

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 981 845**

51 Int. Cl.:

G01R 15/06 (2006.01)

G01R 31/62 (2010.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **05.07.2021** **PCT/EP2021/068482**

87 Fecha y número de publicación internacional: **20.01.2022** **WO22012989**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.07.2021** **E 21739659 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.05.2024** **EP 4158360**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo para determinar el estado de un transformador de tensión capacitivo**

30 Prioridad:

13.07.2020 AT 506072020

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

10.10.2024

73 Titular/es:

OMICRON ELECTRONICS GMBH (100.0%)
Oberes Ried 1
6833 Klaus, AT

72 Inventor/es:

BISCHOF, THOMAS y
GOPP, DAVID

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 2 981 845 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

Procedimiento y dispositivo para determinar el estado de un transformador de tensión capacitivo

5 Campo de la invención

La presente invención se refiere a un procedimiento para determinar el estado de un transformador de tensión capacitivo, en particular para determinar defectos en un divisor de tensión capacitivo en el transformador de tensión capacitivo. La presente invención se refiere además a un dispositivo para determinar el estado de un transformador de tensión capacitivo, que implementa el procedimiento.

Antecedentes

Los transformadores de tensión se utilizan en el campo de la ingeniería eléctrica como transformadores de medida para medir tensiones de corriente alterna. La función de un transformador de tensión es transferir proporcionalmente la alta tensión a medir a valores de baja tensión. Esta tensión más baja, por ejemplo valores en torno a 100 V, se transmite a voltímetros, contadores de energía y dispositivos similares, por ejemplo con fines de medición o protección. Los transformadores de tensión pueden realizarse como transformadores de tensión inductivos y capacitivos, en los que los transformadores de tensión capacitivos pueden, por ejemplo, diseñarse para tensiones nominales primarias (valores nominales) de hasta más de 1 MV.

Los transformadores de tensión capacitivos constan de un divisor de tensión capacitivo en el lado de alta tensión, que suele estar formado por al menos dos condensadores conectados en serie. Normalmente, un extremo de la conexión en serie de los condensadores se conecta a la alta tensión que se va a medir y el otro extremo de la conexión en serie se conecta a tierra. Una tensión inferior proporcional a la alta tensión que debe medirse se aplica a una toma entre los condensadores, que puede alimentarse a un dispositivo de medición de tensión a través de un transformador, por ejemplo.

Los fallos en el transformador de tensión capacitivo pueden deberse a defectos en el divisor de tensión capacitivo. Los defectos en los condensadores del divisor de tensión capacitivo pueden deberse a varias causas, por ejemplo, la penetración de humedad en el aislamiento. La supervisión de la evolución de la variación de la capacitancia a lo largo del tiempo, lo que se conoce como "tendencia", puede ayudar a evitar un fallo total del divisor de tensión capacitivo. Un fallo total podría dañar otros dispositivos, como los dispositivos de medición conectados al transformador de tensión capacitivo, y poner en peligro a las personas. Para seguir la evolución de la capacitancia a lo largo del tiempo y determinar los errores en los condensadores individuales, se miden las capacitancias de los condensadores, por ejemplo analizando la función de transferencia (análisis de respuesta en frecuencia de barrido, SFRA). Estas mediciones se basan, por ejemplo, en el principio de la medición de la impedancia de cortocircuito en función de la frecuencia desde el lado secundario del transformador. Para ello, la conexión en serie de los condensadores suele desconectarse de la alta tensión y de tierra. Para desconectar la conexión en serie de los condensadores de la tierra en particular, se requiere accesibilidad al punto de conexión correspondiente, lo que en realidad a menudo no es posible o solo es posible con un considerable esfuerzo de instalación.

Gopp David: "Influencing variables in model-based testing of capacitive voltage transformers - What are the most influential parameters in model-based testing of capacitive voltage transformers and how do they affect the ratio and phase error?", Tesis de máster Universidad de Ciencias Aplicadas de Vorarlberg, 1 de agosto de 2019 (2019-08-01), páginas 1-104, XP055828668, DOI: 10.25924/opus-3147 divulga un procedimiento y un aparato según el término general de las reivindicaciones independientes.

El documento US 9 817 053 B2 divulga un transformador de tensión capacitivo y la determinación de una relación de capacitancia aplicando una tensión de prueba al lado primario y, para un transformador de tensión inductivo, la determinación de una frecuencia de resonancia aplicando una tensión con frecuencia variable a un lado secundario.

Síntesis de la invención

Se necesita un procedimiento mejorado para comprobar y supervisar los condensadores de un divisor de tensión capacitivo en un transformador de tensión capacitivo.

De acuerdo con la presente invención, se proporciona un procedimiento para determinar el estado de un transformador de tensión capacitivo y un aparato para determinar el estado de un transformador de tensión capacitivo, tal como se define en las reivindicaciones independientes. Las reivindicaciones dependientes definen formas de realización de la invención.

La presente invención proporciona un procedimiento para determinar el estado de un transformador de tensión capacitivo. En su lado primario, el transformador de tensión capacitivo comprende un divisor de tensión capacitivo con un primer condensador y un segundo condensador. En este contexto, el lado primario del transformador de tensión capacitivo se refiere al lado del transformador de tensión capacitivo que está acoplado a la alta tensión que

debe medirse. La alta tensión puede, por ejemplo, tener una tensión de varios 1000V hasta varios 1000V o incluso 1MV o más. El lado secundario del transformador de tensión capacitivo es, por lo tanto, el lado del transformador de tensión capacitivo que está acoplado al dispositivo de medición o a otro dispositivo, como un contador de energía. El primer condensador tiene una conexión de alta tensión para conectar el primer condensador a la alta tensión. El segundo condensador tiene una conexión a tierra para conectar el segundo condensador a tierra. En este contexto, la tierra puede ser un potencial de referencia para la alta tensión, por ejemplo. Tanto el primer condensador como el segundo pueden incluir varios condensadores conectados en serie para aumentar la rigidez dieléctrica del condensador resultante. El primer condensador y el segundo condensador pueden conectarse en serie para formar el divisor de tensión capacitivo, por ejemplo, de modo que una tensión parcial de la alta tensión pueda derivarse en el punto de conexión entre el primer y el segundo condensador. El convertidor de tensión capacitivo también puede comprender un transformador al que se alimenta la tensión entre el punto de conexión y tierra en el lado primario del transformador y que, de este modo, proporciona una tensión eléctricamente aislada en el lado secundario del transformador, que es proporcional a la tensión derivada entre el punto de conexión y tierra. El factor de transmisión del transformador puede ser 1, por ejemplo. El transformador puede tener cualquier otro factor de transmisión, en particular un factor de transmisión superior a 1, de modo que la tensión captada por el divisor de tensión sea transformada a la baja por el transformador.

En el procedimiento, se determina una primera frecuencia de resonancia mediante varias primeras mediciones de impedancia de cortocircuito a diferentes frecuencias en el lado secundario del transformador de tensión capacitivo mientras la conexión de alta tensión está conectada a tierra. Además, se determina una segunda frecuencia de resonancia mediante varias segundas mediciones de impedancia de cortocircuito a diferentes frecuencias en el lado secundario del transformador de tensión capacitivo mientras la conexión de alta tensión está abierta. Se determina una relación de capacitancia del divisor de tensión capacitivo en función de la primera frecuencia de resonancia y de la segunda frecuencia de resonancia. La relación de capacitancia puede ser, por ejemplo, una relación entre la capacitancia del segundo condensador y la capacitancia del primer condensador o una relación entre el segundo condensador y la capacitancia total de los condensadores primero y segundo. Al determinar tanto la primera frecuencia de resonancia como la segunda frecuencia de resonancia, el segundo condensador puede permanecer conectado a tierra con su toma de tierra.

Si la capacitancia de los condensadores del divisor de tensión capacitivo cambia debido al desgaste, por ejemplo, la relación de capacitancia también suele cambiar. Por lo tanto, la relación de capacitancia puede considerarse un indicador del estado del transformador de tensión capacitivo. Dado que la relación de capacitancia puede determinarse sin desconectar de tierra la conexión a tierra del segundo condensador, el estado del divisor de tensión capacitivo puede determinarse de forma rápida y económica.

En el procedimiento, también puede determinarse una corriente de medición en función de una carga del transformador de tensión capacitivo y una caída de tensión a través de la carga del transformador de tensión capacitivo. La pluralidad de primeras mediciones de impedancia de cortocircuito y la pluralidad de segundas mediciones de impedancia de cortocircuito se realizan utilizando la corriente de medición. La carga del transformador de tensión capacitivo se refiere a la impedancia del circuito secundario del transformador de tensión capacitivo y suele expresarse mediante la potencia aparente consumida en condiciones especificadas. Por lo tanto, las mediciones de impedancia de cortocircuito pueden realizarse específicamente con una corriente de medición cuya amplitud se aproxime a la corriente nominal, de modo que las frecuencias de resonancia puedan determinarse de forma rápida y fiable.

En una forma de realización, las primeras mediciones múltiples de impedancia de cortocircuito comprenden mediciones múltiples de impedancia de cortocircuito en una primera rejilla de frecuencia seguida por mediciones múltiples de impedancia de cortocircuito en una segunda rejilla de frecuencia. La primera rejilla de frecuencia tiene un espaciado de frecuencia mayor que la segunda rejilla de frecuencia. Alternativa o adicionalmente, las múltiples segundas mediciones de impedancia de cortocircuito pueden comprender múltiples mediciones de impedancia de cortocircuito en una primera rejilla de frecuencia seguidas por múltiples mediciones de impedancia de cortocircuito en una segunda rejilla de frecuencia. De nuevo, la primera rejilla de frecuencia tiene un espaciado de frecuencia mayor que la segunda rejilla de frecuencia. En otras palabras, se puede determinar aproximadamente una frecuencia de resonancia en un primer paso. En el primer paso, pueden seleccionarse frecuencias en una amplia gama de frecuencias en pasos aproximados para determinar aproximadamente la frecuencia de resonancia mediante mediciones de impedancia de cortocircuito. En un segundo paso, la frecuencia de resonancia puede determinarse con mayor precisión realizando el segundo paso en una gama de frecuencias que se haya determinado en el primer paso como la gama de frecuencias que incluye la frecuencia de resonancia. Esta gama de frecuencias determinada en la primera pasada puede explorarse en pequeños pasos en la segunda pasada para determinar con precisión la frecuencia de resonancia. Se pueden realizar más pasadas para determinar la frecuencia de resonancia de forma aún más precisa. Este procedimiento iterativo permite determinar la primera y la segunda frecuencia de resonancia de forma rápida y fiable.

En el procedimiento, también puede determinarse una inductancia de resonancia del transformador de tensión capacitivo en función de los valores nominales del primer y segundo condensador y de una frecuencia nominal del transformador de tensión capacitivo. Los valores nominales del primer y segundo condensador y la frecuencia

nominal del transformador de tensión capacitivo pueden tomarse de la placa de características del transformador de tensión capacitivo, por ejemplo. El valor real de la capacitancia del segundo condensador puede determinarse en función de la segunda frecuencia de resonancia y de la inductancia de resonancia. Dado que la conexión de alta tensión está abierta cuando se determina la segunda frecuencia de resonancia, esta resulta esencialmente solo de la capacitancia del segundo condensador. En combinación con la inductancia de resonancia, el valor real de la capacitancia del segundo condensador puede determinarse a partir de la segunda frecuencia de resonancia utilizando, por ejemplo, la ecuación de oscilación de Thomson.

En otras formas de realización, como se ha descrito con anterioridad, pueden determinarse varios valores reales de la capacitancia del segundo condensador en diferentes puntos temporales y puede registrarse y/o visualizarse en un dispositivo de visualización una tendencia temporal de la capacitancia del segundo condensador. La tendencia temporal puede utilizarse para extrapolar o estimar si el estado del transformador de tensión capacitivo es suficiente para un funcionamiento fiable continuado.

Puede determinarse un valor real de la capacitancia del primer condensador en función del valor real de la capacitancia del segundo condensador y de la relación de capacitancia. Pueden determinarse varios valores reales de la capacitancia del primer condensador en diferentes momentos y puede registrarse y/o mostrarse en un dispositivo de visualización una tendencia temporal de la capacitancia del primer condensador. Así, la tendencia temporal del primer condensador también puede utilizarse para extrapolar o estimar si el estado del transformador de tensión capacitivo es suficiente para un funcionamiento fiable posterior.

Alternativa o adicionalmente, varias relaciones de capacitancia del divisor de tensión capacitivo pueden determinarse en diferentes puntos en el tiempo y una tendencia temporal de la relación de capacitancia puede mostrarse en un dispositivo de visualización. Cuando cambia el estado de los condensadores del divisor de tensión capacitivo, también suele cambiar la relación de capacitancia de los condensadores entre sí. Un deterioro en el estado del divisor de tensión capacitivo puede reconocerse fácilmente a tiempo sobre la base de una curva temporal de la relación de capacitancia.

En otra forma de realización, se determina una primera dependencia de la relación de capacitancia con respecto a la primera frecuencia de resonancia. La primera dependencia puede comprender, por ejemplo, una derivada parcial de la relación de capacitancia en función de la primera frecuencia de resonancia. Dicha dependencia también se denomina sensibilidad de la relación de capacitancia con respecto a la primera frecuencia de resonancia. Varias de las primeras dependencias de la relación de capacitancia con respecto a la primera frecuencia de resonancia pueden determinarse en varios puntos diferentes en el tiempo y una tendencia temporal de la primera dependencia puede mostrarse en un dispositivo de visualización.

Además, puede determinarse una segunda dependencia de la relación de capacitancia con respecto a la segunda frecuencia de resonancia. La segunda dependencia puede comprender, por ejemplo, una derivada parcial de la relación de capacitancia en función de la segunda frecuencia de resonancia. Varias de las segundas dependencias de la relación de capacitancia con respecto a la segunda frecuencia de resonancia pueden determinarse en varios puntos diferentes en el tiempo y una tendencia temporal de la segunda dependencia puede visualizarse en un dispositivo de visualización.

