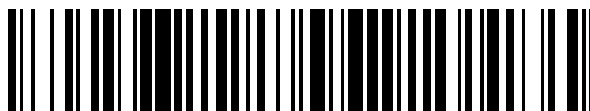


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 741 848**

51 Int. Cl.:

G01R 15/24 (2006.01)

G01R 35/00 (2006.01)

G01R 19/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **02.09.2016 E 16187127 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **15.05.2019 EP 3290931**

54 Título: **Sensor interferométrico de tensión con compensación de errores**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
12.02.2020

73 Titular/es:

ABB SCHWEIZ AG (100.0%)
Brown Boveri Strasse 6
5400 Baden , CH

72 Inventor/es:

GU, XUN;
BOHNERT, KLAUS y
MARCHESE, SERGIO VINCENZO

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 741 848 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

Sensor interferométrico de tensión con compensación de errores

Campo de la invención

5 Esta invención se refiere a la estrategia de compensación de error sistemático utilizada en un sensor óptico de tensión. Versa sobre un método y un dispositivo para medir tensiones.

Antecedentes de la invención

10 Las ventajas de la estrategia de medición de la detección de la fase de modulación (MPD) reflexiva [2] son, en particular, la excelente estabilidad de su factor de escala y su punto cero, necesarios ambos para la medición precisa de una tensión de CC. Para lograr el cambio del modo de polarización, un requisito clave para la MPD reflexiva, el concepto usa un rotador de Faraday de 45° insertado entre la fibra de mantenimiento de polarización (PM) y el cristal electroóptico del sensor de tensión. Se ha desarrollado un método de desambiguación basado en el contraste de interferencia para permitir la extensión del intervalo de medición no ambigua de tensión a ± 500 kV [1].

15 Sin embargo, en un sensor óptico de tensión real, los errores sistemáticos difíciles de evitar, como la desviación del ángulo de rotación de Faraday y la desalineación mecánica, conducen a errores de medición adicionales. Debido a los diferentes circuitos ópticos y un intervalo de medición de fase mucho mayor (~14 periodos de fase para el sensor de tensión en comparación con menos de un periodo para FOCS), el método de compensación utilizado actualmente en el sistema FOCS (basado en el equilibrio de la dependencia de primer orden de los parámetros del sistema con respecto a la temperatura, incluidos la constante de Verdet de la fibra de detección y el desfase QWR) no es aplicable al sensor de tensión. Además, la estrategia de compensación de errores sistemáticos para el sensor de tensión también debe funcionar bien junto con el método de desambiguación del periodo. Para alcanzar la precisión de medición requerida, los inventores han desarrollado un método novedoso para la compensación sistemática de errores en un sensor óptico de MPD reflexiva de la tensión de gran intervalo, que será descrito en esta invención.

20 La detección de la fase de modulación (MPD) [2] es una potente técnica de interrogación para medir el desfase en un sistema óptico. Los sensores MPD pueden, por ejemplo, implementarse en una configuración recíproca, ya sea en forma de un interferómetro Sagnac o en una forma reflexiva, para cancelar los desfases de elementos birrefringentes adicionales en el sistema (como las fibras PM o el cristal modulador de fase), que pueden derivar lentamente; por ejemplo, con el cambio de la temperatura o con alteraciones mecánicas.

25 La estrategia de detección por MPD también se puede utilizar para la detección óptica de la tensión. En la Figura 1 se muestra un dispositivo adecuado. Comprende un módulo 1 de optoelectrónica MPD para generar ondas a lo largo de ambas direcciones de polarización de una fibra 2 de mantenimiento de polarización (PM). Un colimador 3 envía estas ondas a través de un rotador 4 de Faraday de 45° y a un primer extremo del cristal 5 de efecto Pockels, que está siendo expuesto al campo eléctrico derivado de la tensión que ha de ser medida. En el segundo extremo del cristal, las ondas se reflejan en un reflector 6 y se envían de vuelta a través de los componentes 1 - 5 y al módulo 1 de optoelectrónica MPD.

30 El rotador 4 de Faraday hace rotar ambas polarizaciones lineales de la fibra PM 2 en 45° antes de que se propaguen a lo largo de los ejes electroópticos del cristal 5 de detección [3]. Las ondas reflejadas pasan nuevamente por el rotador 4 de Faraday, girando adicionalmente las polarizaciones otros 45° en la misma dirección, haciendo así una rotación combinada de 90° de las polarizaciones de entrada, que es equivalente a un intercambio entre las dos polarizaciones lineales ortogonales.

35 Se hace que las dos polarizaciones que regresan se interfieran en el módulo 1 de optoelectrónica MPD, lo que da lugar a una señal con una dependencia básicamente periódica de la tensión que ha de medirse.

40 Si el intervalo de tensión supera la tensión π del cristal de detección (por ejemplo, 75 kV para el BGO), es necesario resolver la ambigüedad del periodo de desfase para determinar de manera única la tensión aplicada. Esto es particularmente crítico para las mediciones de CC, en las que no son aplicables los métodos de seguimiento de historial, como el recuento de cruces por cero.

45 Con este fin, se puede usar el contraste de la interferencia de una fuente de luz de baja coherencia para determinar el periodo de desfase [1]. Se puede mostrar que tanto para un sistema MPD de modulación sinusoidal de bucle abierto como para un sistema de modulación de onda cuadrada de bucle cerrado, es posible medir el contraste de interferencia, además del valor principal del desfase, y combinarlos para determinar un valor de tensión único.

50 Idealmente, el rotador 4 de Faraday tiene un ángulo de rotación perfecto de 45°, y los ejes de la fibra PM están alineados exactamente a 45° con respecto a los ejes electroópticos del cristal 5 de detección. Sin embargo, en un sensor real, las desviaciones en el ángulo de rotación de Faraday y en la alineación angular son difíciles de evitar, y el ángulo de rotación de Faraday también depende en gran medida de la longitud de onda y de la temperatura. Estos errores sistemáticos pueden hacer que el resultado de la medición se desvíe significativamente de las expectativas teóricas.

55

Compendio de la invención

Por ende, el problema que ha de resolverse es proporcionar un método y un dispositivo de este tipo con un intervalo de medición grande que sea menos sensible a desalineaciones y/o variaciones de la rotación en el rotador de Faraday.

5 Este problema se resuelve mediante el método y el dispositivo de las reivindicaciones independientes. Las realizaciones están dadas por las reivindicaciones dependientes, sus combinaciones y la descripción junto con los dibujos.

En particular, el método comprende las etapas de:

- Colocar un elemento electroóptico en un campo eléctrico generado por dicha tensión: el elemento electroóptico actúa como un dispositivo de detección y, de manera ventajosa, tiene una birrefringencia que depende del campo eléctrico.

10 - Hacer pasar luz de una fuente de luz a través de un rotador de Faraday y a través del elemento electroóptico hasta un reflector y desde ahí que retroceda a través del elemento electroóptico y a través del rotador de Faraday: esta luz se usa para sondear el cambio del índice de refracción en el elemento electroóptico. Sufrirá un desfase entre dos polarizaciones, en particular entre dos polarizaciones que están orientadas a lo largo de los ejes electroópticos principales del elemento electroóptico. El desfase es una función del campo eléctrico y, por lo tanto, de la tensión que ha de ser medida.

