

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 425 175**

51 Int. Cl.:

**G01R 31/08** (2006.01)

**G01R 27/18** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.12.2007** **E 07123293 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **19.06.2013** **EP 1939639**

54 Título: **Sistema y procedimiento de localización de fallos en una línea de transporte de energía de múltiples extremos**

30 Prioridad:

**22.12.2006 US 615103**

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

**11.10.2013**

73 Titular/es:

**GENERAL ELECTRIC COMPANY (100.0%)  
1 RIVER ROAD  
SCHENECTADY, NY 12345, US**

72 Inventor/es:

**PREMERLANI, WILLIAM JAMES;  
KASZTENNY, BOGDAN Z. y  
ADAMIAK, MARK G.**

74 Agente/Representante:

**CARPINTERO LÓPEZ, Mario**

**ES 2 425 175 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Sistema y procedimiento de localización de fallos en una línea de transporte de energía de múltiples extremos

El campo de la invención se refiere, en general, a la identificación y localización de fallos en líneas de transporte de energía eléctrica.

5 La capacidad de determinar exactamente la ubicación de fallos en líneas de sistemas de energía, y la de estimar la impedancia aproximada de fallos, son importantes, ya que facilitan el despacho rápido de las cuadrillas de campo, la inspección más rápida y los tiempos de reparación más cortos, todos ellos conducentes a una restauración más rápida de la línea de transporte afectada. A la vez, la ubicación precisa de fallos es un desafío técnico, principalmente porque la estimación de la ubicación del fallo se hace en base a una cantidad muy limitada de información recogida solamente en los terminales de línea. Los problemas que deben ser superados incluyen la precisión finita de modelación de las líneas de transporte, los errores de los instrumentos de medición, los errores en la estimación de los parámetros de los modelos de la línea y del sistema, el acoplamiento con líneas de transporte de sistemas adyacentes de energía, la resistencia a los fallos, desconocida y a menudo no lineal, la duración finita de los fallos, que da como resultado una breve ventana temporal de datos disponibles.

10 La localización de fallos es efectuada usualmente como un anexo al funcionamiento de los relés protectores de sistemas de energía basados en la distancia. Los enfoques más comunes usan mediciones de voltaje y de corriente desde un único terminal de línea para estimar la localización de fallos, usando diversas hipótesis y aproximaciones. Tales enfoques son denominados procedimientos de extremo único y no son muy precisos. La falta de precisión absoluta es principalmente un resultado de tener más incógnitas que las ecuaciones que podrían obtenerse del modelo de línea y de sistema basado en mediciones desde un extremo de la línea. Como resultado, se plantean hipótesis. Diversas hipótesis producen diversos procedimientos de localización de fallos de extremo único. Cuando las hipótesis son satisfechas en una situación dada de fallo, el resultado de la localización del fallo es exacto. Si las hipótesis no son satisfechas, tendrá lugar un error inherente, a veces muy significativo, del procedimiento.

15 Los sistemas de localización de fallos que utilizan información de más de un terminal de línea se denominan localizadores de fallos de múltiples extremos. Un localizador de fallos de múltiples extremos elimina el punto débil básico de un enfoque de extremo único, pero requiere canales de comunicación para retransmitir datos desde terminales de línea geográficamente dispersos hacia una única ubicación, donde se realizan los cálculos reales de localización de fallos. Algunos procedimientos de localización de fallos de múltiples extremos también requieren la sincronización de los datos entre los terminales de línea. Estos dos requisitos hacen que los procedimientos de localización de fallos de múltiples extremos sean difíciles de implementar. La Patente Estadounidense 6.256.592, por ejemplo, describe un sistema de múltiples extremos para localizar un fallo en una línea de energía, usando el valor de la magnitud de la corriente de secuencia negativa y la magnitud y los valores angulares de la impedancia de secuencia negativa, en el momento en que ocurre el fallo. La magnitud y la información angular son transmitidas entre dos terminales del sistema de múltiples extremos, de modo que el punto de localización del fallo pueda ser determinado a partir de la información. La Patente Estadounidense 6.256.592 usa la información de la corriente de secuencia negativa para producir resultados en tiempo casi real, reduciendo la cantidad de datos que deben ser transmitidos entre los terminales. La Patente Estadounidense 6.879.917 usa corrientes y voltajes de secuencia positiva o negativa para localizar fallos. La mayoría de los tipos de fallos están cubiertos por el procedimiento de secuencia negativa de la patente. Los fallos equilibrados trifásicos no producen ninguna señal de secuencia negativa que inutilice el procedimiento de secuencia negativa de la Patente Estadounidense 6.879.917. Por lo tanto, dicho procedimiento patentado añade las ecuaciones basadas en secuencias positivas para eliminar este punto débil. Como resultado, dos conjuntos de cálculos deben ser ejecutados en paralelo, o bien debe ser realizada una identificación grosera del tipo de fallo.

20 El documento de JOE-Air Jiang et al: "Un nuevo esquema de protección para la detección, la dirección, la discriminación, la clasificación y la localización de fallos en líneas de transporte", Transacciones del IEEE sobre Suministro de Energía, Centro de Servicios del IEEE, Nueva York, NY, EE UU, VOL. 18, Nº 1, 1 de enero de 2003 (2003-01-01), XP011078917, ISSN: 0885-8977, DOI: 10.1109/TPWRD.2003.809882, describe una técnica adaptable de detección / localización de fallos basada en una Unidad de Gestión de Energía, usando fasores sincronizados de dos terminales y un modelo de línea distribuida. El punto de fallo es determinado usando valores modales constantes de propagación, valores modales de impedancia de sobretensión y fasores de modalidad sincronizada de voltajes y corrientes del extremo receptor, o del extremo emisor, respectivamente.

25 El documento de Calero F.: "Renacimiento de cantidades de secuencia negativa en la retransmisión protectora con relés basados en microprocesadores", Ingenieros de Relés Protectores, 57-ima Conferencia Anual de 2004 para la Estación del Colegio, Tejas, EE UU, Piscataway, NJ, EE UU, IEEE, 1 de enero de 2004 (2004-01-01), páginas 190 a 219, XP010698085, ISBN: 978-0-7803-8423-3, describe el uso de parámetros de secuencia negativa equivalentes a la impedancia de secuencia positiva en el cálculo de las localizaciones de fallos.

30 La Solicitud de Patente Internacional Nº 98 / 11641 describe un procedimiento de detección de fallos en un sistema de línea de transporte de energía que incluye medir simultáneamente muestras de corrientes de fase en cada fase de cada terminal de transporte, y calcular minifases reales e imaginarias que comprenden sumas parciales de las muestras actuales de fases.

5 La Patente Estadounidense N° 4275429 describe un aparato piloto de relé protector de retransmisión para líneas de transporte de corriente alterna trifásica de alto voltaje. Es de estado absolutamente sólido, y toma decisiones de pulsación en base a tres comparaciones distintas de las condiciones de corriente de línea, cercanas y lejanas, representadas por las señales de voltaje unifásico obtenidas de la corriente de línea. Las tres comparaciones indican la magnitud de la diferencia de fasores, la magnitud del ángulo de fase y las magnitudes absolutas del promedio relativo.

10 La necesidad de una identificación del tipo de fallo es un punto débil para los sistemas de tiempo real con un ancho de banda de comunicación limitado. La parte remota del localizador necesita enviar señales basadas tanto en secuencias negativas como positivas, o bien las dos partes del localizador deben funcionar impecablemente en términos de identificación de tipos de fallos. Si una parte envía la información basada en secuencias negativas, mientras que la otra parte la combina con la información basada en secuencias positiva, tendrán lugar errores significativos en la estimación de distancias de fallos.

15 Un típico localizador de fallos de extremo único o múltiple requiere conocimiento del tipo de fallo, es decir, cuáles y cuántos conductores están implicados en el fallo, conocimiento del acoplamiento mutuo con líneas adyacentes situadas en las mismas torres o en las inmediaciones, y alguna otra información auxiliar. Estos factores extra son hallados mediante procedimientos individuales y, si son entregados al procedimiento principal de localización de fallos con errores, afectarán la precisión global de la localización de fallos.

20 Aún existe la necesidad de otros procedimientos para determinar precisamente la posición de un fallo en una línea de transporte de energía, que pueda reducir adicionalmente el error y producir resultados rápidamente a continuación de un fallo. Para sistemas de múltiples extremos que funcionan en tiempo real, o casi real, tales como los localizadores integrados con los relés de protección, es importante limitar los requisitos de ancho de banda para las comunicaciones y, en particular, la cantidad de información que necesita ser enviada entre distintos terminales de la línea de transporte.

La presente invención reside en un sistema y en un procedimiento de detección de posiciones de fallos según lo expuesto en las reivindicaciones adjuntas.

25 Un sistema de detección de posiciones de fallos según la invención utiliza mediciones de fasores sincronizados de corrientes y voltajes compuestos unívocamente diseñados, provenientes de todos los extremos de una línea de transporte de energía, y ecuaciones básicas de red. El sistema es aplicable a líneas de transporte que tengan dos o más terminales. Usando solamente las señales compuestas especialmente creadas, el procedimiento no requiere el conocimiento del tipo de fallo, la resistencia a fallos, la cantidad del acoplamiento mutuo con las líneas adyacentes, o la impedancia de secuencia cero de la línea dada. La capacidad de ignorar el último valor hace que el procedimiento sea muy útil para su aplicación en líneas de cable donde la impedancia de secuencia cero varía y es difícil de tratar.