La tendencia temporal de la primera dependencia refleja una sensibilidad de la capacitancia total del primer y segundo condensador y la tendencia temporal de la segunda dependencia refleja una sensibilidad de la capacitancia del segundo condensador. Si la primera y/o segunda sensibilidad cambian con el tiempo, es decir, analizando la respectiva tendencia temporal de la primera y/o segunda sensibilidad con el tiempo, pueden inferirse cambios en el estado del primer y/o segundo condensador.

La presente invención también proporciona un dispositivo para determinar el estado de un transformador de tensión capacitivo. El transformador de tensión capacitivo comprende un divisor de tensión capacitivo con un primer condensador y un segundo condensador en su lado primario. El primer condensador tiene una conexión de alta tensión para la conexión a una alta tensión. El segundo condensador tiene una conexión a tierra. El primer condensador y el segundo condensador pueden, por ejemplo, formar una conexión en serie para formar el divisor de tensión capacitivo. El dispositivo comprende un dispositivo de medición que está diseñado para realizar una medición de impedancia de cortocircuito con frecuencia ajustable. El dispositivo comprende además un dispositivo de control, por ejemplo un controlador electrónico con un microprocesador, que está diseñado para determinar una primera frecuencia de resonancia mediante una pluralidad de primeras mediciones de impedancia de cortocircuito a diferentes frecuencias en un lado secundario del divisor de tensión capacitivo mientras el terminal de alta tensión está conectado a tierra. El dispositivo de control también está diseñado para determinar una segunda frecuencia de resonancia mediante varias segundas mediciones de impedancia de cortocircuito a diferentes frecuencias en el lado secundario del transformador de tensión capacitivo mientras la conexión de alta tensión está abierta. En función de la primera frecuencia de resonancia y de la segunda frecuencia de resonancia, el dispositivo de control determina una relación de capacitancia del divisor de tensión capacitivo.

El dispositivo es adecuado para llevar a cabo el procedimiento descrito con anterioridad y las formas de realización

del procedimiento descrito con anterioridad y, por lo tanto, también comprende las ventajas descritas con anterioridad.

Breve descripción de las Figuras

La invención se explica más detalladamente a continuación con referencia a los dibujos y a las formas de realización preferidas. En los dibujos, signos de referencia idénticos denotan elementos idénticos.

La Fig. 1 muestra esquemáticamente un transformador de tensión capacitivo conectado a una línea de alta tensión.

La Fig. 2 muestra esquemáticamente un circuito del transformador de tensión capacitivo de la Fig. 1 para determinar una primera frecuencia de resonancia.

La Fig. 3 muestra esquemáticamente una interconexión del transformador de tensión capacitivo de la Fig. 1 para determinar una segunda frecuencia de resonancia.

La Fig. 4 muestra esquemáticamente un circuito del transformador de tensión capacitivo de la Fig. 1 para determinar otra frecuencia de resonancia.

La Fig. 5 muestra esquemáticamente mediciones de impedancia de cortocircuito a diversas frecuencias para determinar la primera y la segunda frecuencias de resonancia según una forma de realización.

La Fig. 6 muestra esquemáticamente ángulos de fase para mediciones de impedancia de cortocircuito a diferentes frecuencias para determinar la primera frecuencia de resonancia o la segunda frecuencia de resonancia según una forma de realización.

La Fig. 7 muestra esquemáticamente mediciones de impedancia de cortocircuito a diferentes frecuencias para determinar la frecuencia de resonancia adicional según una forma de realización.

La Fig. 8 muestra esquemáticamente ángulos de fase para mediciones de impedancia de cortocircuito a diferentes frecuencias para determinar la frecuencia de resonancia adicional según una forma de realización.

La Fig. 9 muestra esquemáticamente una dependencia de una relación de capacitancia con la segunda frecuencia de resonancia según una forma de realización.

La Fig. 10 muestra esquemáticamente una dependencia de una relación de capacitancia con la primera frecuencia de resonancia según una forma de realización.

La Fig. 11 muestra esquemáticamente una dependencia de una relación de capacitancia con respecto a la capacitancia de un segundo capacitor de un divisor de voltaje capacitivo según una forma de realización.

La Fig. 12 muestra esquemáticamente una dependencia de una relación de capacitancia con respecto a una capacitancia de un primer capacitor de un divisor de voltaje capacitivo según una forma de realización.

La Fig. 13 muestra los pasos del método para determinar el estado de un transformador de tensión capacitivo según una forma de realización.

La Fig. 14 muestra los pasos de un procedimiento para determinar el estado de un transformador de tensión capacitivo según otra forma de realización.

La Fig. 15 muestra los pasos de un procedimiento para determinar el estado de un transformador de tensión capacitivo según otra forma de realización.

Descripción detallada de ejemplos de realización

A continuación, la presente invención se explica con más detalle en los dibujos con referencia a formas de realización preferidas. En las figuras, signos de referencia idénticos denotan elementos idénticos o similares. Las figuras son representaciones esquemáticas de diversas formas de realización de la invención. Los elementos mostrados en las Figuras no se muestran necesariamente a escala. Más bien, los diversos elementos mostrados en las Fig. se representan de tal manera que su función y propósito pueden ser entendidos por un experto en la técnica.

Las conexiones y acoplamientos entre unidades funcionales y elementos mostrados en las Fig. también pueden implementarse como conexiones o acoplamientos indirectos. Una conexión o acoplamiento puede implementarse como cableada o inalámbrica.

A continuación se describen en detalle procedimientos y dispositivos para determinar el estado de un transformador

de tensión capacitivo. El estado de un transformador de tensión capacitivo puede verse afectado por defectos en los condensadores del divisor de tensión capacitivo. Los defectos en los condensadores pueden deberse a diversas causas, como la penetración de humedad en el aislamiento. El control de la variación de la capacitancia a lo largo del tiempo puede ayudar a evitar un fallo total del divisor de tensión capacitivo. Un fallo total puede poner en peligro otras partes del equipo o a las personas. Para evaluar la variación de la capacitancia a lo largo del tiempo y localizar defectos en los condensadores del divisor de tensión capacitivo, puede ser necesario determinar las capacitancias de los condensadores por separado.

La Fig. 1 muestra esquemáticamente un transformador de tensión capacitivo 50, que está acoplado a una línea de alta tensión 60 a través de una conexión de alta tensión HV del transformador de tensión 50. El transformador de tensión capacitivo 50 comprende dos condensadores C_1 y C_2 conectados en serie, que forman un divisor de tensión. El transformador de tensión capacitivo 50 comprende dos condensadores C_1 y C_2 conectados en serie, que forman un divisor de tensión. El primer condensador C_1 está conectado a la conexión de alta tensión HV y el segundo condensador C_2 está conectado a tierra 70 a través de una conexión NHF. En la conexión entre el primer condensador C_1 y el segundo condensador C_2 hay una derivación 52, en la que se puede derivar una tensión parcial de la alta tensión 60 durante el funcionamiento del convertidor de tensión 50. La tensión derivada se conduce a una fuente de alimentación de alta tensión. La tensión derivada se conduce a un devanado primario de un transformador T a través de una inductancia de compensación L_{comp} . En el devanado secundario del transformador T se dispone de una tensión de medición libre de potencial, que es considerablemente inferior y proporcional a la alta tensión en la línea de alta tensión 60, y que puede medirse, por ejemplo, con un aparato de medición 80 en una conexión 51 del lado secundario del transformador T. En el diagrama esquemático de la Fig. 1, el transformador T se muestra como un transformador ideal. Las propiedades no ideales de un transformador real correspondiente se modelan en la Fig. 1 mediante una resistencia de bobinado R_1 y una inductancia de fuga L_1 en el lado primario, una resistencia de bobinado R_2 y una inductancia de fuga L_2 en el lado secundario, una inductancia principal L_h y pérdidas en el hierro R_{fe} .

Como se describirá más adelante con referencia a las Fig. 2 a 4, las capacitancias de los condensadores C_1 y C_2 pueden diferenciarse utilizando diferentes mediciones para analizar la función de transferencia (análisis de la respuesta en frecuencia de barrido, SFRA). Estas mediciones se basan en el principio de las mediciones de impedancia de cortocircuito dependientes de la frecuencia en el lado secundario del transformador T. Debe tenerse en cuenta que la conexión NHF debe estar desconectada de tierra para la medición mostrada en la Fig. 4. Sin embargo, esto solo es posible si la conexión NHF está desconectada de tierra. Sin embargo, esto solo es posible si la conexión NHF es accesible y puede desconectarse de tierra. Por lo tanto, puede resultar ventajoso determinar el estado del transformador de tensión capacitivo sin realizar la medición según la Fig. 4. Para todas las mediciones según las Fig. 2 a 4, la conexión de alta tensión HV del transformador de tensión debe estar desconectada de la línea de alta tensión 60.

En la configuración de medida mostrada en la Fig. 2, la conexión de alta tensión HV está conectada a tierra 70 a través de una línea adicional 91. La conexión NHF también está conectada a tierra 70, de modo que los condensadores C_1 y C_2 están conectados en paralelo entre la toma 52 y tierra 70. Un dispositivo de medición 90, que está conectado a la conexión 51 en el lado secundario del transformador T, se utiliza para llevar a cabo una medición de la impedancia de cortocircuito en el lado secundario del transformador T, es decir, en el lado de baja tensión del transformador de tensión capacitivo 50. La medición de la impedancia de cortocircuito se describirá detalladamente a continuación.

En la configuración de medida mostrada en la Fig. 3, la conexión de alta tensión HV está abierta y la conexión NHF está conectada a tierra 70. Esencialmente, solo el segundo condensador C_2 está ahora conectado entre la toma 52 y tierra. El dispositivo de medición 90 se utiliza para realizar una medición de la impedancia de cortocircuito en el lado secundario del transformador T.

La Fig. 4 muestra una configuración de medida en la que la conexión de alta tensión HV está conectada a tierra a través de una línea adicional 91 y la conexión NHF está abierta, de modo que esencialmente solo el primer condensador C_1 está conectado entre la toma 52 y tierra 70. El dispositivo de medición 90 se utiliza para realizar una medición de la impedancia de cortocircuito en el lado secundario del transformador T.

Las configuraciones de medida mostradas en las Figuras 2 a 4 difieren en que diferentes cargas capacitivas actúan en el lado primario del transformador de tensión capacitivo durante la medida de impedancia de cortocircuito dependiente de la frecuencia. En la Fig. 2, los condensadores C_1 y C_2 están conectados a tierra, de modo que la conexión en paralelo de C_1 y C_2 actúa como carga capacitiva. En la Fig. 3, solo el condensador C_2 actúa como carga capacitiva y en la Fig. 4, solo el condensador C_1 actúa como carga capacitiva.

Como se describirá más adelante, puede determinarse una relación de capacitancia K_c entre la capacitancia del condensador C_1 y la capacitancia del condensador C_2 mediante dos mediciones diferentes de impedancia de cortocircuito dependientes de la frecuencia en el lado secundario del transformador de tensión capacitivo, incluso sin conocer la relación de transformación inductiva del transformador de tensión capacitivo, que se define por la relación del número de espiras secundario y primario. Las mediciones de la impedancia de cortocircuito en función de la

frecuencia se llevan a cabo utilizando una señal de corriente que tiene una amplitud que corresponde esencialmente a una corriente nominal del transformador de tensión capacitivo o está próxima a esta corriente nominal. Durante la medición de la impedancia de cortocircuito en función de la frecuencia, la frecuencia se modifica gradualmente, por ejemplo, aumentando por pasos desde una frecuencia inicial baja hasta una frecuencia final más alta. La intensidad de la señal de corriente, es decir, una corriente de medición, puede determinarse y ajustarse utilizando la información de la placa de características del transformador de tensión capacitivo. Por ejemplo, la corriente de medición puede determinarse y ajustarse basándose en la carga S_r especificada en la placa de características y la caída de tensión a través de la carga U_{Sr} . La carga puede especificarse como potencia aparente en la unidad voltio-amperio (VA), que se forma como el producto de la corriente nominal que se produce en el lado secundario del transformador de corriente y la caída de tensión asociada a través de la carga.

Por ejemplo, una frecuencia de resonancia puede determinarse realizando varias mediciones de impedancia de cortocircuito a diferentes frecuencias. Por ejemplo, la frecuencia a la que se lleva a cabo una medición respectiva de la impedancia de cortocircuito puede aumentarse en pasos aproximados en una primera pasada, de modo que el intervalo de la frecuencia de resonancia pueda reducirse aproximadamente. En una segunda pasada, la frecuencia a la que se realiza una medición de la impedancia de cortocircuito respectiva puede aumentarse en pasos más finos en el intervalo determinado en la primera pasada y, de este modo, la frecuencia de resonancia puede determinarse con mayor precisión. En otras palabras, en la primera pasada, se pueden realizar varias mediciones de impedancia de cortocircuito en una primera rejilla de frecuencias y en la segunda pasada, se pueden realizar varias mediciones de impedancia de cortocircuito en una segunda rejilla de frecuencias, que tiene un espaciado de frecuencias menor que la primera rejilla de frecuencias.

La base de las consideraciones siguientes es la ecuación de oscilación de Thomson (ecuación 1), que puede utilizarse para calcular la frecuencia de resonancia $\omega (=2\pi f)$ de un circuito oscilante con una capacitancia C y una inductancia L . En las siguientes ecuaciones, las frecuencias de circuito se denotan por ω y las frecuencias de oscilación por f . En el texto, estas cantidades ω y f se denominan simplemente frecuencias.

Ecuación 1:
$$\omega^2 = \frac{1}{L \cdot C}$$

Las frecuencias de resonancia pueden determinarse para los circuitos resonantes mostrados en las Fig. 2 a 4. Las frecuencias de resonancia pueden utilizarse para determinar la relación de capacitancia. Las frecuencias resonantes pueden utilizarse para determinar la relación de capacitancia. Con los circuitos resonantes mostrados en las Figuras 2 a 4, se pueden determinar tres frecuencias resonantes a partir de las correspondientes mediciones de impedancia de cortocircuito dependientes de la frecuencia.