15 - Medir el contraste de interferencia k , así como el valor principal φ del desfase total ϕ entre dichas polarizaciones: como se describe, por ejemplo, en [1], estos dos parámetros serían básicamente suficientes para determinar la tensión. Sin embargo, en el contexto actual, no se pueden utilizar directamente debido a los errores sistemáticos mencionados anteriormente.

20 - Calcular un contraste de interferencia corregido \tilde{k} y un valor principal corregido $\tilde{\varphi}$. Estos valores corregidos se calculan a partir del valor principal medido φ de un desfase total ϕ usando valores de calibración. Concretamente, la operación que convierte los valores medidos k y φ en los valores corregidos \tilde{k} y $\tilde{\varphi}$ debe cumplir las siguientes propiedades matemáticas:

$$\tilde{\varphi} = \arg \tilde{K}, \quad \tilde{k} = |\tilde{K}|,$$

25 siendo \tilde{K} un valor complejo compensado dado por

$$\tilde{K} = \left[\frac{\operatorname{Re}(K - K_0)}{r_1} + i \frac{\operatorname{Im}(K - K_0)}{r_2} \right] r_0 \cdot e^{i\alpha}$$

donde r_1 , r_2 , K_0 y α son valores de calibración, r_0 es un valor real constante distinto de cero, y K es un valor complejo no compensado dado por los valores medidos k y φ como

$$K = k e^{i\varphi}$$

30 - Como última etapa, deducir dicha tensión utilizando el contraste de interferencia corregido \tilde{k} y el valor principal corregido $\tilde{\varphi}$. Esta etapa puede ahora, por ejemplo, proceder como se describe en [1], pero utilizando los valores corregidos en lugar de los valores medidos originalmente.

La invención también se refiere a un dispositivo para medir una tensión. El dispositivo comprende

un rotador de Faraday,

35 un elemento electroóptico,

un reflector,

40 una fuente de luz posicionada para enviar luz a través de dicho rotador de Faraday y dicho elemento electroóptico hasta el reflector y, desde ahí, que retroceda a través de dicho elemento electroóptico y dicho rotador de Faraday, sufriendo las dos polarizaciones de dicha luz (concretamente, las polarizadas a lo largo de los ejes principales del índice de refracción del elemento electroóptico) sufren un desfase dependiente de la tensión en dicho elemento electroóptico,

un detector de luz colocado para medir una interferencia entre dichas dos polarizaciones que regresan de ese elemento electroóptico y dicho rotador de Faraday, y

una unidad de control adaptada y estructurada para llevar a cabo en las etapas descritas anteriormente.

El método puede comprender, además, etapas de calibración. Estas etapas de calibración comprenden:

- someter el elemento electroóptico a un campo eléctrico variable, y
- medir dicho contraste de interferencia k así como dicho valor principal φ para varios valores de dicho campo eléctrico variable y calcular al menos uno de dichos valores de calibración r_1, r_2, K_0 a partir de los mismos.

5 En otras palabras, el contraste y el valor principal se miden para varios valores de tensión de la tensión de referencia. Utilizando los valores medidos del contraste y el valor principal en los diversos valores de tensión, se pueden calcular uno o más de los valores de calibración.

La medición de los valores de calibración de esta manera permite medir la tensión de forma precisa y rápida.

Ventajosamente, todos los valores de calibración se calculan en dichas etapas de calibración.

10 En otra realización ventajosa adicional, se hace que el campo eléctrico variable varíe en un intervalo suficiente para generar desfases entre dichas polarizaciones que varían al menos π , en particular en al menos 2π .

Esto se basa en el entendimiento de que el valor complejo no compensado K es sustancialmente periódico en el desfase entre las polarizaciones y describe una espiral en el plano complejo. El centro, así como las amplitudes de los ejes real e imaginario de esta espiral básicamente describen los valores de calibración. El argumento complejo de K corresponde sustancialmente al desfase entre la polarización. El centro y las amplitudes del eje de la espiral se pueden determinar mejor variando el desfase al menos en π , en particular en al menos 2π .

15 Las etapas de calibración comprenden ventajosamente la etapa de determinar un centro y factores de escala reales e imaginarios de una espiral que conecta dicho valor complejo no compensado K al variar dicho valor principal φ .

La invención se basa en la idea de que se necesita un modelo y una estrategia perfeccionados para tener en cuenta y compensar los errores causados por la desalineación de los componentes y las rotaciones distintas de 45° en el rotador de Faraday.

20 La invención es particularmente adecuada para medir altas tensiones de al menos 100 kV, en particular de al menos 500 kV. Se puede usar ventajosamente para tensiones de corriente continua. Pero también se puede usar para medir tensiones de CA, en cuyo caso se puede usar el aumento de la pendiente descendente de la tensión para determinar los valores corregidos \bar{k} y $\bar{\varphi}$.

25 La técnica puede proporcionar una alta precisión, con errores $< 0,2\%$.

La técnica puede proporcionar una alta precisión, con errores $< 0,2\%$.

El sensor y el método son, por ejemplo, ideales para diversas aplicaciones de HVDC, incluyendo HVDC Light, HVDC Classic y HVDC para aplicaciones de CC en alta mar; por ejemplo, en una CC GIS. Por consiguiente, la invención también se refiere al uso del dispositivo o del método para medir una tensión de CC de al menos 100 kV.

30 Breve descripción de las figuras.

La invención se comprenderá mejor y otros objetos distintos de los expuestos anteriormente se harán evidentes cuando se considere la siguiente descripción detallada de los mismos. Esta descripción hace referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

la Figura 1 muestra un dispositivo para la medición electroóptica de tensiones,

35 la Figura 2a muestra el contraste de interferencia k y la potencia óptica no modulada I/I_0 como funciones de la tensión aplicada y el correspondiente desfase, ejemplarmente para un sensor reflexivo ideal de tensión de BGO, con un espectro gaussiano de anchura a media altura FWHM de 40 nm centrado a 1310 nm, y un desplazamiento de retardo de grupo $\tau_0 = -60$ fs;

40 la Figura 2b muestra el trazado de la salida compleja $K = ke^{i\varphi}$ recuperada por MPD del sensor de tensión ideal en el intervalo de tensión [-500 kV, 500 kV] en el plano complejo; el símbolo del aspa indica el centro de la espiral, que está en el origen del plano complejo;

la Figura 3a muestra trazados de la salida compleja $K = ke^{i\varphi}$ recuperada por MPD en el intervalo de tensión [-500 kV, 500 kV], para un sensor de tensión no ideal con $\varepsilon_{F0} = 10^\circ$ y $\varepsilon_\theta = 0^\circ$ y un sensor con $\varepsilon_{F0} = 0^\circ$ y $\varepsilon_\theta = 10^\circ$, respectivamente; los símbolos en aspa indican los centros en espiral determinados por el método M1 aquí propuesto;

45 la Figura 3b muestra errores de medición de fase no compensados, es decir, $\arg K - \varphi (\phi_0 + \pi)$, para los dos sensores no ideales de la Figura 3a;

la Figura 4a muestra los trazados de la K no compensada y la \bar{K} compensada, calculada con el método propuesto, para un sensor no ideal con $\varepsilon_{F0} = 10^\circ$ y $\varepsilon_\theta = 0^\circ$; los símbolos en aspa indican los centros espirales calculados; los parámetros de compensación se determinan con el método M1;

la Figura 4b muestra los errores de desfase para las salidas no compensadas, compensadas (con el método M1) y optimizadas (ajustadas).

