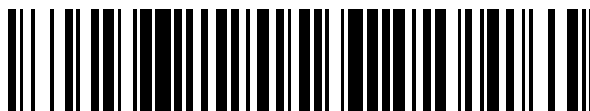


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 728 575**

51 Int. Cl.:

G01D 5/26 (2006.01)

G01B 9/02 (2006.01)

G01J 9/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **02.09.2016 E 16187126 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.03.2019 EP 3290870**

54 Título: **Sensor interferométrico de bucle cerrado que utiliza una ganancia de bucle para determinar el contraste de interferencia**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
25.10.2019

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**GU, XUN;
MACHESE, SERGIO VINCENZO y
BOHNERT, KLAUS**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 728 575 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 bucle cerrado que utiliza una ganancia de bucle para determinar el contraste de interferencia

Campo de la invención

5 La invención se refiere a un método para medir el contraste de interferencia en un dispositivo sensor óptico de modulación de fase, de bucle cerrado, basado en interferencias. La invención también se refiere a tal dispositivo sensor óptico de modulación de fase, de bucle cerrado, basado en interferencias.

10 En este contexto, un “dispositivo sensor óptico de modulación de fase, de bucle cerrado, basado en interferencias” es un dispositivo sensor que está adaptado para medir un mensurando por medio de la interferencia óptica entre unas ondas primera y segunda, al menos una de las cuales ha pasado por un elemento de detección. Comprende un modulador de fase para cambiar el desfase entre las dos ondas, así como un sensor de luz para determinar una señal medida a partir de la interferencia de las ondas. El controlador de retroalimentación mantiene la señal medida en un valor de referencia dado controlando el modulador de fase.

Antecedentes de la invención

15 Un problema clave para la detección óptica de tensión de CC de gran alcance basada en mediciones interferométricas es cómo determinar de manera única el desfase electro-óptico inducido por tensión a lo largo de muchos periodos 2π . Con ese fin, los inventores han demostrado en una solicitud de patente anterior [1] un método basado en contraste de interferencia, que funciona bien para un intervalo de tensión más allá de ± 500 kV.

20 La detección de la fase de modulación (MPD) [2] es una potente técnica de interrogación para medir el desfase en un sistema óptico. Con esta técnica, una forma de onda de modulación de fase de alta frecuencia se superpone al desfase que se va a medir. Este desfase puede deducirse a continuación de la medición de la forma de onda de respuesta óptica polarimétrica. Una gran ventaja de la técnica MPD es que, como el desfase de interés se calcula a partir de la forma de la onda de respuesta polarimétrica y no de una amplitud de señal absoluta, la medición (y en particular su estabilidad de punto cero) no se ve afectada en principio por la fluctuación de la potencia óptica o la variación de la pérdida. En comparación con las técnicas polarimétricas tradicionales de medición de fase, la MPD disfruta de una precisión superior, estabilidad de CC y robustez.

30 Normalmente, los sensores MPD se implementan en una configuración recíproca, ya sea en forma de un interferómetro Sagnac o en una forma reflectante, 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 alteraciones mecánicas. Tales esquemas recíprocos de MPD generalmente se denominan “modulación de fase no recíproca”, porque la modulación de fase impuesta no recíproca y el desfase que ha de ser medido son los únicos desfases que permanecen en la señal medida. Los esquemas recíprocos de MPD han visto amplia adopción en los giroscopios de fibra óptica [2], y después en sensores de corriente de fibra óptica (FOCS) [3, 4]. Recientemente, los inventores han demostrado que una forma no recíproca de MPD, concretamente la MPD diferencial [5], también se puede usar para lograr un rendimiento similar, lo cual es de gran beneficio para las aplicaciones que requieren un elemento de detección óptica de grandes magnitudes.

40 La técnica MPD se puede utilizar para la detección óptica de la tensión [6], midiéndose el desfase electro-óptico diferencial entre dos ondas de luz polarizadas ortogonalmente en un cristal de Pockels para determinar la tensión aplicada. En los casos en los que el intervalo de tensión requerido es mayor que la tensión π del cristal de detección, los inventores han demostrado que se puede eliminar la ambigüedad de los periodos de desfase midiendo el contraste de interferencia además [1], que varía en función del retraso de grupo (y, equivalentemente, del desfase) entre las dos ondas de luz polarizadas dentro del intervalo de coherencia de una fuente de luz de baja coherencia. La combinación del valor principal del desfase y el contraste de interferencia permite la determinación inequívoca del desfase electro-óptico en muchos periodos 2π , cubriendo un intervalo de tensión $> \pm 500$ kV. Como ejemplo [1], los inventores han demostrado que en un esquema MPD de onda sinusoidal de bucle abierto, puede determinarse el contraste de interferencia midiendo el nivel de CC de la respuesta óptica.

45 La mayoría de los sensores MPD comerciales utilizan modulación de onda cuadrada con control de bucle cerrado y el esquema descrito por [1] no es aplicable a tales sistemas.

Compendio de la invención

50 Por lo tanto, el problema que ha de resolverse es proporcionar un método y un dispositivo del tipo de bucle cerrado mencionado anteriormente que permita medir el contraste de interferencia o medir un valor que dependa de este contraste de interferencia.