Para el circuito mostrado en la Fig. 2, se puede determinar una primera frecuencia de resonancia ω_e , que depende de la suma de las capacitancias de los condensadores C_1 y C_2 según la ecuación 2.

Ecuación 2:
$$\omega_e = \frac{1}{\sqrt{L \cdot (C_1 + C_2)}} \rightarrow \omega_e^2 = \frac{1}{L \cdot (C_1 + C_2)}$$

Para el circuito según la Fig. 3, se puede determinar una segunda capacitancia de frecuencia de resonancia del condensador C_2 según la ecuación 3.

Ecuación 3:
$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_2}} \rightarrow \omega_2^2 = \frac{1}{L \cdot C_2}$$

Para el circuito de la Fig. 4, se puede determinar otra frecuencia de resonancia ω_1 , que depende de la capacitancia del condensador C_1 según la ecuación 4.

Ecuación 4:
$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_1}} \rightarrow \omega_1^2 = \frac{1}{L \cdot C_1}$$

La relación de capacitancia K_c del transformador de tensión capacitivo 50 depende de las capacitancias individuales del divisor de tensión y puede definirse como el cociente de la suma de las capacitancias de los condensadores C_1 y C_2 y la capacitancia del condensador C_1 (ecuación 5), véase también la Norma Internacional IEC 61869-5, Sec. 3.1.528, Nota 501.

Ecuación 5:
$$K_c = \frac{C_1 + C_2}{C_1}$$

Las ecuaciones 2 a 4 derivadas de las mediciones de impedancia de cortocircuito en función de la frecuencia

pueden utilizarse en la ecuación 5. De este modo, pueden derivarse otras cuatro ecuaciones (ecuación 6 a ecuación 9). De este modo, pueden derivarse otras cuatro ecuaciones (ecuación 6 a ecuación 9). La ecuación 6 incluye las frecuencias resonantes ω_1 y ω_e , la ecuación 7 incluye las frecuencias resonantes ω_1 y ω_2 , la ecuación 8 incluye las frecuencias resonantes ω_2 y ω_e y la ecuación 9 incluye las frecuencias resonantes ω_1 , ω_2 y ω_e . Como se ha descrito con anterioridad, la determinación de la frecuencia de resonancia ω_1 puede ser problemática, ya que la conexión NHF debe estar separada de tierra, lo que no siempre es posible (fácilmente). Por lo tanto, a continuación se considerará principalmente la ecuación 8, que es independiente de la medición de la frecuencia de resonancia ω_1 .

Ecuación 6:
$$K_c = \frac{\omega_1^2}{\omega_e^2}$$

Ecuación 7:
$$K_c = \frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{\omega_2^2}$$

Ecuación 8:
$$K_c = \frac{\omega_2^2}{\omega_2^2 - \omega_e^2}$$

Ecuación 9:
$$K_c = \frac{\omega_e^2 * (\omega_2^2 + \omega_1^2)}{\omega_1^2 * (\omega_2^2 - \omega_e^2)}$$

Para proporcionar la menor tensión de medida posible proporcional a la alta tensión con el divisor de tensión capacitivo formado por los condensadores C_1 y C_2 , se puede seleccionar una capacitancia considerablemente mayor para el condensador C_2 que para la capacitancia del condensador, es decir, C_1 , d. h., $C_2 \gg C_1$. Por lo tanto, la capacitancia total $C_1 + C_2$ en el circuito mostrado en la Fig. 2 difiere solo ligeramente de la capacitancia del condensador C_2 . De ello se deduce que las frecuencias de resonancia ω_e y ω_2 de los circuitos según la Fig. 2 y la Fig. 3 difieren solo ligeramente entre sí. Una inductancia que forma un circuito resonante correspondiente junto con las capacitancias C_1 y/o C_2 puede presentar una no linealidad dependiente de la frecuencia. La inductancia, que forma un circuito resonante correspondiente junto con la capacitancia C_2 o $C_1 + C_2$, es por lo tanto esencialmente la misma en los circuitos según la Fig. 2 y la Fig. 3. Esto se aplica en particular a la ecuación 8. Los puntos de funcionamiento de los circuitos según la Fig. 2 y la Fig. 3 son casi idénticos, ya que la inductancia de resonancia es esencialmente la misma en ambas medidas. Esto significa, en particular, que los puntos de funcionamiento de la inductancia no lineal son casi iguales, ya que los valores de impedancia a la frecuencia de resonancia de las mediciones (con C_2 o $C_1 + C_2$). La ecuación 8 es la ecuación válida para determinar la relación de capacitancia K_c debida al mismo punto de funcionamiento.

La inductancia de resonancia L , que puede tenerse en cuenta para considerar por separado las capacitancias de los condensadores C_1 y C_2 , puede deducirse de la placa de características. La inductancia de resonancia L puede representar la inductancia de compensación L_{comp} , las inductancias de fuga L_1 y L_2 , así como la inductancia principal L_h . Por ejemplo, la inductancia de resonancia L puede determinarse utilizando la ecuación de oscilación de Thomson según la ecuación 10.

Ecuación 10:
$$\omega^2 = \frac{1}{L * C} \rightarrow L = \frac{1}{\omega^2 * (C_1 + C_2)}$$

Por ejemplo, la inductancia de resonancia L del transformador de tensión capacitivo puede determinarse en función de los valores nominales del primer y segundo condensador C_1 y C_2 y de una frecuencia nominal ω del transformador de tensión capacitivo. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que los valores absolutos de la inductancia, por ejemplo la inductancia de resonancia L o la inductancia de compensación L_{comp} , y los valores absolutos de los condensadores C_1 y C_2 no tienen por qué conocerse o ser de gran interés, ya que generalmente tienen una cierta tolerancia en relación con la especificación de la placa de características. Lo que es más interesante es la diferencia porcentual entre las dos capacitancias (C_1 y C_2) en diferentes mediciones a lo largo del tiempo, es decir, una tendencia en la relación de las capacitancias entre sí. Por lo tanto, solo es necesario utilizar la misma inductancia en las ecuaciones, que tienen el mismo punto de funcionamiento. No es necesario conocer la relación de transformación inductiva del transformador de tensión capacitivo, es decir, tanto la relación de capacitancia K_c como la inductancia de resonancia L del transformador de tensión capacitivo pueden determinarse independientemente de la relación de transformación inductiva utilizando los valores nominales indicados con anterioridad, por ejemplo a partir de la placa de características.

La resonancia se alcanza en un circuito resonante cuando el ángulo de fase entre la corriente y la tensión alcanza un ángulo de fase de 0° . En un ángulo de fase de 0° , las componentes imaginarias inductiva y capacitiva se anulan mutuamente y solo queda la componente real. La frecuencia a la que se alcanza este valor se denomina frecuencia de resonancia.

Alternativa o adicionalmente, la inductancia de resonancia L del transformador de tensión capacitivo, que es importante para la separación de C_1 y C_2 , puede derivarse de mediciones de impedancia de cortocircuito

dependientes de la frecuencia. Por ejemplo, pueden realizarse varias mediciones de la impedancia de cortocircuito a diferentes frecuencias f en un intervalo de frecuencias especificado. Las mediciones de la impedancia de cortocircuito en función de la frecuencia pueden realizarse en el lado secundario del transformador de tensión capacitivo mientras la conexión de alta tensión HV del primer condensador C_1 está conectada a tierra, como se muestra en la Fig. 2. Alternativa o adicionalmente, las mediciones de impedancia de cortocircuito dependientes de la frecuencia pueden realizarse en el lado secundario del transformador de tensión capacitivo mientras la conexión de alta tensión HV del primer condensador C_1 está abierta, como se muestra en la Fig. 3. Estas mediciones pueden entenderse como mediciones en un circuito resonante en serie. A partir de las impedancias de cortocircuito Z_{sc} medidas se puede determinar una impedancia mínima $Z_{sc,f0}$, un ancho de banda B y una frecuencia de resonancia f_0 . Como se muestra en la ecuación 11, la impedancia mínima $Z_{sc,f0}$ se determina mediante la primera derivada de las impedancias de cortocircuito Z_{sc} con respecto a la frecuencia f . La impedancia mínima $Z_{sc,f0}$ se presenta donde la primera derivada de la impedancia de cortocircuito tiene el valor cero o la respuesta de fase tiene el cruce por cero. Este punto también se denomina impedancia $Z_{sc,f0}$ a la frecuencia de resonancia f_0 . Esta impedancia $Z_{sc,f0}$ corresponde a la resistencia óhmica R , ya que las partes imaginarias se anulan entre sí. El ancho de banda B también resulta de las mediciones de impedancia de cortocircuito en función de la frecuencia. El ancho de banda B viene definido por los puntos -3dB de la curva de corriente. La diferencia entre la frecuencia de corte superior f_H y la frecuencia de corte inferior f_L resultantes a -3dB se define como ancho de banda B , es decir, el ancho de banda B se extiende por la gama de frecuencias de f_L a f_H en la que la corriente de cortocircuito medida es como máximo 3dB inferior a la corriente de cortocircuito máxima. La impedancia a las dos frecuencias de corte f_L y f_H es mayor que la impedancia $Z_{sc,f0}$ por el factor raíz 2. Los valores de la inductancia de resonancia L'' y de la capacitancia de resonancia C'' de la ecuación 12 se refieren al lado secundario del transformador T y se transfieren al lado primario con ayuda de la relación de transformación inductiva K_{VT} del transformador T , dando como resultado la inductancia de resonancia L' y la capacitancia de resonancia C' en el lado primario del transformador de tensión.

Ecuación 11:

$$\frac{dZ_{sc}}{df} = 0 \rightarrow Z_{sc,f0} = R$$

$$B = f_H - f_L; Z_{sc}(f_H \text{ y } f_L) = Z_{sc,f0} \cdot \sqrt{2}$$

Ecuación 12:

$$L'' = \frac{\omega_0 R}{\omega_0^2 - \omega^2} \rightarrow L' = L'' \cdot K_{VT}^2$$

$$C'' = \frac{1}{\omega_0^2 \cdot L''} \rightarrow C' = \frac{C''}{K_{VT}^2}$$

La inductancia de resonancia L' en el lado primario determinada de este modo corresponde a la inductancia de resonancia L , que puede tenerse en cuenta para la consideración separada de las capacitancias de los condensadores C_1 y C_2 y que representa la inductancia de compensación L_{comp} , las inductancias de fuga L_1 y L_2 así como la inductancia principal L_h en el circuito respectivo según la Fig. 2 y la Fig. 3.

Al realizar las mediciones de impedancia de cortocircuito en función de la frecuencia con la conexión de alta tensión HV del primer condensador C_1 conectada a tierra, como se muestra en la Fig. 2, la capacitancia resonante C' corresponde a la capacitancia sumada de los condensadores primero y segundo C_1 y C_2 . La frecuencia de resonancia f_0 o frecuencia de resonancia del circuito ω_0 corresponde a la frecuencia de resonancia ω_e según la ecuación 2, teniendo en cuenta la inductancia de resonancia L correspondiente.

Al realizar las mediciones de impedancia de cortocircuito en función de la frecuencia con la conexión de alta tensión HV del primer condensador C_1 abierta, como se muestra en la Fig. 3, la capacitancia resonante C' corresponde a la capacitancia del segundo condensador C_2 . La frecuencia de resonancia f_0 o frecuencia de resonancia del circuito ω_0 corresponde a la frecuencia de resonancia ω_2 según la ecuación 3, teniendo en cuenta la inductancia de resonancia L correspondiente.

La Fig. 5 muestra los resultados de las mediciones de la impedancia de cortocircuito a diferentes frecuencias. En detalle, la Fig. 5 muestra las impedancias 501 de las mediciones de impedancia de cortocircuito en el transformador de tensión capacitivo según la Fig. 2 a diferentes frecuencias y las impedancias 502 de las mediciones de impedancia de cortocircuito en el transformador de tensión capacitivo según la Fig. 3 a diferentes frecuencias. La Fig. 6 muestra los ángulos de fase correspondientes que se midieron durante las mediciones de impedancia de cortocircuito a diferentes frecuencias. Los ángulos de fase 601 se midieron durante las mediciones de impedancia de cortocircuito en el transformador de tensión capacitivo según la Fig. 2 y los ángulos de fase 602 se midieron durante las mediciones de impedancia de cortocircuito en el transformador de tensión capacitivo según la Fig. 3. Las dos mediciones muestran una curva muy similar. Las dos mediciones muestran una curva muy similar de impedancia y fase en función de la frecuencia. Puesto que la capacitancia C_2 solo difiere ligeramente de la capacitancia total C_1 más C_2 y la frecuencia de resonancia es similar, se puede suponer que la misma inductancia es responsable del fenómeno de resonancia en los circuitos del transformador de tensión según la Fig. 2 y la Fig. 3. En este ejemplo, la frecuencia de resonancia del transformador de tensión capacitivo en el circuito mostrado en la Fig. 2 está entre 49 y 50 Hz y la frecuencia de resonancia del transformador de tensión capacitivo en el circuito mostrado en la Fig. 3 está entre 52 y 53 Hz.

Como se ha descrito con anterioridad, la ecuación 8 es especialmente adecuada para analizar la relación de capacitancia del divisor de tensión capacitivo, ya que los puntos de funcionamiento de los circuitos según la Fig. 2 y la Fig. 3 son casi idénticos, lo que significa que los puntos de funcionamiento de los componentes no lineales de las inductancias también son casi idénticos. Por el contrario, la frecuencia de resonancia del circuito del transformador de tensión capacitivo según la Fig. 4 se encuentra en un rango significativamente diferente, como muestran los resultados de medición de las Fig. 7 y 8. La Fig. 7 muestra la impedancia 701 de las mediciones de impedancia de cortocircuito en el transformador de tensión capacitivo según la Fig. 4 a diferentes frecuencias y la Fig. 8 muestra los correspondientes ángulos de fase 801, que se midieron durante las mediciones de impedancia de cortocircuito a diferentes frecuencias. Las Figuras 7 y 8 muestran que la frecuencia de resonancia del transformador de tensión capacitivo en el circuito mostrado en la Fig. 4 está en el intervalo de 155 a 156 Hz.