Descripción detallada

Introducción, dispositivo:

5 Ya se han descrito los principios básicos del dispositivo de la Figura 1.

Comprende un módulo 1 de optoelectrónica MPD para generar ondas a lo largo de ambas direcciones de polarización de una fibra 2 de mantenimiento de polarización (PM). Un colimador 3 envía estas ondas a través de un rotador 4 de Faraday a 45° y hacia un primer extremo del cristal 5 de efecto Pockels, que está siendo expuesto al campo eléctrico derivado de la tensión que ha de ser medida. En el segundo extremo del cristal, las ondas se reflejan en un reflector 6 y se envían de vuelta a través de los componentes 1 - 5 y al módulo 1 de optoelectrónica MPD.

10 El rotador 4 de Faraday hace rotar ambas polarizaciones lineales de la fibra PM 2 en 45° antes de que se propaguen a lo largo de los ejes electroópticos (ejes principales del índice de refracción) del cristal de detección 5 [3]. Las ondas reflejadas pasan nuevamente por el rotador 4 de Faraday, girando adicionalmente las polarizaciones en 45° en la misma dirección, haciendo así una rotación combinada de 90° de las polarizaciones de entrada, que es equivalente a un intercambio entre las dos polarizaciones lineales ortogonales.

15 El módulo 1 de optoelectrónica MPD está adaptado para medir el contraste de interferencia k , así como el valor principal φ del desfase total ϕ entre las dos polarizaciones que regresan de la fibra PM 2, es decir, $\varphi = \text{vp}(\phi) = \phi \text{ mod } 2\pi$.

20 El módulo 1 de optoelectrónica comprende un modulador 7 de fase adaptado para introducir un desfase ϕ_m entre las dos polarizaciones de luz que retornan en la fibra PM 2 antes de hacer que se interfieran en un detector 8.

Además, comprende una fuente 9 de luz que genera la luz para pasar a través de la fibra PM 2 y el cristal 5. La longitud de coherencia de la fuente 9 de luz está ventajosamente entre $5 \cdot \lambda_0$ y $100 \cdot \lambda_0$, siendo λ_0 la longitud de onda central de la fuente de luz, para obtener una buena variación del contraste de interferencia k al cambiar la fase entre las dos polarizaciones unos pocos múltiplos de 2π .

25 El dispositivo comprende, además, una unidad 10 de control adaptada y estructurada para llevar a cabo los métodos de medición y compensación de errores descritos a continuación. Puede, por ejemplo, estar formado por un microprocesador o microcontrolador provisto de circuitos de interfaz adecuados.

El contraste de interferencia k y valor principal φ pueden ser determinados, por ejemplo, según se describe en [1].

30 A continuación, se muestra que el trazado de una salida compleja con su valor absoluto igual al contraste de interferencia k medido por MPD y su argumento igual al valor principal φ del desfase medido por MPD es una curva espiral en el plano complejo. La influencia de los errores sistemáticos en un sensor óptico reflexivo de tensión, como el error del ángulo de rotación de Faraday y el error de alineación del eje, se puede representar como un desplazamiento del centro de la espiral desde el origen del plano complejo y la escala de los radios de la espiral a lo largo de los ejes real e imaginario. El error de medición sistemático se puede compensar entonces mediante el

35 recenterado y el reescalado del trazado espiral medido, lo que produce una medición de desfase más precisa.

Sistema ideal con fuente de luz monocromática:

Matemáticamente, la propagación de la luz polarizada en un sensor de tensión ideal entre los dos pasos a través del rotador 3 de Faraday se puede describir mediante una matriz de Jones en la base de las polarizaciones lineales en los ejes de la fibra PM como

40
$$T = \begin{bmatrix} f & -g^* \\ g & f^* \end{bmatrix} = R(-45^\circ)R(-45^\circ)S(\phi)R(-45^\circ)R(45^\circ) = R(-90^\circ)S(\phi)R(0^\circ)$$

donde la matriz

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta \\ \text{sen}\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

describe la rotación por θ en la base lineal, y

$$S(\phi) = \begin{bmatrix} ie^{i\phi/2} & 0 \\ 0 & -ie^{-i\phi/2} \end{bmatrix}$$

5 describe las etapas de avance y retorno a través del cristal sensor con un reflejo entre las mismas. El desfase electroóptico ϕ de doble paso es proporcional a la tensión aplicada V , que se pretende obtener de la medición. De derecha a izquierda en secuencia, las matrices componentes representan una rotación de Faraday de 45° , una rotación de -45° entre la fibra PM 2 y los ejes electroópticos del cristal de detección 4, la reflexión especular, el retardo de fase en el cristal 4, la rotación de los ejes y la rotación de Faraday en el marco de referencia reflejado, respectivamente.

Escribiendo los elementos de la matriz de T , encontramos

$$f = 0, \quad g = -\text{sen} \frac{\phi}{2} + i \cos \frac{\phi}{2} = ie^{i\phi/2}$$

10 En un sistema MPD, se añade una modulación de fase ϕ_m a la señal óptica, lo que resulta en una potencia óptica modulada

$$I = \frac{I_0}{2} [1 + \text{Re}(g^2 e^{i\phi_m})]$$

15 Con una forma de onda de modulación adecuada y una estrategia de demodulación, se pueden obtener tanto el valor principal del desfase $\varphi = \arg g^2$ como el contraste de interferencia $k = |g^2|$; véase, por ejemplo, [1]. El contraste k y principal valor de desfase φ se pueden combinar en un valor complejo K como

$$K = ke^{i\varphi} = g^2.$$

Para el sensor de tensión ideal descrito anteriormente, $K = -e^{i\phi}$, así que $\varphi = \text{vp}(\phi + \pi)$ y $k = 1$, denominándose a $\text{vp}(x) = x \bmod 2\pi$ valor principal. El desfase π en φ surge de la quiralidad especular entre una rotación de 90° y un simple intercambio de dos polarizaciones ortogonales.

20 Fuente de luz de baja coherencia

El resultado presentado más arriba es válido solo para un sistema MPD que opera en una sola longitud de onda. Cuando se usa una fuente de luz de baja coherencia, en el espectro de banda ancha hay contenido un conjunto de longitudes de onda. La dependencia espectral del desfase electroóptico ϕ se puede expresar como una serie de Taylor hasta el primer orden

$$25 \quad \phi = \phi_0 + (\tau + \tau_0)(\omega - \omega_0),$$

30 donde ϕ_0 es el desfase electroóptico en la frecuencia angular central ω_0 , τ es el retardo del grupo electroóptico, y τ_0 es el desplazamiento de retardo de grupo de todo el sistema de sensores (debido a otros elementos birrefringentes contenidos en el mismo). De forma importante para la desambiguación del periodo, el retardo del grupo electroóptico τ es proporcional al desfase electroóptico ϕ_0 cuando la tensión aplicada varía. Para el BGO, $\tau/\phi_0 = 0,76 \text{ fs/rad}$ a 1310 nm .