En una realización adicional de la invención, una vez que el fallo está localizado, se estima la impedancia del fallo. En otra realización más de la localización, el sistema es compensado en cuanto a los efectos de las corrientes de carga de línea.

35 Las diversas características de novedad que caracterizan la invención son señaladas particularmente en las reivindicaciones anexas a, y que forman parte de esta revelación. Para una mejor comprensión de la invención, de sus ventajas operativas y de los beneficios obtenidos por sus usos, se hace referencia a los dibujos adjuntos y al material descriptivo. Los dibujos adjuntos están concebidos para mostrar ejemplos de las muchas formas de la invención. Los dibujos no están concebidos para mostrar los límites de todas las maneras en que la invención puede ser hecha y usada. Pueden hacerse, por supuesto, cambios y sustituciones de los diversos componentes de la invención. La invención reside asimismo en sub-combinaciones y sub-sistemas de los elementos descritos, y en los procedimientos para usarlos.

Se describirán ahora diversos aspectos y realizaciones de la presente invención, con relación a los dibujos adjuntos, en los cuales:

la Fig. 1 es un diagrama esquemático de circuitos de un sistema de detección de fallos de dos terminales, de acuerdo a una realización de la invención:

45 la Fig. 2 es un diagrama esquemático de circuitos de un sistema de detección de fallos de tres terminales, de acuerdo a otra realización;

la Fig. 3 es un diagrama esquemático de circuitos de un modelo de resistencia a fallos para el circuito de dos terminales de la Fig. 1;

50 la Fig. 4 es un diagrama esquemático de circuitos de un modelo de señales compuestas de compensación de corrientes de carga, de acuerdo a una realización adicional; y

la Fig. 5 es un diagrama esquemático de circuitos del modelo de señales compuestas de compensación de corrientes de carga de la Fig. 4.

El sistema de detección de fallos de diversas realizaciones de la invención realizada en la presente memoria está basado en la idea de que las mediciones sincronizadas de voltaje y de corriente en todos los extremos de la línea de transporte

posibilitan usar ecuaciones de red directamente para calcular la localización del fallo sin hipótesis ni aproximaciones, usando solamente las señales compuestas y la red asociada.

5 La señal compuesta es creada de modo tal que, independientemente del tipo de fallo, haya una perturbación en las señales compuestas. El voltaje compuesto en el fallo puede ser calculado desde cada extremo de la línea, restando la caída de la línea al fallo del voltaje en ese extremo, usando los voltajes compuestos en los terminales, las corrientes compuestas y la impedancia adecuada. Hay más ecuaciones que incógnitas en este modelo de señales compuestas, por lo que es posible despejar la ubicación del fallo que coincida con las estimaciones de voltaje de fallo hechas desde todos los extremos de la línea. Esto simplifica el sistema y lo hace sumamente preciso, al eliminar tanto las hipótesis como los parámetros del modelo que puedan tener limitaciones inherentes de la precisión, tal como la impedancia de secuencia  
10 cero de la línea. Los sistemas y cálculos para sistemas de dos extremos y de tres extremos son similares, y serán descritos adicionalmente en la presente memoria, primero en resumen, y luego con referencia a los dibujos adjuntos.

15 El sistema de dos extremos ejecuta un algoritmo de mediciones por separado en cada terminal. Cualquier resultado es suficiente para localizar el fallo. Ambos terminales calcularán exactamente la misma localización del fallo, dado que usan exactamente las mismas ecuaciones aplicadas a los mismos datos. Esto podría resumirse en cuanto a que los cálculos son simétricos en términos de ecuaciones idénticas ejecutadas en ambos extremos de la línea, y redundantes en términos de los resultados que permanecen en la relación conocida a priori. De ese modo, el sistema de dos extremos puede comparar los resultados de los cálculos para asegurar la precisión. En una realización adicional del sistema de dos extremos, el sistema puede ser configurado para calcular posteriormente la resistencia a fallos en cada terminal a partir de la localización del fallo más las mediciones locales, de modo que cada terminal pueda calcular una estimación  
20 levemente distinta. Los dos valores estimados pueden ser promediados para aumentar la precisión.

25 El sistema de tres terminales ejecuta un algoritmo en cada terminal que tiene información proveniente de los tres terminales. En el caso en que un canal de comunicación esté caído, este puede ser solamente uno de los tres terminales. El algoritmo del sistema tiene dos partes: una parte que determina qué segmento de línea está fallado, y una segunda parte que localiza el fallo en el segmento fallado. Como con el sistema de dos terminales, el algoritmo calculará exactamente la misma ubicación de fallo a partir de cada terminal. Sin embargo, cada terminal puede informar de una resistencia a fallos levemente distinta. La precisión del cálculo de la resistencia a fallos puede ser aumentada promediando el valor determinado obtenido de cada terminal en una etapa subsiguiente.

30 Con referencia ahora a los dibujos, en los cuales los números iguales de referencia son usados para indicar los mismos elementos, o elementos relacionados, la Fig. 1 ilustra una red 100 de señales compuestas para una línea de transporte de energía de dos terminales. Una perturbación en la red de señales compuestas en la ubicación del fallo entre los terminales 105, 110 primero y segundo, respectivamente, caracteriza el fallo 150. El algoritmo de localización de fallos del sistema no necesita determinar explícitamente el voltaje compuesto en el fallo 150. En cambio, elimina el voltaje de fallo  $V(F)$  de las ecuaciones para la ubicación de fallos, usando en cambio otra información.

El algoritmo del sistema se basa en las siguientes mediciones de fallos y configuraciones:

35  $I(1) =$  fasor de corriente compuesta que fluye en la línea en el primer terminal 105

$I(2) =$  fasor de corriente compuesta que fluye en la línea en el segundo terminal 110

$V(1) =$  fasor de voltaje compuesto en el primer terminal 105

$V(2) =$  fasor de voltaje compuesto en el segundo terminal 110

$Z =$  impedancia de línea compleja

40  $L =$  longitud de línea entre los terminales 105, 110 primero y segundo

45 Las señales compuestas deben ser definidas primero. Estas señales son seleccionadas con el objeto de proporcionar una cantidad operativa no nula para cualquier tipo de fallo (simétrico, desequilibrado, con descarga a tierra o aislado de la tierra), de modo que la identificación del tipo de fallo no sea requerida antes de crear tal señal operativa compuesta. Otro objetivo es crear la señal compuesta de manera tal que el efecto de las corrientes fluyendo a tierra sea eliminado. Esto es para aumentar la precisión con respecto a los efectos de acoplamiento mutuo con otras líneas. Otro objetivo más es representar la situación con una única corriente y un voltaje tal que sea intercambiada la cantidad mínima de datos entre las partes del sistema de localización de fallos colocado en diversos terminales de la línea de transporte.

50 La presente invención usa la transformación generalizada de Clarke para representar voltajes y corrientes con el fin de la localización de fallos. La transformada tradicional de Clarke funciona para ambos valores instantáneos y de fasor, y usa la siguiente ecuación para uno de sus componentes:

$$V = (1/3) * (2 * V_A - V_B - V_C) \quad (1)$$

Lo anterior tiene el punto débil de anular los fallos de BC (Carga Básica) y, como tal, no satisface el requisito de suministrar una señal que represente el fallo en todas las circunstancias. Por lo tanto, la ecuación (1) está generalizada

por esta invención de la siguiente manera:

$$V = (1/3)*(2*VA - b*VB - (b^*)*VC) \quad (2)$$

donde b es un número complejo dado por:

$$b = 1 + j*\tan(\alpha) \quad (3a)$$

5 y b\* es un conjugado de b o bien, matemáticamente:

$$b^* = 1 - j*\tan(\alpha) \quad (3b)$$

donde alfa es un ángulo arbitrario. Obsérvese que con alfa = 0, la transformación generalizada de Clarke de esta invención se convierte en la transformada tradicional de Clarke. Una implementación específica del procedimiento revelado usa alfa = pi/4, o sea, 45 grados. Se observará, sin embargo, que muchos ángulos satisfacen los requisitos de representar cualquier tipo de fallo y de no ser sensibles al acoplamiento de la corriente a tierra. Además, se observará que muchas otras combinaciones de las señales de fase (A, B, C) piden los requisitos de representar cualquier tipo de fallo y de no ser sensibles al acoplamiento de la corriente a tierra. Esta invención reivindica un procedimiento en el cual es creada una única señal para representar las tres señales medidas (A, B, C), con fines de localización de fallos, de manera tal que las corrientes a tierra no afecten a dicha señal, y que dicha señal sea no nula para todos los tipos de fallo. Por lo tanto, las ecuaciones (1) a (3) son solamente ejemplos, y los expertos en la técnica pueden obtener muchas alternativas de este enfoque.