Por lo tanto, las mediciones de impedancia de cortocircuito en el transformador de tensión capacitivo según los circuitos de las Fig. 2 y 3 son posibles sin desconectar la conexión a tierra en el terminal NHF y también pueden garantizar que el transformador de tensión capacitivo funcione aproximadamente en el mismo punto de funcionamiento en ambos casos, de modo que se pueda despreciar el comportamiento no lineal de los componentes del transformador de tensión capacitivo, por ejemplo, las inductancias en el transformador de tensión capacitivo.

Las siguientes consideraciones se basan en al menos dos frecuencias de resonancia de diferentes mediciones, por ejemplo mediciones de impedancia de cortocircuito según los circuitos mostrados en las Fig. 2 y 3. Las frecuencias de resonancia pueden derivarse de los resultados de las mediciones de impedancia de cortocircuito, por ejemplo mediante interpolación. Las frecuencias de resonancia pueden derivarse de los resultados de medición de las mediciones de impedancia de cortocircuito, por ejemplo mediante interpolación. La interpolación puede tener un cierto grado de inexactitud. Para contrarrestar esta imprecisión, pueden realizarse varias mediciones alrededor del cruce por cero de fase. Por ejemplo, en una primera medición, se puede explorar una gama de frecuencias relativamente amplia en pasos de frecuencia amplios, por ejemplo una gama de frecuencias de 20 Hz a 200 Hz en pasos de unos pocos hercios, por ejemplo en pasos de 0,5 Hz a 5 Hz. Esto permite determinar un rango aproximado en el que se encuentra la frecuencia de resonancia. El rango aproximado es de solo unos pocos hercios. En una segunda medición, este rango puede explorarse en pasos de frecuencia más pequeños, por ejemplo en pasos de 0,1 Hz o 0,01 Hz, para determinar la frecuencia de resonancia con mayor precisión.

Utilizando la ecuación 8, la relación de capacitancia puede determinarse basándose en las frecuencias de resonancia determinadas mediante las mediciones de impedancia de cortocircuito, por ejemplo basándose en las frecuencias de resonancia ω_e y ω_2 determinadas para los circuitos según las Fig. 2 y Fig. 3:

Ecuación 13:
$$K_c = \frac{\omega_2^2}{\omega_2^2 - \omega_e^2}$$

La relación de capacitancia K_c puede ser del orden de 10, por ejemplo.

A partir de la relación de capacitancia K_c , por ejemplo, se pueden determinar los valores absolutos de las capacitancias de los condensadores C_1 y C_2 . En primer lugar, debe determinarse la inductancia total del transformador de tensión capacitivo. Para ello pueden utilizarse los valores de capacidad de la placa de características del transformador de tensión. Por ejemplo, los valores de capacidad para C_1 y C_2 pueden especificarse en la placa de características del transformador de tensión capacitivo. Los valores típicos son, por ejemplo, $C_1 = 5140$ pF (+10%, -5%) y $C_2 = 50700$ pF (+10%, -5%). También puede especificarse la frecuencia nominal del transformador de tensión capacitivo, por ejemplo 50 Hz. Estos valores pueden utilizarse en la siguiente ecuación 14, a partir de la cual puede determinarse, al menos aproximadamente, la inductancia del transformador de tensión capacitivo. Para el ejemplo mencionado con anterioridad, la inductancia es de 180,1586 H, por ejemplo.

Ecuación 14:
$$\omega^2 = \frac{1}{L \cdot C} \rightarrow L = \frac{1}{\omega^2 \cdot (C_1 + C_2)}$$

La capacitancia real del condensador C_2 puede determinarse entonces mediante la ecuación 15 utilizando la frecuencia de resonancia ω_2 .

Ecuación 15:
$$C_2 = \frac{1}{L \cdot \omega_2^2}$$

La capacitancia del condensador C_1 puede determinarse utilizando la capacitancia del condensador C_2 y la relación de capacitancia K_c según la ecuación 16.

Ecuación 16:

$$C_1 = \frac{C_2}{K_C - 1}$$

Las desviaciones de las capacitancias de los condensadores C_1 y C_2 determinadas de este modo con respecto a los valores especificados en la placa de características pueden determinarse en términos absolutos o relativos y visualizarse en un dispositivo de visualización del dispositivo de medición 90 a fin de evaluar el estado del divisor de tensión capacitivo. Puede suponerse un funcionamiento fiable del transformador de tensión capacitivo, por ejemplo, si las capacitancias realmente determinadas de los condensadores C_1 y C_2 se encuentran dentro de los márgenes de tolerancia especificados en la placa de características.

Además, para evaluar el estado de los condensadores del divisor de tensión capacitivo, puede determinarse y visualizarse una dependencia de la relación de capacitancia de la frecuencia de resonancia ω_e o de la frecuencia de resonancia ω_2 . Diferenciando parcialmente la ecuación 8 en función de la frecuencia de resonancia ω_2 , puede determinarse la dependencia de la relación de capacitancia K_C de la frecuencia de resonancia ω_2 según la ecuación 17.

Ecuación 17:

$$\frac{\delta K_C}{\delta \omega_2} = - \frac{2 \cdot \omega_2 + \omega_e^2}{(\omega_2^2 - \omega_e^2)^2}$$

Del mismo modo, diferenciando parcialmente la ecuación 8 en función de la frecuencia de resonancia ω_e , se puede determinar la dependencia de la relación de capacitancia K_C de la frecuencia de resonancia ω_e según la ecuación 18.

Ecuación 18:

$$\frac{\delta K_C}{\delta \omega_e} = \frac{2 \cdot \omega_2^2 + \omega_e}{(\omega_2^2 - \omega_e^2)^2}$$

La dependencia de la relación de capacitancia con respecto a la frecuencia de resonancia ω_e o ω_2 se refiere, pues, a una dependencia de la variación de la relación de capacitancia con respecto a una variación de la frecuencia de resonancia ω_e o ω_2 . Esta dependencia también se denomina sensibilidad. Una sensibilidad elevada puede contribuir a que se reconozcan claramente incluso los cambios más pequeños y, por lo tanto, a que se detecte de forma precoz y fiable un empeoramiento del estado del divisor de tensión capacitivo. La Fig. 9 muestra la sensibilidad de la relación de capacitancia K_C en relación con un cambio en la frecuencia de resonancia ω_2 , donde la representación se ha normalizado a la frecuencia de resonancia medida, es decir, la frecuencia de resonancia medida se representa por la línea 901 y la sensibilidad de la relación de capacitancia por el gráfico 902 en porcentaje en función del cambio de la frecuencia de resonancia en porcentaje. La Fig. 10 muestra la sensibilidad de la relación de capacitancia K_C en relación con un cambio en la frecuencia de resonancia ω_e . Esta representación también se ha normalizado a la frecuencia de resonancia medida, es decir, la frecuencia de resonancia medida se representa mediante la línea 1001 y la sensibilidad de la relación de capacitancia se representa mediante el gráfico 1002 en porcentaje del cambio en la frecuencia de resonancia.

Basándose en la ecuación 5, la dependencia o sensibilidad de la relación de capacitancia K_C de la capacitancia del condensador C_2 puede mostrarse según la ecuación 19. La ecuación 19 muestra que la sensibilidad de la relación de capacitancia K_C es constante aunque cambie la capacitancia del condensador C_2 .

Ecuación 19:

$$\frac{\delta K_C}{\delta C_2} = \frac{1}{C_1}$$

De forma similar, basándose en la ecuación 5, la dependencia o sensibilidad de la relación de capacitancia K_C de la capacitancia del condensador C_1 puede mostrarse según la ecuación 20.

Ecuación 20:

$$\frac{\delta K_C}{\delta C_1} = - \frac{C_2}{C_1^2}$$

La Fig. 11 muestra la sensibilidad de la relación de capacitancia K_C en relación con un cambio en la capacitancia del condensador C_2 . La representación se normalizó a la frecuencia de resonancia medida, es decir, la frecuencia de resonancia medida se representa mediante la línea 1101 y la sensibilidad de la relación de capacitancia se representa mediante el gráfico 1102 en porcentaje en función del cambio en la capacitancia del condensador C_2 en porcentaje. En consecuencia, la Fig. 12 muestra la sensibilidad de la relación de capacitancia K_C en relación con un cambio en la capacitancia del condensador C_1 , por lo que la representación se ha normalizado a la frecuencia de resonancia medida. La frecuencia de resonancia medida se representa mediante la línea 1201 y la sensibilidad de la relación de capacitancia mediante el gráfico 1202 en porcentaje en función del cambio en la capacitancia del condensador C_1 en porcentaje.

El procedimiento previamente determinado puede ser llevado a cabo automáticamente por el dispositivo de medición 90. El modo de funcionamiento del dispositivo de medición 90 se resume a continuación con referencia a las Fig. 13 a 15.

El procedimiento mostrado en la Fig. 13 comprende los pasos de procedimiento 1301 a 1312. En el paso 1301, se introducen los datos de la placa de características del transformador de tensión capacitivo, por ejemplo a través de una interfaz de usuario por un operador del dispositivo de medición 90 o con un escáner correspondiente, que escanea la placa de características del transformador de tensión capacitivo que se va a probar. Los datos de la placa de características pueden incluir, por ejemplo, la carga y la caída de tensión a través de la carga a la frecuencia nominal, así como los valores nominales de los condensadores primero y segundo. Aunque las mediciones de impedancia de cortocircuito que se describen a continuación se llevan a cabo en un lado secundario de un transformador del transformador de tensión capacitivo, para este procedimiento no es necesario conocer la relación de transformación inductiva del transformador. Basándose en los datos de la placa de características, en el paso 1302 se calcula una corriente de medición, por ejemplo como se ha descrito con anterioridad utilizando la carga y la caída de tensión a través de la carga a la frecuencia nominal. En el paso 1303, la conexión de alta tensión HV se desacopla de la línea de alta tensión 60 y se acopla a tierra 70 de forma que se presente el circuito mostrado en la Fig. 2. En el paso 1304, se determina la frecuencia de resonancia ω_e , por ejemplo mediante varias mediciones de impedancia de cortocircuito en una primera rejilla de frecuencia seguidas de varias mediciones de impedancia de cortocircuito en una segunda rejilla de frecuencia, en la que la primera rejilla de frecuencia tiene un espaciado de frecuencia mayor que la segunda rejilla de frecuencia. En el paso 1305, la conexión de alto voltaje HV se desconecta para que el circuito mostrado en la Fig. 3 esté presente. En el paso 1306, se determina la frecuencia de resonancia ω_2 mediante mediciones de impedancia de cortocircuito. Una vez más, pueden realizarse varias mediciones de impedancia de cortocircuito en una primera rejilla de frecuencia seguidas de varias mediciones de impedancia de cortocircuito en una segunda rejilla de frecuencia, en la que la primera rejilla de frecuencia tiene un espaciado de frecuencia mayor que la segunda rejilla de frecuencia. En el paso 1307, se determina una relación de capacitancia K_c , por ejemplo según la ecuación 8. En el paso 1308, la inductancia de resonancia L se determina a partir de los datos de la placa de características, como se ha descrito con anterioridad con referencia a las ecuaciones 10 y 14. En el paso 1309, la capacitancia del condensador C_2 puede determinarse de acuerdo con la ecuación 15, teniendo en cuenta la inductancia de resonancia L , y en el paso 1310, la capacitancia del condensador C_1 puede determinarse de acuerdo con la ecuación 16. En el paso 1311, los valores de capacitancia de los condensadores C_1 y C_2 se muestran en, por ejemplo, un dispositivo de visualización del dispositivo de medición 90. Además, en el paso 1312, los valores de capacitancia de los condensadores C_1 y C_2 se muestran en un dispositivo de visualización del dispositivo de medición 90. Además, en el paso 1312, puede mostrarse una tendencia temporal de las capacitancias de los condensadores C_1 y C_2 en el dispositivo de visualización o, por ejemplo, registrarse y analizarse en un dispositivo de procesamiento durante un período de tiempo más largo. Para un análisis de tendencias, las capacitancias de los condensadores C_1 y C_2 pueden registrarse durante un período de tiempo más largo y transferirse a una memoria en la nube, por ejemplo.

El procedimiento mostrado en la Fig. 14 comprende los pasos 1401 a 1411. En el paso 1401, se introducen los datos de la placa de características del transformador de tensión capacitivo. Estos datos pueden, por ejemplo, ser introducidos a través de una interfaz de usuario por un operador del dispositivo de medición 90. Alternativamente, estos datos pueden ser capturados electrónicamente por el operador. Alternativamente, estos datos pueden capturarse electrónicamente de la placa de características del transformador de tensión capacitivo que se va a probar, por ejemplo, utilizando un escáner o una cámara. Los datos de la placa de características pueden incluir, por ejemplo, la carga y la caída de tensión a través de la carga a frecuencia nominal. Aunque las mediciones de impedancia de cortocircuito que se describen a continuación se llevan a cabo en un lado secundario de un transformador del transformador de tensión capacitivo, para este procedimiento no es necesario conocer la relación de transformación inductiva del transformador. Basándose en los datos de la placa de características, se puede calcular una corriente de medición adecuada en el paso 1402 (véase el paso 1302). En el paso 1403, la conexión de alta tensión HV se desacopla de la línea de alta tensión 60 y se acopla a tierra 70. De este modo se dispone del cableado del transformador de tensión capacitivo según la Fig. 2. A continuación, en el paso 1404 se determina el ω_e de frecuencia de resonancia, por ejemplo como se ha descrito con anterioridad utilizando dos series de varias mediciones de impedancia de cortocircuito en diferentes redes de frecuencia. En el paso 1405, se desconecta la conexión de alta tensión HV de modo que se disponga del circuito del transformador de tensión capacitivo, como se muestra en la Fig. 3. En el paso 1406, se determina la frecuencia de resonancia ω_2 , por ejemplo también como se ha descrito con anterioridad utilizando dos series de varias mediciones de impedancia de cortocircuito con diferentes rejillas de frecuencia. En el paso 1407, se determina una relación de capacitancia K_c , por ejemplo según la ecuación 8. En el paso 1408, se determina una dependencia o sensibilidad de la relación de capacitancia con respecto a la frecuencia de resonancia ω_2 (véase también la ecuación 17). En el paso 1409, se determina una dependencia o sensibilidad de la relación de capacitancia con respecto a la frecuencia de resonancia ω_e (véase también la ecuación 18). Las sensibilidades de la relación de capacitancia con respecto a la frecuencia de resonancia ω_2 o ω_e se muestran en el paso 1410 en un dispositivo de visualización del dispositivo de medición 90. Además, en el paso 1411, las tendencias temporales de las sensibilidades de la relación de capacitancia en relación con la frecuencia de resonancia ω_2 o ω_e pueden visualizarse o almacenarse a lo largo del tiempo para ser analizadas por un dispositivo de procesamiento. Para un análisis de tendencias, las sensibilidades pueden registrarse durante un período de

tiempo más largo y transferirse a un almacenamiento en la nube, por ejemplo.