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

En particular, el método comprende las etapas de:

- Generar unas ondas ópticas primera y segunda por medio de una fuente de luz: esta es la luz que ha de usarse para sondear el elemento de detección.
- 5 - Enviar al menos dicha primera onda a través de un elemento de detección, dependiendo de un mensurando al menos un índice de refracción de dicho elemento de detección: De esta manera, se genera un desfase entre las dos ondas dependiente del mensurando. Ventajosamente, ambas ondas se envían a través de los elementos de detección, pero con polarizaciones diferentes. Aún más ventajosamente, las ondas se reflejan de nuevo al elemento de detección para pasar por él dos veces.
- 10 - Enviar dicha primera y/o dicha segunda onda a través de un modulador de fase para agregar un desfase o modulación de desfase ϕ_m entre dichas ondas primera y segunda, siendo controlada dicha modulación de desfase ϕ_m por una señal de control ϕ_r . Esta modulación de desfase ϕ_m se suma al desfase dependiente del mensurando generado por el elemento de detección.
- 15 - Hacer que dichas ondas primera y segunda se interfieran (después de que hayan pasado por el elemento de detección y el modulador de fase al menos una vez) y determinar una señal de interferencia medida (I) en un sensor de luz: La señal de interferencia depende al menos casi periódicamente del desfase entre dichas ondas primera y segunda.
- Usar la amplitud de modulación de dicha señal medida (I) debida al modulador de fase para determinar una señal de error ΔI .
- 20 - Alimentar dicha señal de error ΔI a un bucle de retroalimentación para generar dicha señal de control ϕ_r , esforzándose el bucle de retroalimentación por mantener la señal de error ΔI a cero con una ganancia G del bucle de retroalimentación. Para lograr una respuesta y una estabilidad óptimas del control de retroalimentación, la ganancia ideal del bucle de retroalimentación se debe establecer como

$$G = \left. \frac{\partial \phi_f}{\partial \Delta I} \right|_{\Delta I=0}$$

y así se ajusta para mantener el sistema de control de retroalimentación funcionando en dicha condición óptima.

- 25 Además, el método comprende la etapa de usar dicha ganancia G para determinar el contraste de interferencia de dichas ondas.

En otro aspecto, la invención se refiere a un dispositivo sensor óptico de modulación de fase, de bucle cerrado, basado en interferencias, que comprende:

- 30 - Una unidad de control: Esta es una unidad que controla las operaciones del dispositivo. En una realización ventajosa, la unidad de control está adaptada y estructurada para llevar a cabo una o más de las etapas del método descrito en el presente documento.
- Una fuente de luz para generar unas ondas ópticas primera y segunda: Esta es nuevamente la luz para sondear el elemento de detección.
- 35 - Un elemento de detección que tiene al menos un índice de refracción que depende de un mensurando, estando situada dicha fuente de luz para enviar al menos dicha primera onda a través de dicho elemento de detección: De esta manera, se genera entre las dos ondas un desfase dependiente del mensurando. El elemento de detección puede ser, por ejemplo, un cristal electro-óptico de efecto Pockels.
- 40 - Un modulador de fase adaptado y estructurado para agregar una modulación de desfase. ϕ_m entre dichas ondas primera y segunda, siendo controlada dicha modulación de desfase ϕ_m por una señal de control ϕ_r . Esta modulación de desfase ϕ_m se suma al desfase generado por el elemento de detección.
- Un sensor de luz adaptado y estructurado para determinar una señal medida a partir de una interferencia de dichas ondas primera y segunda después del paso a través de dicho elemento de detección y dicho modulador de fase: De esta manera, puede derivarse una señal que depende casi periódicamente del desfase entre las dos ondas.
- 45 - Un controlador de retroalimentación adaptado y estructurado para usar la amplitud modulada de dicha señal de interferencia para determinar una señal de error ΔI y generar dicha señal de control ϕ_r , teniendo dicho controlador de retroalimentación una ganancia óptima G

$$G = \left. \frac{\partial \phi_f}{\partial \Delta I} \right|_{\Delta I=0} .$$

Tal controlador de retroalimentación se esfuerza por mantener la señal de error a cero con la ganancia ajustada para una estabilidad y capacidad de respuesta óptimas.

Además, la unidad de control está adaptada y estructurada para utilizar la ganancia óptima G para determinar el contraste de interferencia de las ondas.

- 5 La invención se basa en la comprensión de que la ganancia óptima G es una función del contraste de interferencia de las ondas en el sensor de luz; es decir, el contraste de interferencia puede determinarse a partir de la ganancia óptima G .

En este contexto, la expresión “determinar un contraste de interferencia” debe entenderse de manera que el contraste de interferencia se determine explícitamente o se determine una cantidad que dependa del contraste de interferencia.

- 10 Ventajosamente, se genera una modulación de fase ϕ_m entre dos niveles $\phi_{\pm} = \pm\phi_{m0} + \phi_f$. En este caso, ϕ_f es un desfase controlado por una señal de control. Ventajosamente $\phi_{m0} = \pi/2$.

En este caso, se mide la amplitud de la señal de interferencia bajo modulación $\Delta I = I_- - I_+$, siendo I_+ y I_- los niveles de señal de interferencia en niveles de fase modulados ϕ_{\pm} , respectivamente. Esta señal ΔI se utiliza como señal de error que ha de ser mantenida a cero por el sistema de control.

- 15 Ventajosamente, el dispositivo sensor comprende un controlador de tensión para el modulador de fase, que genera la modulación de fase mencionada anteriormente.

En una realización ventajosa, la ganancia óptima G puede ser usada para calcular dicho mensurando.

