuencia cero y positiva) para determinar la matriz de capacitancia y realizar una compensación precisa. Los datos usados para la compensación están habitualmente disponibles a partir de los registros de alta de la línea protegida.

Los componentes simétricos de la corriente de carga se compensan automáticamente compensando las corrientes de fase, usando la ecuación (14).

La ecuación (14) es una implementación en el dominio temporal de un procedimiento de compensación de corriente de carga. De esta manera, se compensan valores instantáneos de la corriente diferencial (p. ej., no solamente el componente fundamental de frecuencia). Esto permite que diversos algoritmos, que responden a características de señal, distintas a la componente fundamental de frecuencia, funcionen bien.

Obsérvese que el procedimiento (14) de implementación funciona bien en una gran variedad de condiciones de sistema: excitación, fallos, condiciones de polo abierto y otros sucesos del sistema.

Un ejemplo de simulación

El siguiente ejemplo ilustra una realización de la excitación de una línea de 275kV de tres terminales, con una longitud total de 300 km y una corriente de carga de secuencia positiva y estado estable de 230A. En este ejemplo, todas las señales se filtran con un filtro Butterworth de segundo orden con una frecuencia angular de 600Hz. La línea se energiza a partir del tercer terminal. Los valores numéricos y los gráficos asociados a esta realización se proporcionan solamente a modo de ejemplo, y no como limitación.

La FIG. 5A ilustra gráficamente formas de onda de voltajes y la FIG. 5B ilustra gráficamente formas de onda de porciones calculadas de la corriente de carga, calculadas por el primer terminal en la realización ejemplar de simulación. Se proporcionan distintas formas de onda para la fase A, la fase B y la fase C de un sistema trifásico. Obsérvese que, en este ejemplo, una corriente de carga efectiva derivada de este terminal es cero (interruptor abierto).

La FIG. 6A ilustra gráficamente formas de onda de voltajes y la FIG. 6B ilustra gráficamente formas de onda de porciones calculadas de la corriente de carga calculada por el segundo terminal en la realización ejemplar de simulación mostrada en las FIGS. 5A y 5B. Nuevamente, en este ejemplo, la corriente efectiva suministrada por este terminal es cero.

La FIG. 7A ilustra gráficamente voltajes de formas de onda y la FIG. 7B ilustra gráficamente formas de onda de porciones calculadas de la corriente de carga calculada por el tercer terminal en la realización ejemplar de simulación mostrada en las FIGS. 5A, 5B, 6A y 6B. Obsérvese que en este ejemplo el tercer terminal suministra la corriente de carga efectiva, y la porción calculada del tercer terminal de la corriente de carga es de alrededor de un tercio de la corriente efectiva.

La FIG. 8A ilustra gráficamente formas de onda de corrientes de carga efectivas y la FIG. 8B ilustra gráficamente formas de onda de corrientes de carga calculadas para la realización ejemplar de simulación mostrada en las FIGS. 5A, 5B, 6A, 6B, 7A y 7B. Las corrientes de carga efectivas mostradas en la FIG. 8A son las corrientes mostradas en el terminal energizador (terminal 3 en este ejemplo). Las corrientes de carga calculadas mostradas en la FIG. 8B son el total de las porciones de corriente de carga calculadas en cada uno de los terminales de línea. Según se muestra en las FIGS. 8A y 8B, las corrientes de carga calculadas corresponden estrechamente a las corrientes de carga efectivas en este ejemplo.

Para ilustrar el efecto y la precisión de la compensación en este ejemplo, las FIGS. 9A, 9B y 9C comparan las respectivas corrientes diferenciales sin compensación (líneas discontinuas) y con compensación (líneas continuas). La FIG. 9A ilustra gráficamente una forma de onda de corriente diferencial sin compensación 910 y una forma de onda diferencial con compensación 912 para la fase A, según la realización ejemplar mostrada en las FIGS. 5A, 5B, 6A, 6B, 7A y 7B. La FIG. 9B ilustra gráficamente una forma de onda de corriente diferencial sin compensación 914 y una forma de onda diferencial con compensación 916 para la fase B, según la realización ejemplar mostrada en las FIGS. 5A, 5B,

6A, 6B, 7A y 7B. La FIG. 9C ilustra gráficamente una forma de onda de corriente diferencial sin compensación 918 y una forma de onda diferencial con compensación 920 para la fase C, según la realización ejemplar mostrada en las FIGS. 5A, 5B, 6A, 6B, 7A y 7B. En las FIGS. 9A, 9B y 9C, la corriente diferencial sin compensación 910, 914, 918 es la corriente medida en el terminal energizador. La corriente diferencial con compensación 912, 916, 920 es la corriente calculada siguiendo las ecuaciones (8) y (9), es decir, a partir de los términos diferenciales parciales enviados por cada relé. Obsérvese que, en este ejemplo, una amplia parte de la corriente de carga se retira de la señal diferencial, y el resto es de frecuencias mayores, que pueden suprimirse adicionalmente, según ciertas realizaciones, con algoritmos de filtrado de relé.

Precisión de la compensación

Como se ha expuesto anteriormente, en algunas realizaciones, un procedimiento de compensación de carga de línea usa un modelo de parámetros concentrados para estimar y restar la corriente de carga de línea. Este modelo representa bien las líneas de transmisión efectivas para frecuencias de hasta unos pocos cientos de hercios. El modelo de parámetros concentrados puede desviarse, sin embargo, de los parámetros efectivos de línea a mayores frecuencias.

La FIG. 10 ilustra gráficamente una respuesta de frecuencia de una admitancia de una línea aérea de muestra para unas pocas longitudes distintas de línea (100km, 200km, 300km y 400km) sobreimpuesta sobre una respuesta de frecuencia del modelo 1010 de parámetros concentrados, según una realización. Según se muestra en la FIG. 10, puede ocurrir una discrepancia significativa entre la línea efectiva y el modelo 1010 de parámetros concentrados para frecuencias mayores, en particular para líneas largas (y son las líneas largas las que más se benefician de la compensación de corriente de carga).

En otras realizaciones, puede usarse un modelo más preciso de la línea (en comparación con $C \cdot dv/dt$) en un relé diferencial de corriente de línea. Sin embargo, el comportamiento de largas líneas de transmisión a mayores frecuencias puede ser difícil de modelar sin una considerable cantidad de datos. Hay diferencias entre líneas de transmisión suspendidas y cables. Las líneas mixtas con algunas secciones de cable y secciones suspendidas pueden ser difíciles de cubrir con un modelo más preciso de la línea. La geometría de la línea, los efectos epidérmicos y la resistencia de secuencia cero también pueden tener un efecto sobre la precisión del modelo. Así, un enfoque que use un modelo más preciso puede colocar una carga adicional sobre el usuario. Además, la introducción de respuestas de frecuencia de los VT puede aumentar la complejidad.

Además, los componentes de mayor frecuencia de la corriente diferencial que resultan de la compensación por exceso o por defecto de la corriente de carga no se usan con fines de protección y, por lo tanto, puede no ser necesario que se midan correctamente en muchas realizaciones. En cambio, los componentes de mayor frecuencia compensados por exceso o por defecto están afectando por ruido a otras mediciones y pueden abordarse como tales usando enfoques de protección conocidos. Una manera de abordar los componentes de corriente de carga de alta frecuencia compensados por defecto o por exceso es producir una restricción extra a partir del espectro de alta frecuencia en la señal diferencial. Por ejemplo, la FIG. 11 es un diagrama en bloques de un módulo 1100 para generar un término restrictivo extra a partir del espectro de alta frecuencia en la corriente diferencial, según una realización. El módulo 1100 incluye un filtro 1110 de paso alto, un componente 1112 de media cuadrática mínimos (RMS) y un componente 1114 de suma. El filtro 1110 de paso alto extrae componentes de alta frecuencia de la señal diferencial. El componente 1112 de RMS determina un valor de RMS de los componentes de alta frecuencia. Los componentes de RMS pueden multiplicar el valor de RMS por un factor q , a fin de estimular la restricción fundamental de frecuencia. El factor q puede ser una constante de diseño optimizada en base a las prestaciones de elementos en el relé, tales como el filtrado de las señales operativas, o la frecuencia angular del filtro de paso alto en la FIG. 11. De esta manera, si el componente de alta frecuencia afecta a mediciones de la señal diferencial, también aumenta automáticamente el correspondiente término restrictivo. Como resultado, el plano alfa equivalente (expuesto más adelante) se mantiene seguro.

Por tanto, en ciertas realizaciones, el sistema de protección retira la corriente de carga para frecuencias cerca de la frecuencia fundamental, ya que estas frecuencias afectan a la respuesta transitoria y de estado estable del relé, mientras que el sistema de protección proporciona una restricción adicional obtenida a partir de componentes de mayor frecuencia en la señal diferencial.

Tratamiento de reactores de línea

Las líneas largas que se benefician de las realizaciones de compensación de corriente de carga, reveladas en el presente documento, pueden incluir reactores de desvío instalados en una ubicación dada de la zona de los CT que conectan el esquema diferencial de corriente de línea. La corriente capacitiva de la línea y la corriente inductiva de los reactores no se cancelan transitoriamente en lo que respecta a la protección rápida. La naturaleza transitoria (respuesta de frecuencia) es distinta entre un inductor y un condensador, las razones de reactancia entre secuencias positivas y cero pueden ser distintas entre un inductor y un condensador, y la saturación del reactor hace que la inductancia sea no lineal. Además, los reactores se encienden y apagan como parte del control de voltaje, o de suministro eléctrico reactivo, en el sistema de suministro eléctrico y pueden operarse de forma desequilibrada (una o dos fases).

A fin de mantener sencillas las aplicaciones de protección, según ciertas realizaciones, la corriente del reactor se retira de

la zona de medición, paralelizando los CT del reactor con los CT de la línea. En cualquier momento dado, la línea puede o no estar compensada, pero el relé mide la corriente de carga entera y la compensa. Por ejemplo, la FIG. 12 ilustra esquemáticamente una línea 1210 de transmisión de suministro eléctrico con un reactor 1212 de desvío, según una realización. El reactor 1212 de desvío está asociado a un CT 1214, y se usan los CT duales 1216, 1218 para terminar la línea 1210 como parte de un esquema diferencial de corriente de línea. Como se ha expuesto anteriormente, una capacitancia 1220 de línea también está asociada a la línea 1210. Según se muestra en la FIG. 12, cuando se aplica la compensación de corriente de carga, según ciertas realizaciones en el presente documento, una zona 1222 diferencial de línea excluye tanto a una corriente i_{REACTOR} de reactor asociada al reactor 1212 de desvío como a la corriente i_c de carga asociada a la capacitancia 1220 de línea.

Problemas de inmunidad al transformador de voltaje (VT)

Como se ha expuesto anteriormente, la compensación de corriente de carga hace que la función diferencial de corriente de línea sea parcialmente dependiente de la disponibilidad de las fuentes de voltaje y, en cierto grado, la expone a problemas con las señales de voltaje. Por tanto, la dependencia de las fuentes de voltaje debería remediarse tanto como sea posible. Ciertas realizaciones reveladas en el presente documento usan un bit adicional en la carga útil de comunicación para señalar si el terminal efectivamente realiza la compensación (p. ej., el indicador de CCC expuesto anteriormente).

Un relé en un terminal dado puede no calcular ni restar su porción a la corriente de carga por las siguientes razones: los VT no están instalados o no están cableados con el relé, se detecta un problema con los VT (pérdida de potencial) y la lógica de compensación de corriente de carga suspende la compensación basada en este voltaje, o se usan los VT del lado del bus mientras el interruptor de línea está abierto y la lógica suspende el uso de este voltaje, como no representativo para la línea.

Cada conjunto de corrientes recibidas es compensado o no, según el indicador de CCC acompañante. Cada terminal receptor, por lo tanto, conoce cuántos terminales restan efectivamente su porción a la corriente de carga y puede calcular su propia porción de compensación a fin de compensar la corriente de carga total de la línea.

De esta manera, el sistema funciona con un número variable de terminales compensadores y tolera una pérdida de uno o más conjuntos de VT.

Considérense los siguientes ejemplos.

Ejemplo 1

Supongamos una aplicación de tres terminales y un terminal con ninguna fuente de voltaje. El relé sin ningún voltaje no compensa sus corrientes y envía permanentemente CCC = 0 a los otros pares. Cada uno de los pares receptores ve que el terminal no compensa, y hay un total de dos terminales que sí compensan. Como resultado, cada terminal que proporciona compensación aplica un coeficiente de 1/2 en sus ecuaciones para la porción de la corriente de carga. De esta manera, la corriente de carga se compensa totalmente, usando un promedio de los voltajes de terminal que están disponibles para el sistema diferencial de corriente de línea. Obsérvese que el terminal sin ningún voltaje aún funciona con una corriente diferencial totalmente compensada.

Ejemplo 2

Supongamos una aplicación de tres terminales y un terminal con un voltaje del lado del bus. Normalmente, cada terminal realiza la compensación aplicando el coeficiente de 1/3, y activando el bit CCC. En el momento en que el terminal que usa un voltaje del lado del bus detecta cualquier polo abierto, desactiva su indicador CCC y cesa de compensar su corriente. Los otros dos terminales reconocen este cambio a partir del indicador CCC recibido, conmutan sus coeficientes de 1/3 a 1/2 y la compensación continúa usando los dos voltajes que son representativos del perfil del voltaje de la línea.