El procedimiento mostrado en la Fig. 15 comprende los pasos de procedimiento 1501 a 1511. En el paso 1501, se introducen los datos de la placa de características del transformador de tensión capacitivo. Estos datos pueden, por ejemplo, ser introducidos a través de una interfaz de usuario por un operador del dispositivo de medición 90. Alternativamente, estos datos pueden ser capturados electrónicamente por el operador. Alternativamente, estos datos pueden capturarse electrónicamente de la placa de características del transformador de tensión capacitivo que se va a probar, por ejemplo, utilizando un escáner o una cámara. Los datos de la placa de características pueden incluir, por ejemplo, la carga y la caída de tensión a través de la carga a la frecuencia nominal, así como una relación de transformación inductiva de un transformador del transformador de tensión capacitivo. Basándose en los datos de la placa de características, se puede calcular una corriente de medición adecuada en el paso 1502 (véase el paso 1302). En el paso 1503, la conexión de alta tensión HV se desacopla de la línea de alta tensión 60 y se acopla a tierra 70. De este modo, el transformador de tensión capacitivo queda cableado como se muestra en la Fig. 2. A continuación, en la etapa 1504, se determinan la frecuencia de resonancia ω_e y el ancho de banda B_e (véase también la ecuación 11), por ejemplo como se ha descrito con anterioridad utilizando dos series de varias mediciones de impedancia de cortocircuito en diferentes redes de frecuencias. En la etapa 1505, se desconecta la conexión de alta tensión HV de manera que se disponga del circuito del transformador de tensión capacitivo, tal como se muestra en la Fig. 3. En el paso 1506, se determinan la frecuencia de resonancia ω_2 y el ancho de banda B_2 (véase también la ecuación 11), por ejemplo también como se ha descrito con anterioridad utilizando dos series de varias mediciones de impedancia de cortocircuito con diferentes rejillas de frecuencia. En el paso 1507, se determina una relación de capacitancia K_c a partir de las frecuencias resonantes ω_e y ω_2 , por ejemplo según la ecuación 8. En el paso 1508, se determina una inductancia de resonancia respectiva L de la frecuencia de resonancia ω_e o ω_2 (véase también la ecuación 12). Además, en el paso 1508, utilizando la inductancia de resonancia L respectiva, la frecuencia de resonancia ω_e o ω_2 respectiva y la relación de transformación inductiva, puede determinarse la capacitancia total de los condensadores C_1 y C_2 o la capacitancia del condensador C_2 de acuerdo con la ecuación 12. Esto, a su vez, puede utilizarse para determinar la capacitancia total de los condensadores C_1 y C_2 o la capacitancia del condensador C_2 . Esto, a su vez, puede utilizarse para determinar la capacitancia del condensador. En el paso 1509, se puede comprobar si la medición es válida haciendo coincidir la relación de capacitancia K_c determinada en el paso 1507 con la relación de capacitancia de las capacitancias de los condensadores C_1 y C_2 determinada en el paso 1508. Si la medición es válida, los valores de capacitancia de los condensadores C_1 y C_2 pueden mostrarse en el paso 1510, por ejemplo en un dispositivo de visualización del dispositivo de medición 90. Además, en el paso 1511, puede mostrarse una tendencia temporal de las capacitancias de los condensadores C_1 y C_2 en el dispositivo de visualización o, por ejemplo, registrarse y analizarse en un dispositivo de procesamiento durante un período de tiempo más largo. Para un análisis de tendencias, las capacitancias de los condensadores C_1 y C_2 pueden registrarse durante un período de tiempo más largo y transferirse a una memoria en la nube, por ejemplo.

En resumen, los procedimientos descritos con anterioridad proporcionan una forma de determinar y observar una tendencia de las dos capacitancias de un divisor de tensión capacitivo en un transformador de tensión capacitivo con el fin de evaluar un estado del transformador de tensión capacitivo. La curva de tendencia proporciona información sobre la tendencia temporal de las capacitancias de los condensadores C_1 y C_2 en el divisor de tensión capacitivo. Para un análisis de tendencia de las capacitancias, un cambio en el tiempo es actualmente más significativo que el valor absoluto de las capacitancias. Por lo tanto, está justificado utilizar los valores de capacitancia de la placa de características para determinar la inductancia L del transformador de tensión capacitivo, ya que la precisión absoluta de los valores de capacitancia de los condensadores C_1 y C_2 no es decisiva para la tendencia de las dos capacitancias. A partir de la inductancia L así obtenida y de las frecuencias de resonancia ω_e y ω_2 determinadas mediante mediciones de impedancia de cortocircuito, se pueden calcular las capacitancias de los condensadores C_1 y C_2 y utilizarlas como valores de referencia. Estos valores proporcionan una base fiable para la supervisión del estado mediante una curva de tendencia.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para determinar un estado de un transformador de tensión capacitivo, en donde el transformador de tensión capacitivo (50) comprende en su lado primario un divisor de tensión capacitivo que tiene un primer condensador (C_1) y un segundo condensador (C_2), en donde el primer condensador (C_1) presenta un terminal de alta tensión (HV) para conexión a una alta tensión (60) y el segundo condensador (C_2) presenta un terminal de tierra (NHF), caracterizándose el procedimiento por:
 - determinar una primera frecuencia de resonancia (ω_e) mediante una pluralidad de primeras medidas de impedancia de cortocircuito a diferentes frecuencias en un lado secundario del transformador de tensión capacitivo (50) mientras el terminal de alta tensión (HV) está conectado a tierra (70),
 - determinar una segunda frecuencia de resonancia (ω_2) mediante una pluralidad de segundas mediciones de impedancia de cortocircuito a diferentes frecuencias en el lado secundario del transformador de tensión capacitivo (50) mientras el terminal de alta tensión (HV) está abierto, y
 - determinar una relación de capacitancia (K_c) del divisor de tensión capacitivo (50) en función de la primera frecuencia de resonancia (ω_e) y de la segunda frecuencia de resonancia (ω_2).
2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende además:
 - determinar una corriente de medida en función de una carga del transformador de tensión capacitivo (50) y de una caída de tensión a través de la carga del transformador de tensión capacitivo (50), en donde la pluralidad de primeras medidas de impedancia de cortocircuito y la pluralidad de segundas medidas de impedancia de cortocircuito se realizan utilizando la corriente de medida.
3. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en donde la pluralidad de primeras mediciones de impedancia de cortocircuito comprende una pluralidad de mediciones de impedancia de cortocircuito en una primera rejilla de frecuencias seguida de una pluralidad de mediciones de impedancia de cortocircuito en una segunda rejilla de frecuencias, en donde la primera rejilla de frecuencias tiene una separación de frecuencias mayor que la segunda rejilla de frecuencias, y/o en donde la pluralidad de segundas mediciones de impedancia de cortocircuito comprende una pluralidad de mediciones de impedancia de cortocircuito en una primera rejilla de frecuencias seguida de una pluralidad de mediciones de impedancia de cortocircuito en una segunda rejilla de frecuencias, en donde la primera rejilla de frecuencias tiene un espaciado de frecuencias mayor que la segunda rejilla de frecuencias.
4. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además:
 - determinar una inductancia de resonancia del transformador de tensión capacitivo (50) en función de los valores nominales de los condensadores primero y segundo (C_1 , C_2) y de una frecuencia nominal del transformador de tensión capacitivo (50), y
 - determinar un valor real de la capacitancia del segundo condensador (C_2) en función de la segunda frecuencia de resonancia (ω_2) y de la inductancia de resonancia.
5. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 4, en el que la inductancia de resonancia se determina independientemente de una relación de transformación inductiva de un transformador del transformador de tensión capacitivo.
6. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además:
 - determinar una primera impedancia mínima y un primer ancho de banda por medio de la pluralidad de primeras mediciones de impedancia de cortocircuito a diferentes frecuencias en el lado secundario del transformador de tensión capacitivo (50) mientras el terminal de alta tensión (HV) está conectado a tierra (70),
 - determinar una segunda impedancia mínima y un segundo ancho de banda mediante la pluralidad de segundas mediciones de impedancia de cortocircuito a diferentes frecuencias en el lado secundario del transformador de tensión capacitivo (50) mientras el terminal de alta tensión (HV) está abierto, y
 - determinar un valor real de la capacitancia del primer condensador C_1 y un valor real de la capacitancia del segundo condensador C_2 en función de la primera impedancia mínima, del primer ancho de banda, de la segunda impedancia mínima del segundo ancho de banda y de una relación de transformación inductiva de un transformador del transformador de tensión capacitivo.
7. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 6, que comprende además:
 - comparar la relación de capacitancia (K_c), que se determina en función de la primera frecuencia de resonancia (ω_e) y de la segunda frecuencia de resonancia (ω_2), con una relación de capacitancia, que se determina en función del valor real de la capacitancia del primer condensador C_1 y del valor real de la capacitancia del segundo condensador C_2 , y
 - determinar la validez de la determinación del valor real de la capacitancia del primer condensador C_1 y del valor

real de la capacitancia del segundo condensador C_2 en función de la comparación.

8. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 4 a 7, que comprende además:

- 5 - determinar una pluralidad de valores reales de la capacitancia del segundo condensador (C_2) en diferentes momentos, y
- visualizar una tendencia temporal de la capacitancia del segundo condensador (C_2) en un dispositivo de visualización.

10 9. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 4 o la reivindicación 5, que comprende además:

- determinar un valor real de la capacitancia del primer condensador (C_1) en función del valor real de la capacitancia del segundo condensador (C_2) y de la relación de capacitancia (K_c).

15 10. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 6 a 9, que comprende además:

- determinar varios valores reales de la capacitancia del primer condensador (C_1) en diferentes momentos, y
- visualizar una tendencia temporal de la capacitancia del primer condensador (C_1) en un dispositivo de visualización.

20 11. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además:

- determinar varias relaciones de capacitancia (K_c) del divisor de tensión capacitivo en diferentes momentos, y
- visualizar una tendencia temporal de la relación de capacitancia (K_c) en un dispositivo de visualización.

25 12. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además:

- determinar una primera dependencia $(\partial K_c / \partial \omega_e)$ de la relación de capacitancia (K_c) con respecto a la primera frecuencia de resonancia (ω_e).

30 13. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además:

- determinar una segunda dependencia $(\partial K_c / \partial \omega_2)$ de la relación de capacitancia (K_c) respecto a la segunda frecuencia de resonancia (ω_2).

35 14. Aparato para determinar el estado de un transformador de tensión capacitivo, comprendiendo el transformador de tensión capacitivo (50) un divisor de tensión capacitivo en su lado primario con un primer condensador (C_1) y un segundo condensador (C_2), teniendo el primer condensador (C_1) un terminal de alta tensión (HV) para la conexión a una alta tensión (60) y el segundo condensador (C_2) un terminal de masa (NHF), comprendiendo el aparato (90) un divisor de tensión capacitivo en su lado primario con un primer condensador (C_1) y un segundo condensador (C_2), en el que el primer condensador (C_1) tiene un terminal de alta tensión (HV) para la conexión a una alta tensión (60) y el segundo condensador (C_2) tiene un terminal de masa (NHF):

- un dispositivo de medición diseñado para realizar una medición de la impedancia de cortocircuito con frecuencia ajustable,
- 45 caracterizado por
- un dispositivo de control configurado para
- determinar una primera frecuencia de resonancia (ω_e) mediante una pluralidad de primeras medidas de impedancia de cortocircuito a frecuencias diferentes en un lado secundario del transformador de tensión capacitivo (50) mientras que el terminal de alta tensión (HV) está conectado a tierra (70),
- 50 determinar una segunda frecuencia de resonancia (ω_2) mediante una pluralidad de segundas mediciones de impedancia de cortocircuito a diferentes frecuencias en el lado secundario del transformador de tensión capacitivo (50) mientras el terminal de alta tensión (HV) está abierto, y
- determinar una relación de capacitancia (K_c) del divisor de tensión capacitivo en función de la primera frecuencia de resonancia (ω_e) y de la segunda frecuencia de resonancia (ω_2).

55 15. Aparato de acuerdo con la reivindicación 14, en donde el aparato (90) está configurado para realizar el procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-13.

