

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 654 679**

51 Int. Cl.:

**G01R 15/24** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **20.12.2013 PCT/EP2013/077709**

87 Fecha y número de publicación internacional: **25.06.2015 WO15090448**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.12.2013 E 13811242 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.10.2017 EP 3084450**

54 Título: **Sensor óptico**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**14.02.2018**

73 Titular/es:  
**ABB SCHWEIZ AG (100.0%)  
Brown Boveri Strasse 6  
5400 Baden, CH**

72 Inventor/es:  
**BOHNERT, KLAUS;  
FRANK, ANDREAS;  
MÜLLER, GEORG y  
YANG, LIN**

74 Agente/Representante:  
**UNGRÍA LÓPEZ, Javier**

**ES 2 654 679 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 óptico

5 **Campo de la invención**

La descripción se refiere a un sensor óptico con un elemento detector que produce un desplazamiento de fase de ondas de luz que pasan a su través en presencia de un campo mensurando, tal como un sensor de corriente de fibra óptica (FOCS) o sensor de campo magnético que incluye una fibra detectora a exponer a un campo magnético, por ejemplo, de una corriente a medir, como el usado típicamente en aplicaciones de alto voltaje o alta corriente.

**Antecedentes de la invención**

Los sensores de corriente de fibra óptica se basan en el efecto Faraday magnetoóptico en una fibra óptica enrollada alrededor del conductor de corriente. El campo magnético inducido por corriente genera en la fibra óptica una birrefringencia circular que es proporcional al campo magnético aplicado. Una disposición preferida emplea un reflector en el extremo lejano de la fibra detectora de modo que la luz acoplada a la fibra realiza un viaje de ida y vuelta en la bobina de fibra. De ordinario, se inyectan a la fibra detectora ondas de luz circularmente polarizadas izquierda y derecha que son generadas a partir de dos ondas de luz linealmente polarizadas ortogonales por un retardador de fase de fibra óptica empalmado a la fibra detectora y que actúa como retardador de cuarto de onda (QWR), como se describe en la referencia [1]. Después del viaje de ida y vuelta a través de la bobina de fibra, las dos ondas circulares han acumulado un retardo de fase relativo proporcional a la corriente aplicada como resultado de la birrefringencia circular en la fibra. Este retardo de fase es proporcional al número de devanados de fibra alrededor del conductor de corriente, la corriente eléctrica aplicada, y la constante de Verdet  $V(T, \lambda)$  de la fibra: la constante de Verdet es dependiente del material, la temperatura y la longitud de onda.

Como una alternativa, el sensor puede diseñarse como un interferómetro del tipo de Sagnac con retardadores de cuarto de onda (QWRs) en ambos extremos de la fibra detectora y ondas de luz del mismo sentido de polarización circular que se contrapropagan en la fibra detectora (véase la referencia [1]).

También son conocidos los sensores de voltaje o campo eléctrico basados en el efecto de Pockels (efecto electroóptico lineal) [21] o en el uso de una fibra óptica acoplada a un material piezoeléctrico [16, 7]. En estos sensores, la birrefringencia inducida por el campo eléctrico o la fuerza o el cambio anisotrópico en el índice de refracción del material se usa en el sensor óptico para medir voltajes o la intensidad del campo eléctrico.

Los sensores de corriente de alto rendimiento a menudo usan una técnica interferométrica en base a modulación de fase no recíproca que también se aplica en giroscopios de fibra con el fin de medir el desplazamiento de fase óptico, véase, por ejemplo, la referencia [2]. Se emplean moduladores de fase ópticos integrados o moduladores piezoeléctricos. La técnica proporciona, en particular en combinación con la detección en bucle cerrado, alta precisión, buena estabilidad de factor de escala, y una respuesta lineal en un rango grande de desplazamiento de fase magnetoóptico. Por otra parte, la técnica es relativamente sofisticada y a menudo requiere componentes de fibra de mantenimiento de polarización (MP) y procesado elaborado de señales. Además, los moduladores ópticos integrados son componentes relativamente caros.

En contraposición, los esquemas de detección más simples emplean componentes ópticos pasivos tales como placas de onda y polarizadores que convierten el desplazamiento de fase magnetoóptico a un cambio de la potencia óptica transmitida (como se describe, por ejemplo, en la referencia [3]). Con el fin de hacer la salida del sensor independiente, por ejemplo, de las variaciones de la potencia de la fuente de luz, tales sensores trabajan a menudo con al menos dos canales de detección. La potencia óptica en los dos canales varía con la fase opuesta (antifase) en respuesta a la corriente a medir. En principio, la diferencia de las dos señales dividida por su suma es proporcional a la corriente y es independiente de la potencia de la fuente. Sin embargo, las asimetrías en los dos canales, tales como las diferentes pérdidas ópticas, influencias del esfuerzo, y su variación con el tiempo y la temperatura, limitan la precisión que se puede alcanzar con este tipo de sensores. Aunque la precisión del sensor puede ser suficiente para funciones de protección en subestaciones de alto voltaje (la clase de precisión IEC 5P demanda una precisión dentro de  $\pm 1\%$  a la corriente de régimen), la precisión es típicamente insuficiente para medición de electricidad; la clase de medición IEC 0,2, por ejemplo, demanda una precisión dentro de 0,2% a la corriente de régimen (referencia [4]).

US 5895912 describe un sensor CA polarimétrico en el que se usan componentes de señal CC para normalizar la intensidad de las señales de medición CA.

Por lo tanto, un objeto de la invención es proporcionar sensores ópticos del tipo anterior, tales como sensores de campo magnético o sensores de corriente de fibra óptica (FOCSs), y métodos relacionados que aumentan la precisión de tales sensores incluso al usar componentes ópticos pasivos en lugar de componentes modulantes de fase activos para detectar un desplazamiento de fase relativo entre ondas de luz.

**Resumen de la invención**

Según un primer aspecto de la invención se facilita un método de incrementar la precisión de un sensor óptico según la reivindicación 1, una unidad de procesamiento de señal según la reivindicación 10 configurada para ejecutar dicho método, y un sensor según la reivindicación 11 que incluye tal unidad de procesamiento de señal. El método se basa en generar dos conjuntos de ondas de luz que tienen diferentes velocidades en presencia de un campo mensurando no evanescente dentro de un elemento detector del sensor y con un desplazamiento de fase de polarización estática definido introducido entre los dos conjuntos de ondas de luz, convirtiendo el sensor un desplazamiento de fase óptico total incluyendo el desplazamiento de fase óptico de polarización estática y el desplazamiento de fase óptico inducido por dicho campo mensurando a cambios de potencia óptica de signos opuestos (antifase) en al menos dos canales de detección, incluyendo el método el paso de normalizar los cambios de potencia óptica después de su conversión a señales eléctricas de detección en dos canales de detección para reducir los efectos de la intensidad no uniforme y la diferente pérdida o ganancia en los canales de detección.

Los dos conjuntos de ondas de luz son típicamente ondas de luz linealmente polarizadas ortogonales u ondas de luz circularmente polarizadas izquierda y derecha. Preferiblemente, el desplazamiento de fase entre ambos conjuntos es convertido a cambios de potencia óptica que tienen signos opuestos (es decir, que están en antifase) en los dos canales de detección.

Debido a la introducción de un desplazamiento de fase óptico de polarización estática entre los dos conjuntos de ondas de luz, la detección aplicada es una detección pasiva y por ello no requiere una modulación de fase óptica activa. El desplazamiento de fase óptico de polarización estática está típicamente alrededor de  $(2n + 1) \times 90^\circ$ , en particular dentro de  $(2n + 1) \times 90^\circ \pm 20^\circ$  o  $(2n + 1) \times 90^\circ \pm 5^\circ$ , donde  $n$  es cualquier número entero. El desplazamiento de fase óptico de polarización estática puede ser introducido, por ejemplo, usando al menos un retardador de cuarto de onda o un rotador Faraday.

Para medición de corriente o campo magnético, el elemento detector puede ser un elemento de fibra óptica, un material magnetoóptico en masa (tal como un cristal de itrio hierro granate o vidrio de sílice fundida), o una fibra óptica o material óptico en masa montado en un elemento magnetostrictivo. Para medición de voltaje o campo eléctrico, el elemento detector puede ser un cristal electroóptico [21], una fibra electroóptica cristalina [19], una fibra polarizada [20], o una fibra montada en un material piezoeléctrico [7].

La normalización de los cambios de potencia óptica se deriva de filtrar componentes espectrales de las señales eléctricas de detección de los canales de detección y combinar los componentes espectrales o al menos un factor de normalización derivado de ellos con al menos una señal de detección para producir señales de detección normalizadas.