Ejemplo 3

Continuando con el segundo ejemplo anterior, y suponiendo que posteriormente uno de los otros terminales detecta una pérdida de potencial. El otro terminal que detecta la pérdida de potencial desactiva su indicador CCC y deja de compensar su corriente. El único terminal con un voltaje sano sabe ahora que el segundo par perdió la compensación, y conmuta su coeficiente de 1/2 a 1. De esta manera, la compensación se realiza usando el único voltaje que aún está disponible para el sistema de protección diferencial de línea. Como tal, la compensación puede ser menos precisa, pero todavía útil. Los otros dos terminales aún reciben CCC = 1 desde el último terminal capaz de compensación, y saben que la corriente diferencial de línea está compensada para la corriente de carga.

Las realizaciones reveladas hacen que la función de compensación de corriente de carga sea más tolerante con los problemas de los VT en los cuales los relés individuales en el sistema diferencial de corriente de línea funcionan entre sí como fuentes remotas de voltaje de resguardo.

La compensación de corriente de carga y el plano alfa

En ciertas realizaciones, el plano alfa se usa con compensación de corriente de carga. Por ejemplo, la FIG. 13 es un diagrama de flujo de un procedimiento 1300 para la protección diferencial de corriente de línea con compensación de corriente de carga, usando el plano alfa, según una realización. El procedimiento 1300 incluye medir 1310 corrientes locales en los respectivos terminales de un aparato de suministro eléctrico, y aumentar 1312 las corrientes medidas en base a sus respectivas contribuciones a un valor de compensación de corriente de carga. La determinación de la corriente de carga puede hacerse usando procedimientos conocidos, o según los sistemas y procedimientos revelados en el presente documento. El procedimiento 1300 calcula luego 1314 una razón compleja de corrientes en base a las corrientes aumentadas. 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 1300 incluye adicionalmente activar selectivamente 1316 el aparato de suministro eléctrico en base al análisis del plano alfa de la razón compleja de corrientes.

Como se expone más adelante, el punto operativo de un plano alfa equivalente se obtiene de los términos auxiliares diferenciales y restrictivos. Reduciendo la señal diferencial, la compensación de corriente de carga desplaza el punto operativo del plano alfa equivalente hacia la posición de bloqueo. En un caso extremo de retirada de toda la corriente de carga, la reducción de la señal diferencial usando la compensación de corriente de carga produce el punto operativo de $1 \angle 180^\circ$ sobre el plano alfa equivalente. Esto no es solamente un resultado deseado, sino que ocurre sin conocimiento de cómo se divide la corriente de carga efectiva entre los terminales de la línea.

Durante los fallos internos, la compensación de corriente de carga aumenta la señal diferencial no permitiendo que su componente inductivo sea reducido por la corriente de carga capacitiva. Esto desplaza el punto operativo sobre el plano alfa equivalente, alejándolo de la región de bloqueo, según lo esperado. Como resultado, los elementos diferenciales (fase en particular) pueden fijarse como más sensibles cuando se habilita la compensación de corriente de carga.

Surge una cuestión de diseño con respecto a la adición de la corriente de carga calculada a los términos restrictivos. La corriente de carga efectiva es medida por los relés y ya contribuye a las restricciones. Así, en tales realizaciones, la corriente de carga calculada es la contramedida y no debería incluirse, pues en caso contrario la corriente de carga se contaría dos veces en los términos restrictivos.

A fin de ilustrar esta cuestión, considérese el caso del ejemplo de excitación de línea expuesto anteriormente con respecto a las FIGS. 5A, 5B, 6A, 6B, 7A y 7B. La corriente de carga efectiva se mide en el tercer terminal y en el estado estable produce alrededor de 230A de restricción de fase. A la vez, la corriente de carga compensada está cerca del cero. Estos valores producen un punto operativo de aproximadamente $1 \angle 180^\circ$ en el plano alfa, o bien una sólida indicación de bloqueo. Esto muestra que la compensación de corriente de carga permite que las ecuaciones de activación restrinjan adecuadamente, en lugar de bloquear mediante una configuración elevada de activación.

En ciertas realizaciones, la compensación de corriente de carga también puede usarse con una restricción (p. ej., restricción de armónicos) usando el plano alfa equivalente. Por ejemplo, la FIG. 14 es un diagrama de flujo de un procedimiento 1400 para la compensación de corriente de carga con una corriente restrictiva intencionalmente aumentada, usando un plano alfa equivalente, según una realización. El procedimiento 1400 incluye calcular 1410 una corriente diferencial global como una suma de las corrientes diferenciales parciales remotas y la corriente compensada diferencial parcial local, según se ha expuesto anteriormente con respecto a las ecuaciones (8) y (9). Como se ha expuesto anteriormente, al menos una entre las corrientes diferenciales parciales remotas y la corriente diferencial parcial local está compensada para la corriente de carga.

Como se expone más adelante, el procedimiento 1400 también incluye calcular 1412 una corriente restrictiva correspondiente a corrientes restrictivas parciales remotas y a una corriente restrictiva parcial local. El procedimiento 1400 también incluye aumentar 1414 la corriente restrictiva global. Por ejemplo, la corriente restrictiva global puede aumentarse intencionalmente en base a uno o más entre los armónicos segundo, cuarto y / o quinto de la corriente diferencial. Además, o en otras realizaciones, un valor obtenido de un valor de RMS del espectro de alta frecuencia de la señal diferencial puede añadirse a la corriente restrictiva.

Como se expone en detalle más adelante, el procedimiento 1400 también incluye convertir 1416 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 1418 la razón compleja de corrientes entre la primera corriente equivalente y la segunda corriente equivalente.

La FIG. 15 es un diagrama de flujo de un procedimiento 1500 para la protección diferencial de corriente de línea que incluye aumentar corrientes diferenciales parciales y / o corrientes restrictivas parciales, según una realización. El procedimiento 1500 incluye medir 1510 una o más corrientes locales, y determinar 1512 corrientes diferenciales parciales locales y corrientes restrictivas parciales locales. El procedimiento 1500 incluye adicionalmente aumentar 1514 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.

El procedimiento 1500 incluye adicionalmente transmitir 1516 las corrientes diferenciales parciales locales y las corrientes restrictivas parciales locales a uno o más terminales remotos, y recibir 1518 una o más corrientes diferenciales parciales remotas y una o más corrientes restrictivas parciales remotas desde uno o más terminales remotos. En base a la información intercambiada, el procedimiento 1500 incluye adicionalmente determinar 1520 corrientes diferenciales globales y corrientes restrictivas globales.

En este punto, el procedimiento 1500 también puede incluir realizar 1522 un aumento adicional, si acaso, de las corrientes diferenciales globales y / o de las corrientes restrictivas globales. Como se expone en detalle más adelante, el procedimiento 1500 también incluye usar 1524 las corrientes diferenciales globales y las corrientes restrictivas globales en un análisis de plano alfa.

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 al transformador. La invención 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 suministro eléctrico.

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 graficarse en el plano de razones complejas de corrientes 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. 16 es un diagrama simplificado de un plano alfa (razón de corrientes). Las marcas para los dos ejes del plano, a y jb , se obtienen de la siguiente manera

$$k = \frac{\overline{I_1}}{I_2} = r e^{j\theta} = a + jb, \quad (15)$$

$$a = \operatorname{Re} \left(\frac{\overline{I_1}}{I_2} \right), \quad (16)$$

$$b = \operatorname{Im} \left(\frac{\overline{I_1}}{I_2} \right), \quad (17)$$

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,

$$k = \frac{I_1}{I_2} = 1 \angle 180^\circ, \quad (18)$$

que está representado por el punto marcado con 1610 en la FIG. 16.

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,

$$k = \frac{I_1}{I_2} = 1 \angle 0^\circ. \quad (19)$$

Sin embargo, según el fallo interno avanza hacia el segundo relé (local), I_2 aumentará y el punto 1612 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 lo precedente. 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 1610 mostrado en la FIG. 16. Para fallos internos, tales factores darán como resultado que la razón de corriente se desplace por el plano alfa.

El movimiento desde el punto 1610 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. 17 ilustra gráficamente una región 1710 de restricción y una región 1711 de operación en un plano alfa usado, según una realización, para decisiones de determinación de fallos. Con fines ilustrativos, la región 1710 de restricción se muestra como encerrada dentro de líneas continuas. Nuevamente, la región 1711 de operación puede incluir todos los puntos en el plano alfa que no estén en la región 1710 de restricción. La región 1710 de restricción en el plano alfa ilustrado en la FIG. 17 está situada alrededor del punto 1712 de fallo externo ideal. La región 1710 de restricción está definida por un ángulo (de bloqueo) de razón de corrientes seleccionado por el usuario (mostrado como las líneas radiales 1713 y 1714 por encima y por debajo del eje "a"), cuya gama de valores admite los valores de razones de corrientes 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 1710 de restricción está adicionalmente definida por una magnitud, seleccionada por el usuario, de la razón de corriente (mostrada como las líneas curvas 1715, 1716), cuya gama de valores admite la saturación del CT, entre otros factores. En general, un usuario selecciona un radio R para la línea 1716 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 1710 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 1710 de restricción, en cuyo caso no hay ninguna señal de activación. Cuando la razón k de corrientes está fuera de la región 1710 de restricción, en la región 1711 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. 18 ilustra esquemáticamente una zona diferencial general 1800 de protección de N terminales, según una realización. En este ejemplo, la zona 1800 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 presente invención que puede usarse cualquier número de corrientes mayor que uno para la zona 1800 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 1800 de N terminales. El principio diferencial obtendría la siguiente corriente diferencial $I_{DIF(N)}$ y la corriente restrictiva $I_{RST(N)}$ para la zona 1800 de N terminales:

$$I_{DIF(N)} = \sum_{k=1}^N I_k, \quad (20)$$

$$I_{RST(N)} = \sum_{k=1}^N |I_k|. \quad (21)$$

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 1800. 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. 19 ilustra esquemáticamente una zona equivalente 1900 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 1900 de dos terminales mostrada en la FIG. 19 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 1800 de N terminales mostrada en la FIG. 18. 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 1900 de dos terminales.

Las dos corrientes virtuales I_S, I_T en la zona equivalente 1900 de dos terminales se buscan de modo tal que se determinen la misma corriente diferencial y las mismas corrientes restrictivas en la zona equivalente 1900 de dos terminales, que en la zona efectiva 1800 de N terminales:

$$I_{DIF(2)} = I_{DIF(N)}, \quad (22)$$

$$I_{RST(2)} = I_{RST(N)}. \quad (23)$$

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 fronteras: las partes real e imaginaria de la corriente diferencial (ecuación (22)) y la magnitud de la corriente restrictiva (ecuación (23)). 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 1800.

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

$$R_k = |\text{real}(I_k \cdot I_{DN}^*)|, \quad k = 1..N, \quad (24)$$

donde I_{DN}^* representa la conjugada compleja de la corriente diferencial $I_{DIF(N)}$ de la zona 1800 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 :

$$\beta = \text{ángulo}(I_P). \quad (25)$$

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

$$I_X = I_{DIF(N)} \cdot 1\angle(-\beta). \quad (26)$$

Las dos corrientes I_S , I_T de la zona equivalente 1900 de dos terminales se calculan ahora de la siguiente manera:

$$I_T = \left(\frac{\text{Im}(I_X)^2 - (I_{RST(N)} - \text{Re}(I_X))^2}{2 \cdot (I_{RST(N)} - \text{Re}(I_X))} + j \cdot \text{Im}(I_X) \right) \cdot 1\angle\beta, \quad (27)$$

$$I_S = (I_{RST(N)} - |I_T|) \cdot 1\angle\beta. \quad (28)$$

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:

$$\frac{I_S}{I_T} = k = k_{mag} \angle \alpha. \quad (29)$$

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 presente invención, 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 1800 de N terminales a la zona equivalente 1900 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. 20A es un diagrama de flujo de un procedimiento 2000 para la protección diferencial de la corriente de un aparato de suministro eléctrico multi-terminal según una realización. El procedimiento 2000 incluye medir 2010 una corriente I_1 , I_2 , ..., I_N en cada terminal, respectivamente. El procedimiento 2000 también incluye calcular 2012 una corriente diferencial $I_{DIF(N)}$ como una suma de las corrientes medidas I_1 , I_2 , ..., I_N y calcular 2014 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 2000 incluye convertir 2016 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 2016 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 2000 incluye adicionalmente calcular 2018 a y k_{mag}

usando las corrientes equivalentes I_S , I_T (véase la ecuación (29) anteriormente), y aplicar 2020 el plano alfa usando a y k_{mag} .

La FIG. 20B es un diagrama de flujo de un procedimiento 2016 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 2016 incluye calcular 2022 números auxiliares R_k como la proyección de una respectiva corriente I_1 , I_2 , ..., I_N sobre la línea de la corriente diferencial $I_{DIF(N)}$, seleccionando 2024 una corriente I_P de referencia como la corriente correspondiente al mayor valor de R , desplazando 2026 la corriente diferencial $I_{DIF(N)}$ en el ángulo β de la corriente I_P de referencia y calculando 2028 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 desplace 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 presente invención, 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. 21A 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. 21A. Usando la ecuación (20), la corriente diferencial $I_{DIF(N)} = 11,2A \angle 128^\circ$. Usando la ecuación (21), 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. 21A. 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. 21A.