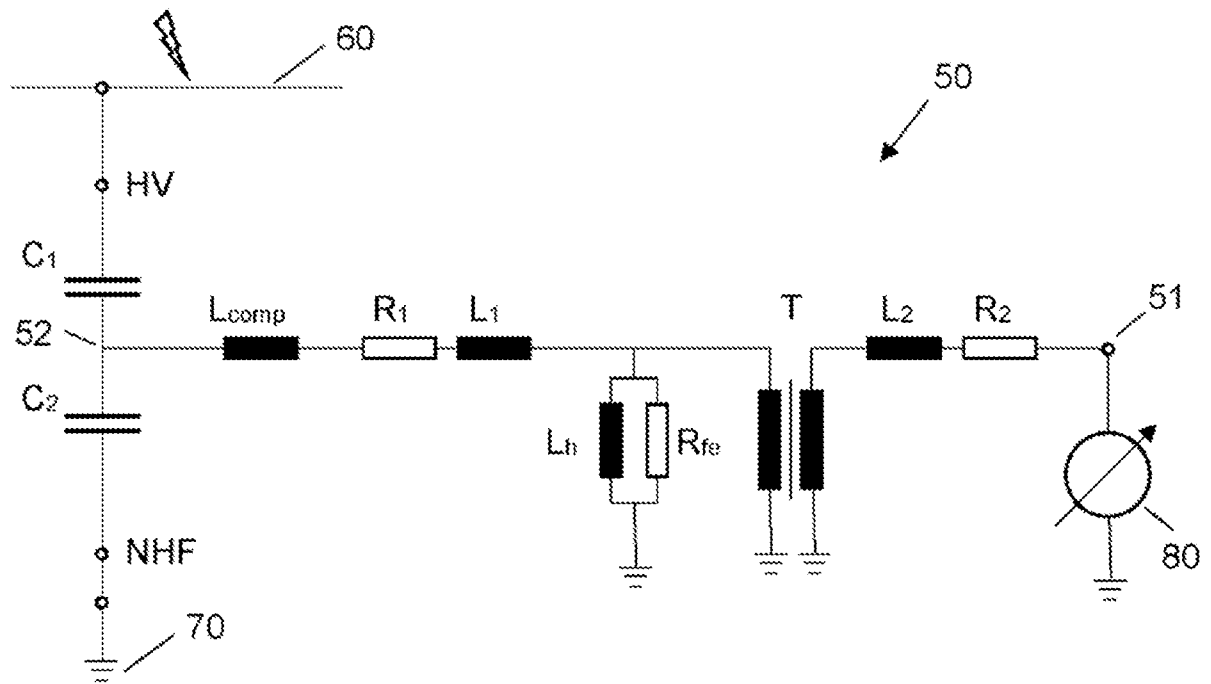


Fig. 1

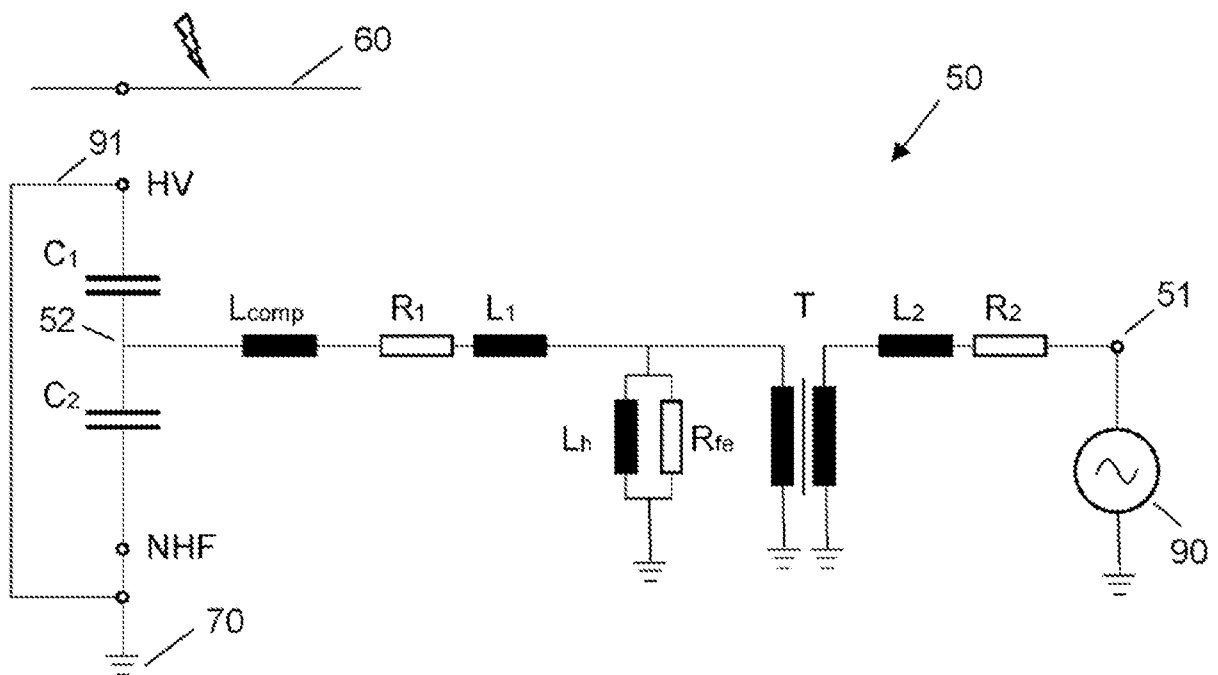


Fig. 2

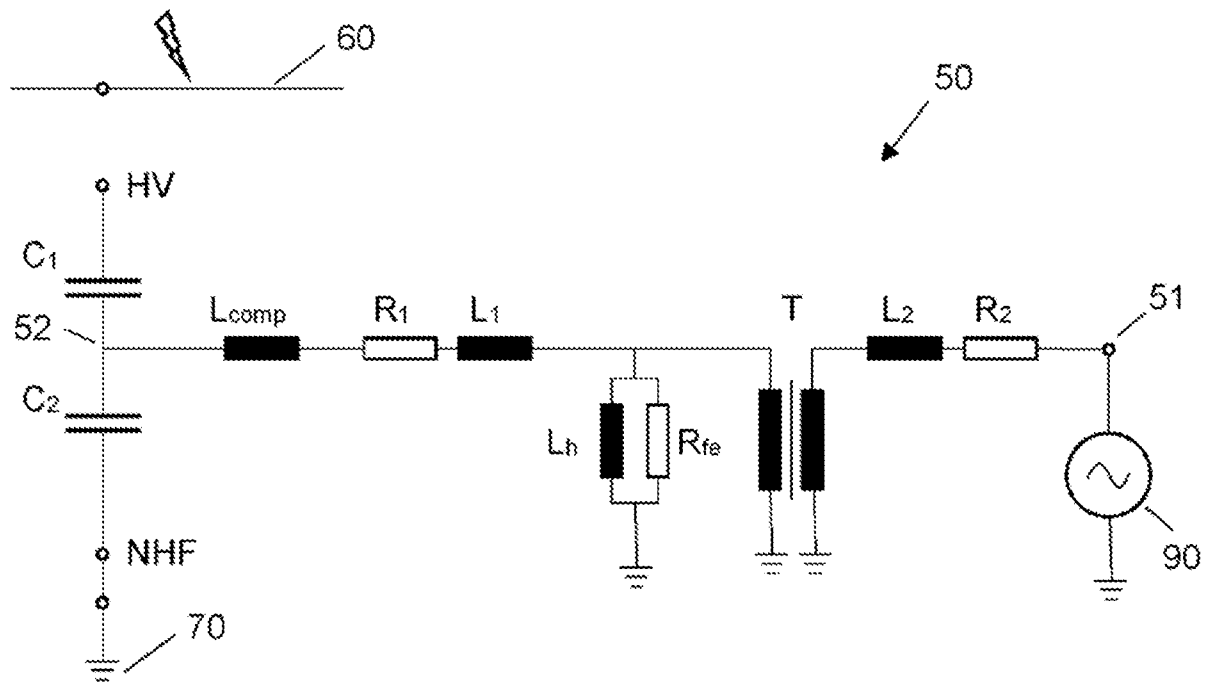


Fig. 3

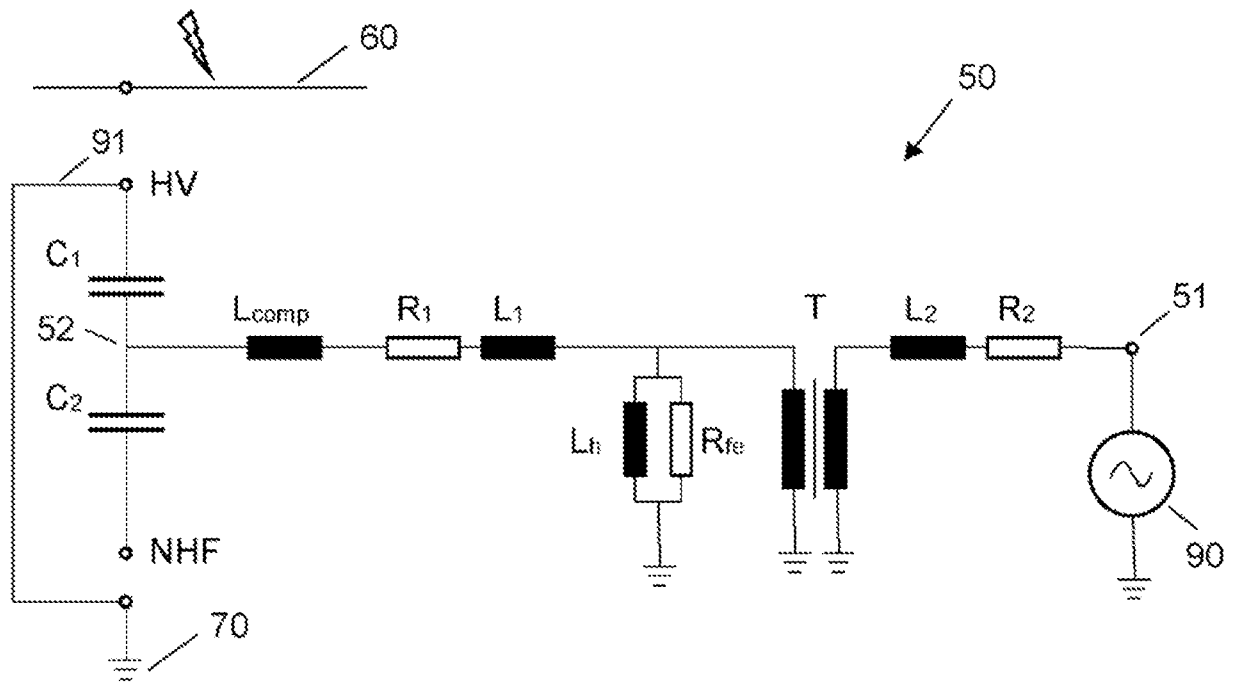


Fig. 4

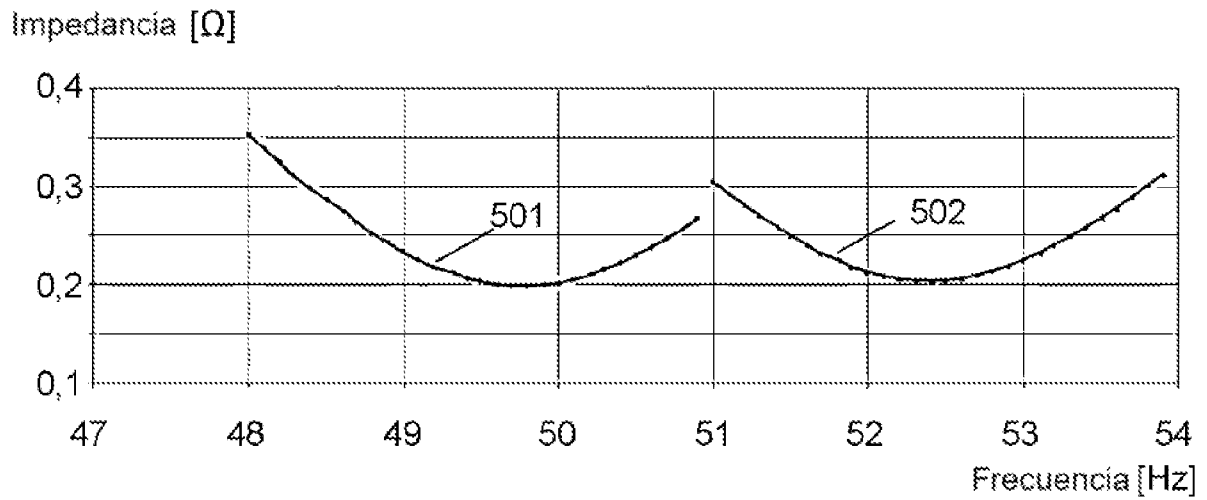


Fig. 5