- 20 En particular, en los dispositivos de sensores ópticos interferométricos, la señal medida es a menudo una función casi periódica del mensurando. En este contexto, se entiende que “casi periódica” y “cuasi periodicidad” describen que la señal medida es una función periódica del mensurando, con la excepción de que su amplitud de oscilación (es decir, el contraste de interferencia) varía, en particular debido a la longitud de coherencia limitada de la fuente de luz. Por lo tanto, la ganancia óptima G puede ser usada para una eliminación de la ambigüedad de la cuasi periodicidad de la señal medida, según se describe, por ejemplo, en [1].

- 25 En una realización particularmente ventajosa, la invención se puede usar para detectar una tensión. En ese caso, dicho mensurando es dicha tensión eléctrica. El elemento de detección se encuentra en un campo eléctrico generado por la tensión eléctrica. Y el al menos un índice de refracción del elemento de detección depende del campo eléctrico; es decir, el elemento de detección es un elemento electro-óptico de detección, en particular un cristal que presenta el efecto Pockels, en el que la birrefringencia lineal del material es una función lineal del campo eléctrico aplicado.

- 30 La invención es particularmente apta para medir altas tensiones de al menos 100 kV, en particular de al menos 500 kV. Se puede usar ventajosamente para tensiones de CC. Pero también se puede utilizar para medir tensiones de CA.

La invención es ideal para diversas aplicaciones de corriente continua de alta tensión (HVDC), incluidas HVDC Light, HVDC Classic y aplicaciones en mar abierta de CC; por ejemplo, en una subestación de corriente continua con aislamiento gaseoso (DC GIS).

- 35 En otra realización ventajosa, la invención se puede usar para detectar una corriente eléctrica. En ese caso, el mensurando es dicha corriente eléctrica. El elemento de detección está ubicado en un campo magnético generado por la corriente eléctrica. Y al menos un índice de refracción del elemento de detección depende del campo magnético; el elemento de detección es, por ejemplo, un elemento magneto-óptico de detección, en particular una fibra enrollada alrededor de un conductor que lleva la corriente, siendo la birrefringencia circular una función lineal del campo magnético.

- 40 En otra realización ventajosa adicional, la invención se puede usar para detectar la aceleración en un giroscopio óptico.

La ganancia puede ser determinada, por ejemplo, midiendo de forma intermitente una respuesta de la amplitud de la señal de interferencia medida hasta una variación de la señal de control ϕ_f . En este caso, ha de entenderse ventajosamente que el término “intermitentemente” es una incidencia periódica o no periódica de esta etapa de determinación, mientras que una operación normal del bucle de control tiene lugar entre las etapas de determinación.

- 45 En otra realización ventajosa, la invención se refiere a un método en el que la ganancia óptima determinada G se utiliza para corregir errores sistemáticos, en particular debidos a la deriva y/o a la desalineación de los componentes, en el dispositivo sensor, en particular en la detección óptica de la tensión.

- 50 La invención muestra que es posible usar la ganancia del bucle de retroalimentación de, por ejemplo, un sistema MPD de onda cuadrada de bucle cerrado para determinar el contraste de interferencia, sin soporte físico adicional. La capacidad de medir el contraste de interferencia permite, por ejemplo, extender el intervalo de medición de desfase sin ambigüedades más allá de 2π , lo cual es de vital importancia para algunas aplicaciones, como la medición óptica de una tensión de CC. La invención también se puede utilizar para monitorizar la variación de la PER (relación de

extinción de la polarización) y para corregir los cambios correspondientes en el factor de escala de medición de la corriente en un sistema FOCS.

5 La invención demuestra que, sin ningún soporte físico adicional, el contraste de interferencia se puede determinar fácilmente en un esquema de detección de MPD a partir de la ganancia de bucle, que se mide continuamente en el sistema ABB de corriente para la regulación de la operación.

Junto con el método de eliminación de la ambigüedad del periodo basado en contraste de interferencia, como se describe, por ejemplo, en [1], esta invención proporciona la tecnología esencial que permite la detección óptica de una tensión de CC en un amplio intervalo de tensión.

10 Ventajas particulares del esquema de detección de la fase de modulación (MPD) de onda cuadrada en bucle cerrado son el excelente factor de cambio de escala y las estabilidades del punto cero, siendo ambos necesarios para la medición precisa de una tensión de CC. La invención demuestra que, sin ningún soporte físico adicional, se puede determinar fácilmente el contraste de interferencia en un esquema de detección de MPD a partir de la ganancia de bucle, que es medida continuamente por el sistema de control para la regulación de la operación. Junto con el método de eliminación de la ambigüedad del periodo basado en el contraste de interferencia, esta invención proporciona la tecnología esencial que permite la detección óptica de una tensión de CC en un amplio intervalo de tensión.

15 La medición del contraste de interferencia con MPD de bucle cerrado también es beneficiosa para la mejora adicional de los sistemas de detección, siendo sensible el factor de cambio de escala de medición a la relación de extinción de la polarización (PER) del enlace de fibra. Los cambios de PER debidos, por ejemplo, a los cambios en las propiedades del conector de fibra, se reflejan directamente en el contraste de interferencia; por lo tanto, monitorizar el contraste de interferencia proporciona una manera de controlar y compensar tales errores sistemáticos de variaciones del factor de escala, lo cual es importante para mantener una alta precisión de medición durante un tiempo prolongado y un amplio intervalo de temperatura.