Tanto las corrientes de fase (IA, IB, IC) como los voltajes (VA, VB, VC) en todos los puntos de interés son convertidos en la señal compuesta, tal como la transformación generalizada de Clarke, usando el mismo procedimiento de transformación en toda la extensión de la red de interés. Esta conversión tiene lugar en el aparato que localiza los fallos, y es llevada a cabo matemáticamente sobre todas las señales al obtener el procedimiento y las ecuaciones de localización de fallos.

En el caso de las mediciones de corrientes de fase que son compensadas para cargar la corriente de la línea de transporte, los fasores de corriente de fase compensada son usados al obtener las señales de corriente compuesta, y proporcionarán una estimación de ubicación de fallos que aprovecha totalmente la compensación. Los efectos de la carga de corriente son descritos adicionalmente más adelante.

Desde este punto en adelante, todos los cálculos se refieren a las corrientes y voltajes compuestos.

Se desea conocer la ubicación de un fallo en unidades fraccionarias, o bien absolutas:

F = ubicación de fallo fraccionaria proveniente del primer terminal 105

D = F · L = distancia desde el primer terminal 105 a la ubicación del fallo 150

30 Debería observarse que la proporción directa anterior entre la ubicación fraccionaria del fallo y la distancia al fallo vale para líneas homogéneas, es decir, líneas donde la impedancia está distribuida uniformemente a lo largo de la longitud de la línea. Para líneas no homogéneas, no vale la proporción directa. Sin embargo, el procedimiento de esta revelación puede ser fácilmente expandido sobre líneas no homogéneas. Para simplificar la explicación, el caso de las líneas homogéneas se considera en la siguiente descripción:

La ubicación fraccionaria del fallo está dada por:

$$F = \text{Real} \left[ \frac{\frac{V(1) - V(2)}{Z} + I(2)}{I(1) + I(2)} \right]$$

35 (4)

La Ecuación (4) aprovecha la redundancia en los datos. Hay más ecuaciones que incógnitas, por lo que se usa un ajuste de cuadrados mínimos. La ecuación es independiente de la fase fallada, del tipo de fallo, de la resistencia a fallos y del acoplamiento de secuencia cero (corriente a tierra) con una línea de transporte adyacente, si la hubiera.

Es importante entender el valor de la impedancia total de línea de la línea de transporte, Z, usada en la ecuación (4). Este valor es una razón compleja del voltaje compuesto y de la corriente compuesta medidas en un extremo de la línea, con el otro extremo en fallo. Obsérvese que el tipo de fallo no es relevante, y que dicha razón será la misma independientemente del tipo de fallo. Prácticamente, esta impedancia es igual a la impedancia de secuencia negativa o positiva de la línea, y está inmediatamente disponible.

La Ecuación (4) puede ser calculada en cualquiera de los terminales 105, 110 primero y segundo, o en ambos, produciendo exactamente la misma estimación de ubicación de fallo, excepto cuando se mide desde extremos opuestos

de la línea. Como se reconocerá, los papeles de los dos terminales 105, 110 son intercambiados cuando se cambia el terminal en el cual se calcula la ecuación (1). Los dos valores de F deben arrojar idénticamente una suma igual a 1.

5 Puede mostrarse que el error producido por la ecuación (1), como resultado de un error de medición y de parámetros, es igual a 1/2 del peor error relativo de sensor, tal como un error de dispositivo de tipo CT (Transferencia de Carga). Eso resulta estar entre el 2,5 y el 5% para errores típicos de instrumentación de CT y de ubicación de fallos.

10 El algoritmo de dos terminales descrito anteriormente es extendido inmediatamente a un sistema 200 de tres terminales, tal como el mostrado en la Fig. 2. La situación para un sistema 200 de tres terminales está ilustrado para el caso en el cual el fallo 150 está en la línea desde el primer terminal 105 a la toma 220. Las situaciones para un fallo 150 localizado en uno de los otros dos segmentos de línea no se muestran, pero pueden ser obtenidas por una permutación cíclica de los índices de línea.

Se suponen disponibles las siguientes mediciones y parámetros:

$I(1), I(2), I(3) =$  fasores de corriente compuesta que fluyen a los segmentos de línea primero, segundo y tercero

$V(1), V(2), V(3) =$  fasores de voltaje compuesto en el primer terminal 105, el segundo terminal 110 y el tercer terminal 115

15  $Z(1), Z(2), Z(3) =$  impedancia compuesta compleja de los segmentos de línea primero, segundo y tercero

$L(1), L(2), L(3) =$  longitudes de línea de los segmentos de línea primero, segundo y tercero

Por supuesto, el objetivo es determinar qué segmento de línea tiene el fallo 150, y la distancia del fallo 150 desde el correspondiente terminal 105, 110, 115 de línea. Los siguientes parámetros son usados para determinar la línea con el fallo 150 y la distancia desde un terminal dado hasta el fallo 150:

20  $N =$  índice de terminal del segmento de línea fallado (= 1, 2 o 3)

$F =$  ubicación fraccionaria del fallo a partir del N-ésimo terminal 105, 110, 115

$D = F \cdot L(N) =$  distancia desde el N-ésimo terminal 105, 110, 115 a la ubicación de fallo 150

25 Inicialmente, se hacen tres estimaciones distintas del voltaje en la toma 220, suponiendo una condición sin fallos entre el punto de toma y un terminal dado, comenzando en cada uno de los terminales 105, 110, 115 primero, segundo y tercero. El algoritmo de localización de fallos usa, por tanto, las siguientes estimaciones del voltaje de la toma:

$$\begin{aligned} \mathbf{VT}(1) &= \mathbf{V}(1) - \mathbf{I}(1) \cdot \mathbf{Z}(1) \\ \mathbf{VT}(2) &= \mathbf{V}(2) - \mathbf{I}(2) \cdot \mathbf{Z}(2) \\ \mathbf{VT}(3) &= \mathbf{V}(3) - \mathbf{I}(3) \cdot \mathbf{Z}(3) \end{aligned} \quad (5)$$

donde  $\mathbf{VT}(1)$ ,  $\mathbf{VT}(2)$  y  $\mathbf{VT}(3)$  son los voltajes de la toma, calculados, respectivamente, a partir de cada uno entre los terminales 105, 110, 115 primero, segundo y tercero.

30 Luego, se determina el segmento de línea que contiene el fallo 150. La determinación de la línea puede ser hecha reconociendo que las caídas de voltaje alrededor de un bucle a través de los segmentos de línea sin fallos arrojarán una suma igual a cero. Los fasores de voltaje residual son calculados para cada bucle. El bucle con el mínimo voltaje residual contiene los dos segmentos de línea sin fallos. En otras palabras, solamente un segmento de línea está fallado y los dos segmentos sin fallos permiten que los dos terminales estimen el verdadero voltaje de la toma. Como resultado, si un par dado de terminales determina el mismo voltaje de la toma, el fallo debe estar entre la toma y el tercer terminal. Las siguientes ecuaciones se usan para calcular las magnitudes al cuadrado de los fasores de voltaje residual en cada bucle, como indicadores:

$$\begin{aligned} R^2(1) &= |\mathbf{VT}(2) - \mathbf{VT}(3)|^2 \\ R^2(2) &= |\mathbf{VT}(3) - \mathbf{VT}(1)|^2 \\ R^2(3) &= |\mathbf{VT}(1) - \mathbf{VT}(2)|^2 \end{aligned} \quad (6)$$

40 donde  $R^2(1)$ ,  $R^2(2)$  y  $R^2(3)$  son las magnitudes al cuadrado. El índice  $N = 1, 2$  o  $3$  de la línea que contiene el fallo 150 es el mismo que el indicador más pequeño de fasor de voltaje residual. En el caso en que todos los indicadores  $R^2(1)$ ,  $R^2(2)$  y  $R^2(3)$  son aproximadamente iguales entre sí, entonces el fallo está cerca de la toma 220.

Una vez que está determinado el índice N de la línea que contiene el fallo 150, el fallo 150 es localizado usando una fórmula obtenida para las líneas de dos terminales, alimentada con datos adecuados para ese segmento de línea. Cada fórmula es obtenida de cualquiera de las otras fórmulas, por una permutación cíclica de los índices N. Las fórmulas para cada índice o línea se dan más adelante. En primer lugar, se calculan la mejor estimación del fasor de voltaje en el punto 220 de toma y la contribución de corriente del fallo desde la toma 220, usando fasores de corriente y las estimaciones de voltaje de toma, calculados en la ecuación (5) anterior:

5

$$\begin{aligned}
 \text{si } (N = 1) : \mathbf{VT} &= \frac{\mathbf{VT}(2) + \mathbf{VT}(3)}{2}; \mathbf{IT} = \mathbf{I}(2) + \mathbf{I}(3); Z = Z(1); \\
 \text{si } (N = 2) : \mathbf{VT} &= \frac{\mathbf{VT}(3) + \mathbf{VT}(1)}{2}; \mathbf{IT} = \mathbf{I}(3) + \mathbf{I}(1); Z = Z(2); \\
 \text{si } (N = 3) : \mathbf{VT} &= \frac{\mathbf{VT}(1) + \mathbf{VT}(2)}{2}; \mathbf{IT} = \mathbf{I}(1) + \mathbf{I}(2); Z = Z(3);
 \end{aligned} \tag{7}$$