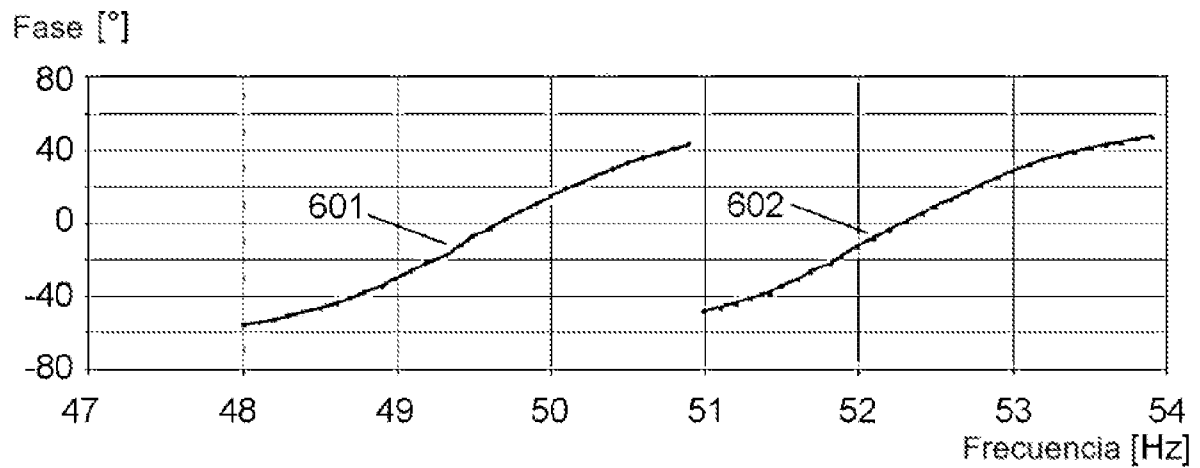


Fig. 6

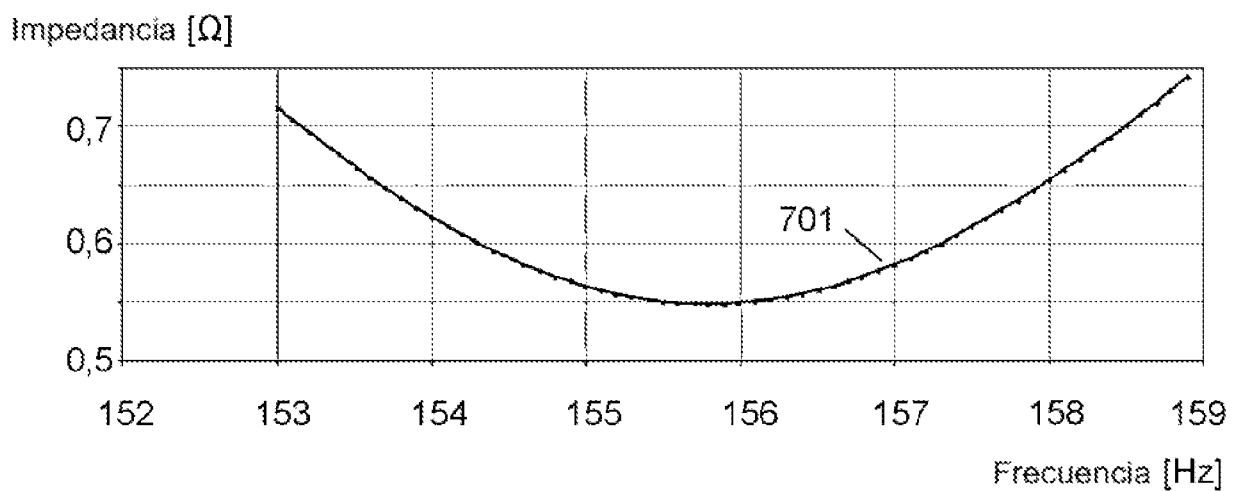


Fig. 7

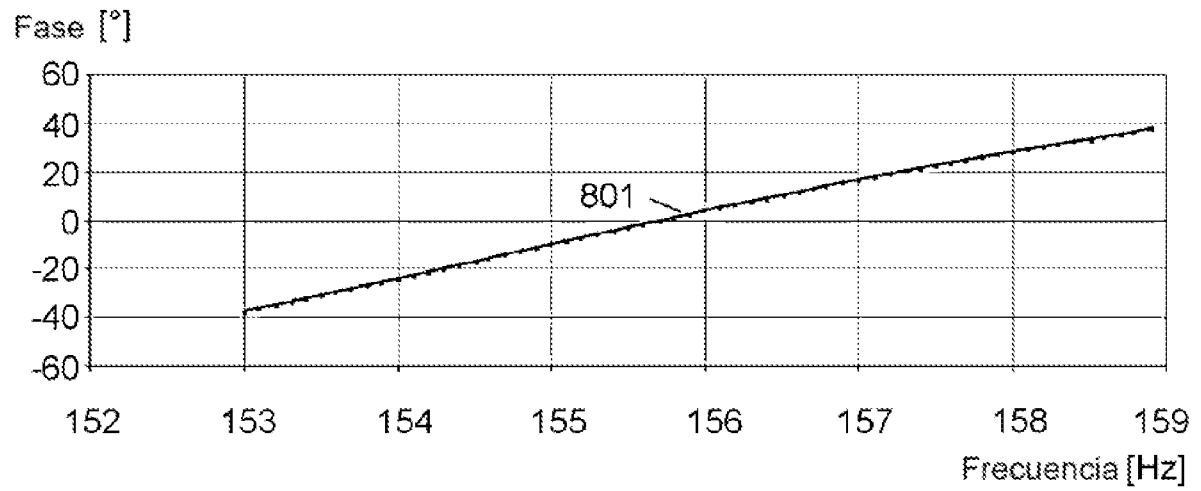


Fig. 8

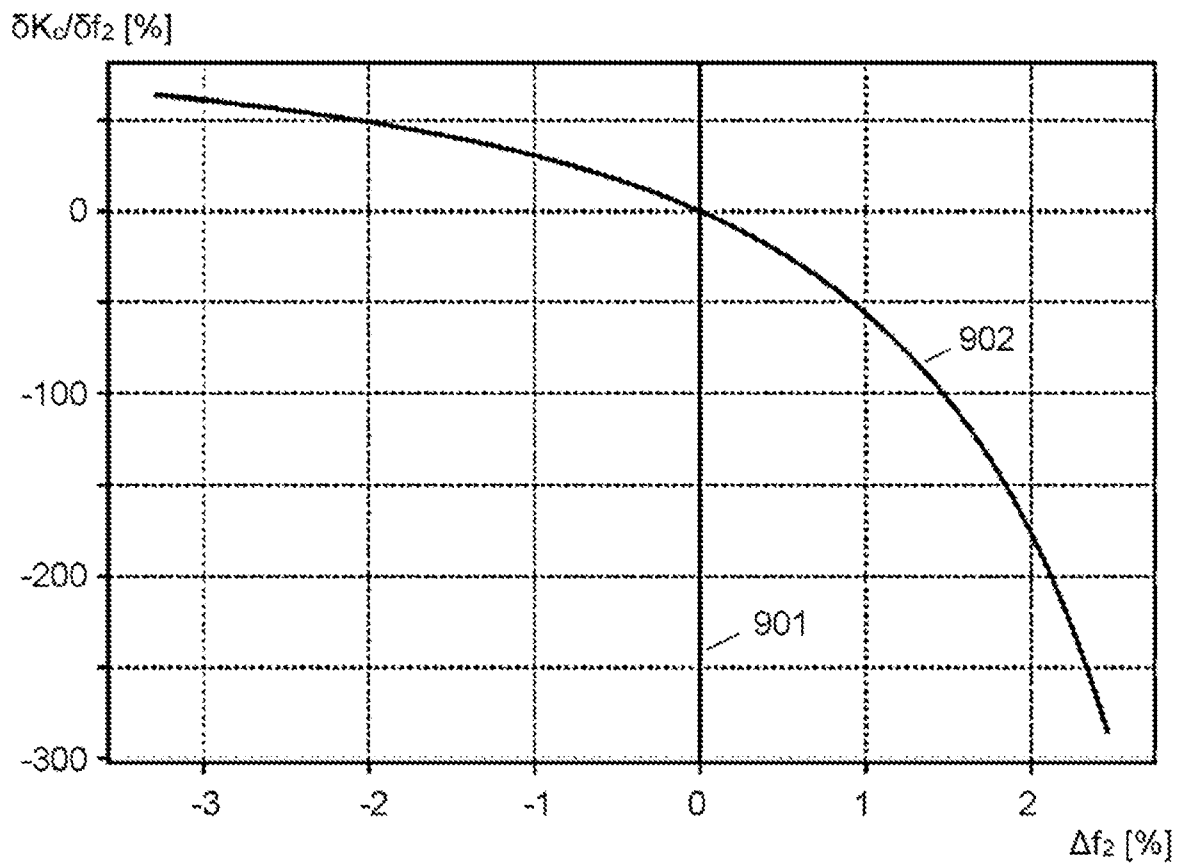


Fig. 9

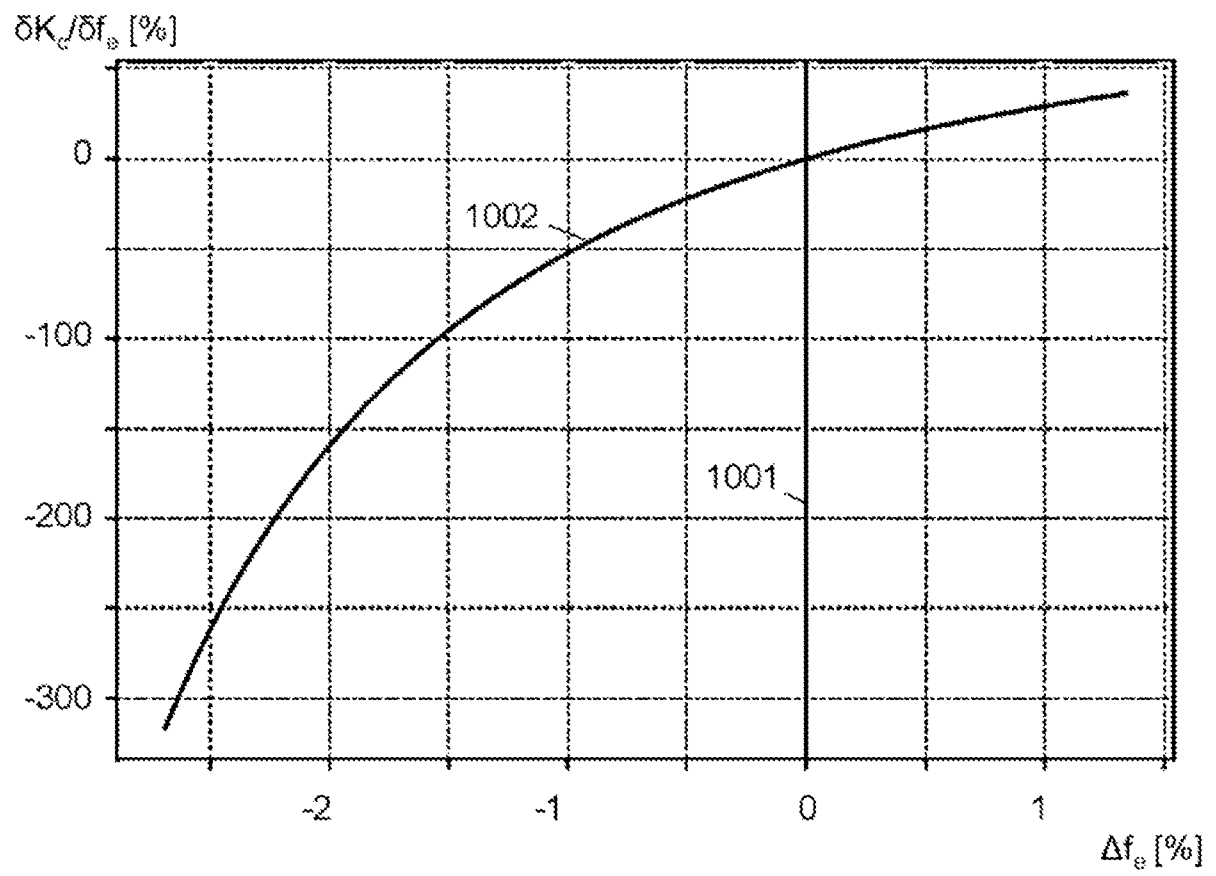


Fig. 10