- 5 Siguiendo los procedimientos expuestos anteriormente e ilustrados en las FIGS. 20A y 20B, la ecuación (24) proporciona los números auxiliares R_k como;

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

$$10 \quad R_2 = 49,50A^2,$$

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

- 15 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° .

Despejando el equivalente de dos corrientes en las ecuaciones (26), (27) y (28), se obtiene:

$$20 \quad I_T = 11,1A \angle 11,7^\circ \text{ y}$$

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

- 25 La FIG. 21B ilustra gráficamente un plano alfa para el equivalente de dos terminales de la realización mostrada en la FIG. 21A, según una realización. Usando la ecuación (20), la corriente diferencial equivalente $I_{DIF(2)} = 11,2A \angle 128^\circ$. Usando la ecuación (21), la corriente restrictiva equivalente $I_{RST(2)} = 30,0$. Las corrientes equivalentes I_S , I_T se muestran como líneas continuas en la FIG. 21B. 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. 21B. 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.

- 30 Usando la ecuación (29), 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. 21A y 21B. 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. 21A 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. 21B 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.

- 40 A modo de contraste con el ejemplo mostrado en las FIGS. 21A y 21B, las FIGS. 22A y 22B ilustran gráficamente respectivos planos alfa para el caso de un fallo interno, según una realización. La FIG. 22A 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. 22B ilustra el plano alfa para el equivalente de dos terminales de la realización mostrada en la FIG. 22A. Una gran diferencia entre las magnitudes de las corrientes equivalentes I_S , I_T (según se muestra en la FIG. 22B) indica el fallo interno, lo que da como resultado la habilitación de una señal de activación.

- 50 Los ejemplos mostrados en las FIGS. 21A, 21B, 22A y 22B 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.

- 60 La FIG. 23 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. 24 ilustra gráficos de diversas señales durante un fallo AB externo en la configuración mostrada en la FIG. 23, 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

- 5 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.
- 10 Los expertos en la técnica entenderán que pueden hacerse muchos cambios en los detalles de las realizaciones anteriormente descritas sin apartarse de los principios subyacentes de la invención. El alcance de la presente invención, por lo tanto, debería determinarse solamente por las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento para la protección diferencial de corriente que usa compensación de corriente de carga para un aparato de suministro eléctrico, caracterizado porque los terminales individuales determinan dinámicamente sus respectivas contribuciones, si las hubiera, a la compensación de corriente de carga según cambia dinámicamente la disponibilidad de una o más fuentes de voltaje dentro del aparato de suministro eléctrico, comprendiendo el procedimiento:
- 5 calcular, en los respectivos terminales del aparato de suministro eléctrico, contribuciones locales a un valor de compensación de corriente de carga, basada cada contribución local en una medición local de voltaje, un valor de capacitancia de línea y un coeficiente correspondiente a un número total de terminales que contribuyen al valor de compensación de corriente de carga;
- 10 determinar un cambio en el número de terminales que contribuyen al valor de compensación de corriente de carga según cambia dinámicamente la disponibilidad de una o más fuentes de voltaje dentro del aparato de suministro eléctrico;
- 15 en respuesta al cambio en el número de terminales que contribuyen al valor de compensación de corriente de carga, ajustar automáticamente el coeficiente de modo tal que una suma de las contribuciones locales represente una corriente de carga total; y
- 20 activar selectivamente el aparato de suministro eléctrico en base a la protección diferencial de corriente de línea y al valor de compensación de corriente de carga.
2. El procedimiento de la reivindicación 1, caracterizado porque comprende adicionalmente:
- 25 medir una corriente diferencial parcial en cada terminal;
- 30 restar las contribuciones locales a las respectivas corrientes diferenciales parciales; y
- 35 transmitir las corrientes diferenciales parciales con respectivos indicadores que indican si cada correspondiente corriente diferencial parcial transmitida está contribuyendo al valor de compensación de corriente de carga.
3. El procedimiento de la reivindicación 2, caracterizado porque el coeficiente comprende la inversa de una suma de los indicadores que indican que la correspondiente corriente diferencial parcial transmitida está contribuyendo al valor de compensación de corriente de carga.
4. El procedimiento de la reivindicación 2, caracterizado porque la determinación del cambio en el número de terminales que contribuyen al valor de compensación de corriente de carga comprende:
- 40 determinar que una fuente local de voltaje en un terminal local está indisponible;
- 45 en respuesta a la determinación, fijar un coeficiente local en cero, de modo tal que la correspondiente contribución local al valor de compensación de corriente de carga sea cero, y fijar un indicador local para indicar que el terminal local no está contribuyendo al valor de compensación de corriente de carga; y
- 50 transmitir un valor de corriente diferencial parcial local y el indicador local desde el terminal local a los otros terminales.
5. El procedimiento de la reivindicación 4, caracterizado porque la contribución local al valor de compensación de corriente de carga en el terminal local, representado como i_{C1} , se convierte a partir de un valor local v_1 de voltaje, según:
- 50
$$i_{C1} = 1/T * C_{TOTAL} * d/dt (v_1),$$
- 55 en donde T es el número de terminales que contribuyen a la compensación de corriente de carga, C_{TOTAL} es la capacitancia de línea total estimada y $d/dt(v_1)$ es la derivada del valor v_1 de voltaje local con respecto al tiempo t.
6. El procedimiento de la reivindicación 2, caracterizado porque comprende adicionalmente:
- 60 calcular una corriente diferencial global como una suma de los valores transmitidos de corriente diferencial parcial;
- 65 calcular una corriente restrictiva global correspondiente a una magnitud de los valores medidos de corriente diferencial parcial;
- 70 determinar componentes de alta frecuencia de una corriente diferencial total; y
- 75 amplificar la corriente restrictiva global en base a una magnitud de los componentes de alta frecuencia.

7. El procedimiento de la reivindicación 6, caracterizado porque activar selectivamente el aparato de suministro eléctrico comprende:
- 5 convertir la corriente diferencial global y la corriente restrictiva global en una primera corriente equivalente de un aparato equivalente de suministro eléctrico de dos terminales y en una segunda corriente equivalente del aparato equivalente de suministro eléctrico de dos terminales,
- 10 en el cual una suma de la primera corriente equivalente y de la segunda corriente equivalente es esencialmente igual a la corriente diferencial global del aparato de suministro eléctrico original, y
- 15 en el cual los valores de la primera corriente equivalente y de la segunda corriente equivalente producen esencialmente la corriente restrictiva global del aparato de suministro eléctrico; y
- 20 en base a la primera corriente equivalente y a la segunda corriente equivalente, activar selectivamente el aparato de suministro eléctrico multi-terminal.
8. El procedimiento de la reivindicación 7, caracterizado porque activar selectivamente en base a la primera corriente equivalente y a la segunda corriente equivalente comprende:
- 25 aplicar un análisis de plano alfa a la primera corriente equivalente y a la segunda corriente equivalente para determinar si se proporciona o se bloquea una señal de activación.
9. Un procedimiento para la protección diferencial de corriente que usa plano alfa con compensación de corriente de carga, caracterizado porque comprende:
- 30 medir corrientes locales en los respectivos terminales de un aparato de suministro eléctrico;
- 35 calcular contribuciones locales, en los respectivos terminales, a un valor de compensación de corriente de carga;
- 40 aumentar intencionalmente las corrientes locales medidas restando las respectivas contribuciones locales a las correspondientes corrientes locales medidas;
- 45 calcular una razón compleja de corrientes correspondiente a las corrientes aumentadas;
- 50 aplicar un análisis de plano alfa a la razón compleja de corrientes; y
- 55 activar selectivamente, en base al análisis de plano alfa, el aparato de suministro eléctrico.
10. El procedimiento de la reivindicación 9, caracterizado porque el cálculo de las contribuciones locales al valor de compensación de corriente de carga comprende:
- 60 medir uno o más voltajes locales en los respectivos terminales;
- 65 determinar coeficientes locales en base a un número total de terminales que contribuyen al valor de compensación de corriente de carga;
- 70 fijar en cero coeficientes locales asociados a terminales que no están contribuyendo al valor de compensación de corriente de carga; y
- 75 calcular cada contribución local como un producto del respectivo coeficiente local, una capacitancia de línea estimada y una derivada del respectivo voltaje local con respecto al tiempo.
11. El procedimiento de la reivindicación 10, caracterizado porque comprende adicionalmente:
- 80 transmitir las corrientes aumentadas entre cada uno de los terminales, junto con los respectivos indicadores que indican si las corrientes transmitidas están contribuyendo al valor de compensación de corriente de carga.
12. El procedimiento de la reivindicación 11, caracterizado porque comprende adicionalmente:
- 85 determinar un cambio en el número de terminales que están contribuyendo al valor de compensación de corriente de carga según cambia dinámicamente la disponibilidad de una o más fuentes de voltaje dentro del aparato de suministro eléctrico;
- 90 en respuesta al cambio en el número de terminales que contribuyen al valor de compensación de corriente de carga, ajustar automáticamente los coeficientes locales de modo tal que una suma de las contribuciones locales represente una corriente de carga total.

13. El procedimiento de la reivindicación 11, caracterizado porque el cálculo de la razón compleja de corrientes comprende:

5 calcular una corriente diferencial global como una suma de las corrientes transmitidas;

calcular una corriente restrictiva global;

10 convertir la corriente diferencial global y la corriente restrictiva global 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 el cual una suma de la primera corriente equivalente y de la segunda corriente equivalente es esencialmente igual a la corriente diferencial global del aparato de suministro eléctrico original, y

en el cual los valores de la primera corriente equivalente y de la segunda corriente equivalente producen esencialmente la corriente restrictiva global del aparato de suministro eléctrico; y

20 calcular una razón compleja de corrientes entre la primera corriente equivalente y la segunda corriente equivalente.

14. El procedimiento de la reivindicación 13, caracterizado porque la aplicación del análisis de plano alfa comprende:

25 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

30 comparar el valor de magnitud de la razón y el valor de diferencia angular con valores preseleccionados que establecen una región de fase en un plano de razones de corriente,

en donde, cuando el valor de magnitud de la razón y el valor de diferencia angular están fuera de la región establecida, se permite la activación, y

35 en donde, cuando el valor de magnitud de la razón y el valor de diferencia angular están dentro de la región establecida, se bloquea la activación.

15. Un sistema para la protección diferencial de corriente que usa compensación de corriente de carga para un aparato de suministro eléctrico, caracterizado porque comprende:

40 un relé local para determinar valores locales de corriente y un valor de voltaje en un terminal local de un aparato de suministro eléctrico; y

45 uno o más relés remotos para determinar valores remotos de corriente y valores de voltaje en respectivos terminales remotos del aparato de suministro eléctrico,

estando el relé local configurado para:

50 calcular una contribución local a un valor de compensación de corriente de carga en base al valor local de voltaje, un valor de capacitancia de línea y un coeficiente correspondiente a un número total de relés que contribuyen al valor de compensación de corriente de carga;

determinar un cambio en el número de terminales que contribuyen al valor de compensación de corriente de carga según cambia dinámicamente la disponibilidad de una o más fuentes de voltaje dentro del aparato de suministro eléctrico;

55 en respuesta al cambio en el número de terminales que contribuyen al valor de compensación de corriente de carga, ajustar automáticamente el coeficiente de modo tal que una suma de la contribución local y de contribuciones remotas cualesquiera represente una corriente de carga total; y

60 activar selectivamente el aparato de suministro eléctrico en base a la protección diferencial de corriente de línea y al valor de compensación de corriente de carga.

16. El sistema de la reivindicación 15, caracterizado porque el relé local está adicionalmente configurado para:

65 medir una corriente diferencial parcial local;

restar la contribución local a la corriente diferencial parcial local;

transmitir la corriente diferencial parcial local con un indicador local que indica si la corriente diferencial parcial local transmitida está contribuyendo al valor de compensación de corriente de carga; y

5 recibir, desde uno o más relés remotos, una o más corrientes diferenciales parciales remotas con los correspondientes indicadores remotos que indican si cada una de las corrientes diferenciales parciales remotas está contribuyendo al valor de compensación de corriente de carga.

10 17. El sistema de la reivindicación 16, caracterizado porque el coeficiente comprende la inversa de una suma de los indicadores locales y remotos que indican que su respectivo terminal está contribuyendo al valor de compensación de corriente de carga.

15 18. El sistema de la reivindicación 16, caracterizado porque el relé local está configurado para determinar el cambio en el número de terminales que contribuyen al valor de compensación de corriente de carga:

determinando que la fuente local de voltaje está indisponible;

20 en respuesta a la determinación, fijando un coeficiente local en el relé local en cero, de modo tal que la correspondiente contribución local al valor de compensación de corriente de carga sea cero, y fijando el indicador local para indicar que el relé local no está contribuyendo al valor de compensación de corriente de carga; y

transmitiendo el valor de corriente diferencial parcial local y el indicador local desde el relé local a los uno o más relés remotos.

25 19. El sistema de la reivindicación 18, caracterizado porque la contribución local al valor de compensación de corriente de carga en el relé local, representada como i_{C1} , se convierte a partir de un valor local v_1 de voltaje, según:

$$i_{C1} = 1/T * C_{TOTAL} * d/dt (v_1),$$

30 en donde T es el número de relés que contribuyen a la compensación de corriente de carga, C_{TOTAL} es la capacitancia de línea total estimada y $d/dt(v_1)$ es la derivada del valor v_1 de voltaje local con respecto al tiempo t.