La ubicación fraccionaria del fallo desde el extremo terminal 105 del segmento de línea que contiene el fallo 150 se calcula luego a partir del terminal 105 y de los fasores de corriente y voltaje de toma. El punto 220 de toma actúa exactamente como el otro terminal en el algoritmo de dos terminales. Por lo tanto:

$$\begin{aligned}
 \text{si } (N = 1) : F &= \text{Real} \left[ \frac{\frac{\mathbf{V}(1) - \mathbf{VT}}{Z} + \mathbf{IT}}{\mathbf{I}(1) + \mathbf{I}(2) + \mathbf{I}(3)} \right] \\
 \text{si } (N = 2) : F &= \text{Real} \left[ \frac{\frac{\mathbf{V}(2) - \mathbf{VT}}{Z} + \mathbf{IT}}{\mathbf{I}(1) + \mathbf{I}(2) + \mathbf{I}(3)} \right] \\
 \text{si } (N = 3) : F &= \text{Real} \left[ \frac{\frac{\mathbf{V}(3) - \mathbf{VT}}{Z} + \mathbf{IT}}{\mathbf{I}(1) + \mathbf{I}(2) + \mathbf{I}(3)} \right]
 \end{aligned} \tag{8}$$

10 La distancia efectiva a lo largo de la línea específica es calculada posteriormente multiplicando la distancia fraccionaria por la longitud del segmento de línea afectado:

$$D = F \cdot L(N) \tag{9}$$

15 La ecuación (8) puede ser implementada en cualquiera de, o en todos, los tres terminales 105, 110, 115 que tengan disponible la información necesaria. Los tres resultados serán idénticos. Debería observarse que debe tenerse algo de cuidado en cuanto al hecho de que los tres terminales 105, 110, 115 tienen índices distintos dentro de cada terminal en una arquitectura de igual a igual, tal como la descrita en la realización de la Fig. 2. Como se apreciará, si los tres canales de comunicaciones están en funcionamiento, entonces los tres terminales pueden calcular la ubicación del fallo 150, mientras que, si solamente dos están en funcionamiento, entonces solamente un terminal 105, 110, 115 puede realizar el cálculo: el terminal 105, 110, 115 conectado con ambos canales operativos. Si solamente un canal está operativo, entonces los fallos no pueden ser detectados o localizados usando el sistema 200. Como se entenderá, todas las mediciones requeridas pueden ser obtenidas y los cálculos pueden ser hechos usando dispositivos convencionales de medición y / o de cálculo, conectados, o en comunicación, con el circuito de línea de transporte y los trayectos de comunicaciones, y configurados de acuerdo a las realizaciones descritas en la presente memoria.

25 En una realización adicional, la resistencia a fallos puede ser calculada calculando los voltajes de fase a tierra en el fallo 150, empezando por los voltajes terminales y restando las caídas de voltaje hasta la ubicación 150 del fallo conocido.

La resistencia a fallos puede ser calculada usando asimismo los sistemas 100, 200. Una vez que el fallo 150 está localizado, es un asunto sencillo estimar la resistencia a fallos. Los detalles dependen del tipo de fallo y del número de terminales. La siguiente explicación considera las ecuaciones de dos terminales. Las ecuaciones de tres terminales son similares, y se entenderá cómo obtener esas ecuaciones a partir de la explicación de dos terminales más adelante.

Para un fallo único de línea a tierra, la resistencia a fallos es estimada tomando la parte real de la razón del voltaje de fallos y los fasores de corriente para la fase fallada. El fasor de voltaje es estimado comenzando en el extremo terminal 105, 110, 115, donde los fasores de voltaje son conocidos, y restando la caída de voltaje en el fallo 150. Se consideran los posibles efectos del acoplamiento mutuo desde una línea adyacente. Con referencia a las Figs. 1 y 3, se considera el caso de un fallo de fase A a tierra. Las ecuaciones para fallos de B a tierra o de fallos de C a tierra (no mostradas en la Fig. 3) son similares, excepto en que se usan las cantidades de la fase adecuada.

5

En primer lugar, calcular el acoplamiento mutuo de secuencia cero desde la línea adyacente:

$$\mathbf{ZOM} = \mathbf{Z0} \cdot (\mathbf{ZOM} / \mathbf{Z0}) \quad (10)$$

$$(\mathbf{ZOM} / \mathbf{Z0}) = \text{razón de acoplamiento de secuencia cero}$$

10 Luego, calcular la distancia hasta el fallo:

$$D = F \cdot L \quad (11)$$

Calcular la parte de acoplamiento mutuo:

$$\text{si } (D < L_m) F_m = D / L_m; \text{ en caso contrario, } F_m = 1 \quad (12)$$

Dividir el valor 3IOM de la línea adyacente entre 3, según lo siguiente:

15

$$\mathbf{IOM} = \mathbf{3IOM} / 3 \quad (13)$$

Calcular la corriente de secuencia cero que fluye en el extremo local de la línea de transporte:

$$\mathbf{IO}(1) = (\mathbf{IA}(1) + \mathbf{IB}(1) + \mathbf{IC}(1)) / 3 \quad (14)$$

en donde el índice 1 se refiere a las mediciones de corriente tomadas del terminal local 105, 110. Luego, estimar el voltaje de fase a tierra en el fallo 150:

20

$$\mathbf{VA}(F) = \mathbf{VA}(1) - F \cdot ((\mathbf{IA}(1) - \mathbf{IO}(1)) \cdot \mathbf{Z} + \mathbf{IO}(1) \cdot \mathbf{Z0}) - F_m \cdot \mathbf{IOM} \cdot \mathbf{ZOM} \quad (15)$$

y calcular la corriente del fallo:

$$\mathbf{IA}(F) = \mathbf{IA}(1) + \mathbf{IA}(2) \quad (16)$$

en donde el índice 1 nuevamente se refiere a las mediciones de corriente tomadas desde el terminal local 105, 110, y el índice 2 se refiere a las mediciones de corriente tomadas desde el terminal remoto 110, 105. Finalmente, calcular la resistencia a fallos:

25

$$R_A(F) = \text{Real} \left( \frac{\mathbf{VA}(F)}{\mathbf{IA}(F)} \right) \quad (17)$$

La resistencia a fallos de fase a fase puede ser obtenida más fácilmente de la siguiente manera. En primer lugar, estimar el voltaje de fase a fase en el fallo:

$$\mathbf{VAB}(F) = (\mathbf{VA}(1) - \mathbf{VB}(1)) - F \cdot (\mathbf{IA}(1) - \mathbf{IB}(1)) \cdot \mathbf{Z} \quad (18)$$

30 donde A y B indican la fase, y 1 es el índice del terminal local 105, 110. Luego, estimar la corriente del fallo de fase a fase:

$$\mathbf{IAB}(F) = \frac{1}{2} (\mathbf{IA}(1) + \mathbf{IA}(2) - \mathbf{IB}(1) - \mathbf{IB}(2)) \quad (19)$$

Finalmente, calcular la resistencia de fase a fase usando los resultados de las ecuaciones (18) y (19):

$$R_{AB}(F) = \text{Real} \left( \frac{\mathbf{VAB}(F)}{\mathbf{IAB}(F)} \right) \quad (20)$$

35 Como se apreciará, el análisis del fallo de fase a fase es más sencillo porque el acoplamiento de secuencia cero no es pertinente.

Para la situación del fallo trifásico, una resistencia a fallos equivalente es informada como la parte real de la razón entre el voltaje compuesto y la corriente en el fallo 150. En el caso de un fallo trifásico, una mejor estimación del voltaje en el fallo 150 puede ser construida promediando las estimaciones, usando voltajes compuestos y corrientes de ambos extremos, según lo siguiente:

$$V(F) = \frac{1}{2} (V(1) - F \cdot I(1) \cdot Z + V(2) - (1 - F) \cdot I(2) \cdot Z) \quad (21)$$

5

por lo que la resistencia a fallos es entonces:

$$R(F) = \text{Real} \left( \frac{V(F)}{I(1) + I(2)} \right) \quad (22)$$

10

Con referencia nuevamente a la Fig. 3, el fallo de conexión a tierra de la fase A a la fase B se considera usando el modelo de circuito mostrado en la Fig. 3. A fin de admitir la implicación de redes de secuencia cero, se aplican las ecuaciones de fallo de línea única a tierra a cada una de las fases A y B. En primer lugar, se calcula el acoplamiento mutuo de secuencia cero desde la línea adyacente:

$$ZOM = Z0 \cdot (ZOM / Z0) \quad (23)$$

$(ZOM / Z0)$  = razón de acoplamiento de secuencia cero

La distancia hasta el fallo se calcula como antes:

15

$$D = F \cdot L \quad (24)$$

y calcular la parte de acoplamiento mutuo:

$$\text{si } (D < L_m) F_m = D / L_m; \text{ en caso contrario, } F_m = 1 \quad (25)$$