La potencia luminosa detectada en el sistema MPD es el promedio de conjunto en todo el espectro.

$$\langle I \rangle = \frac{1}{2} [1 + \text{Re}(\langle g^2 \rangle e^{i\phi_m})],$$

donde $\langle x \rangle = \int xS(\omega) d\omega$ denota el conjunto espectral promedio de una cantidad x , y $S(\omega)$ es la densidad espectral normalizada (es decir, $S(\omega)d\omega = 1$) de la potencia óptica centrada alrededor ω_0 .

35 La salida compleja recuperada por MPD es entonces un promedio de conjunto $K = ke^{i\varphi} = \langle g^2 \rangle = -\langle e^{i\phi(\omega)} \rangle$, donde el valor principal del desfase es $\varphi = \text{vp}(\phi_0 + \pi)$, y el contraste de interferencia $k = A(\tau + \tau_0) = \int S(\omega) e^{i(\tau + \tau_0)(\omega - \omega_0)} d\omega$ es la función de coherencia $A(\tau)$ evaluada en el retardo de grupo $\tau + \tau_0$.

Si se elige el intervalo operativo del sensor seleccionando un desfase de retardo de grupo apropiado τ_0 (por medio de un elemento birrefringente; por ejemplo, un cristal birrefringente) para representar un intervalo donde la función de

coherencia $A(\tau)$ varía mucho y monótonamente, la salida compleja $K = ke^{i\varphi}$ recuperada por MPD trazada en el plano complejo es una curva espiral que emana del origen del plano complejo (o que converge en el mismo). Como ejemplo, para un sensor de tensión de BGO (tensión π 75 kV) con un espectro gaussiano FWHM de 40 nm centrado a 1310 nm, una opción adecuada de τ_0 para cubrir ± 500 kV sería alrededor de ± 60 fs. En todos los cálculos siguientes, se asume tal espectro y $\tau_0 = -60$ fs. En las Figuras 2a y 2b se representan el desfase, el contraste de interferencia y el trazado de salida compleja recuperados por MPD para el sensor de tensión ideal.

Errores sistemáticos:

La situación es, sin embargo, más complicada en presencia de errores sistemáticos. Por ejemplo, el ángulo de rotación de Faraday puede no ser exactamente de 45° , o los ejes de la fibra PM pueden no estar alineados exactamente a 45° con los ejes electroópticos del cristal de detección. En tales casos, se produce un acoplamiento cruzado entre polarizaciones ortogonales a medida que las ondas entran y salen del cristal de detección, lo que perturbaría el resultado de la medición por MPD.

Si definimos la rotación de Faraday como $45^\circ + \varepsilon_F$, (describiendo ε_F la desviación de la rotación ideal de 45°) y el ángulo entre los ejes electroópticos del elemento sensor y los ejes de fibra PM como $45^\circ + \varepsilon_\theta$ (describiendo ε_θ la desviación de la alineación ideal de los ejes de fibra PM), la matriz del sensor entre los dos pasos a través del rotador de Faraday es

$$T = \begin{bmatrix} f & -g^* \\ g & f^* \end{bmatrix} = R(-45^\circ - \varepsilon_F) R(-45^\circ - \varepsilon_\theta) S(\phi) R(-45^\circ - \varepsilon_\theta) R(45^\circ + \varepsilon_F) \\ = R(-90^\circ - \varepsilon_\theta - \varepsilon_F) S(\phi) R(-\varepsilon_\theta + \varepsilon_F)$$

Los elementos de la matriz son ahora

$$f = \sin \frac{\phi}{2} \sin 2\varepsilon_\theta - i \cos \frac{\phi}{2} \sin 2\varepsilon_F \\ g = \sin \frac{\phi}{2} \cos 2\varepsilon_\theta + i \cos \frac{\phi}{2} \cos 2\varepsilon_F$$

Con un espectro de banda ancha, también debería tenerse en cuenta la dependencia de la longitud de onda del ángulo de rotación de Faraday. En una serie de Taylor hasta el primer orden, la desviación del ángulo de rotación de Faraday se puede escribir como

$$\varepsilon_F = \varepsilon_{F0} + \kappa (\omega - \omega_0)$$

Por ejemplo, para un rotador Faraday de TGG, el ángulo del rotador de Faraday θ_F varía de acuerdo a $\theta_F = C/(\lambda^2 - \lambda_0^2)$, donde $\lambda_0 = 258,2$ nm. Por lo tanto, se puede estimar que un rotador Faraday de TGG de 45° a 1310 nm tendría $\kappa = 1,13$ fs, que es mucho más pequeño en comparación con el retardo de grupo electroóptico típico τ (por ejemplo, 20 fs a 1310 nm para un sensor reflexivo de BGO a 320 kV), por lo que podemos ignorarlo.

La variable compleja $K = ke^{i\varphi}$ recuperada por MPD, que se puede construir a partir del valor principal φ del desfase medido por MPD y del contraste de interferencia k , es ahora, después de promediar la longitud de onda-conjunto,

$$K = \langle g^2 \rangle = -\langle \cos^2 \phi \cos^2 2\varepsilon_F \rangle + \langle \sin^2 \phi \rangle \cos^2 2\varepsilon_\theta - i \langle \sin 2\phi \cos 2\varepsilon_F \rangle \cos 2\varepsilon_\theta$$

En la Figura 3a se representan los trazados K calculados para dos sensores de tensión no ideales. Los trazados todavía tienen forma de espiral; sin embargo, con algunas diferencias importantes con respecto al caso ideal:

1. El centro de la espiral está desplazado con respecto al origen del plano complejo a lo largo del eje real.
2. Los radios de la curva espiral cambian a lo largo de los ejes tanto real como imaginario en diferentes proporciones, lo que hace que la espiral sea elíptica; es decir, las amplitudes reales e imaginarias de la espiral cambian de escala.

Además, observamos que los signos de ε_{F0} y ε_θ no influyen en el trazado K . Con un ε_{F0} distinto de cero, la espiral se desplaza positivamente a lo largo del eje real, mientras que con un ε_θ distinto de cero, la espiral se desplaza negativamente. Por lo tanto, es posible compensar el error del ángulo de rotación de Faraday con una "desalineación" correspondiente de los ejes de fibra PM.

Generalmente, en un sensor no ideal, $\arg K \neq \text{vp}(\phi_0 + \pi)$ y $|K| \neq A(\tau + \tau_0)$. Por lo tanto, el desfase calculado utilizando la estrategia de procesamiento de señal descrita anteriormente para un sensor ideal contendría un error de medición, que se representa gráficamente en la Figura 3b. Se requiere un método adecuado de compensación para alcanzar la precisión requerida.

5 Compensación de errores:

Los inventores proponen un novedoso procedimiento de compensación con las siguientes etapas:

1. Determinar, en particular en una medición de calibración, el centro K_0 de la espiral en el plano complejo, y los radios de la espiral en los ejes real e imaginario (r_1 y r_2).