20. El sistema de la reivindicación 16, caracterizado porque el relé local está adicionalmente configurado para:

35 calcular una corriente diferencial global como una suma de las corrientes diferenciales parciales locales y remotas;

calcular una corriente restrictiva global correspondiente a una magnitud de los valores de las corrientes diferenciales parciales locales y remotas;

40 determinar componentes de alta frecuencia de la corriente diferencial global; y

amplificar la corriente restrictiva global en base a una magnitud de los componentes de alta frecuencia.

45 21. El sistema de la reivindicación 20, caracterizado porque el relé local está configurado para activar selectivamente el aparato de suministro eléctrico:

convirtiendo la corriente diferencial global y la corriente restrictiva global 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,

50 en el cual una suma de la primera corriente equivalente y de la segunda corriente equivalente es esencialmente igual a la corriente diferencial global del aparato de suministro eléctrico original, y

55 en el cual los valores de la primera corriente equivalente y de la segunda corriente equivalente producen esencialmente la corriente restrictiva global del aparato de suministro eléctrico; y

en base a la primera corriente equivalente y a la segunda corriente equivalente, activando selectivamente el aparato de suministro eléctrico.

60 22. El sistema de la reivindicación 21, caracterizado porque el relé local está adicionalmente configurado para aplicar un análisis de plano alfa a la primera corriente equivalente y a la segunda corriente equivalente, para determinar si se proporciona o se bloquea una señal de activación.

65 23. Un sistema para la protección diferencial de corriente que usa compensación de corriente de carga para un aparato de suministro eléctrico, caracterizado porque comprende:

- medios para medir corrientes locales en los respectivos terminales de un aparato de suministro eléctrico;
- medios para calcular contribuciones locales, en los respectivos terminales, a un valor de compensación de corriente de carga;
- 5 medios para aumentar intencionalmente las corrientes locales medidas restando las respectivas contribuciones locales a las correspondientes corrientes locales medidas;
- 10 medios para calcular una razón compleja de corrientes correspondiente a las corrientes aumentadas;
- medios para aplicar un análisis de plano alfa a la razón compleja de corrientes; y
- medios para activar selectivamente, en base al análisis de plano alfa, el aparato de suministro eléctrico.