Luego, dividir el valor 310M de la línea adyacente entre 3:

$$IOM = 3IOM / 3 \quad (26)$$

20

y calcular la corriente de secuencia cero que fluye en el extremo local 105, 110 de la línea de transporte:

$$IO(1) = (IA(1) + IB(1) + IC(1)) / 3 \quad (27)$$

Luego, estimar el voltaje de fase a tierra en el fallo para cada una de las fases A y B:

$$VA(F) = VA(1) - F \cdot ((IA(1) - IO(1)) \cdot Z + IO(1) \cdot Z0) - F_m \cdot IOM \cdot ZOM \quad (28)$$

$$VB(F) = VB(1) - F \cdot ((IB(1) - IO(1)) \cdot Z + IO(1) \cdot Z0) - F_m \cdot IOM \cdot ZOM \quad (29)$$

25

y calcular la corriente del fallo para cada una de las fases A y B:

$$IA(F) = IA(1) + IA(2) \quad (30)$$

$$IB(F) = IB(1) + IB(2) \quad (31)$$

y usar los resultados de las ecuaciones (28) a (31) para determinar la resistencia de fase a fase:

$$R_\phi(F) = 2 \cdot \text{Real} \left( \frac{VA(F) - VB(F)}{IA(F) - IB(F)} \right) \quad (32)$$

30

a fin de calcular finalmente la resistencia a tierra del fallo 150:

$$R_g(F) = \frac{1}{2} \text{Real} \left( \frac{VA(F) + VB(F)}{IA(F) + IB(F)} \right) - \frac{R_\phi(F)}{4} \quad (33)$$

De tal modo, la resistencia del fallo 150 puede ser calculada de distintas maneras, según lo descrito anteriormente, para dar cuenta del tipo de fallo y del acoplamiento mutuo. La información de resistencia a fallos, combinada con la

localización de fallos, permite a los operadores de líneas de transporte de energía gestionar más efectivamente sus sistemas. Según lo expuesto anteriormente, la información puede ser obtenida de cualquier terminal conectado con el número mínimo de otros terminales para recibir los datos necesarios para determinar la ubicación del fallo y / o la resistencia a fallos.

5 En otra realización de la invención, el sistema de localización de fallos de múltiples extremos puede incluir cargar la compensación de corriente en la determinación de la ubicación del fallo, para realzar adicionalmente la precisión del sistema de localización de fallos. Dado que el sistema de localización de fallos utiliza la red de señales compuestas, el circuito modelo mostrado en la Fig. 4 se aproxima a la red razonablemente bien. El modelo de la Fig. 4 es equivalente a suponer que la corriente de carga total depende de la capacitancia total de la línea y del promedio de los voltajes V(1),  
 10 V(2) en ambos extremos de las líneas. La hipótesis implícita en este modelo de compensación de corriente es que el voltaje en la línea varía linealmente a lo largo de la línea, desde un extremo al otro. Esto es verdad durante las condiciones normales (sin fallos), pero no es verdad durante las condiciones de fallo. En consecuencia, el resultado es que estas hipótesis son violadas por una condición de fallo. Esto funciona bien para la detección de fallos, pero requiere una investigación adicional del efecto de cargar corriente en la ubicación del fallo.

15 Durante un fallo, el perfil del voltaje en la línea es de aproximadamente dos líneas rectas desde los terminales al fallo, lo que da como resultado el modelo mostrado en la Fig. 5. Si un dispositivo está funcionando en el sistema en una modalidad de compensación de corriente de carga, los fasores de corriente compuesta en cada línea se convierten en:

$$\hat{\mathbf{I}}(1) = \mathbf{I}(1) - j\omega \frac{C}{2} \mathbf{V}(1) ; \hat{\mathbf{I}}(2) = \mathbf{I}(2) - j\omega \frac{C}{2} \mathbf{V}(2) \quad (34)$$

20 donde C es la capacitancia, entendida como la representación de la corriente de carga compuesta de la línea, para un voltaje de excitación compuesta. En situaciones prácticas, esta capacitancia es equivalente a las llamadas capacitancias de secuencia positiva o negativa de la línea.

Se apreciará que sería conveniente utilizar simplemente los valores de corriente compensada de las corrientes de línea en los algoritmos (6), (7) y (8) de localización de fallos, en lo que antecede. Afortunadamente, después de modificar la ecuación con algunas aproximaciones que ignoran las diferencias entre el modelo de la Fig. 4 y el de la Fig. 5, pueden ser usadas las corrientes en la ecuación (34).  
 25

La ecuación para la caída de voltaje compuesto desde el primer terminal 105 hasta el fallo 150, según se muestra en la Fig. 5, es:

$$F \cdot \mathbf{I}(1) \cdot \mathbf{Z} = \mathbf{V}(1) \cdot \left( 1 + F^2 \cdot j\omega \frac{C}{2} \cdot \mathbf{Z} \right) - \mathbf{V}(F) \quad (35)$$

y la caída de voltaje desde el segundo terminal 110 hasta el fallo 150 es:

$$(1 - F) \cdot \mathbf{I}(2) \cdot \mathbf{Z} = \mathbf{V}(2) \cdot \left( 1 + (1 - F)^2 \cdot j\omega \frac{C}{2} \cdot \mathbf{Z} \right) - \mathbf{V}(F) \quad (36)$$

30 Las ecuaciones (35) y (36) determinan las relaciones entre los voltajes y las corrientes que pueden ser usados posteriormente para determinar la precisión de una estimación de la ubicación del fallo. Las ecuaciones podrían, alternativamente, ser usadas para determinar una estimación de cuadrados medios mínimos de la ubicación del fallo. Sin embargo, el proceso lleva a un polinomio de cuarto orden en F, con coeficientes algo complicados, por lo que no es eficaz implementar este algoritmo para producir soluciones en tiempo real, o tiempo casi real, porque la solución numérica tendría que ser usada en tiempo real, ya que el polinomio de cuarto orden no puede ser resuelto a priori en el caso general. Dado que se necesita una aproximación de cualquier modo, un enfoque más eficaz y más sencillo es usar las corrientes compensadas dadas por la ecuación (34) en los algoritmos de ubicación y analizar el error resultante en la localización del fallo. De tal modo, el algoritmo de ubicación de dos terminales que usa fasores de corriente compuesta  
 35 compensada es:  
 40

$$F = \text{Real} \left[ \frac{\frac{\mathbf{V}(1) - \mathbf{V}(2)}{\mathbf{Z}} + \hat{\mathbf{I}}(2)}{\hat{\mathbf{I}}(1) + \hat{\mathbf{I}}(2)} \right] \quad (37)$$

mientras que los fasores de corriente compensada están dados por la ecuación (34).

Ahora mostraremos que la solución anterior simplificada es lo suficientemente precisa. Los fasores de corriente compuesta pueden ser expresados en términos del voltaje en el fallo 150 y de los voltajes de los terminales 105, 110, reordenando las ecuaciones (35) y (36). La corriente en el primer terminal 105 está dada por:

$$\mathbf{I}(1) = \frac{\mathbf{V}(1) \cdot \left( 1 + F^2 \cdot j\omega \frac{C}{2} \cdot \mathbf{Z} \right) - \mathbf{V}(F)}{F \cdot \mathbf{Z}} \quad (38)$$

y la corriente en el segundo terminal 110 está dada por:

$$\mathbf{I}(2) = \frac{\mathbf{V}(2) \cdot \left( 1 + (1 - F)^2 \cdot j\omega \frac{C}{2} \cdot \mathbf{Z} \right) - \mathbf{V}(F)}{(1 - F) \cdot \mathbf{Z}} \quad (39)$$

Como se entenderá, es conveniente expresar el voltaje del fallo en términos de una perturbación con respecto al voltaje de circuito abierto en el fallo 150, por la siguiente ecuación:

$$\mathbf{V}_\Delta = (1 - F) \cdot \mathbf{V}(1) + F \cdot \mathbf{V}(2) - \mathbf{V}(F) \quad (40)$$

La sustitución de la ecuación (40) en las ecuaciones (38) y (39) produce las siguientes expresiones equivalentes para las corrientes no compensadas, en términos del voltaje de perturbación:

$$\mathbf{I}(1) = \frac{\mathbf{V}(1) - \mathbf{V}(2)}{\mathbf{Z}} + F \cdot \mathbf{V}(1) \cdot j\omega \frac{C}{2} + \frac{\mathbf{V}_\Delta}{F \cdot \mathbf{Z}} \quad (41)$$

$$\mathbf{I}(2) = \frac{\mathbf{V}(2) - \mathbf{V}(1)}{\mathbf{Z}} + (1 - F) \cdot \mathbf{V}(2) \cdot j\omega \frac{C}{2} + \frac{\mathbf{V}_\Delta}{(1 - F) \cdot \mathbf{Z}} \quad (42)$$

La sustitución de las ecuaciones (41) y (42) en la ecuación (34) produce la siguiente expresión de los fasores de corriente compensada:

$$\hat{\mathbf{I}}(1) = \frac{\mathbf{V}(1) - \mathbf{V}(2)}{\mathbf{Z}} - (1 - F) \cdot \mathbf{V}(1) \cdot j\omega \frac{C}{2} + \frac{\mathbf{V}_\Delta}{F \cdot \mathbf{Z}} \quad (43)$$

$$\hat{\mathbf{I}}(2) = \frac{\mathbf{V}(2) - \mathbf{V}(1)}{\mathbf{Z}} - F \cdot \mathbf{V}(2) \cdot j\omega \frac{C}{2} + \frac{\mathbf{V}_\Delta}{(1 - F) \cdot \mathbf{Z}} \quad (44)$$