10 2. Al realizar una medición en vivo, desplazar el centro de la espiral al origen del plano complejo y volver a cambiar de escala en direcciones tanto real como imaginaria. Por lo tanto, se calcula un valor de salida complejo compensado

$$\tilde{K} = \left[\frac{\text{Re}(K - K_0)}{r_1} + i \frac{\text{Im}(K - K_0)}{r_2} \right] r_0 \quad (1)$$

donde r_0 es el contraste de interferencia nominal a la tensión aplicada. Es un valor constante de valor real distinto de cero y se puede elegir libremente por conveniencia. Se puede, por ejemplo, fijar en 1 o el contraste teórico de interferencia óptica a tensión cero.

15 3. Calcular el desfase compensado y el contraste de interferencia basándose en la salida compleja compensada

$$\tilde{\varphi} = \arg \tilde{K}, \quad \tilde{k} = |\tilde{K}|$$

A continuación, las salidas compensadas se pueden usar de la misma manera que para las salidas del sensor ideal; es decir,

$$\tilde{\varphi} = \text{vp}(\phi + \pi), \quad \tilde{k} = A(\tau + \tau')$$

20 Los valores de K_0 (que es un valor complejo), r_1 y r_2 (ambos de valor real) son valores de calibración, que se determinan en un proceso de calibración. Por ejemplo, en este proceso, uno puede variar la tensión aplicada V en un cierto intervalo, y registrar la salida compleja $K(V)$ al mismo tiempo. El intervalo de tensión seleccionado debe cubrir preferiblemente al menos una tensión de π para un sensor reflexivo de tensión, por lo que el trazado $K(V)$ haría al menos un círculo completo alrededor de K_0 . El intervalo de tensión seleccionado debe estar en una región en la que

25 la función de coherencia $A(\tau + \tau_0)$ sea en gran medida lineal con la tensión. Mediante un ajuste adecuado del trazado $K(V)$ medido a un modelo en espiral de Arquímedes a escala, se pueden determinar fácilmente el centro K_0 y los radios (factores de escala real e imaginario) $r_{1,2}$.

También pueden funcionar bien métodos más simples con el mismo propósito sin requerir un ajuste de curvas que exija gran potencia de cálculo. Aquí se dan dos métodos ejemplares:

30 **M1.** En un trazado de calibración $K(V)$ de círculo completo, se puede ubicar el punto con la parte real más grande K_{r1} , el punto con la parte real más pequeña K_{r2} , el punto con la parte imaginaria más grande K_{i1} , y el punto con la parte imaginaria más pequeña K_{i2} . En general, $\text{Re}(K_0) = \text{Re}(K_{r1}) = \text{Re}(K_{i2})$ e $\text{Im}(K_0) = \text{Im}(K_{r1}) = \text{Im}(K_{i2})$. Podría entonces establecerse

$$K_0 = \text{Re}\left(\frac{K_{i1} + K_{i2}}{2}\right) + i \text{Im}\left(\frac{K_{r1} + K_{r2}}{2}\right),$$

35 y

$$r_1 = \text{Re}\left(\frac{K_{r1} - K_{r2}}{2}\right), \quad r_2 = \text{Re}\left(\frac{K_{i1} - K_{i2}}{2}\right).$$

M2. Además de estos puntos, también se pueden usar los puntos correspondientes en un círculo posterior (K'_{r1} o K'_{i1}) al variar la tensión aplicada aún más. Entonces,

$$K_0 = (K_{r1} + K'_{r1} + 2K_{r2})/4 = (K_{i1} + K'_{i1} + 2K_{i2})/4$$

También se pueden usar muchas otras implementaciones, evitando el ajuste de curvas haciendo uso de algunos puntos característicos en la espiral para determinar sus parámetros.

5 La Figura 4 muestra la comparación entre los resultados no compensados y compensados, para un sensor no ideal con $\varepsilon_{F0} = 10^\circ$ y $\varepsilon_\theta = 0^\circ$. La compensación con los parámetros determinados por el método simple M1 da como resultado una reducción significativa del error de desfase con respecto al resultado no compensado. Un ajuste preciso adicional de los parámetros de la espiral calibrados utilizando un método de ajuste lleva a errores de desfase más bajos aún.

10 Según los cálculos teóricos, cabe esperar que la espiral se desplace solo a lo largo del eje real; es decir, que $\text{Im } K_0 = 0$. Si la medición por MPD incluye un desplazamiento desconocido debido a otros errores sistemáticos, el trazado de la salida compleja K se puede girar alrededor del origen, lo que haría que el centro de la espiral pareciera desplazado también a lo largo del eje imaginario. Se ha observado este efecto en algunas mediciones. Dicha rotación se puede describir reemplazando la Ec. (1) por

$$\tilde{K} = \left[\frac{\text{Re}(K - K_0)}{r_1} + i \frac{\text{Im}(K - K_0)}{r_2} \right] r_0 \cdot e^{i\alpha} \quad (1')$$

15 con $\alpha = \arg K'_0$, donde $K'_0 = K_0 e^{i\alpha}$ es el centro de la espiral determinado a partir del trazado \tilde{K} rotado. Una vez se determina α , se puede repetir el mismo procedimiento para $\tilde{K} e^{-i\alpha}$ para determinar los otros parámetros r_1 y r_2 de la espiral. Si no se requiere compensación de rotación, el valor de calibración α se puede establecer en 0 y no se requiere una medición de calibración explícita para su determinación.

20 Debido a que la desviación del ángulo de rotación de Faraday ε_{F0} y algunos otros parámetros (como el coeficiente electroóptico del cristal de detección) dependen de la temperatura, para un sensor de tensión que opera en un amplio intervalo de temperatura, la calibración mencionada anteriormente (etapa 1) debe realizarse a unas temperaturas representativas en el intervalo dado para determinar cómo varían estos parámetros con la temperatura. En operación real, se necesita una medición de temperatura paralela para ajustar adecuadamente estos parámetros para la condición de operación real.

25 Por ende, el presente método comprende ventajosamente las etapas de medir la temperatura en el rotador 4 de Faraday y seleccionar los valores de calibración en función de esta temperatura. En este caso, los valores de calibración se miden ventajosamente para varias temperaturas.

30 En una medición de tensión de CA, la tensión instantánea se desplaza continuamente a lo largo de una sección del trazado en espiral. Por lo tanto, es posible realizar las etapas de calibración (etapa 1 de calibración) en tiempo real durante una pendiente ascendente o descendente de la tensión. Si la desviación del ángulo de rotación de Faraday ε_{F0} tiene el mismo signo en todo el intervalo de temperatura, se puede usar la dependencia de la temperatura de los parámetros de espiral calibrados en tiempo real (también, opcionalmente, la dependencia de la temperatura de la compensación de retardo de grupo τ_0) para determinar la temperatura y para realizar la compensación de temperatura de otros parámetros; por ejemplo, del coeficiente electroóptico.

Notas:

35 El cristal electroóptico 5 puede ser reemplazado por cualquier otro elemento electroóptico que exhiba una birrefringencia que dependa del campo eléctrico aplicado.

En general, los valores de calibración r_1 , r_2 y K_0 y, opcionalmente, α , son dependientes del dispositivo.