Breve descripción de las figuras

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

la figura 1 muestra un diagrama de bloques de un sensor óptico reflectante de tensión con MPD de bucle cerrado;

la figura 2a muestra el contraste de interferencia A y la potencia óptica no modulada I como funciones de la tensión aplicada y del correspondiente desfase;

30 la figura 2b muestra el contraste de interferencia A y la ganancia G prevista del bucle; el cálculo para las Figuras 2a, 2b se realiza para un sensor BGO reflectante de tensión, con un espectro gaussiano FWHM de 40 nm centrado a 1310 nm, y un desfase de retardo de grupo $\tau_0 = -60$ fs, suponiendo $I_0 = 1$ para la ganancia del bucle;

35 la figura 3 muestra, en la parte (a), la curva de respuesta polarimétrica y , en la parte (b), las formas de onda de la modulación de onda cuadrada del desfase $\phi_m - \phi_f$ (punteada) y la salida polarimétrica I (discontinua) en el punto de referencia; para los gráficos, los inventores postulan $\varepsilon_+ = 0,1\pi$ y $\varepsilon_- = 0,05\pi$; la secuencia de cálculo de la ganancia del bucle ocupa los ciclos de modulación 0 a 3.

Descripción detallada

En la Fig. 1 se muestra el diseño de un sensor óptico reflectante de tensión que utiliza el esquema de detección de desfase MPD de bucle cerrado.

40 El dispositivo comprende un módulo optoelectrónico MPD 1, que contiene una fuente 2 de luz de baja coherencia. La luz de la fuente 2 de luz es suministrada a través de un polarizador 3, un modulador 4 de fase y en ambas direcciones de polarización de una fibra 5 de mantenimiento de la polarización (PM).

45 Un colimador 6 envía estas ondas desde la fibra PM 5 a través de un rotador 7 de Faraday a 45° y hacia un primer extremo del cristal 8 de efecto de Pockels, que está siendo expuesto al campo eléctrico generado por la tensión que ha de ser medida. En el segundo extremo del cristal, las ondas se reflejan en el reflector 9 y se envían de vuelta a través de los componentes 3 - 8.

Un divisor de haz 10 está dispuesto entre la fuente 2 de luz y el polarizador 3 y envía al menos parte de la luz de retorno a un sensor 11 de luz.

50 El dispositivo de la figura 1 comprende además un controlador 12 de retroalimentación para controlar el modulador 4 de fase, así como una unidad 13 de control para controlar las operaciones del dispositivo. Estos dos componentes, cuyas funciones se describen con más detalle a continuación, pueden implementarse como una sola unidad de soporte físico (tal como un microcontrolador) o como unidades de soporte físico separadas.

5 El rotador 6 de Faraday hace rotar 45° ambas polarizaciones lineales de la fibra 5 de PM antes de que se propaguen a lo largo de los ejes electro-ópticos (ejes del índice de refracción principal) del cristal 8 de detección. Las ondas reflejadas vuelven a atravesar el rotador 6 de Faraday, haciendo rotar 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.

El modulador 4 de fase está funcionando a una frecuencia adaptada al tiempo de ida y vuelta de las ondas de luz que viajan desde el modulador 4 al reflector 9 y viceversa, de modo que los desfases relativos inducidos por el modulador de fase en las dos pasadas de las ondas a través de él tienen signos opuestos, y, en consecuencia, las modulaciones de fase en las dos pasadas se suman debido al intercambio en las polarizaciones de la luz.

10 La longitud de coherencia de la fuente 2 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 A cuando se cambia la fase entre las dos polarizaciones algunos múltiplos de 2π .

15 Con tal fuente 1 de luz de baja coherencia y un desfase de retardo de grupo correctamente seleccionado τ_0 (por ejemplo, por medio de un elemento birrefringente), el intervalo de medición de la tensión se puede configurar de manera tal que el contraste de interferencia varíe de forma intensa y monótona con la tensión aplicada (véase la Fig. 2a), permitiendo así la determinación inequívoca de la tensión en un amplio intervalo de medición ($> \pm 500$ kV).

20 En el sistema MPD, una modulación de fase, se suma $\phi_m(t)$ en el modulador 4 de fase a un desfase de interés (ϕ_0) — es decir, aquí el desfase causado por el mensurando—, y la respuesta óptica polarimétrica es medida en las ondas de retorno después de que hayan pasado por el polarizador 3. Esta respuesta es la intensidad I de las ondas interferentes

$$I(t) = \frac{I_0}{2} \left\{ 1 + A \cos[\phi_0 + \phi_m(t)] \right\},$$

donde I_0 es la potencia lumínica total, y A es el contraste de interferencia.

25 En un sistema de modulación de onda cuadrada de bucle cerrado, la modulación $\phi_m(t)$ es ventajosamente una onda cuadrada que alterna entre dos niveles $\phi_{\pm} = \pm \pi/2 + \phi_f$, donde ϕ_f es una fase de retroalimentación controlada dinámicamente [2]. Se puede considerar que ϕ_f es la señal de control que el controlador 12 de retroalimentación utiliza para controlar el modulador 4 de fase.

La correspondiente respuesta polarimétrica medida en los dos niveles de modulación es

$$I_{\pm} = \frac{I_0}{2} \left[1 \pm A \sin(\phi_0 + \phi_f) \right]$$

La señal de error del bucle de retroalimentación es la diferencia entre los dos niveles de respuesta polarimétrica

30
$$\Delta I = I_- - I_+ = A I_0 \sin(\phi_0 + \phi_f)$$

El sistema se opera en un punto en el que la señal de error ΔI se mantiene a 0, lo que corresponde a $\phi_0 + \phi_f = 0$. Por lo tanto, en el punto operativo, la desviación de desfase que ha de medirse ϕ_0 es simplemente lo opuesto al desfase de retroalimentación controlado dinámicamente ϕ_f . En la Fig. 2b se representa la ganancia de bucle prevista en el intervalo de tensión diseñado.