Luego, las ecuaciones (43) y (44) son sustituidas en la ecuación (37), para dar como resultado la siguiente expresión de

la ubicación calculada del fallo:

$$\begin{aligned}
 & \text{Real} \left[ \frac{\mathbf{V}(1) - \mathbf{V}(2) + \hat{\mathbf{I}}(2)}{\mathbf{Z}} \right] = \\
 & F \cdot \text{Real} \left[ \frac{\mathbf{V}_\Delta - F \cdot (1 - F) \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{V}(2) \cdot j\omega \frac{C}{2}}{\mathbf{V}_\Delta - F \cdot (1 - F)^2 \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{V}(1) \cdot j\omega \frac{C}{2} - F^2 \cdot (1 - F) \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{V}(2) \cdot j\omega \frac{C}{2}} \right] \\
 & (45)
 \end{aligned}$$

5 Se observará que el algoritmo de ubicación de la ecuación (45) es exacto cuando no hay ninguna corriente de carga. Además, la ecuación (45) proporciona una excelente precisión para fallos que ocurren cerca de cualquier extremo de la línea, porque los términos del error se acercan a cero según F se acerca a 0 o a 1. A la vez, la ecuación (45) produce resultados sumamente precisos cuando los fallos están localizados asimismo en otras posiciones en la línea. Incluso para el peor caso, para un fallo cerca del medio de la línea, el error es muy pequeño, lo que será mostrado por el siguiente análisis. Para un fallo situado cerca del punto medio de la línea, la ecuación (45) produce la siguiente aproximación a la ubicación efectiva del fallo:

$$\begin{aligned}
 & \text{Real} \left[ \frac{\mathbf{V}(1) - \mathbf{V}(2) + \hat{\mathbf{I}}(2)}{\mathbf{Z}} \right] \approx \\
 & F \cdot \text{Real} \left[ \frac{\mathbf{V}_\Delta - \mathbf{Z} \cdot \mathbf{V}(2) \cdot j\omega \frac{C}{8}}{\mathbf{V}_\Delta - \mathbf{Z} \cdot \mathbf{V}(2) \cdot j\omega \frac{C}{8} - \mathbf{Z} \cdot (\mathbf{V}(1) - \mathbf{V}(2)) \cdot j\omega \frac{C}{16}} \right] \approx \quad (46) \\
 & F - \frac{1}{2} \text{Real} \left[ \frac{\mathbf{Z} \cdot (\mathbf{V}(1) - \mathbf{V}(2)) \cdot j\omega \frac{C}{16}}{\mathbf{V}_\Delta - \mathbf{Z} \cdot \mathbf{V}(2) \cdot j\omega \frac{C}{8} - \mathbf{Z} \cdot (\mathbf{V}(1) - \mathbf{V}(2)) \cdot j\omega \frac{C}{16}} \right]
 \end{aligned}$$

10 Un breve análisis revela por qué las ecuaciones (45) y (46) tienen un error pequeño, incluso cuando el fallo 150 está situado cerca del punto medio de la línea de transporte. El siguiente término en la ecuación (46) representa un error residual:

$$\text{error} \approx -\frac{1}{2} \text{Real} \left[ \frac{\mathbf{Z} \cdot (\mathbf{V}(1) - \mathbf{V}(2)) \cdot j\omega \frac{C}{16}}{\mathbf{V}_\Delta - \mathbf{Z} \cdot \mathbf{V}(2) \cdot j\omega \frac{C}{8} - \mathbf{Z} \cdot (\mathbf{V}(1) - \mathbf{V}(2)) \cdot j\omega \frac{C}{16}} \right] \quad (47)$$

15 El siguiente factor aparece en varios lugares en la ecuación (47):

$$j \cdot \mathbf{Z} \cdot \omega \cdot C$$

El factor está aproximadamente relacionado con la inductancia y la capacitancia de la línea, según:

$$j \cdot \mathbf{Z} \cdot \omega \cdot C \approx -\omega^2 \cdot L \cdot C \quad (49)$$

El factor dado por la ecuación (49) es el cuadrado de la razón de la frecuencia del sistema de energía, dividido entre la frecuencia resonante de la línea, que también es el cuadrado de la razón de la longitud de la línea dividida entre una longitud de onda, a la frecuencia del sistema de energía:

$$Z \cdot \omega \cdot C \approx -\omega^2 \cdot L \cdot C \approx -\frac{\omega^2}{\omega_{resonante}^2} \approx -\frac{D^2}{D_{\lambda}^2} \quad (50)$$

5

El factor dado por la ecuación (50) es algo pequeño, por lo que la ecuación (47) puede ser aproximada por:

$$error \approx \frac{1}{32} \cdot \frac{D^2}{D_{resonante}^2} \cdot \text{Real} \left[ \frac{(V(1) - V(2))}{V_{\Delta}} \right] \quad (51)$$

Cada uno de los factores en la ecuación (51) es pequeño, por lo que, incluso para un fallo cerca del punto medio de la línea, el error en la estimación de la localización del fallo es pequeño.

10 El siguiente ejemplo numérico ilustra adicionalmente la precisión. Supongamos una línea de 160 km operada con una diferencia angular de voltaje de 30 grados entre los extremos, con un fallo unifásico cerca del punto medio de la línea. Para un fallo unifásico cerca del punto medio de una línea, puede mostrarse que el voltaje de perturbación en el fallo es aproximadamente igual a 1/3 del voltaje del sistema. La distancia para una longitud de onda completa a 60 Hz para las líneas típicas es de alrededor de 800 km. La magnitud del voltaje a través de la línea es aproximadamente igual al voltaje del sistema multiplicado por el doble del seno de la mitad del ángulo a través de la línea. Por lo tanto, el error para este ejemplo es:

15

$$|error| = \frac{1}{32} \cdot \left( \frac{160km}{800km} \right)^2 \cdot \frac{2 \cdot \text{sen}(30^{\circ}/2)}{1/3} \approx 0.002 \approx 0.2\% \quad (52)$$

Así, el error asociado al uso de la ecuación (37) con corrientes compensadas de corriente de carga para una línea de 160 km de longitud es despreciable. Al usar la ecuación (51), también puede verse que el error residual crecerá como el cuadrado de la longitud de la línea. Por ejemplo, el aumento de la longitud de la línea en el ejemplo anterior, desde 160 km a 800 km, aumentará el error desde el 0,2% al 5%, estableciendo un límite superior práctico sobre la aplicabilidad de la compensación de carga simple. En cualquier caso, para líneas de transporte muy largas, tales como aquellas de más de 800 km de largo, es bien conocido en la técnica que la corriente de carga debe ser modelada por las ecuaciones diferenciales que describen líneas de transporte largas.

20

Si bien la presente invención ha sido descrita con referencias a realizaciones preferidas, diversos cambios o sustituciones pueden ser hechos en estas realizaciones por los medianamente expertos en la técnica relevante a la presente invención, sin apartarse del alcance técnico de la presente invención.

25

La aplicación y configuración del sistema de localización de fallos, según lo descrito en la presente memoria y mostrado en las figuras adjuntas, son solamente ilustrativas. Aunque solamente unas pocas realizaciones de la invención han sido descritas en detalle en esta revelación, los expertos en la técnica que revisen esta revelación apreciarán inmediatamente que son posibles muchas modificaciones (p. ej., usar coordenadas polares en lugar de las rectangulares para representar números complejos, usar una forma de señales compuestas distinta a la transformación expandida de Clarke, pero que todavía refleje todos los tipos de fallos y que no sea sensible a corrientes de fallo de tierra, etc.) sin apartarse materialmente de las novedosas revelaciones y ventajas del tema en cuestión, revelado en las reivindicaciones adjuntas. En consecuencia, todas las modificaciones de ese tipo están concebidas para ser incluidas dentro del alcance de la presente invención, según lo definido por las reivindicaciones adjuntas. El orden o secuencia de cualquier proceso o etapas de procedimiento puede ser variado o reordenado de acuerdo a realizaciones alternativas. En las reivindicaciones, cualquier cláusula de medios-más-funciones está concebida para abarcar las estructuras descritas en la presente memoria, como realizadora de la función revelada, y no solamente los equivalentes estructurales, sino también las estructuras equivalentes. Pueden hacerse otras sustituciones, modificaciones, cambios y omisiones en el diseño, las condiciones operativas y la disposición de las realizaciones preferidas y otras realizaciones ejemplares, sin apartarse del espíritu de las realizaciones de la invención, según lo expresado en las reivindicaciones adjuntas. Por lo tanto, el ámbito técnico de la presente invención abarca no solamente aquellas realizaciones descritas anteriormente, sino todas las que caigan dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