Las técnicas que aquí se muestran permiten la compensación de errores sistemáticos para un sensor óptico de tensión de CC con un intervalo de medición $> \pm 500$ kV para lograr una precisión $< 0,2\%$.

40 Son ideales para aplicaciones en sistemas HVDC con aislamiento de aire, cables de HVDC y sistemas de conmutación de CC con aislamiento de gas (GIS). Dichos GIS pueden llenarse con gas dieléctrico a base de SF6 o gases alternativos, tales como fluorocetonas o fluoronitrilos, preferiblemente en mezclas con un gas residual, tal como seleccionado, por ejemplo, entre nitrógeno, dióxido de carbono y oxígeno.

Permiten compensar los errores del ángulo de rotación de Faraday y los errores en la alineación de la fibra PM.

45 También permiten compensar errores sistemáticos debidos a cambios de temperatura.

Aunque se muestran y describen las realizaciones actualmente preferidas de la invención, debe entenderse claramente que la invención no está limitada a las mismas, sino que, por lo demás, puede ser realizada y puesta en práctica de manera diversa dentro del alcance de las siguientes reivindicaciones.

Referencias citadas

[1] WO 2015/124676

[2] H. Lefèvre, *The Fiber-Optic Gyroscope*: Artech House, 1993.

[3] US 7911196.

5 Lista de números de referencia

- 1: Módulo optoelectrónico MPD
- 2: Fibra PM
- 3: Colimador
- 4: Rotador de Faraday
- 10 5: Cristal
- 6: Reflector
- 7: Modulador de fase
- 8: Detector
- 9: Fuente de luz
- 15 10: Unidad de control

REIVINDICACIONES

1. Un método para medir una tensión que comprende las etapas de:

colocar un elemento electroóptico (5) en un campo eléctrico generado por dicha tensión,

5 hacer pasar luz desde una fuente (9) de luz a través de un rotador (4) de Faraday y dicho elemento electroóptico (5) hasta un reflector (6) y desde ahí que retroceda a través de dicho elemento electroóptico (5) y dicho rotador (4) de Faraday, generando así un desfase dependiente de la tensión entre dos polarizaciones de dicha luz,

medir un contraste de interferencia k , así como un valor principal φ de un desfase total ϕ entre dichas polarizaciones, estando caracterizado el método por

calcular un contraste de interferencia corregido \tilde{k} y un valor principal corregido $\tilde{\varphi}$ a partir de

10
$$\tilde{\varphi} = \arg \tilde{K}, \quad \tilde{k} = |\tilde{K}|,$$

siendo \tilde{K} un valor complejo compensado dado por

$$\tilde{K} = \left[\frac{\operatorname{Re}(K - K_0)}{r_1} + i \frac{\operatorname{Im}(K - K_0)}{r_2} \right] r_0 \cdot e^{i\alpha}$$

donde r_1, r_2, K_0 y α son valores de calibración, r_0 es un valor real constante distinto de cero, y K es un valor complejo no compensado dado por

15
$$K = ke^{i\varphi}$$

y deducir dicha tensión usando dicho contraste de interferencia corregido \tilde{k} y el valor principal corregido $\tilde{\varphi}$.

2. El método de la reivindicación 1 que, además, comprende etapas de calibración que comprenden:

- someter dicho elemento electroóptico (5) a un campo eléctrico variable,

20 - medir dicho contraste de interferencia k , así como dicho valor principal φ para varios valores de dicho campo eléctrico variable y calcular al menos uno de dichos valores de calibración a partir de los mismos.

3. El método de la reivindicación 2 en el que todos los valores de calibración mencionados se calculan en dichas etapas de calibración.

4. El método de cualquiera de las reivindicaciones 2 o 3 en el que se hace que dicho campo eléctrico variable varíe en un intervalo suficiente para variar un desfase entre dichas polarizaciones en al menos π , en particular en al menos 2π .

5. El método de cualquiera de las reivindicaciones 2 a 4 en el que dichas etapas de calibración comprenden la etapa de determinar un centro y factores de escala reales e imaginarios de una espiral trazada por dicho valor complejo no compensado K al variar dicho valor principal φ .

6. El método de cualquiera de las reivindicaciones 2 a 5 en el que dichas etapas de calibración se llevan a cabo en una medición de calibración antes de medir dicha tensión.

7. El método de cualquiera de las reivindicaciones 2 a 5 en el que dicha tensión es una tensión de CA y dichas etapas de calibración se llevan a cabo durante una pendiente ascendente o descendente de dicha tensión.

8. El método de la reivindicación 7 que, además, comprende la etapa de determinar una temperatura a partir de dichos valores de calibración.

35 9. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6 que, además, comprende la etapa de medir una temperatura en dicho rotador (4) de Faraday y seleccionar dichos valores de calibración como funciones de dicha temperatura.

10. Un dispositivo para medir una tensión que comprende:

un rotador (4) de Faraday,

un elemento electroóptico (5),

40 un reflector (6),

una fuente (9) de luz posicionada para enviar luz a través de dicho rotador (4) de Faraday y dicho elemento electroóptico (5) hasta dicho reflector (6) y, desde ahí, que retroceda a través de dicho elemento electroóptico (5) y dicho rotador (4) de Faraday, sufriendo las dos polarizaciones de dicha luz un desfase dependiente de la tensión en dicho elemento electroóptico,

- 5 un detector (8) de luz colocado para medir una interferencia entre dichas dos polarizaciones que regresan de ese elemento electroóptico (5) y dicho rotador (4) de Faraday,

caracterizado por

una unidad de control (10) adaptada y estructurada para llevar a cabo las etapas de cualquiera de las reivindicaciones precedentes.

- 10 11. El uso del dispositivo o del método de cualquiera de las reivindicaciones precedentes para medir una tensión de CC de al menos 100 kV.