Los componentes espectrales pueden ser componentes CA filtrados y/o componentes transitorios de al menos una de las señales de detección y/o componentes filtrados (de paso bajo) o componentes CC de al menos una de las señales de detección. El método según la presente invención puede usarse para medir CC, CA o campos mensurados transitorios. Los componentes espectrales son promediados en el tiempo para reducción de ruido.

Los componentes espectrales CA están preferiblemente en un rango alrededor de una frecuencia nominal del campo mensurando, tal como en el rango de 45 Hz a 65 Hz para las frecuencias estándar de las redes de potencia eléctrica. Si las amplitudes de CA y los componentes transitorios espectrales caen por debajo de un umbral, pueden ser sustituidos por valores por defecto o por componentes de señal filtrados de paso bajo.

En el caso de que se mida CA o campos transitorios, la señal de sensor combinada después de la normalización es filtrada preferiblemente en paso bajo.

Según un segundo aspecto que puede combinarse o no con el primer aspecto descrito anteriormente o con el tercer aspecto descrito más adelante, para una medición de CA o campo transitorio, una temperatura de los elementos ópticos (pasivos) que introducen el desplazamiento de fase óptico de polarización estática se deriva de los componentes de baja frecuencia o CC de la señal del sensor. Los componentes de CC o baja frecuencia dependen del desplazamiento de fase óptico de polarización estática. El desplazamiento de fase de polarización puede cambiar cuando cambia la temperatura de los componentes ópticos que introducen el desplazamiento de fase y así puede ser indicativo de la temperatura del componente. En otros términos, el componente de CC o de baja frecuencia de la señal puede servir como una medida de la temperatura en la posición donde se introduce el desplazamiento de fase óptico de polarización estática, tal como un módulo divisor de polarización óptico integrado adecuado, que puede ser usado para esta finalidad.

Con el conocimiento de tal temperatura, una señal de sensor de CA o transitorio puede ser corregida consiguientemente. Esta compensación de temperatura puede aplicarse en combinación con otras compensaciones de temperatura, en particular con una compensación de temperatura del elemento detector propiamente dicho.

65

Los aspectos anteriores y los pasos requeridos pueden implementarse como parte de una unidad de procesamiento de señal del sensor y ser ejecutados por ella.

5 Según un tercer aspecto que puede combinarse o no con los aspectos descritos anteriormente, el sensor incluye al menos: una fuente de luz y al menos un detector de luz, preferiblemente al menos dos detectores de luz; y al menos dos, preferiblemente al menos tres, canales de transmisión óptica, un canal proporciona un canal directo para la luz a un elemento detector y uno o dos canales proporcionan canales de detección de retorno para la luz a los detectores; y uno o varios elementos ópticos pasivos para introducir un desplazamiento de fase óptico de polarización estática entre dos conjuntos de ondas de luz diferentes, que tienen diferentes velocidades dentro de dicho elemento detector en presencia de un campo mensurando no evanescente, y para convertir un desplazamiento de fase óptico total incluyendo el desplazamiento de fase óptico de polarización estática y un desplazamiento de fase óptico inducido por el campo mensurando a cambios de potencia óptica de signos opuestos (antifase) en al menos dos canales de detección; y una fibra de mantenimiento de polarización (MP), estando conectada la fibra MP directa o indirectamente mediante al menos un retardador o un elemento rotador Faraday al elemento detector; estando al menos partes del uno o varios elementos ópticos pasivos en contacto térmico con una unidad de estabilización de temperatura que proporciona un entorno de temperatura controlada para el uno o los varios elementos ópticos pasivos. Tal unidad puede incluir, por ejemplo, al menos una resistencia de calentamiento autorregulada, en particular al menos una lámina de resistencia de calentamiento autorregulada.

20 En una realización preferida de este aspecto de la invención, al menos partes del uno o los varios elementos ópticos pasivos están a potencial de tierra y la fibra MP proporciona una conexión óptica desde el potencial de tierra al potencial del elemento detector, siendo este último potencial diferente del potencial de tierra y siendo típicamente un voltaje medio o un voltaje alto. En tal caso, es ventajoso guiar la fibra MP a través de una columna aislante, en particular una columna aislante central hueca mejor llena de material aislante.

25 El uno o los varios elementos ópticos pasivos para introducir un desplazamiento de fase óptico de polarización estática y el uno o los varios elementos ópticos pasivos que convierten un desplazamiento de fase óptico total se combinan mejor en un módulo divisor de polarización óptica integrado con al menos dos o tres puertos en el lado de la fuente óptica/detector y un puerto en el lado del elemento detector, estando conectado el puerto en el lado del elemento detector a la fibra MP.

30 Al igual que con otros aspectos de la invención, el sensor puede estar adaptado para medir campos CA o CC, en particular campos magnéticos, corriente, campos eléctricos, voltaje o campos de fuerza.

35 Los anteriores y otros aspectos de la presente invención, conjuntamente con otras realizaciones ventajosas y aplicaciones de la invención, se describen con más detalles en la descripción siguiente y en las figuras.

#### **Breve descripción de las figuras**

40 La figura 1 es un diagrama esquemático de componentes de un sensor de corriente de fibra óptica con elementos pasivos para introducir un desplazamiento de fase óptico de polarización estática entre dos conjuntos diferentes de ondas de luz y para convertir un desplazamiento de fase óptico total incluyendo el desplazamiento de fase óptico de polarización estática y un desplazamiento de fase óptico inducido por un campo mensurando a cambios de potencia óptica de signos opuestos.

45 Las figuras 2A-2C ilustran ejemplos de pasos de procesamiento de señal según otro aspecto de la invención.

La figura 3 ilustra una variante de los ejemplos de las figuras 2A-2C haciendo uso de partes CC de la señal.

50 La figura 4 ilustra un ejemplo de pasos de procesamiento de señal según otro aspecto de la invención.

La figura 5 representa más elementos de un sensor para uso en un entorno de alto voltaje.

55 Las figuras 6A, 6B ilustran una mejora de estabilidad de la señal del sensor con la temperatura que se logra con un ejemplo según un aspecto de la invención.

Las figuras 7A-7B muestran más configuraciones de sensor para posibles aplicaciones de ejemplos de la presente invención.

60 Y la figura 8 representa otra configuración de sensor para posibles aplicaciones de ejemplos de la presente invención en el campo de la detección de voltaje.

### Descripción detallada

En la figura 1 se representa el ejemplo de una configuración de un sensor óptico de corriente usando un desplazamiento de fase óptico de polarización estática como esquema de detección de señales. Para otros detalles y posibles modificaciones de los elementos conocidos de la figura 1 se puede consultar [3].

5 Como se describe mejor más adelante, tales sensores con elementos pasivos para introducir un desplazamiento de fase de polarización pueden beneficiarse de los varios aspectos de aumento de precisión de la presente invención a describir más adelante, tal como el procesado de señal incluyendo la normalización y la filtración de señales sin tratar y el medio adicional de compensación de temperatura.

10 En el ejemplo de la figura 1, el sensor 10 incluye un módulo optoelectrónico 11 que aloja, por ejemplo, una fuente de luz de banda ancha 111, por ejemplo, un diodo superluminescente, dos fotodetectores 12-1, 12-2, y una unidad de procesado de señal 113 con fuente de alimentación y otros componentes electrónicos (no representados). Se ha de indicar que toda conexión entre el módulo optoelectrónico 11 y un cabezal de sensor 13 con el elemento detector 131 es puramente óptica y se realiza, en el ejemplo representado, por fibras de modo único 101 y conectores de fibra de modo único 102. Además, los elementos en el recorrido óptico fuera del módulo optoelectrónico 11 son componentes ópticos pasivos y, por lo tanto, no requieren activación eléctrica.

15 La luz procedente de la fuente de luz 111 es despolarizada, por ejemplo, en un despolarizador de Lyot de fibra (no representado). La conexión (óptica) entre el módulo optoelectrónico 11 y el cabezal de sensor 13 se realiza a través de tres fibras ópticas de modo único 101 (SMF1, SMF2, SMF3), que conectan con tres puertos de lado de fuente de un módulo divisor de polarización óptica integrado 14, que en el ejemplo representado se basa en un divisor/combinador 1x3 óptico integrado 140 (SC) que forma el módulo conjuntamente con los polarizadores y retardadores (141, 144, 145) montados en él. El primero de tales polarizadores es el polarizador 141 (P1), que polariza la luz en la entrada al SC 140 en un primer puerto, también denominado el canal de fuente de luz SC, en la cara lateral de la fuente. Preferiblemente, la dirección de polarización es a 45° con respecto a la normal del plano SC. Las guías de ondas dentro del SC 140 son de baja birrefringencia para no alterar el estado de polarización de la luz transmitida.