30

35

40

**REIVINDICACIONES**

1. Un sistema (100) de detección de posición de fallos para una línea de transporte de energía que tiene al menos dos terminales (105, 110, 115) y al menos dos segmentos de línea y una toma (220) común a cada uno de los segmentos de línea, comprendiendo el sistema:
- 5 primeros medios para representar voltajes y corrientes trifásicas por señales compuestas de corriente y voltaje en cada uno de los terminales (105, 110, 115), para determinar el voltaje entre la toma (220) y cada terminal (105, 110, 115) y para determinar los valores residuales del voltaje y la corriente para cada segmento de línea;
- segundos medios para determinar cuál de los segmentos de línea de la línea de transporte de energía es un segmento de línea fallado, que contiene un fallo (150), usando las mediciones de fasor de voltaje y corriente compuestas de las señales de corriente y voltaje compuestas y de los valores residuales del voltaje y la corriente;
- 10 terceros medios para determinar una ubicación fraccionaria de fallo a partir de un terminal (105, 110, 115) en el segmento de línea fallado, usando las mediciones de fasor de voltaje y corriente compuestas y los valores residuales del voltaje y la corriente;
- cuartos medios para determinar la posición del fallo en el segmento de línea fallado, usando la ubicación fraccionaria del fallo y la longitud del segmento de línea fallado, sobre el cual está localizado el fallo (150).
- 15 2. El sistema (100) de detección de posición de fallos de la reivindicación 1, en el cual un único valor compuesto de voltaje y corriente es usado para representar las mediciones compuestas de voltaje y corriente en uno cualquiera de dichos al menos dos terminales (105, 100).
3. El sistema (100) de detección de posición de fallos de cualquier reivindicación precedente, en el cual las señales compuestas de voltaje y corriente sean no nulas para cualquier tipo de fallo.
- 20 4. El sistema (100) de detección de posición de fallos de cualquier reivindicación precedente, en el cual las señales compuestas de voltaje y corriente no son afectadas por corrientes de tierra, o de secuencia cero.
5. El sistema (100) de detección de posición de fallos de cualquier reivindicación precedente, en el cual la ubicación del fallo (150) puede ser determinada sin conocer la magnitud del acoplamiento mutuo con los segmentos de línea adyacentes.
- 25 6. Un procedimiento para detectar la posición de un fallo en una línea de transporte de energía que tenga al menos dos terminales (105, 110, 115) y al menos dos segmentos de línea, y una toma (220) común para cada uno de los segmentos de línea, comprendiendo el procedimiento:
- representar voltajes y corrientes trifásicas por señales compuestas de corriente y voltaje en cada terminal (105, 110, 115);
- 30 determinar el voltaje entre la toma (220) y cada terminal (105, 110, 115);
- determinar valores residuales de corriente y voltaje para cada segmento de línea;
- determinar cuál de los segmentos de línea de la línea de transporte de energía es un segmento de línea fallado, que contiene un fallo (150), usando mediciones compuestas de fasor de voltaje y corriente de las señales compuestas de corriente y voltaje y de los valores residuales de voltaje y corriente;
- 35 determinar una ubicación fraccionaria de un fallo a partir de un terminal en el segmento de línea fallado, usando las mediciones compuestas de fasor de voltaje y corriente y los valores residuales de voltaje y corriente; y
- determinar la posición del fallo en el segmento de línea fallado, usando la ubicación fraccionaria del fallo y la longitud del segmento de línea en el cual está localizado el fallo.
- 40 7. Un procedimiento para detectar la posición de un fallo (150), según la reivindicación 6, en el cual se usa un valor único compuesto de voltaje y corriente para representar las mediciones compuestas de voltaje y corriente en uno cualquiera de dichos al menos dos terminales (105, 110).
8. Un procedimiento para detectar la posición de un fallo (150), según la reivindicación 6 o la reivindicación 7, en el cual las señales compuestas de voltaje y corriente son no nulas para cualquier tipo de fallo (150).
- 45 9. Un procedimiento para detectar la posición de un fallo (150), según una cualquiera de las reivindicaciones 6 a 8, en el cual las señales compuestas de voltaje y corriente no son afectadas por las corrientes de tierra, o de secuencia cero.
10. Un procedimiento para detectar la posición de un fallo (150), según una cualquiera de las reivindicaciones 6 a 9, en el cual la determinación de la ubicación del fallo se hace sin conocer la magnitud del acoplamiento mutuo con los segmentos de línea adyacentes.