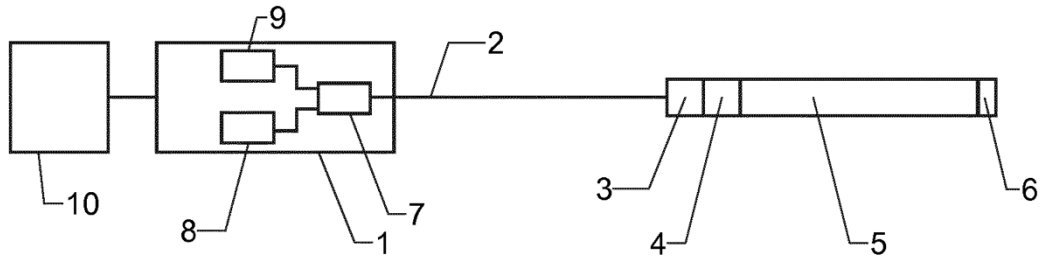


Fig. 1

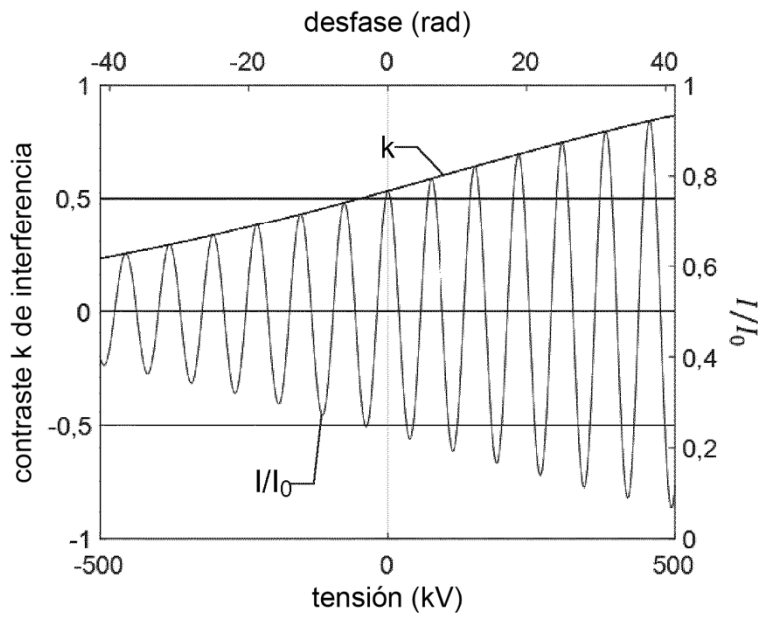


Fig. 2a

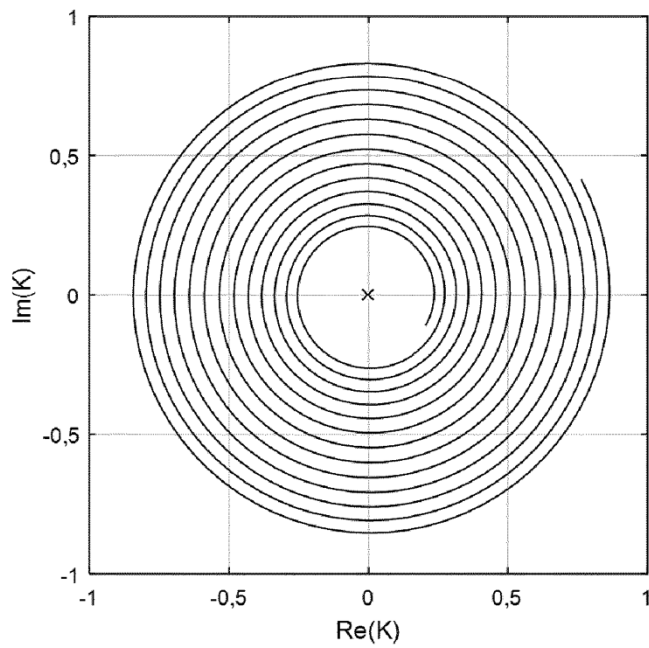
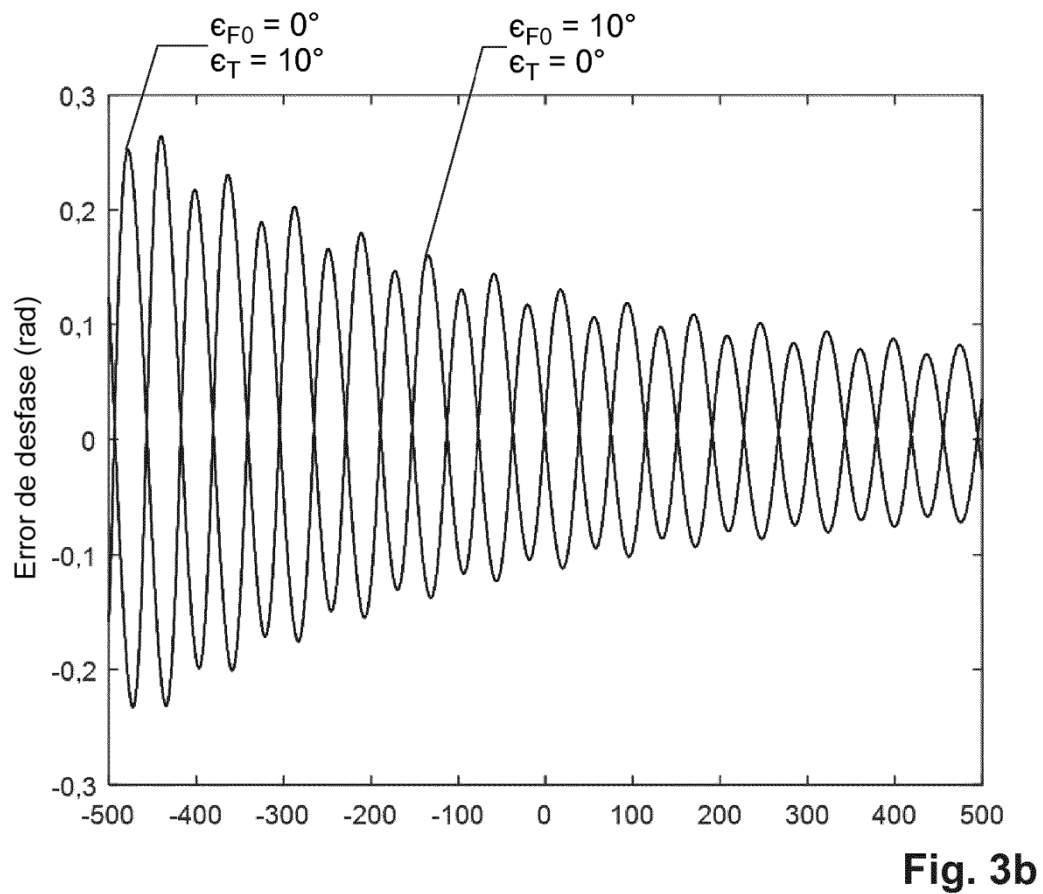
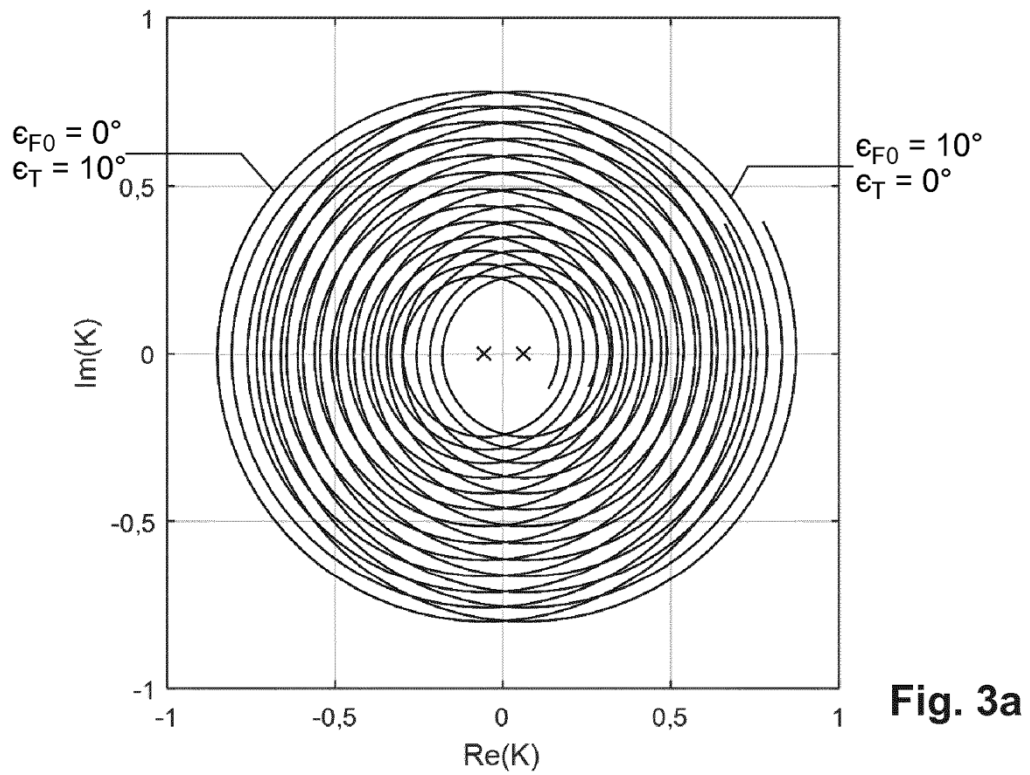