20 En la cara opuesta del SC (también denominada cara de lado de bobina) la luz está acoplada a un rabillo de fibra de mantenimiento de polarización (MP) 132. Los ejes principales de la fibra MP 132 son paralelos y perpendiculares al plano SC, es decir, a 45° a la dirección de polarización del polarizador P1 141. Como resultado, ambos modos de polarización ortogonal de la fibra MP 132 son excitados con la misma amplitud.

25 Un retardador de cuarto de onda de fibra óptica 133 convierte las ondas de luz linealmente polarizadas ortogonales a ondas circularmente polarizadas izquierda y derecha antes de que la luz entre en la fibra detectora 131. La fibra detectora forma una bobina con un número entero de bucles de fibra alrededor de un conductor de corriente 15. La luz es reflejada en el extremo lejano de la fibra 131 por un reflector 135 y luego pasa por la bobina una segunda vez. Después de la reflexión, se intercambian los estados de polarización de las dos ondas de luz, es decir, la luz circular izquierda se hace circular derecha y viceversa.

30 El retardador 133 convierte las ondas circulares reflejadas de nuevo a ondas lineales ortogonales. Las direcciones de polarización de las ondas lineales de retorno también son intercambiadas en comparación con las ondas de propagación hacia delante. Las ondas ortogonales de retorno tienen un desplazamiento de fase magnetoóptico  $\Delta\phi$ , como resultado del efecto de Faraday (véase también la ecuación [3] más adelante). El SC 140 divide las ondas de luz ortogonales en dos canales de detección óptica 142, 143. Una placa retardadora de cuarto de onda (QWR) 144 en la cara lateral de la fuente se usa como el elemento para introducir un desplazamiento de fase óptico de polarización estática, que en este ejemplo es un retardo de fase diferencial de 90° entre las ondas ortogonales de ambos canales de detección 142, 143. Los ejes principales del QWR 144 están alineados paralelos a los ejes del rabillo de fibra MP 132 y a 45° al polarizador P1 141.

35 Las ondas ortogonales del primero de los canales de detección 142, 143 interfieren en el polarizador P1 141 (que, en este ejemplo, es común al canal de fuente de luz y el primer canal de detección 142). Las ondas ortogonales del segundo canal de detección 143 interfieren en un segundo polarizador P2 145. La dirección de polarización de P2 145 está a 90° a la de P1 141. Dos de las fibras de modo único 101 (SMF 2 y SMF 3) guían la luz a los fotodetectores 12-1 y 12-2.

40 Preferiblemente hay despolarizadores (no representados), como la fibra tipo Lyot anterior, en los dos canales de detección después de los polarizadores 141, 145 con el fin de evitar pérdidas dependientes de polarización en el recorrido a los fotodetectores. Tal pérdida podría dar origen a mayor sensibilidad a las perturbaciones mecánicas de las fibras. En lugar de las fibras de modo único SMF 2 y SMF 3 se puede usar dos fibras multimodo. Debido al mayor tamaño del núcleo (por ejemplo, de 62,5  $\mu\text{m}$  en lugar de un núcleo de 9  $\mu\text{m}$  de un SMF), se reducen las pérdidas por acoplamiento desde las guías de ondas del módulo divisor de polarización óptica integrado 14 a las fibras 101.

45 Los polarizadores 141, 145 pueden ser plaquetas de vidrio finas conteniendo metal orientado (por ejemplo, partículas de plata) para polarizar la luz. Un grosor típico de las plaquetas es, por ejemplo, 30  $\mu\text{m}$ . Como resultado

del pequeño grosor, las pérdidas por acoplamiento entre la fibra y el divisor/combinador pueden mantenerse pequeñas.

5 Se usa una plaqueta de vidrio espaciadora 146 con el mismo grosor que la plaqueta de retardador QWR 144 con el fin de facilitar el montaje de los polarizadores P1 141 y P2 145 dentro del módulo óptico integrado 14. El espaciador 146 puede constar de vidrio o puede ser otra plaqueta de QWR con uno de sus ejes principales alineado a la dirección de polarización del polarizador P1 141, de modo que permanezca inactivo y no afecte a la polarización de la luz transmitida. El espaciador 146 también puede ser una segunda plaqueta de polarizador con la misma orientación que el polarizador P1 141, que mejora más el grado de polarización.

10 Preferiblemente, el QWR 144 es de orden bajo y, por ello, de poco grosor (típicamente unas pocas decenas de micras). Esta ayuda de nuevo a limitar las pérdidas por acoplamiento óptico.

15 El uso de un polarizador común P1 141 para la luz de la fuente y el primer canal de detección 142 también facilita el montaje del módulo óptico integrado 14, puesto que las guías de ondas están típicamente separadas en su cara lateral de la fuente solamente unos pocos 100  $\mu\text{m}$ .

20 Se prefiere la orientación de P1 141 a 45° a la normal del divisor/combinador SC 140 y, por lo tanto, la orientación axial de la fibra MP 132 paralela a la normal del divisor/combinador (con respecto a una alineación de, por ejemplo, P1 a 0° o 90° y por ello los ejes de fibra a 45° a la normal al SC 140) dado que el esfuerzo potencial de la fibra resultante de montar la fibra MP en el SC tiende a ser a lo largo de ejes paralelos u ortogonales al plano SC. Entonces se minimiza la perturbación del acoplamiento cruzado de polarización.

25 El módulo óptico integrado 14 es preferiblemente parte del conjunto de cabezal de sensor 13. Puede ser de temperatura estabilizada como se describe mejor más adelante. Una ventaja importante de la configuración de la figura 1 es que el módulo optoelectrónico 11 puede conectarse con el cabezal de sensor 13 por fibras de modo único estándar (o fibras multimodo) y conectores de fibra estándar 102. Así se puede evitar el uso más cuestionable de una fibra de mantenimiento de polarización para esta conexión. Esto es especialmente ventajoso si la distancia del módulo optoelectrónico 11 y el cabezal de sensor 13 es relativamente grande y se desean conectores 102 en ambos extremos del cable de fibra (por ejemplo, cuando el cabezal de sensor 13 está en el recinto de una subestación de voltaje alto y el módulo optoelectrónico 11 incluyendo la fuente de luz 111 está en la sala de control de la subestación con distancias de hasta varios cientos de metros entre ellos).

35 En contraposición, la decreciente relación de extinción de polarización (REP) de un enlace de mantenimiento de polarización a longitudes crecientes del cable limita la longitud posible del cable. Además, los conectores de fibra MP tienden a reducir la REP (relación de extinción de polarización) en forma dependiente de la temperatura y así pueden reducir la estabilidad del factor de escala del sensor. Además, el costo de la fibra MP y los conectores de fibra MP es sustancialmente más alto que el costo de las fibras estándar de modo único o multimodo y de los conectores correspondientes.

40 Para lograr precisión en circunstancias variables, las configuraciones de sensor del tipo descrito anteriormente en la figura 1 o más adelante (figuras 5-8) operan mejor usando un método de procesado de señal que está adaptado para compensar las asimetrías entre los dos o más canales de detección, como se describirá a continuación. Se deberá entender que este método de procesado de señal puede aplicarse a varios sensores ópticos con dos o más canales de detección y con un desplazamiento de fase óptico de polarización estática introducido por un elemento óptico pasivo.

50 Usando, por ejemplo, la configuración de la figura 1 anterior como referencia y suponiendo los componentes ideales (alineación angular perfecta de los componentes, sin acoplamiento cruzado entre los dos modos de polarización ortogonal, sin pérdida óptica asimétrica en los dos canales de detección, fibra detectora libre de birrefringencia lineal), las dos señales de detección en función del desplazamiento de fase magnetoóptico  $\Delta\phi$  vienen dadas por

$$(1) S_1 = (S_0/2) (1 + \text{sen } \Delta\phi)$$

$$55 (2) S_2 = (S_0/2) (1 - \text{sen } \Delta\phi)$$

con

$$60 (3) \Delta\phi = 4NVI.$$

Aquí, N, V, I son el número de devanados de la bobina de fibra, la constante de Verdet de la fibra ( $\sim 1 \mu\text{rad/A}$  a 1310 nm), y la corriente, respectivamente.  $S_0$  es proporcional a la potencia de la fuente de luz.

65 La diferencia de las dos señales dividida por su suma da una señal S independiente de la potencia de la fuente de luz:

(4)  $S = (S_1 - S_2) / (S_1 + S_2)$

o

5 (5)  $S = \text{sen } \Delta\phi$ .

para  $\Delta\phi \ll 1$  (que suele ser el caso en la práctica) S varía linealmente con  $\Delta\phi$ :

10 (6)  $S = \Delta\phi$ .