35 Se encuentra que la ganancia de bucle óptima del bucle de retroalimentación en el controlador 12 de retroalimentación es la derivada del desfase de retroalimentación con respecto a la señal de error en el punto de referencia, es decir,

$$G = \left. \frac{\partial \phi_f}{\partial \Delta I} \right|_{\Delta I=0} = \frac{1}{A I_0}$$

40 Como parámetro de control importante para el bucle de control, la ganancia G de bucle óptima es determinada por la unidad 13 de control, por ejemplo, de la siguiente manera. De forma intermitente, en particular periódicamente (pero posiblemente también de manera no periódica), se mide la respuesta de la señal medida, en particular la respuesta de la señal de error ΔI , a una variación de la señal de control ϕ_f aplicada al modulador de fase 12.

Por ejemplo, se invoca una secuencia de modulación de fase $[\phi_{++}, \phi_{-+}, \phi_{+-}, \phi_{--}]$, por lo que se suman pequeñas desviaciones de fase ϵ_{\pm} (típicamente, $\epsilon_+ = \epsilon_-$) a la modulación de fase normal ϕ_{\pm} (ver fig. 3) o se restan de la misma:

$$\phi_{++} = \phi_+ + \epsilon_+ = \frac{\pi}{2} + \phi_{f0} + \epsilon_+$$

$$\phi_{-+} = \phi_- + \epsilon_+ = -\frac{\pi}{2} + \phi_{f0} + \epsilon_+$$

$$\phi_{+-} = \phi_+ - \epsilon_- = \frac{\pi}{2} + \phi_{f0} - \epsilon_-$$

$$\phi_{--} = \phi_- - \epsilon_- = -\frac{\pi}{2} + \phi_{f0} - \epsilon_-$$

Aquí, ϕ_{f0} corresponde a la señal de control ϕ_f que actualmente establece la señal de error ΔI a cero.

- 5 En consecuencia, las respuestas polarimétricas en los cuatro niveles de modulación son

$$I_{++} = \frac{I_0}{2}(1 - A \text{sen } \epsilon_+) \approx \frac{I_0}{2}(1 - A\epsilon_+)$$

$$I_{-+} = \frac{I_0}{2}(1 + A \text{sen } \epsilon_+) \approx \frac{I_0}{2}(1 + A\epsilon_+)$$

$$I_{+-} = \frac{I_0}{2}(1 + A \text{sen } \epsilon_-) \approx \frac{I_0}{2}(1 + A\epsilon_-)$$

$$I_{--} = \frac{I_0}{2}(1 - A \text{sen } \epsilon_-) \approx \frac{I_0}{2}(1 - A\epsilon_-)$$

- 10 De estas, podemos calcular dos señales de error correspondientes a ϵ_{\pm} como

$$\Delta I_+ = I_{-+} - I_{++} = AI_0\epsilon_+$$

$$\Delta I_- = I_{--} - I_{+-} = -AI_0\epsilon_-$$

La ganancia de bucle óptima se puede calcular como

$$G = \frac{\epsilon_+ + \epsilon_-}{\Delta I_+ - \Delta I_-} = \frac{1}{AI_0}$$

- 15 La ganancia G de bucle óptima calculada se utiliza luego para establecer la amplitud del desfase de retroalimentación.

De los anteriores resultados, se ve que el valor de ganancia G del bucle medido en el sistema MPD está relacionado con el contraste de interferencia A y la potencia lumínica total I_0 . A la inversa, se puede calcular el contraste de interferencia A como

$$A = \frac{1}{GI_0}$$

- 20 En el esquema de modulación descrito anteriormente, la potencia lumínica total I_0 es solo el doble del nivel de respuesta óptica I_{\pm} en el punto operativo $\phi_0 + \phi_f = 0$. Por lo tanto, prácticamente se puede medir como el desfase de CC de la respuesta óptica I_{\pm} , mientras que la amplitud de oscilación de ΔI en CA es usada como señal de error para controlar el bucle de retroalimentación.

- 25 Sin embargo, se debe tener en cuenta que, en algunas aplicaciones, como la eliminación de la ambigüedad del periodo del desfase (por ejemplo, para la detección óptica de una corriente de CC), no es necesario determinar el valor absoluto del contraste de interferencia A , sino que bastaría con seguir su cambio relativo. En tales casos, se pueden registrar las variaciones relativas de la ganancia de bucle G y la potencia óptica total I_0 , sin determinar sus escalas absolutas. Por ejemplo, se pueden establecer los valores de la ganancia de bucle y la potencia óptica total medida en un momento determinado (por ejemplo, al inicio de la operación) a una constante, y evaluar todas las mediciones subsiguientes en consecuencia. Si la potencia óptica se mantiene a un nivel constante, es posible que su medición no sea necesaria en absoluto.

- 30 Con el contraste de interferencia A medido, se puede determinar, a continuación, en qué periodo reside el desfase, y convertir el valor principal medido del desfase en un valor de intervalo completo único correspondiente, siguiendo el procedimiento que se describe en [1], cuya divulgación se incluye a continuación en su integridad. Para un sensor óptico de tensión, se puede calcular entonces un valor de tensión no ambiguo a partir del desfase de intervalo completo.