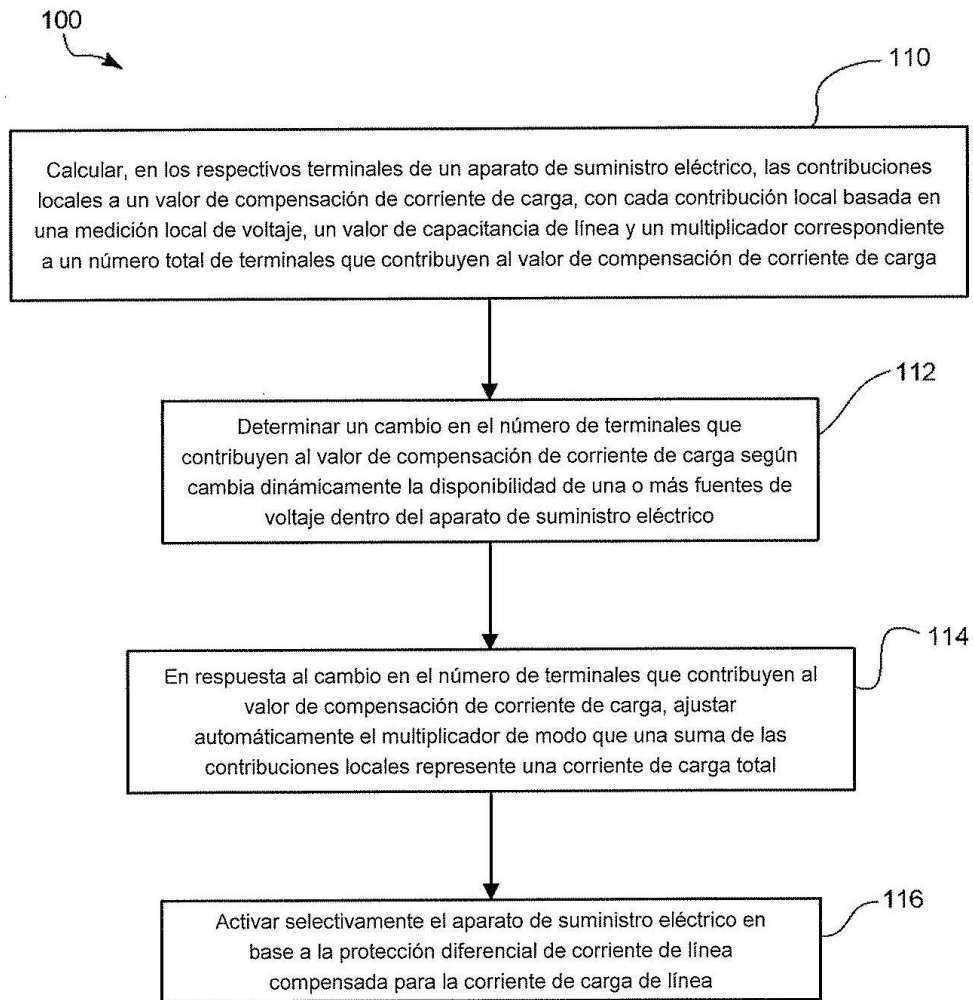


FIG. 1

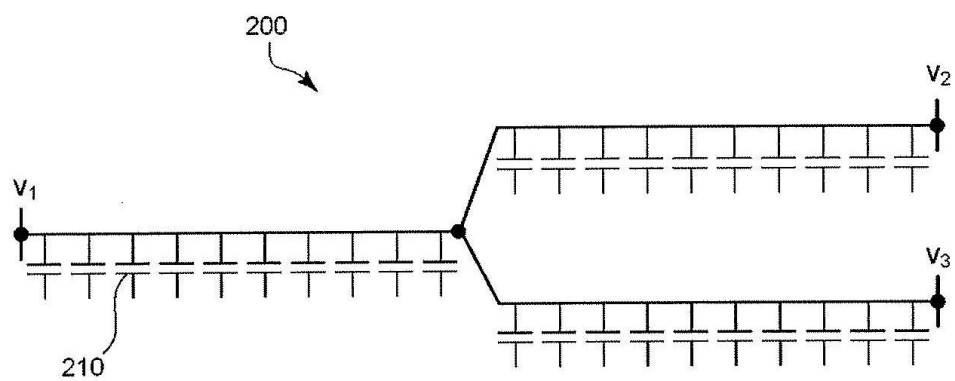


FIG. 2

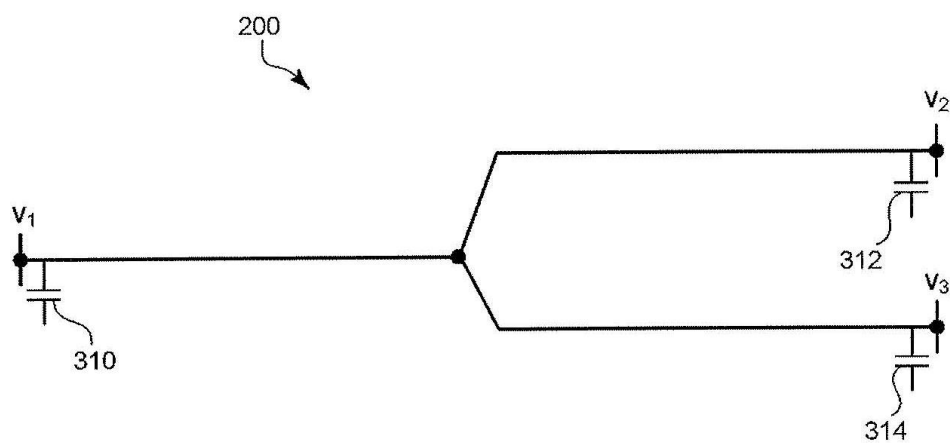


FIG. 3

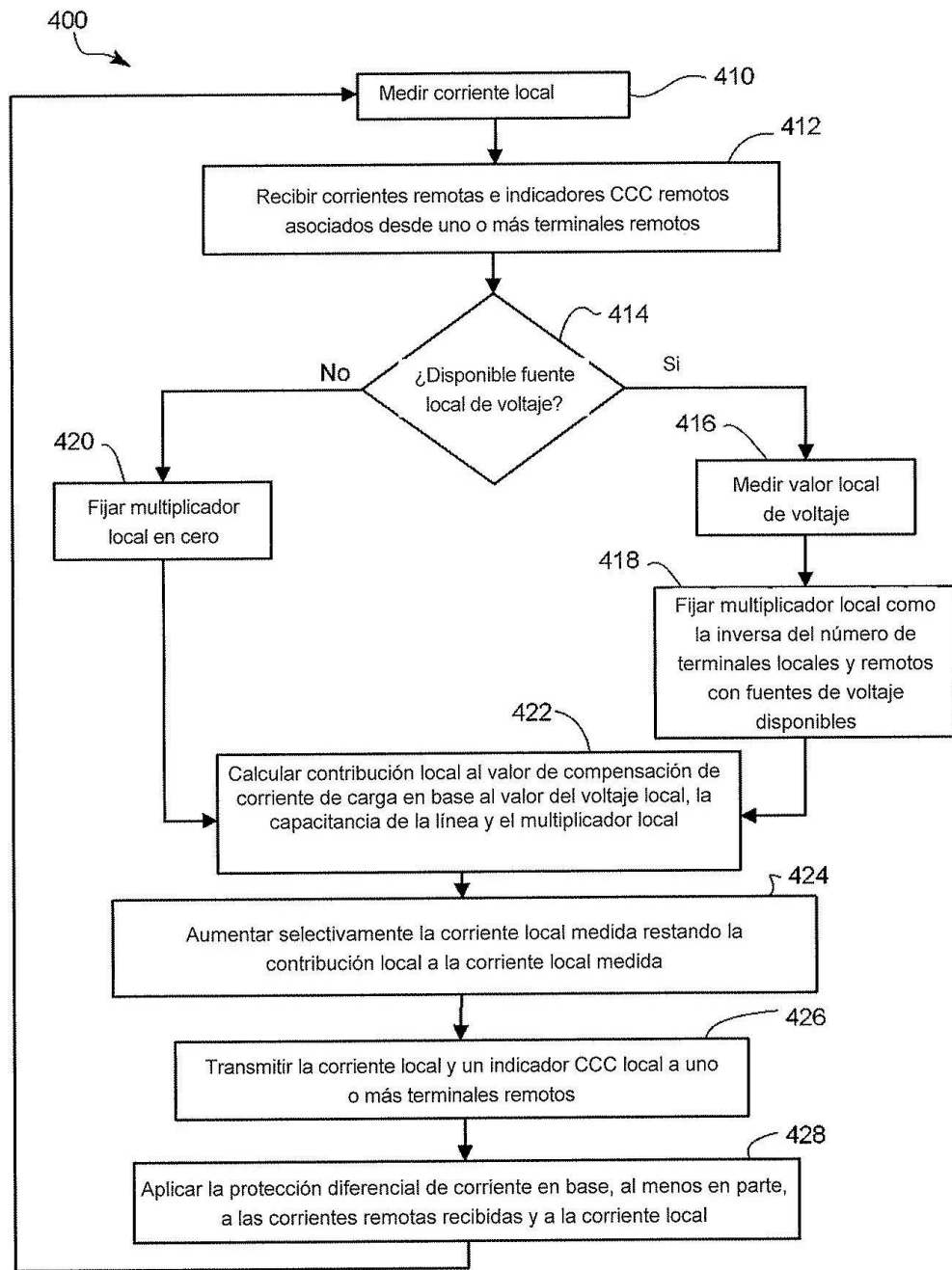


FIG. 4

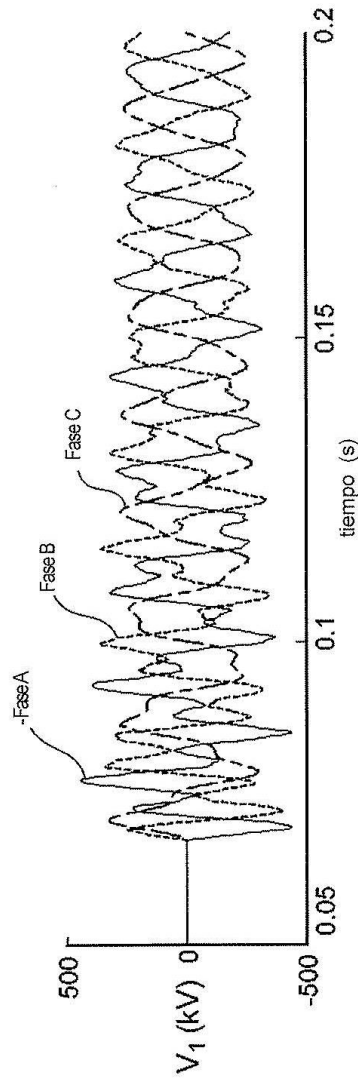


FIG. 5A

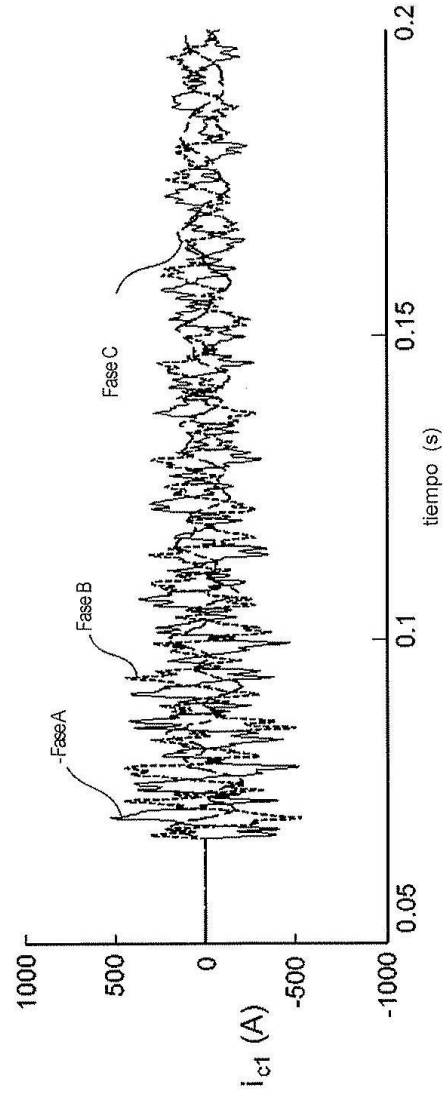


FIG. 5B

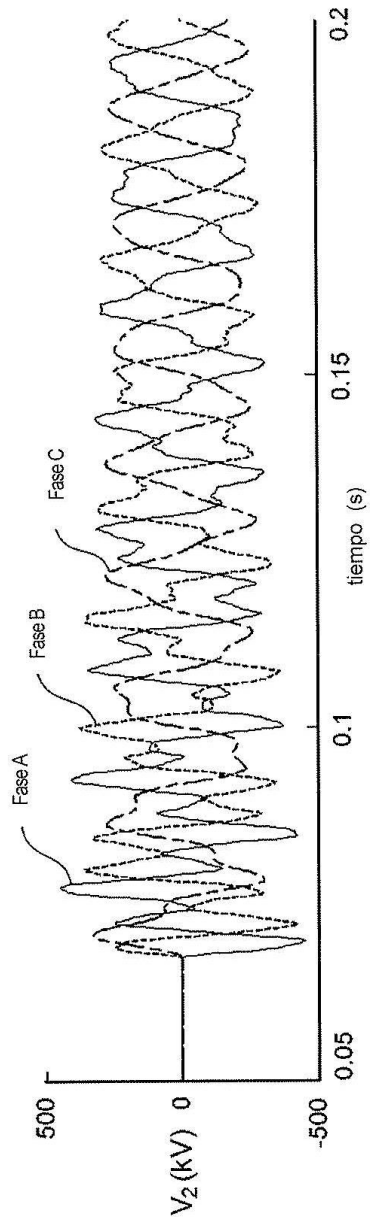


FIG. 6A

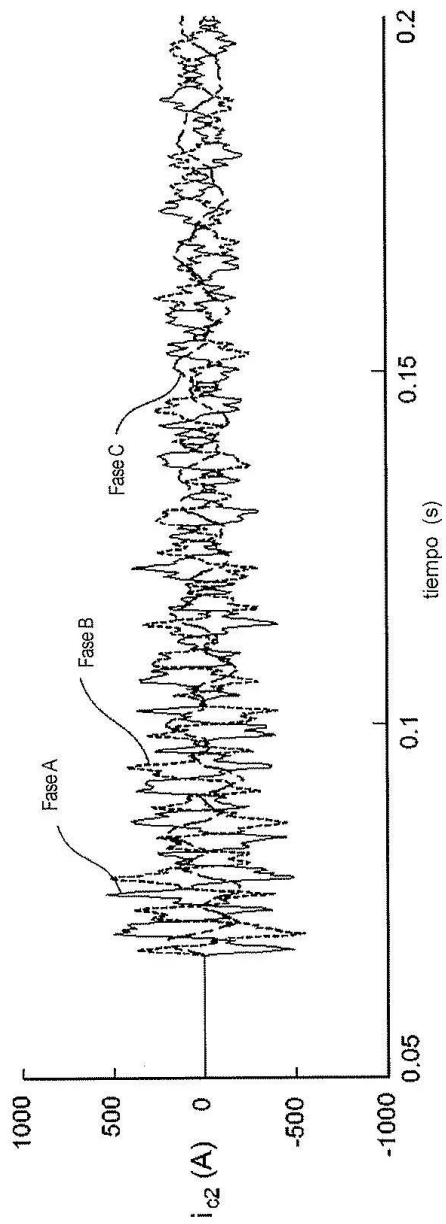


FIG. 6B

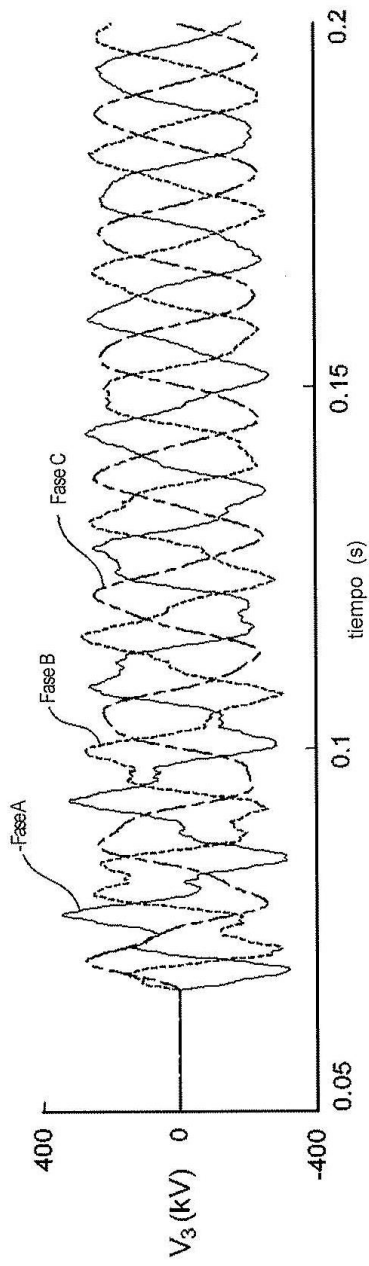


FIG. 7A

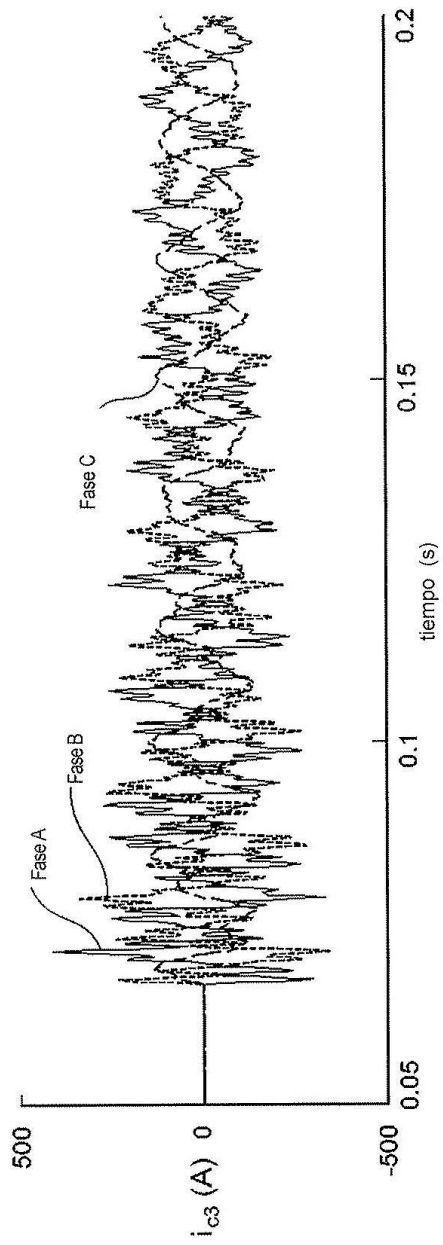
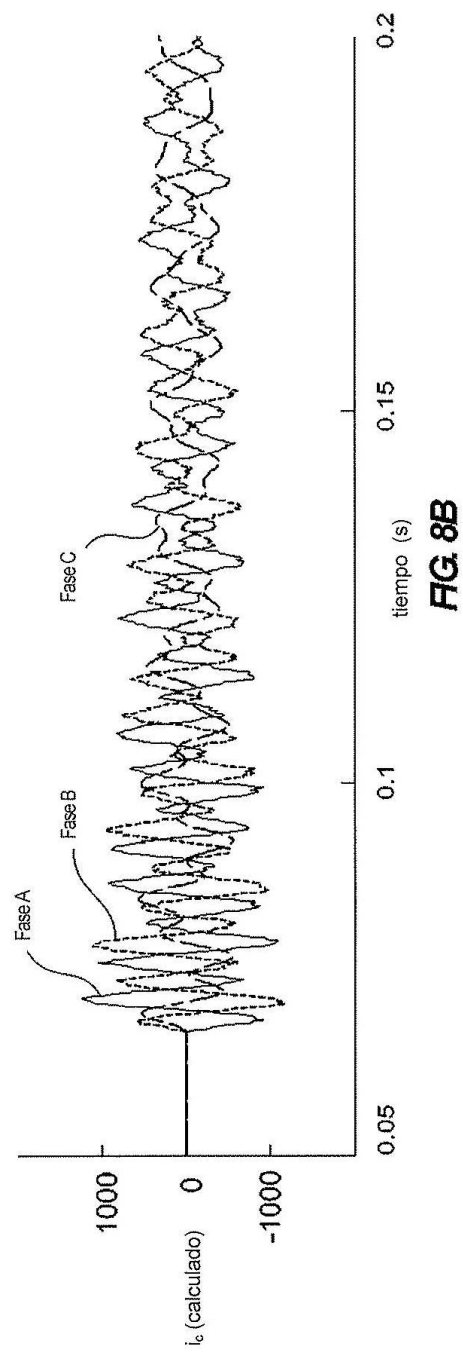
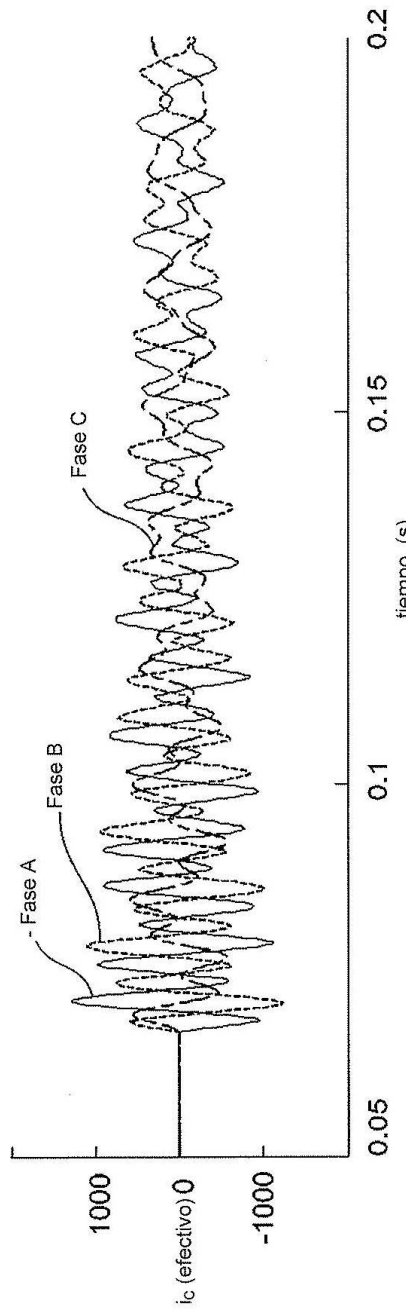
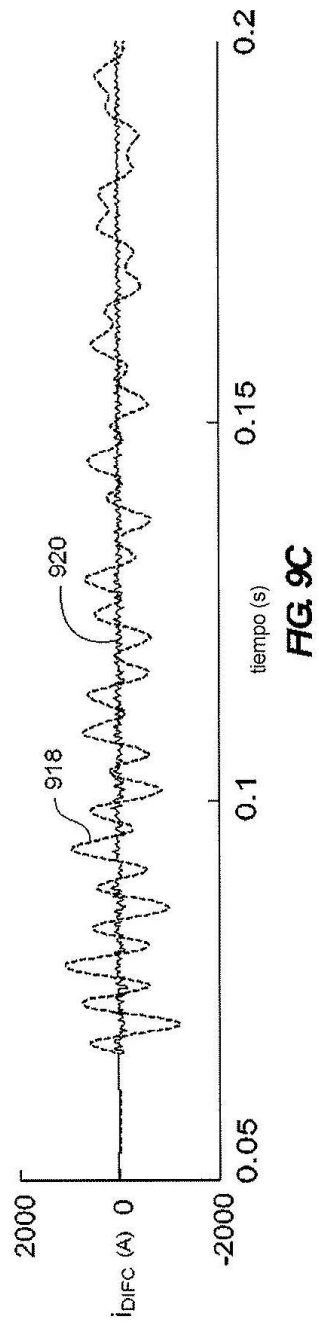
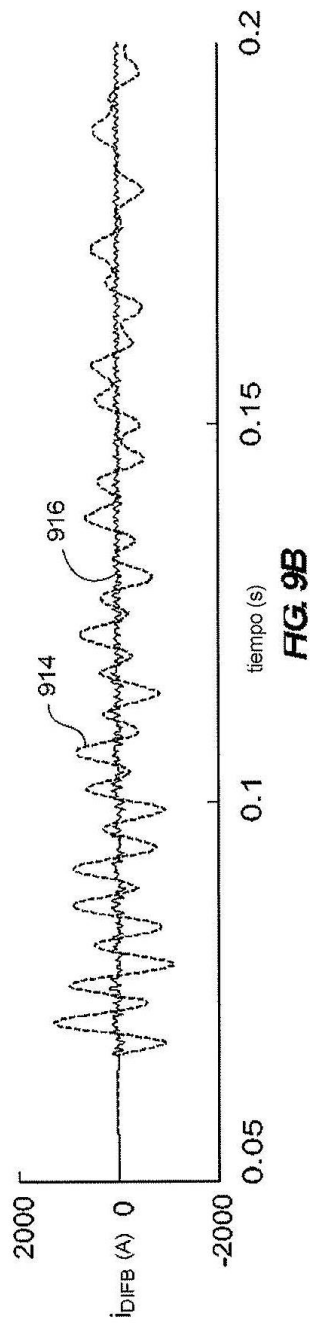
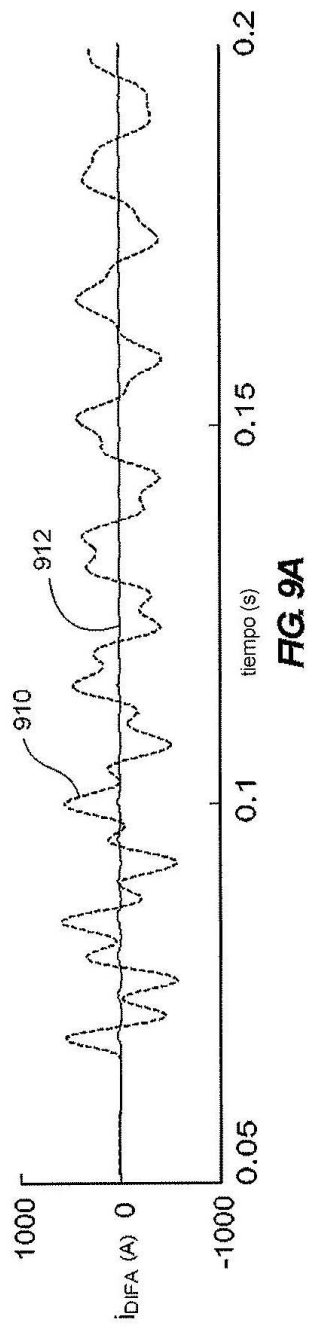