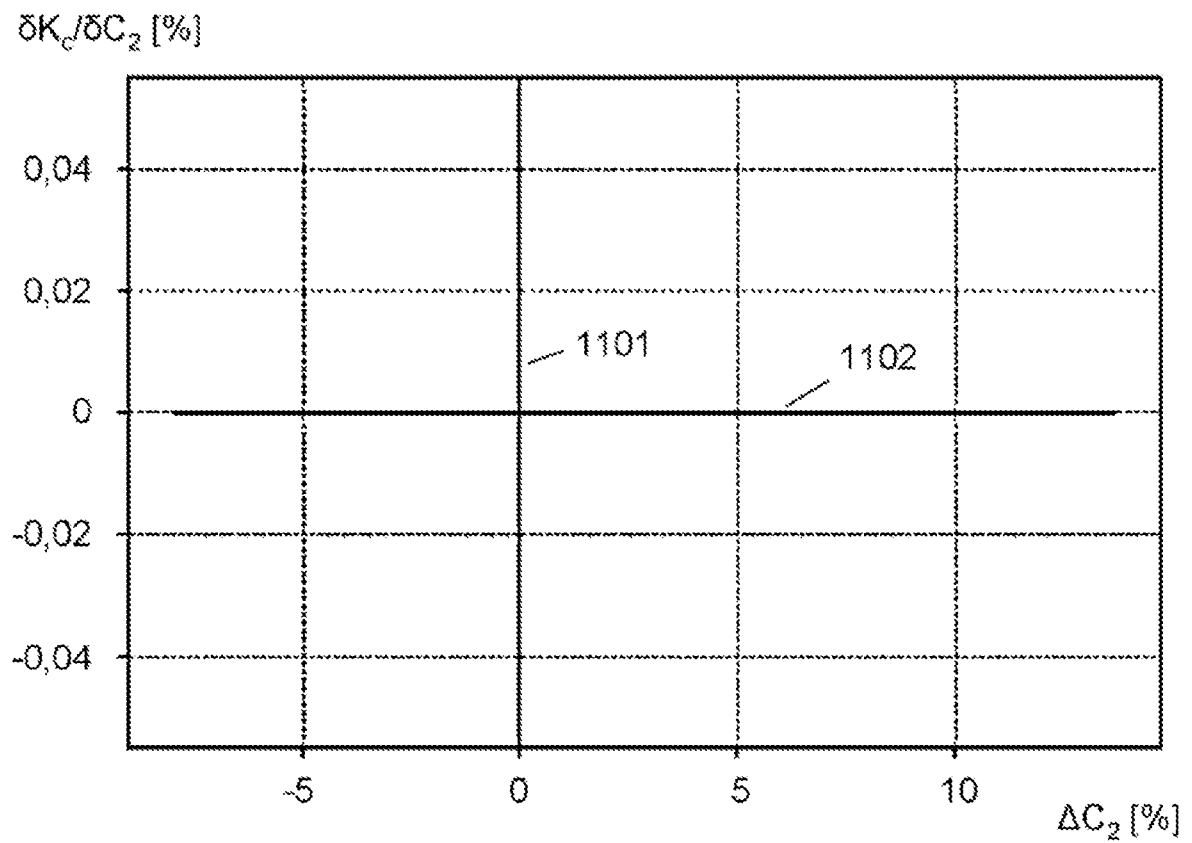


Fig. 11

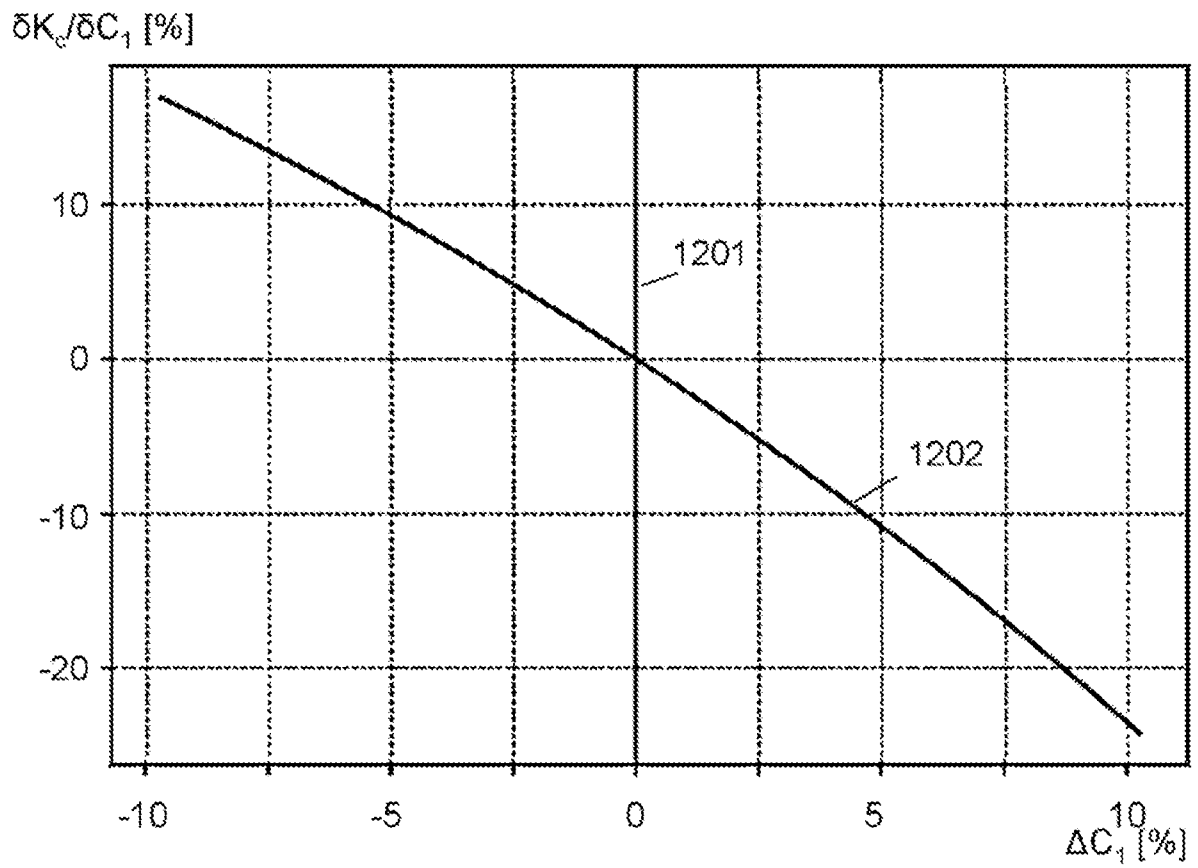
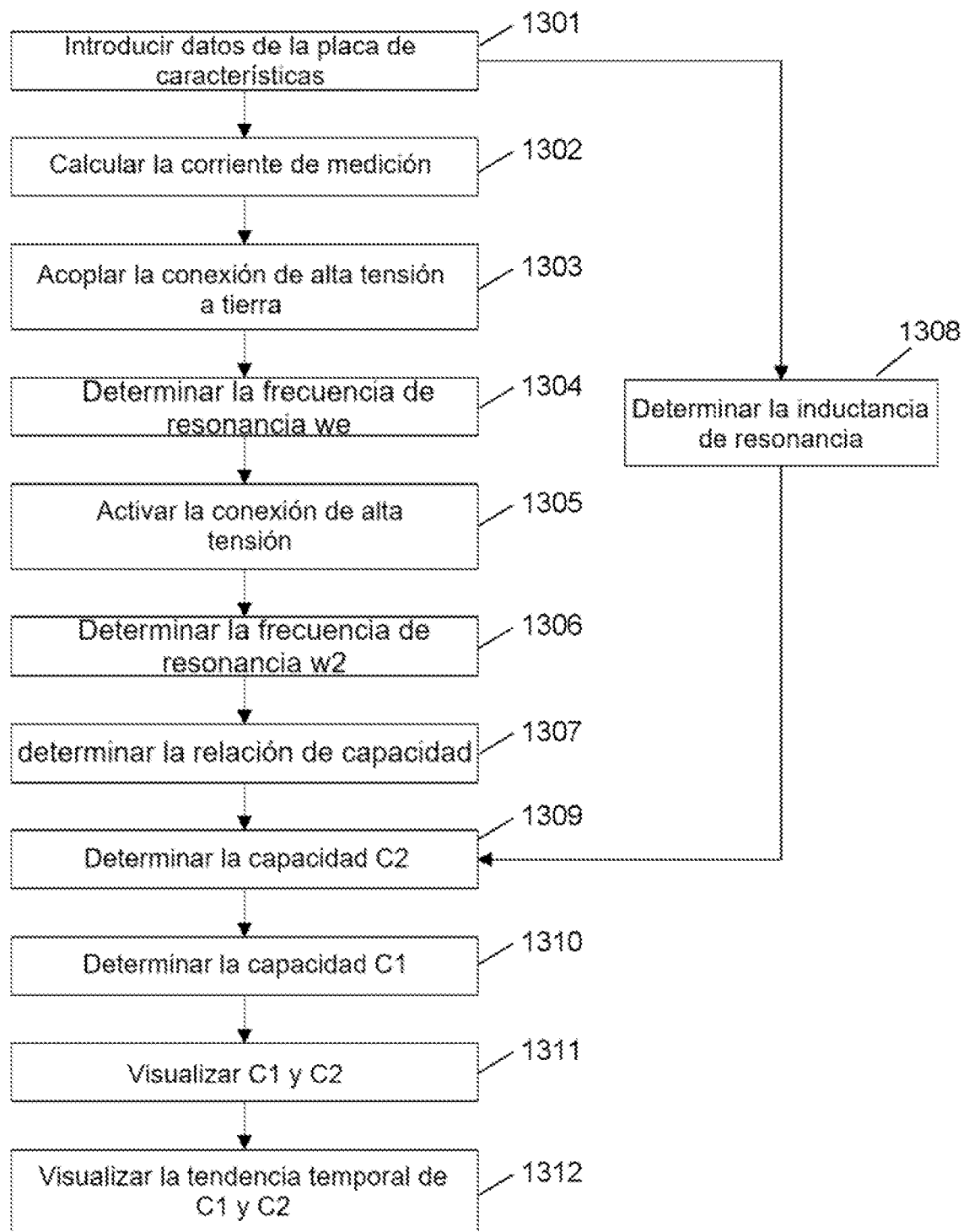


Fig. 12

**Fig. 13**

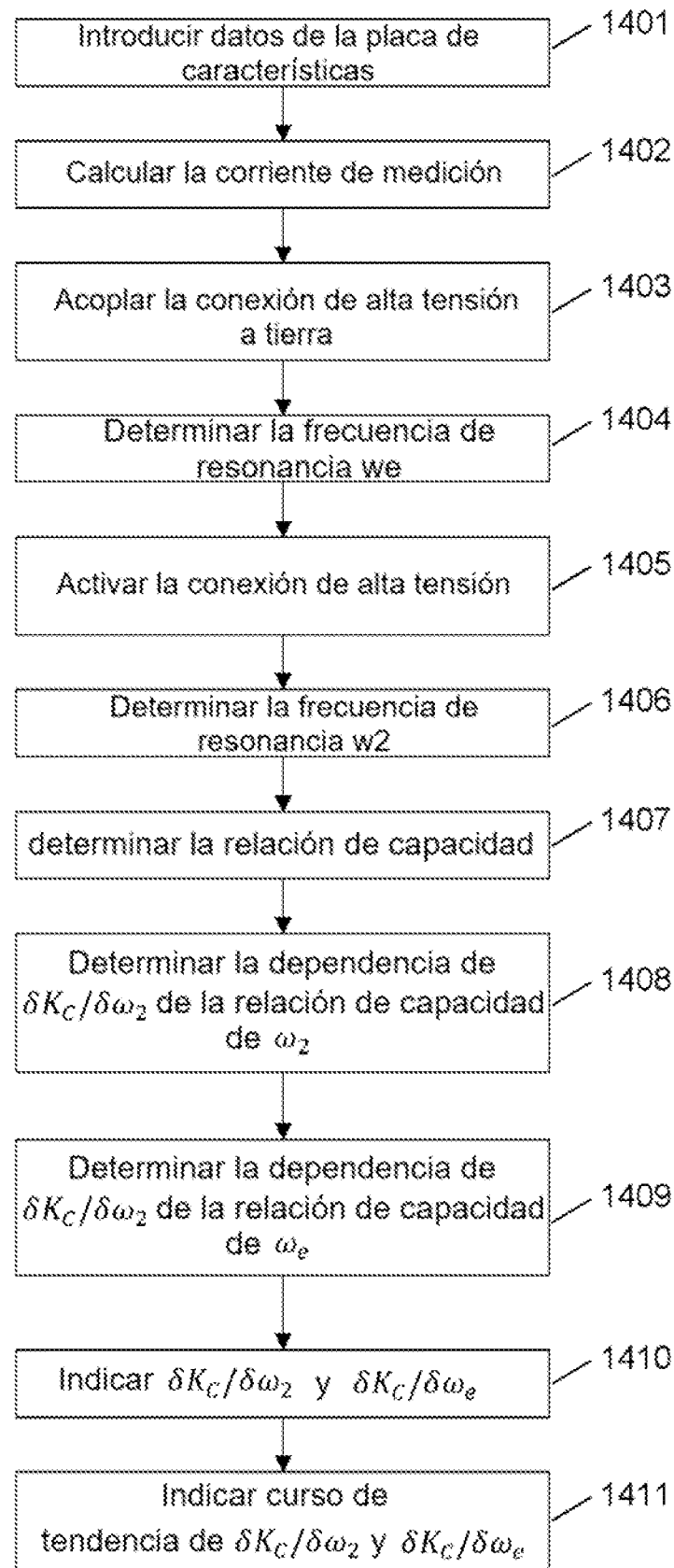


Fig. 14

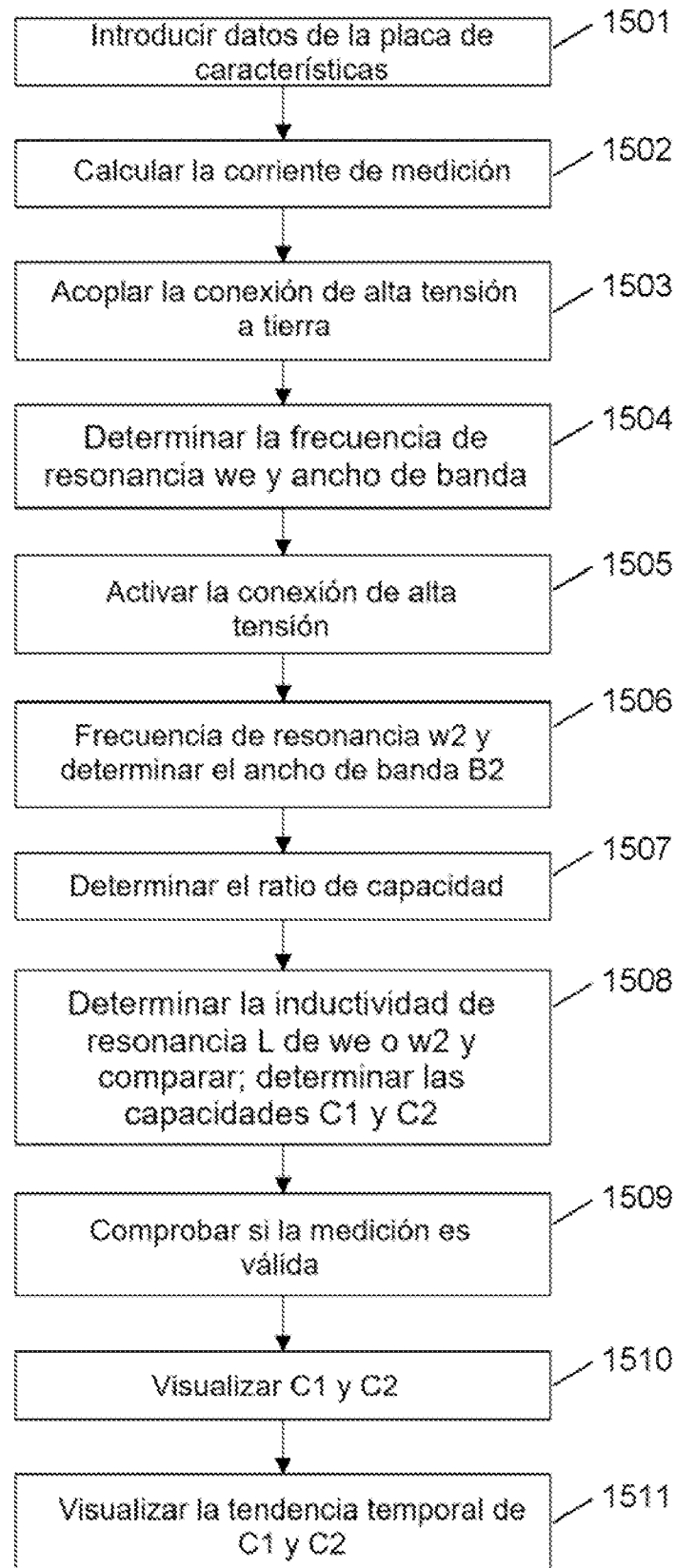


Fig. 15