En un sensor FOCS, el contraste de interferencia calculado a partir de la ganancia del bucle también se puede usar para ampliar el intervalo de medición, que, sin el seguimiento del historial, se limita al desfase 2π en los productos actuales.

5 Además, en algunos sensores FOCS, el factor de escala de medición de la corriente está influenciado por la relación de extinción de polarización del enlace de fibra entre la cabeza del sensor y la optoelectrónica, que a su vez afecta directamente al contraste de interferencia. Por lo tanto, la medición del contraste de interferencia se puede usar para monitorizar la variación de la relación de extinción de polarización y para compensar la variación correspondiente del factor de escala de medición de la corriente. Por lo tanto, también en este caso, el contraste de interferencia se puede utilizar para determinar el mensurando de una manera más precisa.

10 En general, la ganancia determinada G se puede utilizar para corregir errores sistemáticos, en particular errores sistemáticos debidos a la deriva y/o la desalineación de componentes, en el dispositivo sensor, en particular si los errores sistemáticos afectan al contraste de interferencia.

Notas:

15 El cristal electroóptico 5 puede reemplazarse por cualquier otro elemento electroóptico que muestre una birrefringencia en función del campo eléctrico aplicado.

En otra aplicación para medir la corriente en un conductor, el elemento de detección puede ser, por ejemplo, una fibra enrollada alrededor del conductor. En ese caso, se usa un retardador de cuarto de onda en lugar del rotador 7 de Faraday.

20 Ventajosamente, el dispositivo sensor óptico tiene una configuración recíproca; por ejemplo, en forma de un interferómetro Sagnac o en una forma reflectante, en la que los desfases, en particular de la fibra 5 de PM y/o el elemento 8 de detección, se cancelan. En ese caso, el modulador 4 de fase es operado ventajosamente, como se mencionó, para aplicar desfases opuestos entre las dos ondas a una frecuencia correspondiente a un viaje de ida y vuelta desde el modulador 4 al reflector 9 y viceversa.

25 Cuando el dispositivo es un sensor de tensión, las técnicas aquí mostradas 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 $< 0,2\%$.

30 Las técnicas son ideales para aplicaciones en sistemas HVDC con aislamiento de aire, cables de HVDC y sistemas de conmutación de CC con aislamiento gaseoso (GIS). Tales 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, por ejemplo, seleccionado entre: nitrógeno, dióxido de carbono y oxígeno.

Permiten eliminar la ambigüedad de la medición periódica en un amplio intervalo (> 16 periodos de fase, o equivalentemente $> \pm 500$ kV).

Proporcionan un medio para la medición del contraste de interferencia en un sistema de detección de fase de modulación en bucle cerrado para la eliminación de ambigüedades.

35 Y también hacen posible mejorar la precisión de los sensores de corriente de fibra óptica (monitor y control de la relación de extinción de la polarización, PER) mediante la corrección de variaciones en un factor de escala durante la operación.

40 Si bien se muestran y describen las realizaciones actualmente preferidas de la invención, debe entenderse claramente que la invención no se limita a las mismas, sino que, puede ser realizada y puesta en práctica de otro modo 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.

45 [3] K. Bohnert, P. Gabus, J. Nehring y H. Brändle, "Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 20, pp. 267-276, 2002.

[4] K. Bohnert, P. Gabus, J. Nehring, H. Brändle y M. G. Brunzel, "Fiber-Optic Current Sensor for Electro-winning of Metals", *J. Lightwave Technol.*, vol. 25, pp. 3602-3609, 2007.

[5] WO 2015/124678

[6] US 7911196

Lista de números de referencia

- 1: módulo optoelectrónico
- 2: fuente de luz
- 3: polarizador
- 5 4: modulador de fase
- 5: fibra
- 6: colimador
- 7: rotador de Faraday
- 8: efecto cristal 8 de Pockels
- 10 9: reflector
- 10: divisor de haz
- 11: sensor de luz
- 12: controlador de retroalimentación
- 13: unidad de control

15

REIVINDICACIONES

1. Un método para medir un contraste de interferencia (A) en un dispositivo sensor óptico de modulación de fase, en bucle cerrado, basado en interferencias, comprendiendo dicho método que comprende las etapas de generar unas ondas ópticas primera y segunda por medio de una fuente (2) de luz,
- 5 enviar al menos dicha primera onda a través de un elemento (8) de detección, dependiendo al menos un índice de refracción de dicho elemento (8) de detección de un mensurando,
- enviar dicha primera y/o dicha segunda onda a través de un modulador de fase para agregar una modulación de desfase ϕ_m entre dichas ondas primera y segunda, controlándose dicha modulación de desfase ϕ_m por una señal de control ϕ_f ,
- 10 hacer que dichas ondas primera y segunda se interfieran y determinar una señal de interferencia medida (I) en un sensor (11) de luz,
- usar una amplitud de modulación de dicha señal medida (I) para determinar una señal de error ΔI y suministrar dicha señal de error ΔI a un bucle de retroalimentación para controlar dicha modulación de desfase ϕ_m , controlando dicho bucle de retroalimentación dicha señal de control ϕ_f con ganancia G del bucle de retroalimentación para mantener dicha señal de error ΔI a cero,
- 15 ajustar dicha ganancia G del bucle de retroalimentación a un valor