FIG. 7B





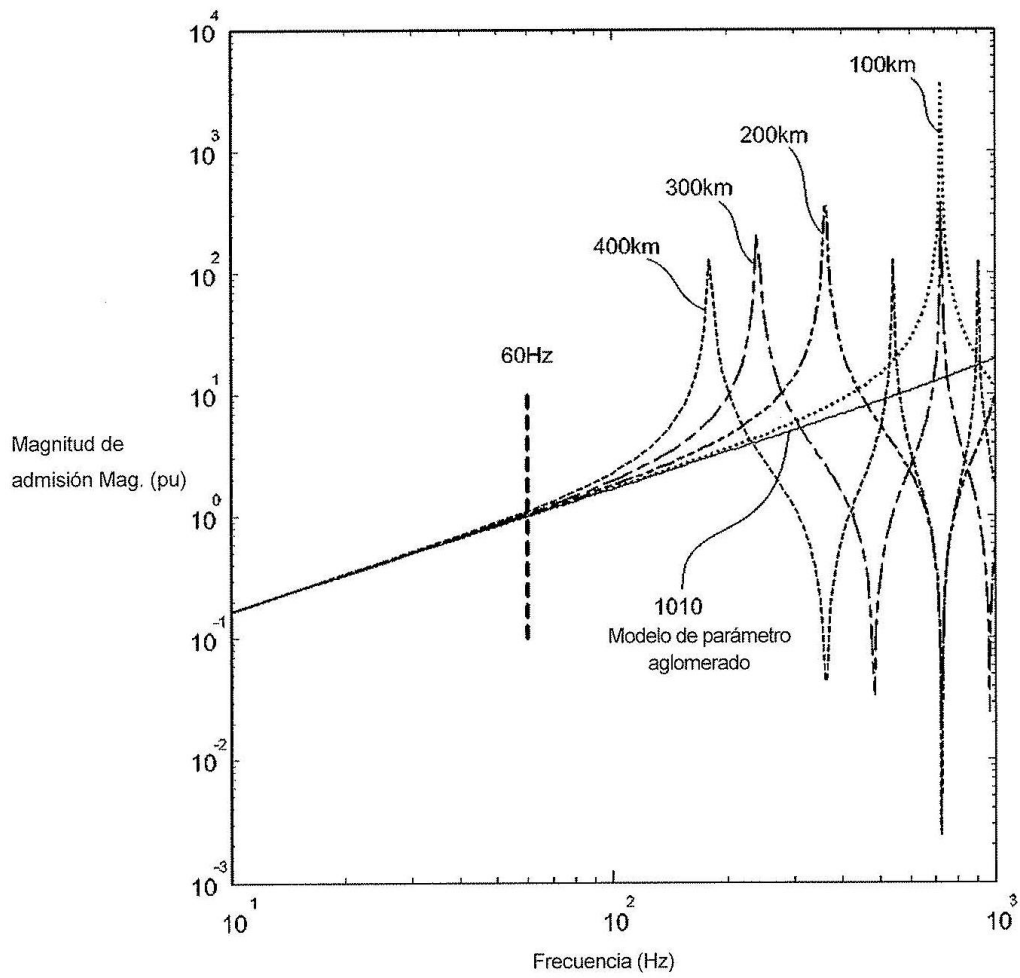


FIG. 10

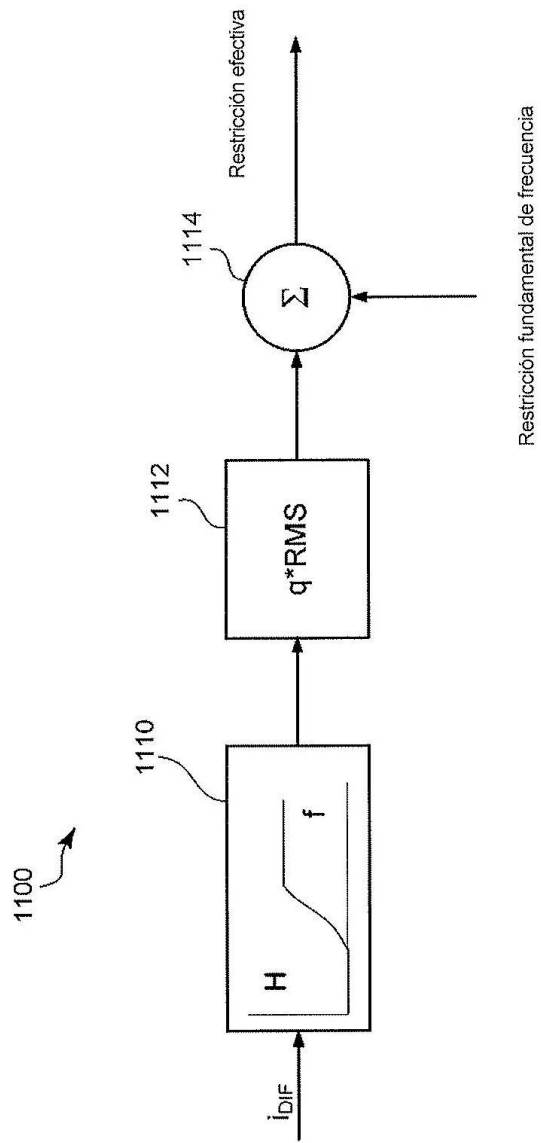
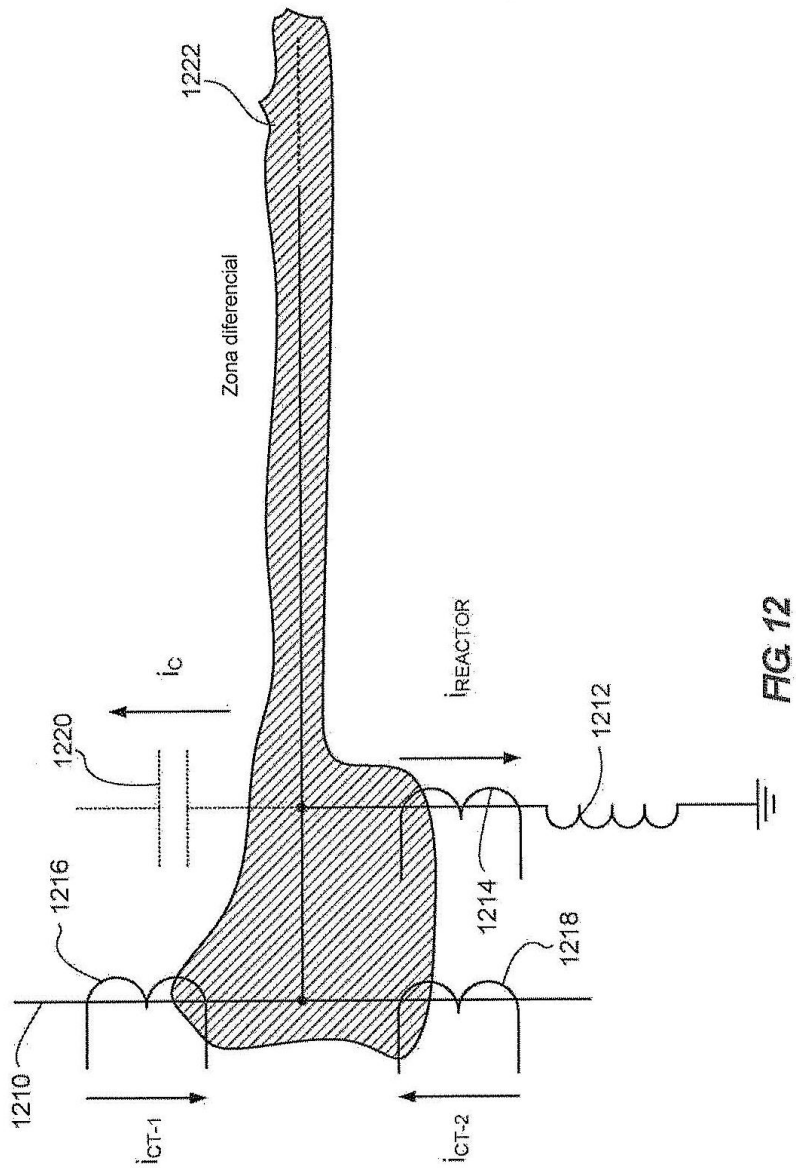