En un sensor práctico, la pérdida de potencia óptica en los dos canales de detección puede diferir, por ejemplo, como resultado de la diferente pérdida por acoplamiento del divisor a las fibras SMF2 y SMF3 o debido a diferente pérdida en los conectores de fibra. Además, la visibilidad de borde de interferencia de los dos canales puede diferir como resultado de las tolerancias en la alineación relativa de los polarizadores P1 y P2. La diferencia de fase entre las ondas de luz de interferencia puede no ser exactamente  $90^\circ$  debido a la dependencia de temperatura del retardador de cuarto de onda en los dos canales de detección. La birrefringencia residual, por ejemplo, debida a esfuerzo dependiente de la temperatura en los dos canales, puede introducir más desfases. En estas condiciones las señales  $S_1$ ,  $S_2$  en el canal 1 y 2, respectivamente, vienen dadas como

20 (7)  $S_1 = (S_{01}/2) [1 + K_1 \text{sen} (\Delta\phi + \alpha(T) + \kappa(T))]$

y

25 (8)  $S_2 = (S_{02}/2) [1 - K_2 \text{sen} (\Delta\phi + \alpha(T) + \kappa(T))]$ .

Aquí,  $K_1$  y  $K_2$  indican el contraste de borde en el canal 1 y 2, respectivamente ( $K_1$  y  $K_2$  son iguales a la unidad en condiciones ideales y menores que la unidad en caso contrario). El término  $\alpha(T)$  describe la desviación del retardo del QWR 144 de  $90^\circ$  y su variación con la temperatura. Los términos  $\eta(T)$  y  $\kappa(T)$  describen desfases debidos a otra birrefringencia en el módulo divisor de polarización 14 en el canal 1 y el canal 2, respectivamente.

Usando el parámetro así introducido, un ejemplo de un método de compensar las pérdidas ópticas diferenciales entre los canales de detección 1 y 2 se describe a continuación.

La diferente pérdida óptica en los diferentes canales de detección es comúnmente la perturbación más severa de las perturbaciones antes indicadas. En las consideraciones siguientes se supone que  $K_1 = K_2 = K$ . Para simplicidad también se supone que  $K = 1$  (sin embargo, las consideraciones siguientes también son válidas para  $K < 1$ ). También se supone que la corriente a medir es una corriente alterna (CA) o una corriente transitoria (por ejemplo, un pulso de corriente). La medición de pulsos de corriente es interesante, por ejemplo, en la supervisión de la correcta conmutación de corriente en disyuntores CC (véase la referencia [5] para detalles), en la detección de iluminación, física de plasma y otros. A continuación se describen ejemplos de tres métodos diferentes, que pueden denominarse métodos CA, transitorio y CC, respectivamente, para explicar la pérdida de canal diferencial.

En el primero de los ejemplos siguientes (figuras 2A a 2C), el método de compensación usa una parte procesada o representación del contenido de la señal CA. Este método se prefiere en general para aplicaciones con corrientes CA periódicas tales como corrientes de línea de 50 Hz o 60 Hz. Se utiliza el conocimiento de que las amplitudes del contenido de CA deben ser las mismas en los dos canales (aparte de ser antifase) para normalizar los dos canales a niveles de señal iguales.

En una disposición preferida, las amplitudes CA más grandes  $S_{01,ac}$  y  $S_{02,ac}$  en un cierto rango de frecuencia, por ejemplo, entre 45 Hz y 65 Hz en el caso de corrientes CA de 50/60 Hz, se determinan por medio de transformaciones Fourier rápidas (FFT), véase la figura 2A. En el caso de una corriente de línea de 50 Hz, la FFT determinará la amplitud de la corriente de 50 Hz. Los posteriores filtros de paso bajo (LPF) sirven para promediar la salida FFT para mejor estabilidad en un intervalo de tiempo determinado por la frecuencia de corte del filtro. Como una alternativa a la serie de FFT y LPF, una medida para las amplitudes  $S_{01,ac}$  y  $S_{02,ac}$  puede determinarse por una serie de un filtro de paso alto (HPF1), un rectificador (R), y un filtro de paso bajo como se representa en la figura 2B. Los filtros de paso alto cortan el contenido de señal CC. Las salidas de los rectificadores son entonces proporcionales a las amplitudes  $S_{01,ac}$  y  $S_{02,ac}$  y los filtros de paso bajo sirven de nuevo para promediar en el tiempo las señales.

La señal  $S_2$  es multiplicada después en el multiplicador (X) por la relación de amplitud  $A = S_{01,ac}/S_{02,ac}$  de las dos señales CA filtradas generadas por el primer divisor (I). (Alternativamente, la señal  $S_2$  puede dejarse sin cambiar y la señal  $S_1$  se multiplica por la relación de amplitud  $S_{02,ac} / S_{01,ac}$ , es decir, por la inversa de A). Después de la multiplicación, las señales  $S_1$  y  $S_2$  tienen la misma amplitud, es decir, están normalizadas a igual pérdida de potencia. La señal S de la ecuación (4), que se obtiene combinando señales normalizadas  $S_1$  y  $S_2$  en el sustractor (-), el sumador (+) y el segundo divisor (I) como se ha indicado, viene dada ahora como

(9)  $S = (S_1 - S_2 A) / (S_1 + S_2 A)$

con

5 (10)  $A = S_{01,ac} / S_{02,ac}$ .

Por lo tanto, la señal S corresponde a la señal de un sensor ideal:

10 [11]  $S = \text{sen } \Delta\phi$ .

La figura 2C representa una modificación del método ilustrado en la figura 2A. Aquí, la señal  $S_1$  es multiplicada en un multiplicador (X) con amplitud  $S_{02,ac}$  y la señal  $S_2$  es multiplicada en un segundo multiplicador (X) con amplitud  $S_{01,ac}$ . Como resultado, las señales  $S_1$  y  $S_2$  son normalizadas de nuevo a igual pérdida de potencia. Una ventaja sobre los métodos ilustrados en las figuras 2A y 2B se puede ver en que la normalización no requiere ninguna división de señal y por lo tanto requiere menos potencia de procesamiento de señal.

En las ecuaciones (9)-(11) anteriores, se supone que los desfases  $\eta$  y  $\kappa$  son despreciables. También se deberá indicar que el valor particular de  $\alpha$  (desviación del retardador QWR de  $90^\circ$ ) no afecta al desplazamiento de fase recuperado a condición de que  $\alpha \ll 1$ .

En el caso de corriente CA o transitoria, la señal de medición S después del segundo divisor (/) puede ser filtrada ventajosamente en paso alto, como indican los filtros HPF, HPF2 representados en línea de trazos en las figuras 2A-2C.

La frecuencia de corte se elige suficientemente pequeña de modo que el sistema sea capaz de detectar todo el contenido de CA y transitorio deseado. En el caso de una corriente de 50 Hz o 60 Hz, la frecuencia de corte puede elegirse, por ejemplo, en el rango de entre 0,001 Hz y 10 Hz. Con una frecuencia de corte baja (por ejemplo, 0,001 Hz), es posible detectar CC transitoria en la corriente que puede tener lugar en el caso de ciertos fallos. La frecuencia de corte de HPF1 en la figura 2B puede ser la misma que la frecuencia de corte de HPF2 o las dos frecuencias pueden diferir, por ejemplo, la frecuencia de corte de HPF1 puede ser más próxima a la frecuencia CA de régimen que la frecuencia de corte de HPF2. La frecuencia de corte de LPF (o equivalentemente el intervalo de tiempo en el que se promedia la relación A) se elige mejor de tal manera que, por una parte, las fluctuaciones aleatorias de A debidas a ruido de señal se mantengan pequeñas, y que, por la otra, la respuesta a las variaciones de potencia óptica, por ejemplo, como resultado de variaciones de la temperatura o movimiento de la fibra, sea suficientemente rápida. Un tiempo de promediado apropiado puede estar en el rango de entre 1 s y 100 s (segundos). Un valor preferido es del rango de 1 s a 20 s.

En lugar de los filtros de paso alto HPF1 de la figura 2B, se puede usar filtros de paso de banda centrados alrededor de la frecuencia de corriente de régimen.