$$G = \left. \frac{\partial \phi_f}{\partial \Delta I} \right|_{\Delta I=0} ,$$

- caracterizándose dicho método por la etapa de usar dicha ganancia G para determinar el contraste de interferencia (A) de dichas ondas.
- 20 2. El método de la reivindicación 1 que comprende, además, la etapa de usar dicha ganancia G para calcular dicho mensurando.
3. El método de la reivindicación 2 que comprende la etapa de usar dicha ganancia G para una eliminación de la ambigüedad de una cuasi periodicidad de dicha señal medida (I) en función de dicho mensurando.
- 25 4. El método de cualquiera de las reivindicaciones precedentes en el que dicho mensurando es una tensión eléctrica, dicho elemento (8) de detección está situado en un campo eléctrico generado por dicha tensión eléctrica, y dicho al menos un índice de refracción depende de dicho campo eléctrico.
5. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3 en el que dicho mensurando es una corriente eléctrica, dicho elemento (8) de detección está situado en un campo magnético generado por dicha corriente eléctrica, y dicho al menos un índice de refracción depende de dicho campo magnético.
- 30 6. El método de cualquiera de las reivindicaciones precedentes que comprende la etapa de medir intermitentemente una respuesta de la señal medida (I) a una variación de dicha señal de control ϕ_f .
7. El método de cualquiera de las reivindicaciones precedentes en el que dicha ganancia G se utiliza para corregir un error sistemático de dicho dispositivo sensor, en particular debido a la deriva y/o a la desalineación de los componentes.
- 35 8. Un dispositivo sensor óptico de modulación de fase, de bucle cerrado, basado en interferencias, que comprende una unidad (13) de control,
- una fuente (2) de luz para generar unas ondas ópticas primera y segunda,
- un elemento (8) de detección que tiene al menos un índice de refracción que depende de un mensurando, estando posicionada dicha fuente (2) de luz para enviar al menos dicha primera onda a través de dicho elemento (8) de detección,
- 40 un modulador (4) de fase adaptado y estructurado para agregar una modulación de desfase ϕ_m entre dichas ondas primera y segunda, controlándose dicha modulación de desfase ϕ_m por una señal de control ϕ_f ,
- un sensor (11) de luz adaptado y estructurado para determinar una señal medida (I) de una interferencia de dichas ondas primera y segunda después del paso a través de dicho elemento (8) de detección y dicho modulador (4) de fase,
- 45

un controlador (12) de retroalimentación adaptado y estructurado para usar la amplitud modulada de dicha señal medida (I) para determinar una señal de error ΔI y generar dicha señal de control ϕ_f , teniendo dicho controlador de retroalimentación una ganancia óptima G

$$G = \left. \frac{\partial \phi_f}{\partial \Delta I} \right|_{\Delta I=0} ,$$

5 caracterizado porque dicha unidad (13) de control está adaptada y estructurada para usar dicha ganancia G para determinar un contraste de interferencia (A) de dichas ondas.

9. El dispositivo sensor de la reivindicación 8 en el que dicha unidad (13) de control está adaptada y estructurada para llevar a cabo las etapas del método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7.