FIG. 11



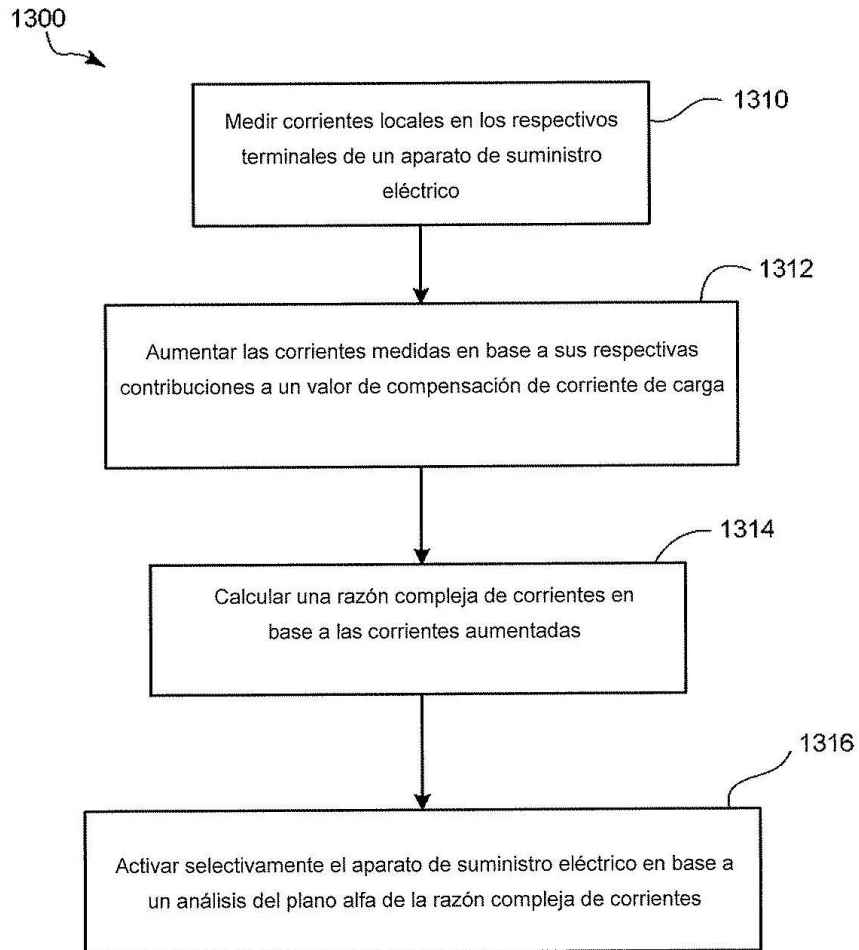


FIG. 13

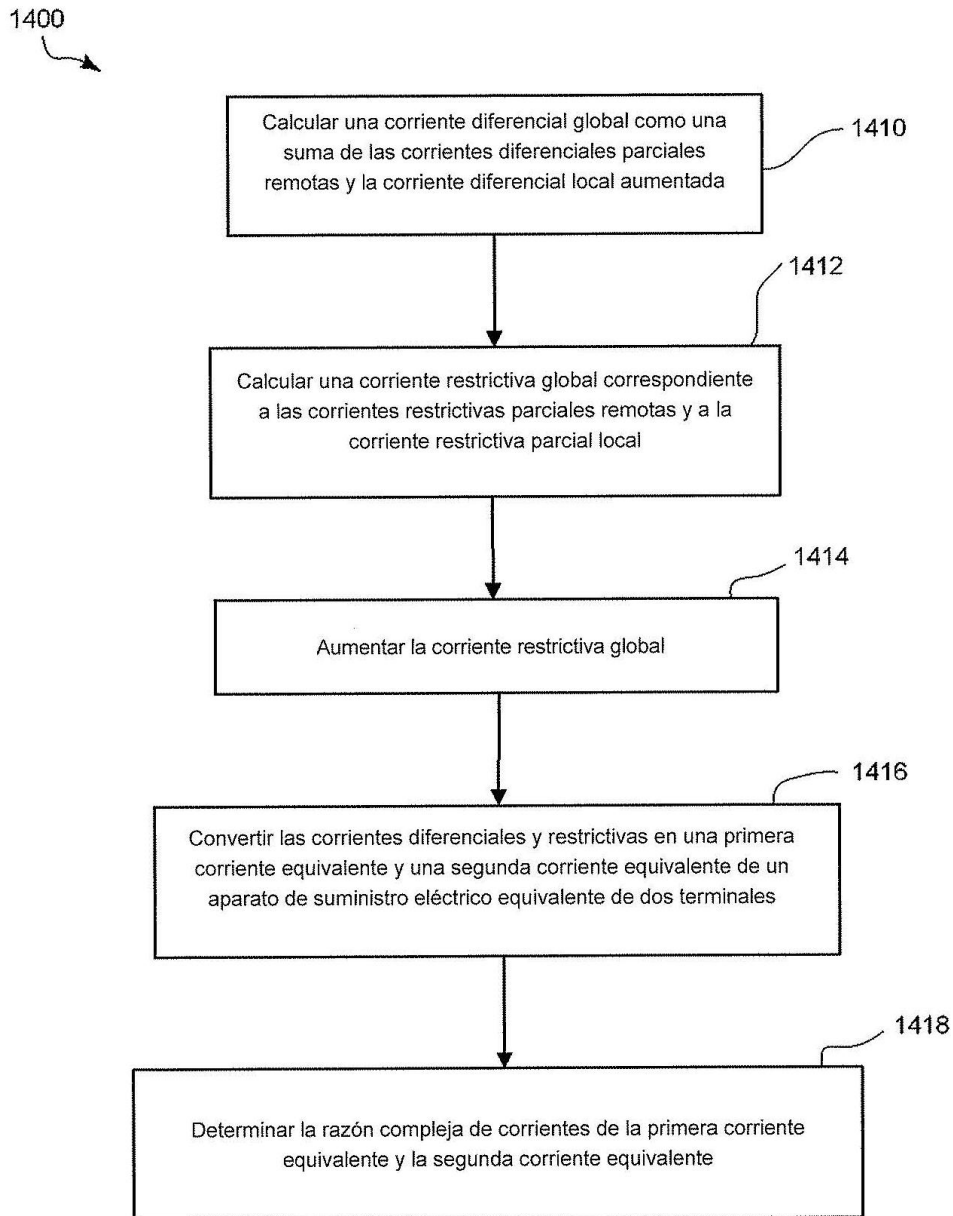


FIG. 14

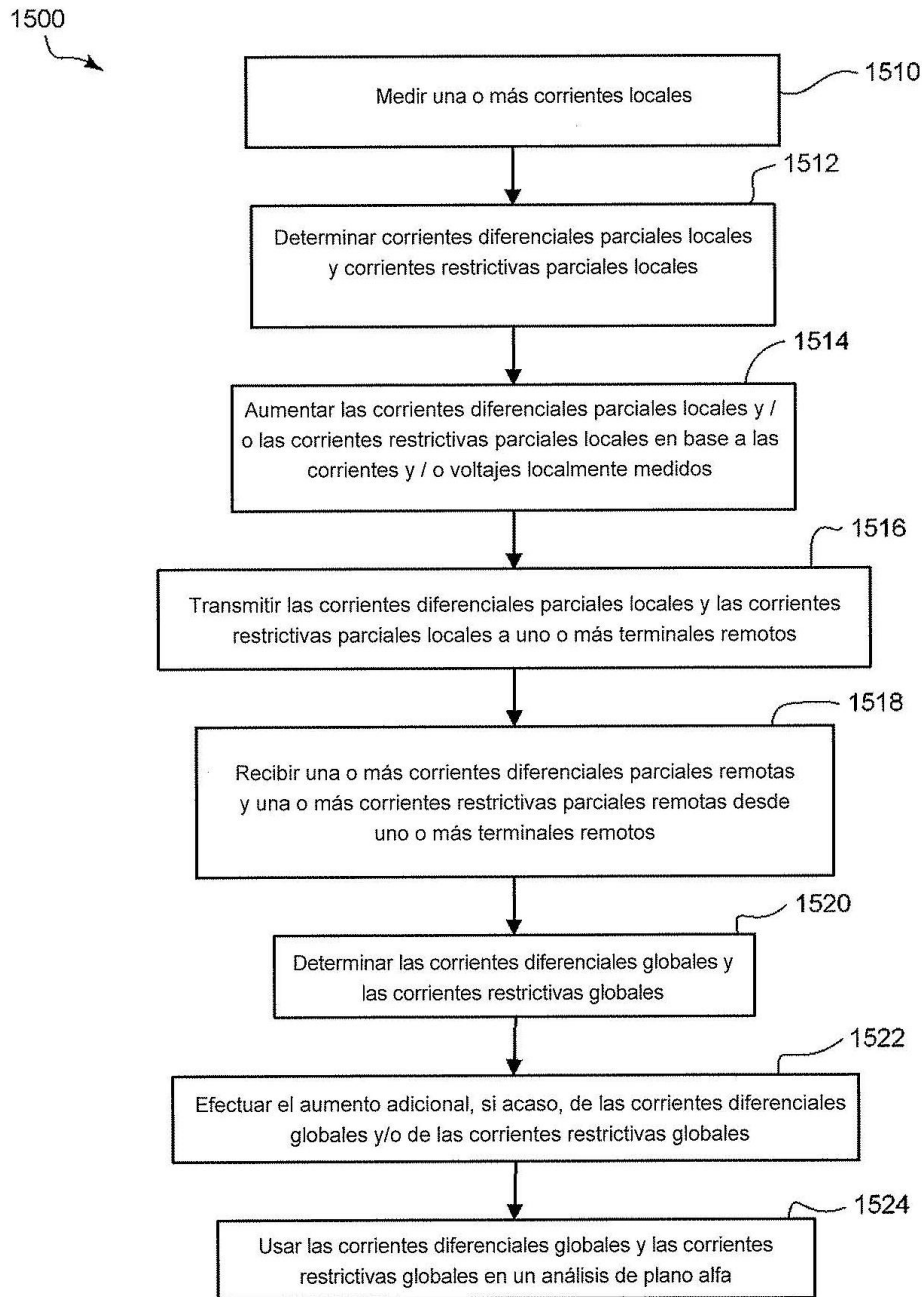


FIG. 15

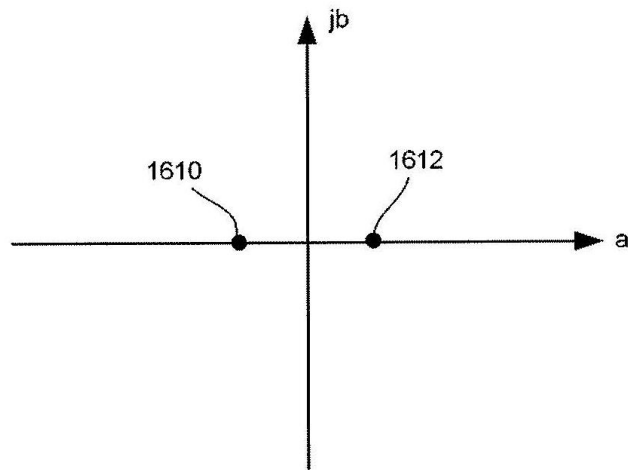


FIG. 16

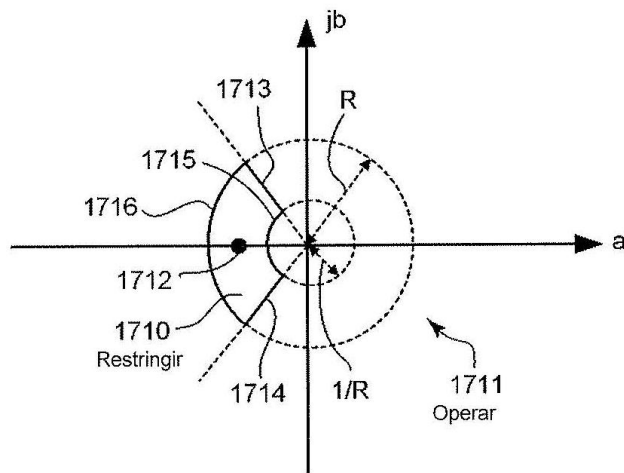


FIG. 17

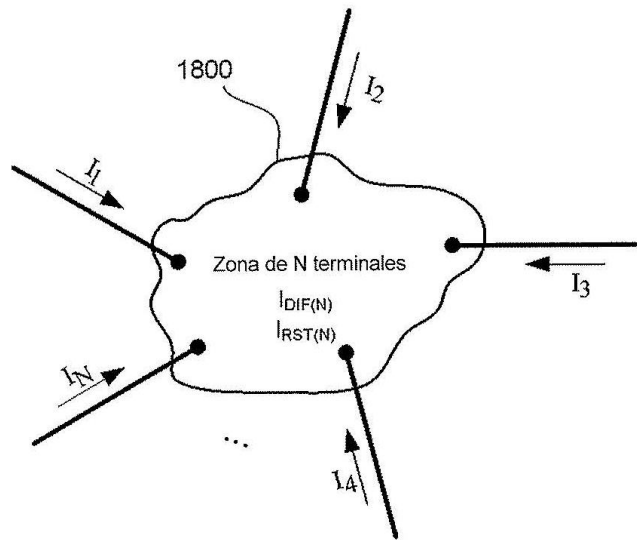


FIG. 18

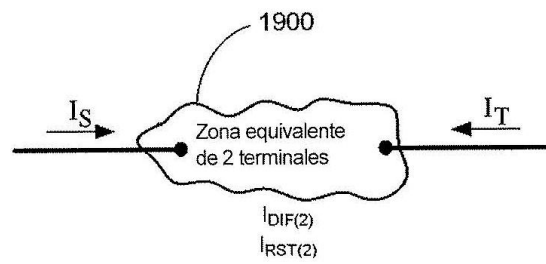


FIG. 19

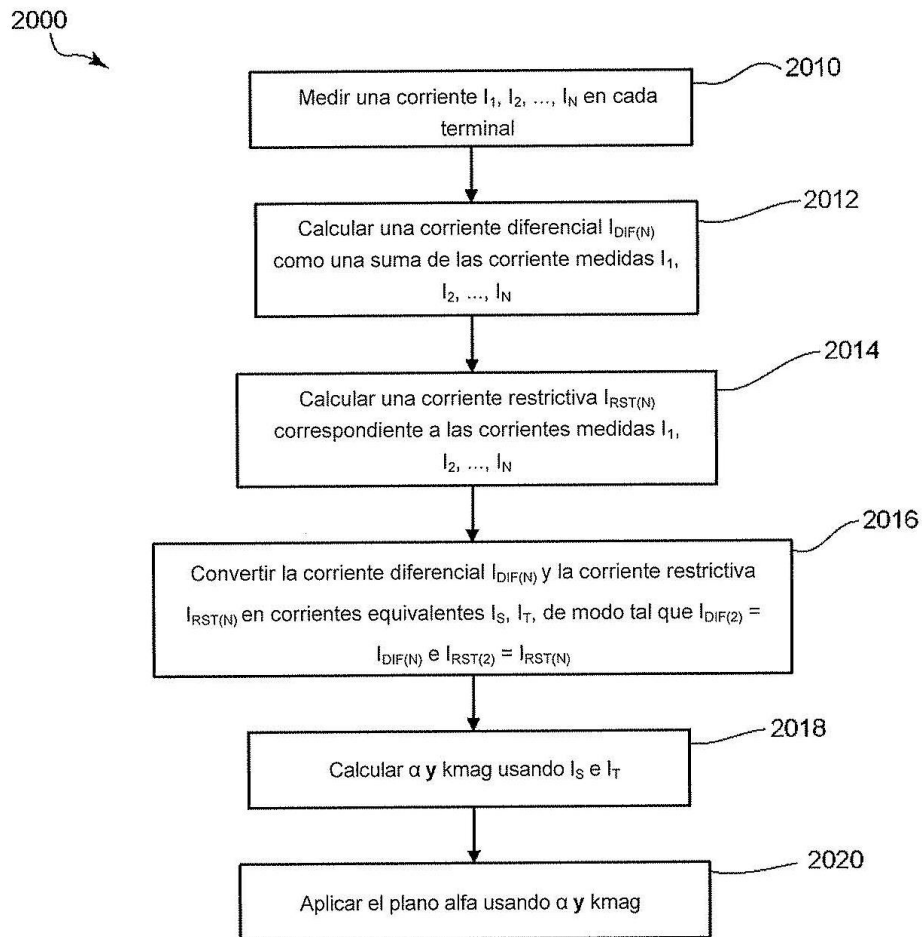