Las ventajas de la normalización mediante el contenido de señal CA descrito anteriormente pueden resumirse de la forma siguiente:

- El método también funciona para corrientes CA con desviación CC.
- Los cambios del QWR 144 con la temperatura (cambio  $\alpha$ ) no afectan a la normalización.
- Los desfases  $\eta(T)$  y  $\kappa(T)$ , debidos a otra birrefringencia del módulo divisor de polarización, no afectan a la normalización (a condición de que sean suficientemente pequeños, preferiblemente  $< \sim 5^\circ$ ).

Son posibles varias modificaciones de los esquemas de las figuras 2A-2C. Por ejemplo, en el método de la figura 2A, las dos señales de entrada del sumador (+) pueden ser filtradas en paso bajo con el fin de disminuir el ruido en la salida del sumador.

Con alguna modificación, los métodos de compensación descritos anteriormente también pueden aplicarse al caso de corrientes transitorias, tal como pulsos de corriente. La relación A se determina entonces dividiendo en el divisor (/) las salidas (digitales o analógicas) instantáneas de los dos filtros de paso alto HPF1 (figura 2B). La frecuencia de corte de HPF1 está adaptada a los tiempos esperados de subida y caída de corriente. Preferiblemente, la normalización solamente está activa a condición de que la corriente esté por encima de un umbral establecido con el fin de evitar normalización errónea debida a ruido de señal. Por debajo del umbral, se puede usar un valor preestablecido por defecto de A o el último valor válido de A.

En la figura 3 se describe un método basado en CC para compensar la asimetría entre diferentes canales de detección.



Aquí, los contenidos de señal CC  $S_{1,dc}$  y  $S_{2,dc}$  se usan para normalizar las señales con respecto a pérdida óptica diferencial. Este método se prefiere en el caso de corrientes transitorias tales como pulsos de corriente que pueden tener lugar en tiempos aleatorios, es decir, el método puede usarse cuando no hay disponible ninguna parte de señal CA para normalización. Una condición es que tampoco fluya ninguna corriente CC continua de magnitud significativa puesto que la CC introducirá desfases antifase en las dos señales, lo que distorsionaría la normalización. Los desfases no despreciables  $\alpha(T)$ ,  $\eta(T)$  y  $\kappa(T)$  afectarán a la precisión del procedimiento. Si la suma de los desfases se determina por una medición independiente, los desfases pueden tomarse en cuenta multiplicando una de las señales  $S_1$ ,  $S_2$  con un factor de corrección apropiado.

Como una alternativa a dividir la diferencia por la suma de las señales en las figuras 2A-2C (que, como se ha indicado, tiene el inconveniente de que la división requiere una potencia significativa del procesador de señal), también es posible mantener la señal de suma después del sumador (+) a nivel constante por medio de un amplificador controlado en un circuito de realimentación en bucle cerrado. La señal de diferencia después del sustractor (-) se multiplica entonces por un factor  $(1/b(t))$ , donde  $b(t)$  es el factor de amplificación (que puede variar con el tiempo y la temperatura) que mantiene la señal de suma a nivel constante.

Cualquiera de los métodos anteriores se implementa mejor en combinación con un medio de compensación de temperatura. Tal compensación de temperatura puede lograrse a través de un entorno de temperatura controlada y/o a través de una extracción de la temperatura de al menos una señal de detección, de lo que se describen ejemplos más adelante.

Alternativamente o además, se puede usar un método como el descrito en la referencia [3] para bobinas de fibra libres de birrefringencia lineal o de birrefringencia baja. Aquí, la dependencia de temperatura de un retardador, tal como el retardador de fibra 133 al inicio de la fibra detectora 131 representada en el ejemplo de la figura 1, se emplea para compensar la dependencia de temperatura del efecto Faraday. En lugar de la ecuación (6), la señal viene dada entonces por

$$(12) S = [\cos \varepsilon (T)] \Delta\phi.$$

El ángulo  $\varepsilon$  es una desviación apropiadamente elegida del retardador 133 con respecto al retardo  $\pi/2$  perfecto a una temperatura de referencia, por ejemplo, la temperatura ambiente. El término  $\cos \varepsilon(T)$  disminuye a temperatura creciente de una forma que equilibra en gran parte el aumento de la constante de Verdet  $V$  con  $T$  en el término  $\Delta\phi = 4NVl$ .

Las modificaciones del método en los casos de fibra detectora con birrefringencia lineal no despreciable se han descrito, por ejemplo, en la referencia [6] para el caso de sensores de corriente interferométricos según la referencia [1].

Sin embargo, aparte de aplicar uno o una combinación de los métodos anteriores de usar un retardador desintonizado para compensar desplazamientos inducidos por temperatura de la señal, el método puede ampliarse en el caso de mediciones CA para incluir otro método para determinar la temperatura de los elementos pasivos, tal como el módulo óptico integrado 14 anterior. Se deberá indicar que este método puede aplicarse a muchos sensores ópticos diferentes para un mensurando CA o transitorio y así puede considerarse un aspecto independiente de la presente invención. Otras realizaciones de sensores ópticos que pueden usar esta invención se describen más adelante.

En el caso de corrientes CA o transitorias, la temperatura del QWR 144 puede extraerse de la salida de sensor filtrada en paso bajo, preferiblemente después de la normalización de las señales de detección por medio del contenido de señal CA como se representa en la figura 4, que también incluye los elementos ya descritos con referencia a la figura 2A anterior. La señal de sensor  $S$  viene dada por

$$(13) S = K \text{sen} (\Delta\phi_{ac} + \alpha(T)),$$

donde  $\Delta\phi_{ac}$  es el desplazamiento de fase magnetoóptico producido por la corriente CA. Los términos  $\eta(T)$  y  $\kappa(T)$  se suponen suficientemente pequeños y el contraste de borde  $K$  se supone igual para los dos canales. El contenido de señal CC se obtiene por filtración de paso bajo (LPF2 en la figura 4) como

$$(14) S_{dc} = K \text{sen} (\alpha(T))$$

Dado que la desviación del retardador de  $90^\circ$  es típicamente pequeña, la ecuación (14) se da aproximadamente como

$$(15) S_{dc} = K \alpha(T)$$

Puede ser un requisito que esto implique que los desplazamientos de fase de corrientes CC potenciales sean pequeños en comparación con  $\alpha$  en el tiempo de promediado de la señal LPF2.

Si el módulo óptico integrado y el elemento detector están en un alojamiento común o expuestos a las mismas o similares condiciones medioambientales,  $S_{dc}$  puede servir también como una medida para la temperatura del cabezal de sensor 13 y puede usarse para compensar cualquier variación (restante) del factor de escala del cabezal del sensor con la temperatura.

El retardador de cuarto de onda QWR 144 del módulo óptico integrado 14 es de ordinario una plaqueta de cuarzo. En caso de una plaqueta de orden cero, el retardo varía aproximadamente  $0,5^\circ$  en un rango de temperatura de  $100^\circ\text{C}$  a una longitud de onda de 1310 nm. Para una medición de temperatura puede ser ventajoso usar un retardador de orden más alto, porque la variación de  $\alpha$  con la temperatura aumenta en proporción al grosor del retardador. Idealmente, la variación deberá ser significativamente mayor que cualquier contribución potencial de los términos  $\eta(T)$  y  $\kappa(T)$ . Incluso con términos  $\eta(T)$  y  $\kappa(T)$  no despreciables la temperatura todavía puede determinarse a partir de la salida de LPF2, a condición de que la señal varíe de forma monótona con el cambio de temperatura y se calibre apropiadamente en términos de temperatura.

A causa de la característica de la señal sinusoidal frente al desplazamiento de fase, una linearización de la señal de sensor representada por la ecuación (13) puede incluirse en el procesado de señal. Además, las desviaciones del desplazamiento de fase de polarización de  $90^\circ$ , en particular la influencia de temperatura en  $\alpha$ , pueden tomarse en cuenta para esta linearización como una corrección de punto cero. En particular, en el caso de corrientes CA o transitorias,  $\alpha(T)$  recuperada a partir de  $S_{dc}$  (véase las ecuaciones (14) y (15)) puede incluirse en la determinación del desplazamiento de fase CA  $\Delta\phi_{ac}$  de la señal S (según la ecuación [13]).