Fig. 2b



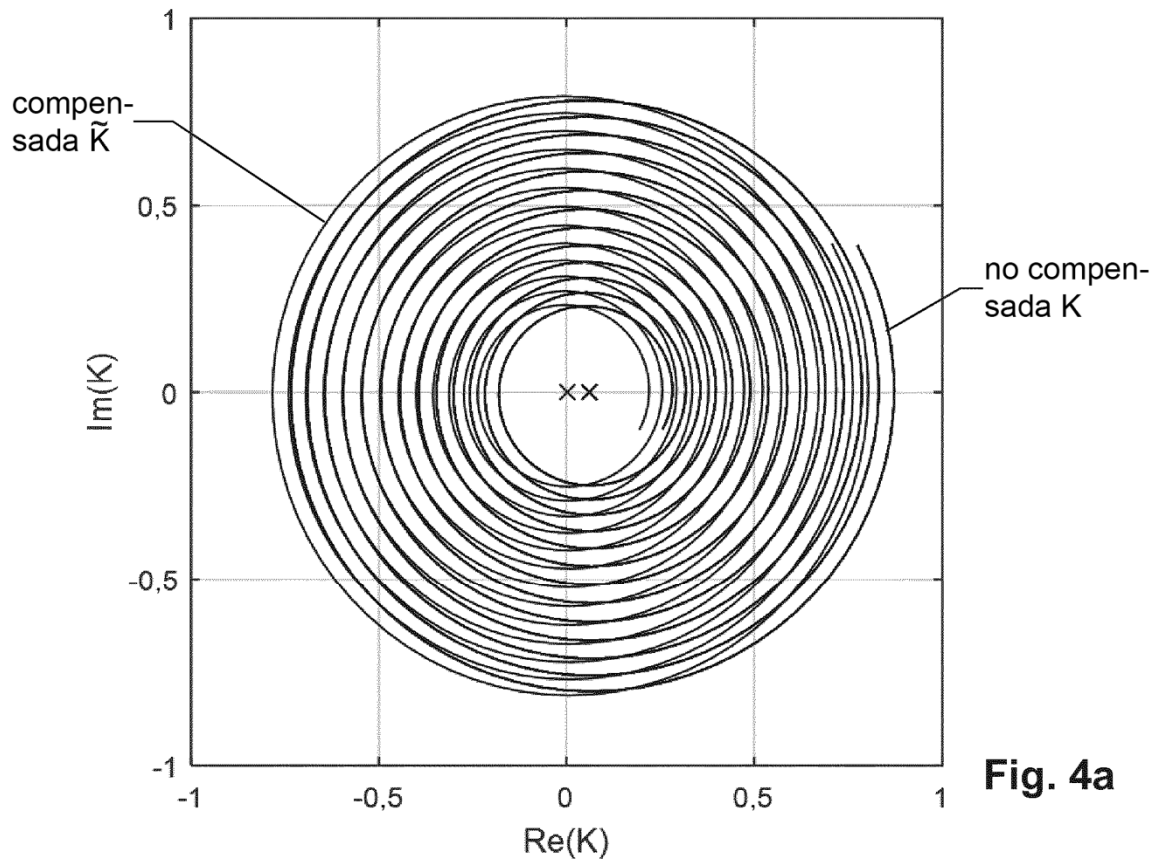


Fig. 4a

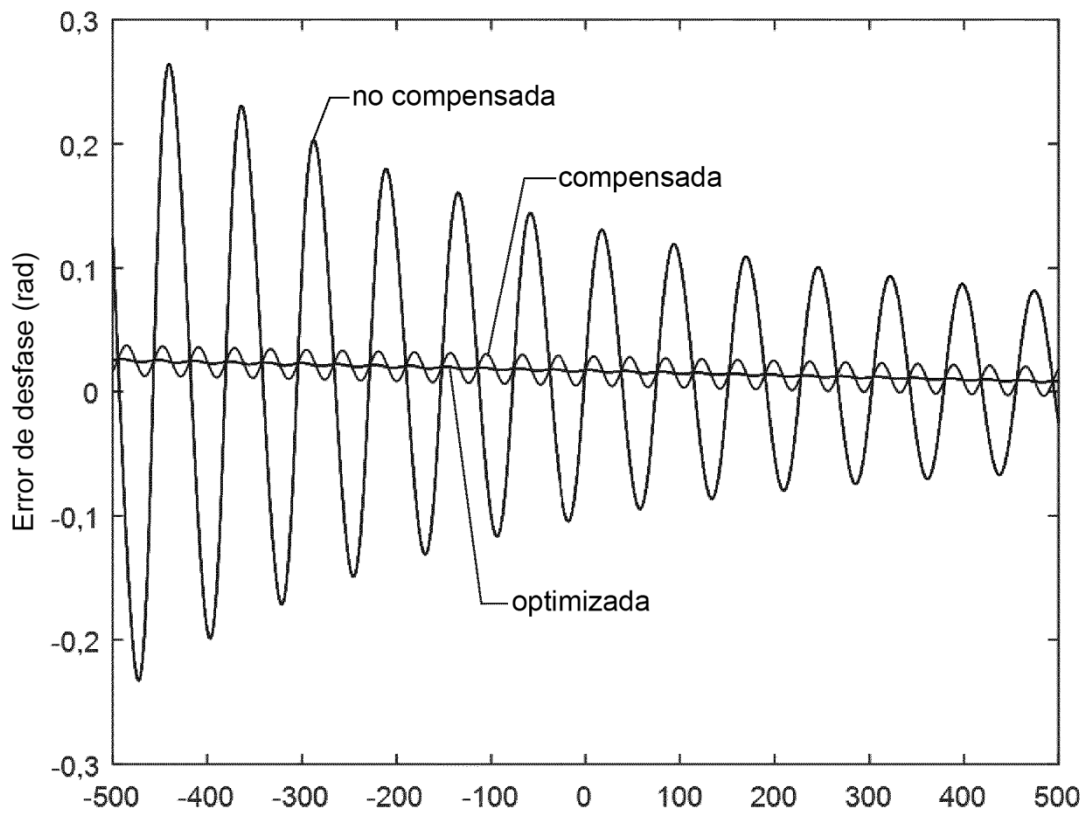


Fig. 4b