FIG. 20A

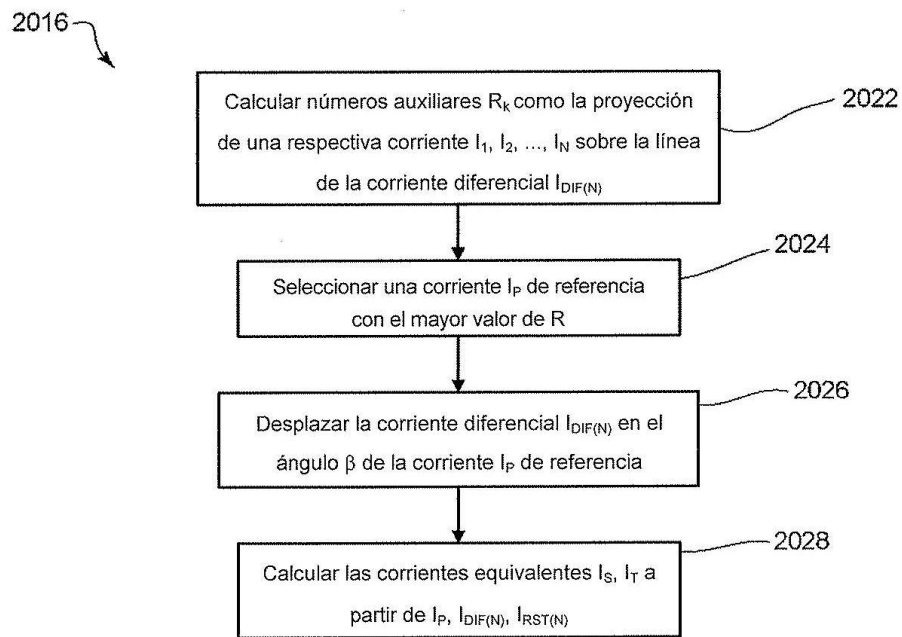


FIG. 20B

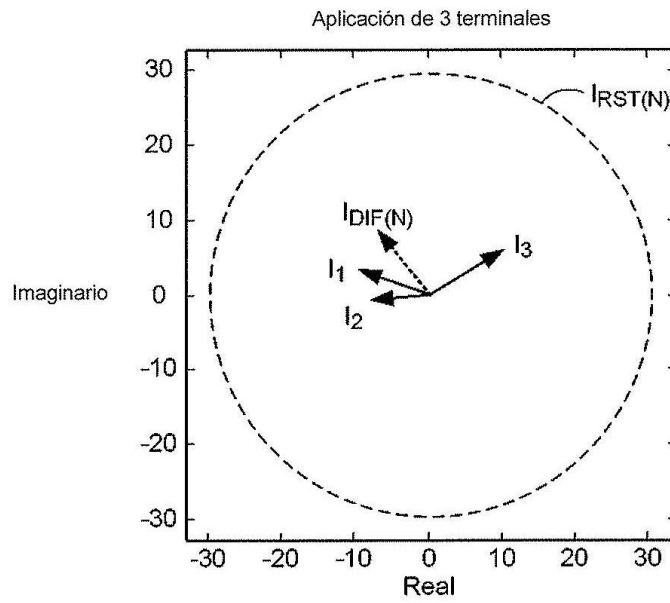


FIG. 21A

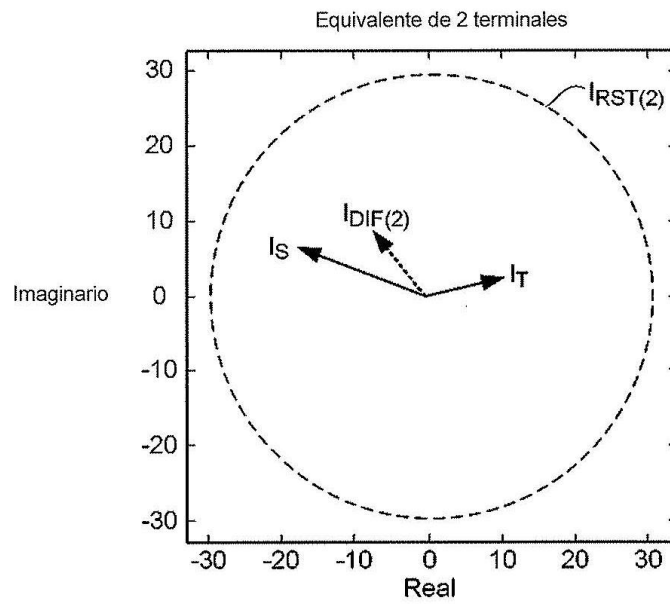


FIG. 21B

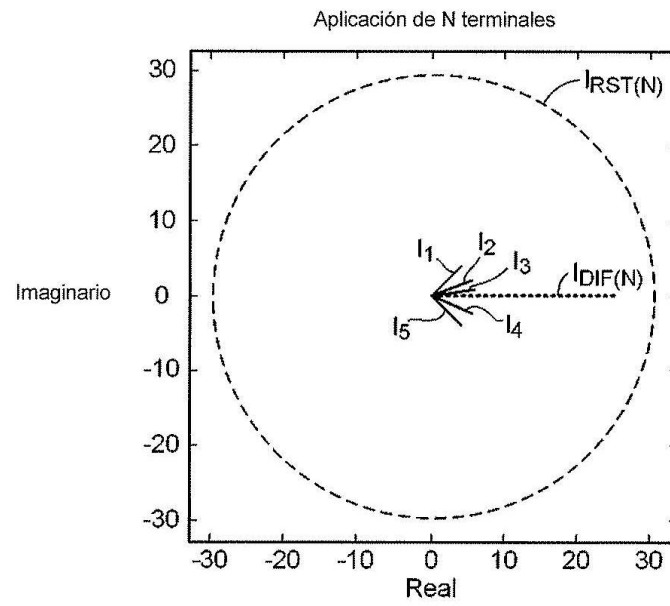


FIG. 22A

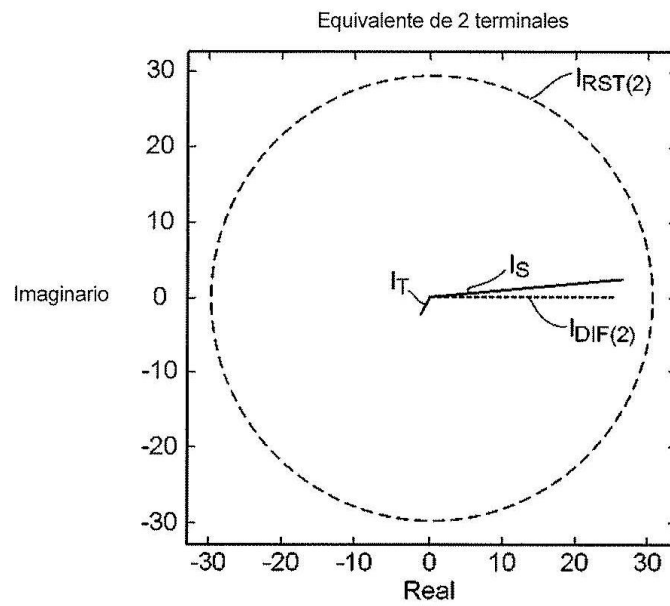


FIG. 22B

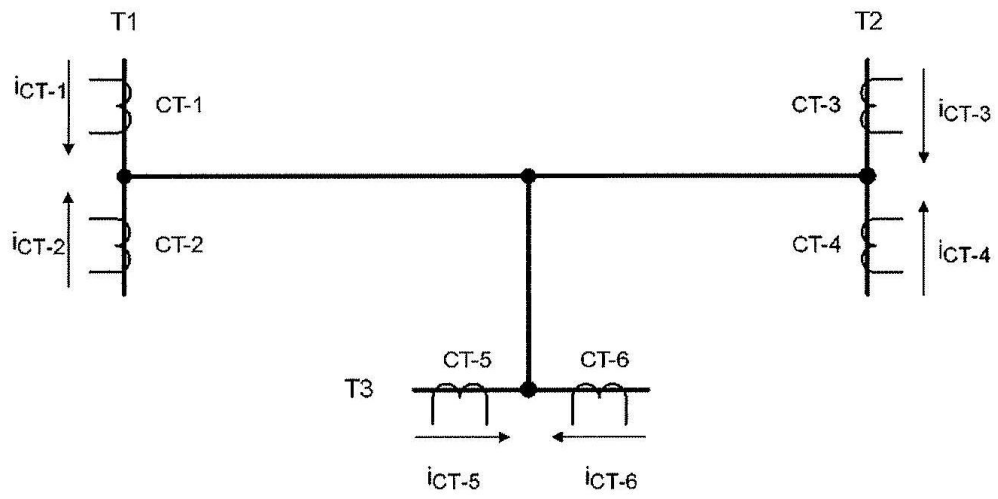


FIG. 23

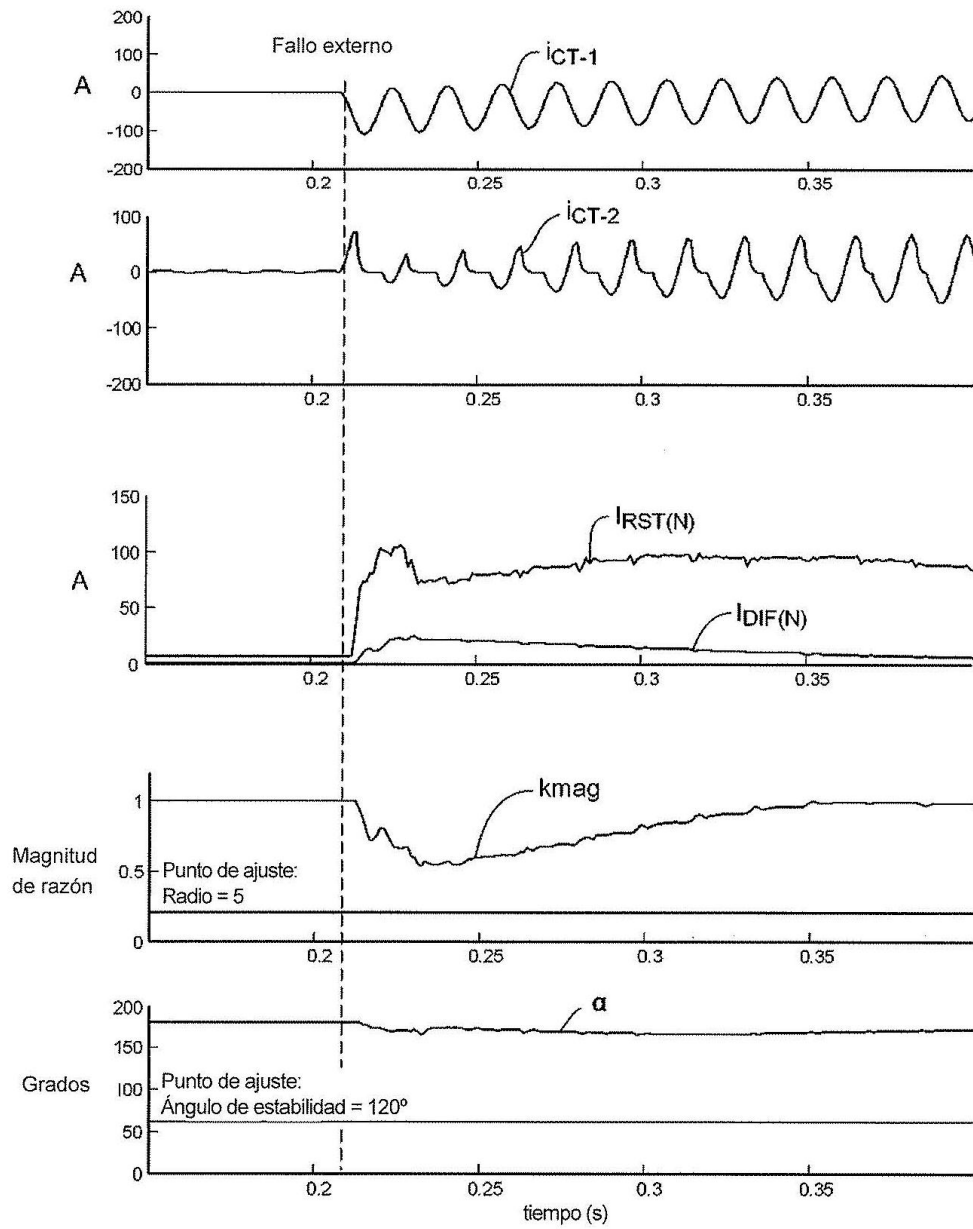


FIG. 24