El contenido de CC que se genera rectificando la corriente CA, por ejemplo, en sistemas de transmisión HVDC o en procesos electroquímicos (por ejemplo, extracción electrolítica de aluminio), a menudo todavía contiene armónicos de la frecuencia de la línea CA. Por lo tanto, la compensación de la diferente pérdida en los canales de detección mediante el contenido de señal CA como se ha descrito anteriormente (figuras 2A-2C) también puede aplicarse a medir tal contenido CC. Para ello, se usa de nuevo uno de los esquemas de procesado de señal de las figuras 2A - 2C, pero sin el filtro de paso alto final HPF2. La salida del sensor S viene dada por:

$$(16) S = K (\Delta\phi + \alpha(T) + \eta(T)) + \kappa(T)$$

Aquí, se supone de nuevo que el desplazamiento de fase (magnetoóptico)  $\Delta\phi$ , conteniendo contenido tanto CC como CA, es mucho menor que 1, y el contraste de interferencia K es el mismo para los dos canales. La incertidumbre en la medición CC se debe entonces principalmente a los términos de fase  $\alpha(T)$ ,  $\eta(T)$ , y  $\kappa(T)$ . Con un módulo óptico integrado de temperatura estabilizada como se describe más adelante, los términos de fase pueden mantenerse estables. Su suma, así como el contraste K, pueden determinarse por calibración.

El esfuerzo residual dependiente de la temperatura, por ejemplo, de adhesivos, que pueden producir birrefringencia indeseada en el módulo divisor de polarización 14, en particular en el retardador, puede seguir siendo una limitación de la precisión del sensor. Tal esfuerzo puede afectar a los términos de contraste  $K_1$  y  $K_2$  a través de acoplamiento cruzado de polarización entre las ondas de luz de interferencia, así como los términos de fase  $\eta(T)$  y  $\kappa(T)$  referidos en las ecuaciones (7), (8) anteriores.

Las aplicaciones de sensor en una subestación de alto voltaje requieren a menudo precisión dentro de  $<+1\%$  para protección y  $\pm 0,2\%$  para medición. Aunque las medidas anteriores son suficientes de ordinario para la precisión de la protección, pueden no ser suficientes para la precisión de la medición en un amplio rango de temperaturas. En una subestación de voltaje alto, las temperaturas ambiente pueden variar, por ejemplo, entre  $-40^\circ\text{C}$  y  $55^\circ\text{C}$ . Pero un sensor también puede encontrar temperaturas aún más severas o diferencias de temperatura, por ejemplo, debido al calentamiento por la corriente.

El ejemplo de la figura 5 muestra una disposición de un sensor según la figura 1, donde las influencias del módulo divisor de polarización óptica integrado 14 en la estabilidad del factor de escala sobre la temperatura se eliminan esencialmente. En la configuración ejemplar, el cabezal de sensor 13 está situado en el lado de potencial eléctrico alto de un aislante eléctrico autónomo 17, es decir, el aislante 17 y el cabezal de sensor 13 representan un dispositivo autónomo equivalente a un transformador de corriente de un instrumento convencional. El módulo divisor de polarización óptica integrado 14 se pone en el lado de potencial de tierra del aislante 17 y se conecta con la bobina de fibra 131 por un enlace de fibra de mantenimiento de polarización 132. El enlace 132 se extiende a través del núcleo hueco del aislante 17. La disposición mantiene la ventaja de los enlaces de fibra de modo único (o multimodo) entre la posición del aislante 17 y por lo tanto el módulo divisor de polarización óptica integrado 14 y el módulo optoelectrónico 11 del sensor 131. El enlace de fibra MP 132 solamente se extiende la distancia desde tierra al potencial de alto voltaje.

Con el módulo óptico integrado 14 separado de la bobina 131 y situado a potencial de tierra, su temperatura puede estabilizarse sin protección contra los efectos de alto voltaje. Preferiblemente, la temperatura del módulo óptico integrado 14 se mantiene a una temperatura que corresponde a o está cerca de la temperatura de operación más alta. Por ejemplo, si la temperatura de operación máxima (temperatura ambiente máxima) es  $65^\circ\text{C}$ , el módulo óptico

integrado 14 puede mantenerse en el rango de entre 65°C y 45°C a temperaturas ambiente de entre 65°C y -40°C. Por lo tanto, el control de la temperatura requiere solamente provisiones para calentamiento, pero ninguna para enfriamiento.

5 El módulo óptico integrado 14 puede estar situado en un paquete o alojamiento térmicamente aislado 18 como el representado. En el caso más simple, la temperatura se estabiliza por medio de una resistencia laminar de calentamiento autorregulada 181. El material de la resistencia tiene un fuerte coeficiente térmico positivo y actúa como un "diodo térmico". Como resultado, la potencia de calor a un voltaje dado (por ejemplo, 24 V) es alta a bajas temperaturas, disminuye gradualmente con el aumento de temperatura, y se aproxima a cero en un umbral designable, por ejemplo, 65°C. En tal implementación no es necesario un circuito electrónico regulador. Alternativamente, la temperatura puede estabilizarse por medio de una o varias resistencias de calentamiento (no representadas) con la corriente controlada por electrónica.

15 En otra disposición ejemplar, la temperatura del módulo óptico integrado 14 puede ser controlada por medio de un enfriador/calentador termoelectrónico que es capaz de mantener una temperatura constante arbitraria, por ejemplo, 25°C.

20 El aislante 17 es un aislante de núcleo hueco que consta de un tubo hueco de epoxi reforzada con fibra. Protectores de silicona en la superficie exterior proporcionan suficiente distancia de fuga en superficie entre alto voltaje y tierra para evitar la descarga, por ejemplo, en caso de contaminación por agua de lluvia o suciedad. La fibra MP 132 está protegida, por ejemplo, por un cable de fibra incluyendo un tubo interior lleno de gel que contiene la fibra. El relleno de gel evita el esfuerzo excesivo de la fibra y por ello el acoplamiento cruzado de polarización indeseado entre los dos modos de polarización ortogonal, por ejemplo, debido a expansión térmica diferencial.

25 El agujero de aislante se llena con un material aislante blando 172, por ejemplo, silicona, que proporciona suficiente resistencia dieléctrica. La silicona contiene un material de relleno que tiene suficiente compresibilidad y acomoda cualquier expansión térmica de la silicona. El relleno puede constar, por ejemplo, de perlas de dimensiones micrométricas hechas de un material blando o de diminutas burbujas de fluido o burbujas de gas. Las burbujas pueden contener gas hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) o mezclas alternativas de fluido de aislamiento dieléctrico o mezclas de gases incluyendo un compuesto de organofluor, seleccionándose dicho compuesto de organofluor del grupo que consta de: un fluoroéter, un oxirano, una fluoroamina, una fluorocetona, una fluoroolefina, y mezclas y/o productos de descomposición de los mismos. El medio de aislamiento dieléctrico puede incluir además un gas de fondo diferente del compuesto de organofluor y en algunas realizaciones puede seleccionarse del grupo que consta de: aire, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, un gas noble, H<sub>2</sub>; NO<sub>2</sub>, NO, N<sub>2</sub>O; fluorocarbonos y en particular perfluorocarbonos, tales como CF<sub>4</sub>; CF<sub>3</sub>I, SF<sub>6</sub> y sus mezclas.

35 Alternativamente, el aislante 17 puede llenarse con espuma de poliuretano y/o contener un gas aislante tal como nitrógeno (N<sub>2</sub>) o hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) o mezclas alternativas de gases de aislamiento dieléctrico incluyendo un compuesto de organofluor, seleccionándose tal compuesto de organofluor del grupo que consta de: un fluoroéter, un oxirano, una fluoroamina, una fluorocetona, una fluoroolefina y mezclas y/o productos de descomposición de los mismos. El gas de aislamiento dieléctrico puede incluir además un gas de fondo diferente del compuesto de organofluor y en algunas realizaciones puede seleccionarse del grupo que consta de: aire, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, un gas noble, H<sub>2</sub>; NO<sub>2</sub>, NO, N<sub>2</sub>O; fluorocarbonos y en particular perfluorocarbonos, tales como CF<sub>4</sub>; CF<sub>3</sub>I, SF<sub>6</sub> y sus mezclas. El gas puede estar a presión atmosférica o a presión elevada para mejorar su resistencia dieléctrica.

45 En otro ejemplo, el aislante puede incluir una varilla interior maciza de epoxi reforzada con fibra extendiéndose la fibra MP dentro de un capilar a lo largo de un recorrido helicoidal a lo largo de la superficie exterior de la varilla aislante como se describe, por ejemplo, en la referencia [8].

50 El alojamiento de temperatura estabilizada 18 conteniendo el módulo óptico integrado 14 puede montarse, por ejemplo, en un alojamiento externo 182 que está montado en la pestaña 171 del aislante, como se representa. El alojamiento externo 182 protege los cables de fibra del módulo óptico integrado 14 y está equipado con conectores de fibra 102 para el cable de fibra 101 entre el módulo optoelectrónico 11 del sensor y el aislante HV 17. Además, el alojamiento externo 182 actúa como un protector solar y protección mecánica del módulo óptico integrado 14. Un protector de conector 103 protege los conectores 102 y tiene provisiones para el prensacable 104 del cable de fibra 101.