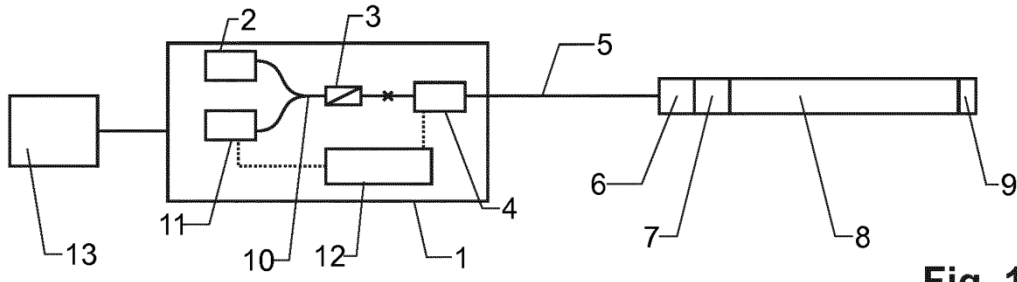


Fig. 1

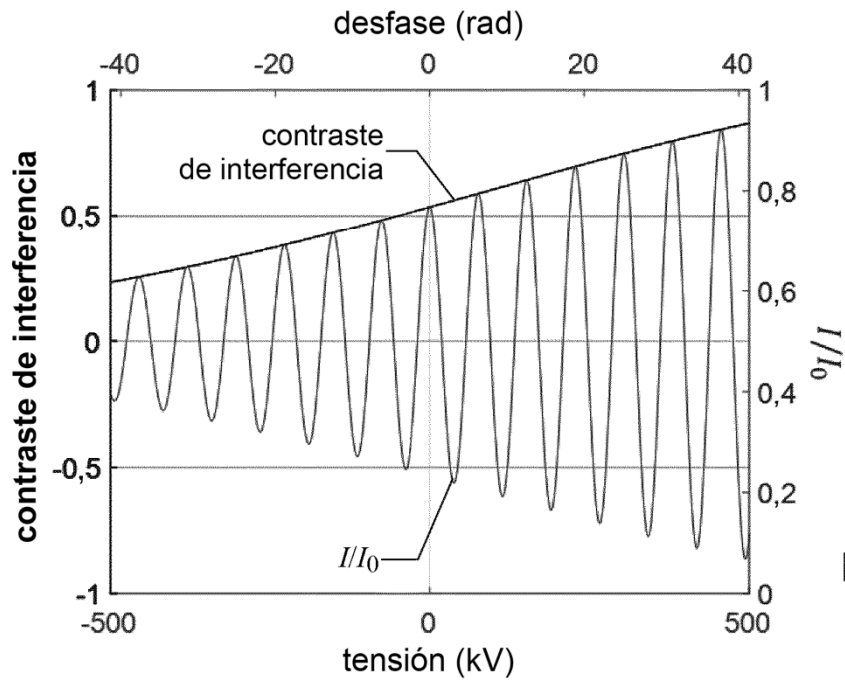


Fig. 2a

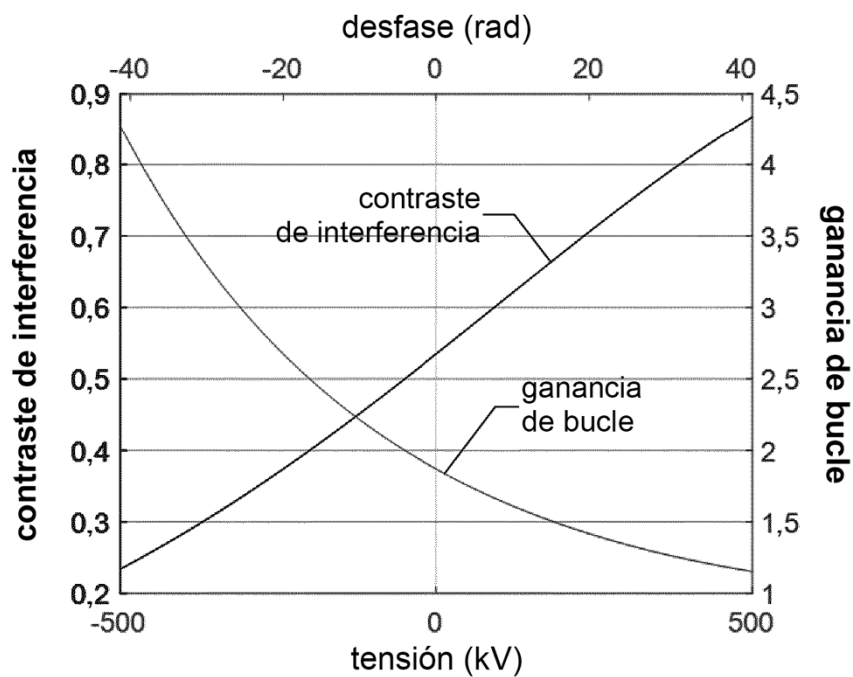


Fig. 2b

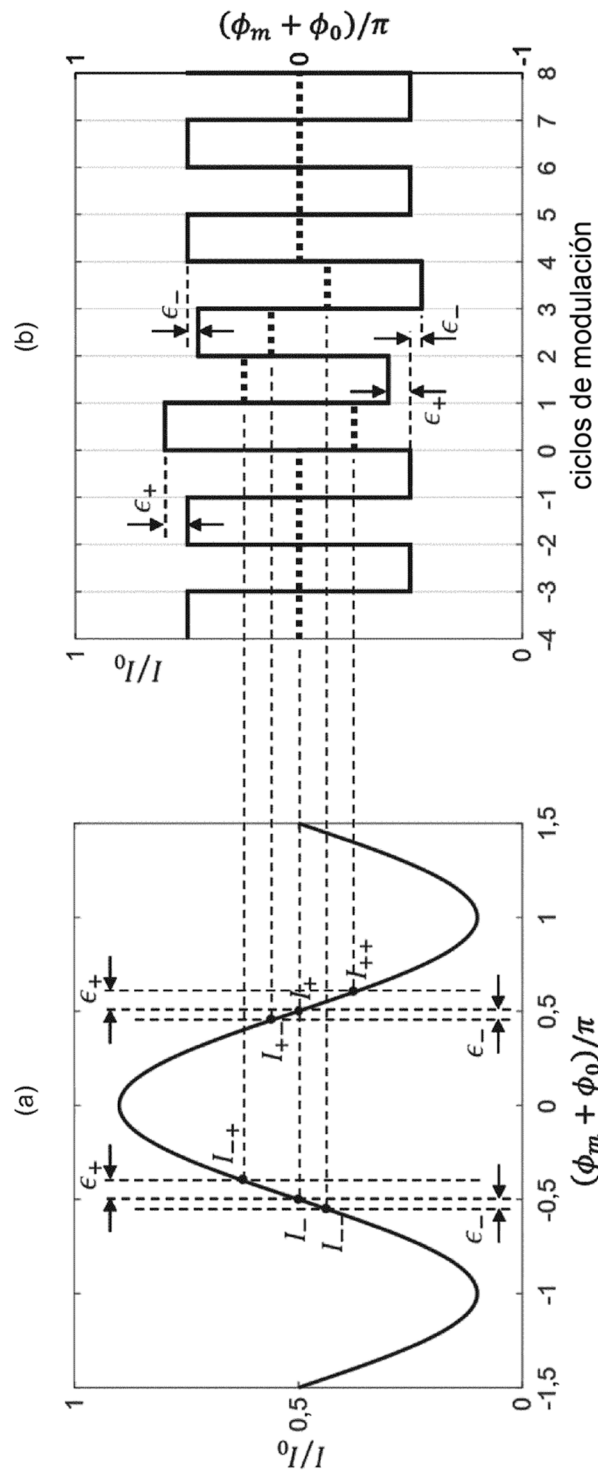


Fig. 3