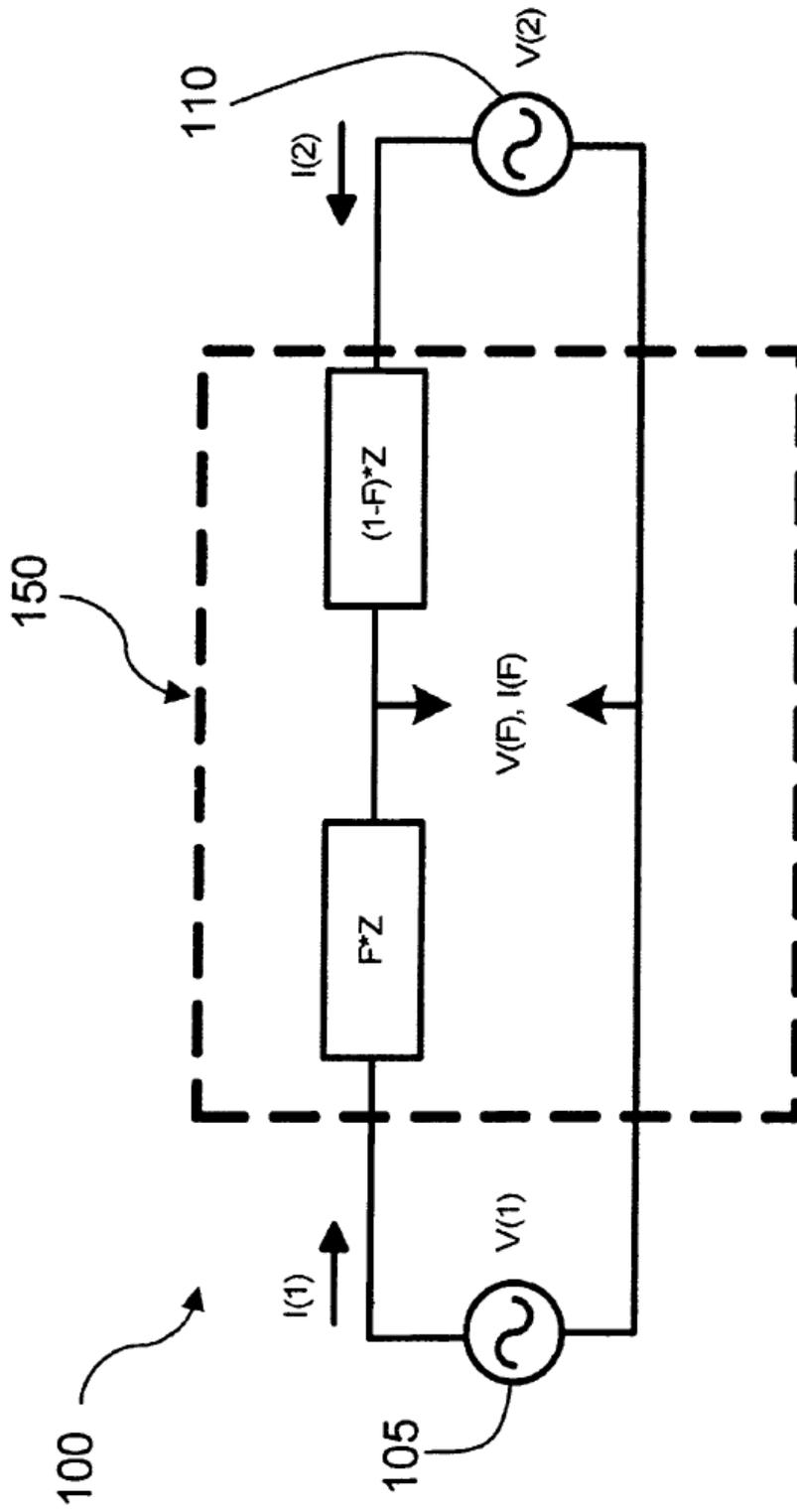


Fig. 1

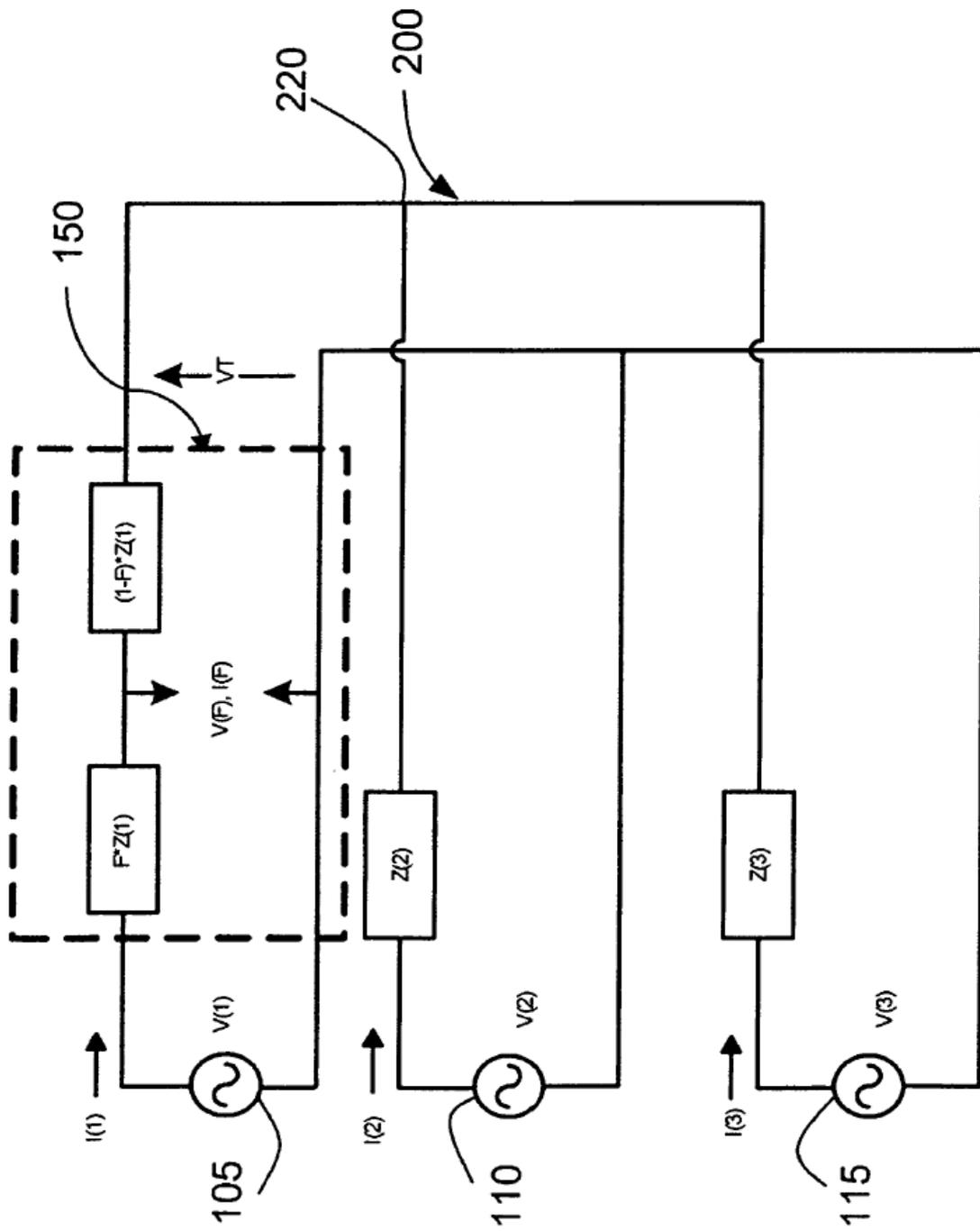


Fig. 2

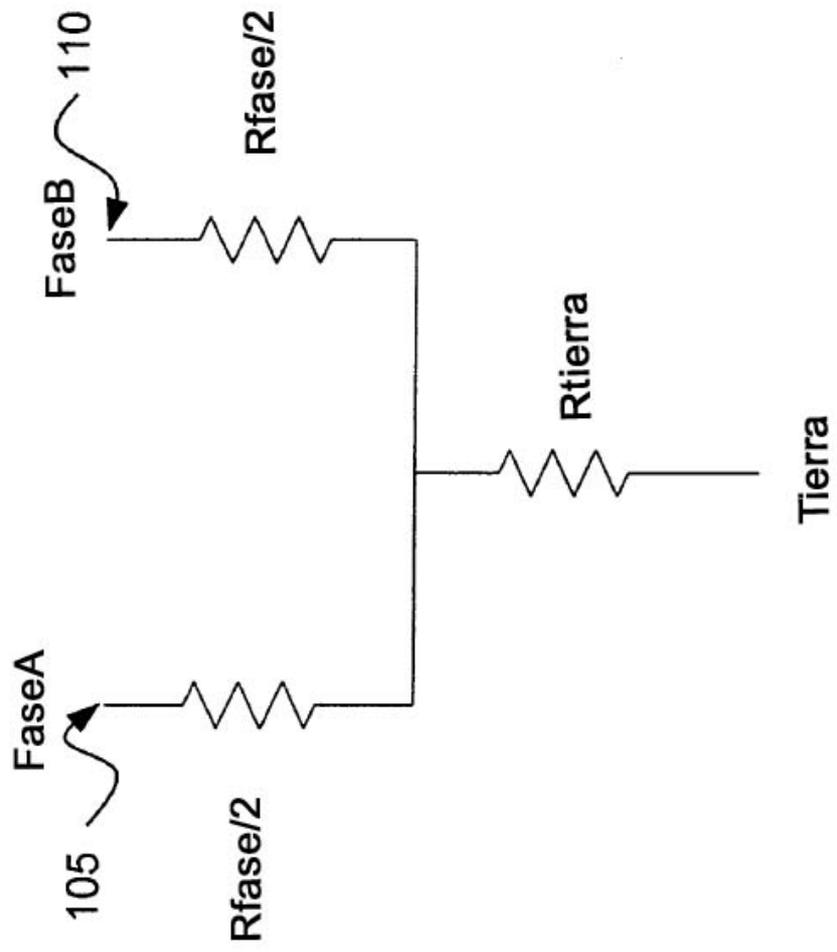


Fig. 3

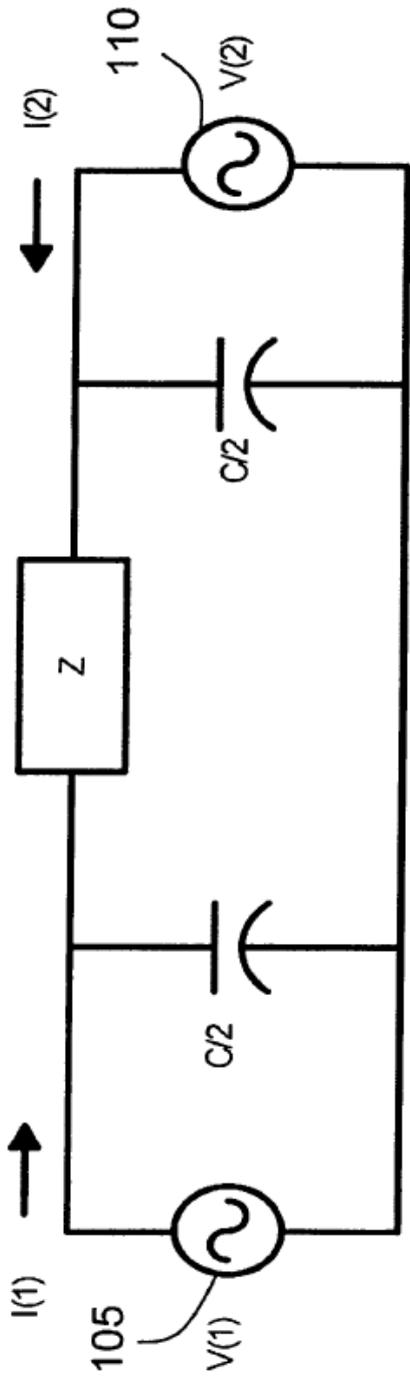


Fig. 4

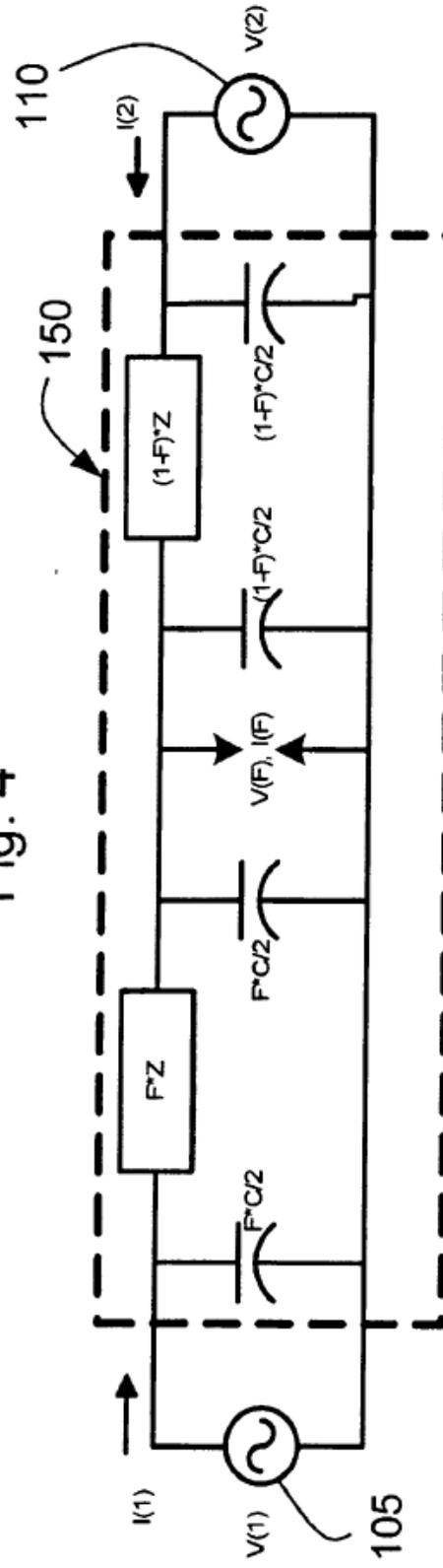


Fig. 5