60 En la figura 5, el alojamiento de bobina de fibra o cabezal de sensor 13 está montado horizontalmente entre las placas terminales 151 para los cables de línea de potencia 15. Una capa aislante 152 evita que la corriente salga de la bobina de fibra 131. En una disposición alternativa (no representada), la bobina de fibra puede estar montada en una posición vertical encima del aislante, pasando la corriente por la bobina en dirección horizontal.

65 En lugar de montar el alojamiento de bobina de fibra o el cabezal de sensor 13 en un aislante autónomo 17, el alojamiento también puede ir montado en el terminal de un disyuntor de circuito de voltaje alto. En este caso, el enlace de fibra de mantenimiento de polarización a tierra puede diseñarse como un cable de fibra flexible de alto

voltaje equipado con protectores para mejorar la distancia de fuga en superficie. El divisor de temperatura controlada puede montarse entonces en el cubículo de activación del disyuntor o en un recinto separado próximo.

5 Como otra alternativa, el alojamiento de bobina de fibra o cabezal de sensor 13 también puede montarse dentro del disyuntor de circuito encima del aislante de soporte del disyuntor de circuito, como se describe, por ejemplo, en la referencia [9]. Aquí el enlace de fibra MP se extiende a tierra a través del volumen de gas (con cualquier medio de aislamiento dieléctrico como se ha descrito anteriormente) del aislante de soporte y sale del aislante de soporte a través de una vía de paso de fibra estanca a los gases. El módulo de temperatura controlada 14 puede montarse de nuevo en el cubículo de activación del disyuntor o en un recinto separado próximo. Otras alternativas de montaje del alojamiento de bobina de fibra o del cabezal de sensor 13 en disyuntores de circuito de alto voltaje se describen en la referencia [10].

15 En otras aplicaciones, la corriente puede medirse en potencial de tierra con disposiciones de sensor equivalentes a las descritas anteriormente con respecto a interruptores de alto voltaje aislados por gas (GIS) (véase, por ejemplo, la referencia [11] para otros detalles), disyuntores de circuitos de generación (véase, por ejemplo, la referencia [12] para otros detalles), o aisladores de una estación de conversión HVDC (véase, por ejemplo, la referencia [13] para otros detalles). En tales aplicaciones, tanto la bobina de fibra 131 como el módulo óptico integrado de temperatura controlada 14 según los ejemplos anteriores de la presente invención pueden montarse en potencial de tierra. En tales aplicaciones no se necesita ningún aislamiento de alto voltaje particular del enlace de fibra MP entre los dos componentes.

25 Los efectos de tener separados la bobina de fibra 131 y el módulo óptico integrado 14 y estabilizada la temperatura de éste último se muestran en la comparación de las figuras 6A y 6B, que muestran la variación del factor de escala en función de la temperatura del cabezal de sensor para los casos en los que tanto la bobina de fibra 131 como el módulo 14 están expuestos a la misma temperatura (figura 6A) y en los que el módulo 14 es de temperatura estabilizada según los métodos aquí propuestos (figura 6B). Además, la bobina de fibra 131 es de temperatura compensada por medio del retardador de fibra 133 (descrito en detalle con referencia a la ecuación (12)). La variación del factor de escala restante entre -40 y 85°C se reduce de aproximadamente 0,5% a  $\pm 0,1\%$  y así cumple requisitos comunes para medición ( $\pm 0,2\%$ ).

30 Como se ha mencionado, cualquiera de los métodos antes descritos para normalización y estabilización de temperatura pueden aplicarse a diferentes tipos de sensores ópticos, que pueden ser similares o diferentes del sensor descrito en conexión con las figuras 1 y 5. Ejemplos de otra posible configuración de sensor óptico que tiene un elemento pasivo para introducir un desplazamiento de fase óptico de polarización estática entre dos canales de detección se describen a continuación. Se deberá indicar que los ejemplos presentados son solamente representativos y la aplicación de los métodos anteriores no se limita a ellos.

35 En el ejemplo de un sensor de corriente de fibra óptica expuesto en la figura 7A, el elemento para introducir un desplazamiento de fase óptico de polarización estática es un rotador Faraday, en particular, un espejo de rotación de Faraday 144' situado en el extremo de la fibra detectora 131. El ángulo de rotación de pasada única, dependiente en general de la temperatura, del rotador Faraday  $\beta(T)$  está relacionado con la cantidad  $\alpha(T)$  de las ecuaciones (7), (8) mediante  $90^\circ + \alpha(T) = 4 \beta(T)$ , es decir, se logra sensibilidad óptima poniendo  $\beta(T_0)$  a una temperatura de referencia  $T_0$ , por ejemplo, la temperatura ambiente, a  $\pm 22,5^\circ$ . La conversión del desplazamiento de fase a cambios de potencia óptica de fase opuesta en dos canales de salida 142, 143 se logra con un divisor de haz polarizante 16. El esfuerzo y la desalineación en el divisor de haz polarizante 16 pueden producir cantidades  $K_1(T)$ ,  $K_2(T)$  en las ecuaciones (7) y (8) que se desvían de 1 y cantidades  $\eta(T)$  y  $\kappa(T)$  en las ecuaciones (7) y (8) que se desvían de cero.

40 Hay dos opciones sobre cómo puede operar el sensor representado en la figura 7A. En una primera opción, dos estados de polarización lineales ortogonales son enviados a través de la fibra MP 132 a la fibra detectora 131 y convertidos por medio de un retardador de fibra 133 a ondas de luz circulares izquierda y derecha en la entrada a la fibra detectora 131. En la segunda opción, solamente un estado de polarización lineal, generado en el divisor de polarización, es enviado a través de la fibra MP 132 y además (sin conversión a polarización circular) a la fibra detectora 131. La señal de corriente puede recuperarse de las potencias de luz detectadas de la misma forma que en la realización anterior del sensor de la figura 1, formándose los dos canales de detección 142, 143 por las dos señales generadas cuando la luz de la fibra detectora 131 pasa a través del divisor de haz 16. La estabilización de temperatura de los elementos 16 y 144' descritos en esta invención mejora la estabilidad de temperatura de la señal de sensor.

45 Un tercer ejemplo de un sensor de corriente de fibra óptica con elementos ópticos pasivos y que también tiene una característica de sensor según la ecuación (7) se describe a continuación.

50 Esta configuración de sensor del tipo de transmisión se ilustra esquemáticamente en la figura 7B. El polarizador lineal 141 genera luz linealmente polarizada que es inyectada a la fibra detectora 131 (en este ejemplo, un eje principal del raballo de fibra MP 132-1 es paralelo a la orientación del polarizador). El desplazamiento de fase magnetoóptico en la fibra detectora 131 se manifiesta como una polarización de rotación de luz. La polarización de

fase a través de un elemento pasivo 144 se logra aquí por la orientación del divisor de haz polarizante 16 a  $\pm 45^\circ$  al eje del primer polarizador lineal 141 (los ejes del raballo de fibra MP 132-2 del divisor de haz polarizante 16 también están orientados a  $\pm 45^\circ$  con respecto al eje del primer polarizador 141) que también divide la luz entrante en dos estados de polarización lineales ortogonales. La potencia de luz detectada en los dos canales 142, 143 se describe de nuevo mediante las ecuaciones (7) y (8), siendo  $\Delta\phi$  menor en un factor de 2 en comparación con los ejemplos anteriores dado que la bobina de detección 131 solamente se pasa una vez. Las cantidades  $K_1(T)$ ,  $K_2(T)$  en las ecuaciones (7) y (8) pueden desviarse de 1 y las cantidades  $\alpha(T)$ ,  $\eta(T)$  y  $\kappa(T)$  pueden desviarse de 0 debido a imperfecciones del polarizador lineal 141, el haz polarizante, o su orientación angular relativa. La estabilización de temperatura del elemento 16 descrito en esta invención mejora la estabilidad de temperatura de la señal del sensor.

Como ya se ha mencionado, la aplicación de las mejoras de precisión de la presente invención no se limita a sensores de corriente de fibra óptica como los descritos en los ejemplos de las figuras 1, 5 y 7A-7B, puesto que los varios aspectos de la presente invención también pueden aplicarse a otros sensores que se basen en la medición de un desplazamiento de fase óptico.

Para ilustración adicional, la figura 8 ilustra un sensor de voltaje óptico al que pueden aplicarse los métodos anteriores.

La disposición general y los componentes de una configuración correspondiente que emplean modulación de fase activa se describen, por ejemplo, con más detalle en la referencia [16] (véase también las referencias [17, 18]). El sistema de detección incluye en gran medida los mismos componentes que el primer ejemplo de un sensor de corriente de fibra óptica que emplea un módulo divisor de polarización óptica integrado 14, como ya se ha descrito con referencia a la figura 1 anterior. Sin embargo, la bobina de detección 131 (retardador de fibra, fibra detectora, reflector de punta de fibra) es sustituida por un elemento electroóptico 134 terminado en el extremo lejano por un reflector 135, y en el extremo próximo por un rotador de Faraday de  $45^\circ$  133'. El reflector 135 puede implementarse usando, por ejemplo, un espejo, un recubrimiento reflector, un prisma reflector, o un reflector de cubo esquinero.

Como se representa en la figura 8, el voltaje a medir se aplica sobre la longitud del elemento electroóptico 134. El elemento electroóptico 134 puede ser un cristal Bi3Ge4012 (BGO) electroóptico en forma de varilla 134. En lugar de un cristal electroóptico en masa se puede usar una fibra electroóptica 134, tal como una fibra cristalina 134 descrita en la referencia [19] o una fibra eléctricamente polarizada 134 como se describe en la referencia [20]. El rotador de polarización de Faraday 133' en el extremo próximo del elemento electroóptico gira las dos ondas de luz ortogonales emergentes de la fibra MP 132  $45^\circ$  antes de que entren en el cristal electroóptico. Las direcciones de polarización después del rotador 133' coinciden con los ejes electroópticos del cristal 134. La luz es reflejada en el extremo lejano del cristal 134 por medio del reflector 135. Las dos ondas de luz ortogonales experimentan un desplazamiento de fase electroóptico diferencial en el cristal 134 que es proporcional al voltaje aplicado. El rotador de Faraday 133' gira las ondas de luz de retorno otros  $45^\circ$  de modo que la rotación de polarización completa total corresponde a  $90^\circ$ . (La rotación de polarización es necesaria para que el retardo completo del grupo de los estados de polarización ortogonal en la fibra MP 132 sea cero y las dos ondas sean de nuevo coherentes cuando interfieran en los polarizadores 141, 145)

El desplazamiento de fase electroóptico es extraído de forma análoga al desplazamiento de fase magnetoóptico del sensor de corriente de fibra óptica de la figura 1. Para recuperar la señal procedente de la medición de potencia luminosa en los dos canales de fotodetección 142, 143, los aspectos de mejora de la precisión de la invención ya explicados en otros detalles y ejemplos anteriores pueden aplicarse como en el caso de los sensores de corriente de fibra óptica. En particular, la estabilización de temperatura del módulo divisor de polarización óptica integrado 14 incrementa la estabilidad de la señal de forma análoga al caso de los sensores de corriente de fibra óptica. Obsérvese que, en lugar del elemento electroóptico detector 134 ilustrado en la figura 8, también se puede usar otros diseños del elemento detector de voltaje descrito en la referencia 16.

Los varios aspectos de la presente invención pueden aplicarse de forma análoga a un sensor de voltaje óptico en base al efecto piezoeléctrico en materiales tales como cuarzo. El o los elementos de cuarzo somete(n) a esfuerzo una fibra detectora MP montada en presencia de un voltaje aplicado y como resultado introduce(n) de nuevo un desplazamiento de fase dependiente de voltaje entre los estados de polarización ortogonal de la fibra detectora (véase las referencias [16, 7] para más detalles). La fibra detectora MP también puede actuar de manera similar como un sensor de esfuerzos o fuerzas de otro origen.

Aunque se han mostrado y descrito realizaciones actualmente preferidas de la invención, se ha de entender que la invención no se limita a ellas, sino que puede realizarse y ponerse en práctica de otro modo de varias formas dentro del alcance de las reivindicaciones siguientes.

En particular, las variaciones ventajosas de los ejemplos antes descritos son las siguientes:

- Preferiblemente, las guías de ondas del divisor/combinador 140 son producidas por intercambio de iones asistido por campo eléctrico que da lugar a birrefringencia despreciable.

- Preferiblemente, las caras de extremo del divisor/combinador 140 están pulidas en ángulo (por ejemplo, a 8° a la dirección de propagación de la luz) con el fin de minimizar las retrorreflexiones.
- 5 • Los ejes rápido y lento del retardador de cuarto de onda QWR 144 del módulo óptico integrado 14 pueden estar orientados a 45° a los ejes rápido y lento de la fibra MP (en lugar de alineación paralela u ortogonal). La luz después del retardador siempre es polarizada linealmente con una polarización que gira, si la fase diferencial de las ondas de luz de interferencia cambia. Las señales de detección explicadas anteriormente permanecen sin cambiar, si los polarizadores en los dos canales de detección se alinean entonces paralelos a los ejes rápido y lento de la fibra MP, respectivamente, es decir, girados 45° con respecto a las configuraciones explicadas anteriormente. Obsérvese que en este caso el polarizador P1 141 ya no puede ser común para la luz de la fuente y el primer canal de detección 142, puesto que las dos direcciones de polarización difieren ahora 45°.
- 10 • En lugar de un divisor/combinador 140 se puede usar un divisor óptico en masa con el retardador de cuarto de onda 144 y los polarizadores 141, 145 montados en él.
- 15 • El alojamiento de bobina de fibra 13, el cable de fibra de mantenimiento de polarización 132, y el alojamiento de módulo óptico 181 pueden contener, a efectos de redundancia, dos o más bobinas de fibra, fibras y divisores, respectivamente.
- 20 • Se puede usar una fuente de luz común 111 para varios cabezales de sensor 13 (en general, n cabezales). De especial interés es una fuente común 111 para un sistema sensor trifásico. La luz de la fuente es dividida entonces por un acoplador de 1xn fibras o un divisor óptico 1xn integrado en los cabezales de sensor individuales 13.
- 25 • Los esquemas de procesamiento de señal ilustrados en las figuras 2, 3 y 4 pueden implementarse como circuitos completamente digitales, como circuitos analógicos, o como circuitos analógicos/digitales mezclados.
- Para la estabilización de la temperatura de un mensurando de CA o campo transitorio es posible utilizar solamente un canal de detección para derivar una medida para la temperatura en el módulo óptico integrado.
- 30 • Se deberá indicar que el retardador 144 y el espaciador 146 del módulo divisor de polarización descrito también pueden intercambiarse de tal manera que la polarización de fase se introduzca antes del elemento detector 131.
- Para sensores ópticos de campo magnético o sensores de corriente según esta invención, el elemento detector puede incluir fibras ópticas o guías de ondas, incluyendo especialmente fibras birrefringentes bajas, fibras de vidrio de roca, o fibras hiladas altamente birrefringentes, materiales magnetoópticos en masa, tales como cristales de itrio hierro granate o bloques de vidrio de sílice fundida, o fibras ópticas, guías de ondas, o materiales ópticos en masa montados en un elemento magnetostrictivo o sus combinaciones.
- 35 • En el caso de estabilización de temperatura del elemento que introduzca el desplazamiento de fase de polarización óptica, en principio un canal de detección puede ser suficiente para mediciones de CA o corriente transitoria. La señal de sensor se determina entonces dividiendo el componente de señal de detección de CA o transitorio por el componente de señal CC.

## Referencias

- 45 [1] K. Bohnert, P. Gabus, J. Nehring y H. Brandle, "Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor", Journal of Lightwave Technology, vol. 20, págs. 267-276, 2002.
- [2] "The fiber-optic gyroscope", Herve Lefevre, Artech House, Boston, Londres, 1992.
- 50 [3] K. Bohnert, A. Frank, H. Brandle, "Fiber-optic current sensor with polarimetric detection scheme", WO 2007/121592 A1.
- [4] Norma de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), IEC60044-8, Transformadores - Parte 8: Transformadores de corriente electrónicos.
- 55 [5] J. Häfner y B. Jacobson, "Proactive Hybrid HVDC Breakers - A key innovation for reliable HVDC grids", en Proceedings of Cigre International Symposium on the electric power systems of the future - Integrating supergrids and microgrids, Bolonia, Italia, 13-15 septiembre 2011.
- 60 [6] R. Wiest, A. Frank, K. Bohnert, "Temperature compensated fiber-optic current or magnetic field sensor with insensitivity to variation in sensor parameters", EP 2 306 212 A1.
- [7] K. Bohnert, M. Ingold y J. Kostovic, "Fiber-Optic Voltage Sensor for SF6 Gas-Insulated High-Voltage Switchgear", Appl. Opt. 38, 1926-1932, 1999.
- 65

- [8] K. Bohnert, P. Gabus, H. Brändle, "High voltage component with optical fiber and method of producing it", US 2006/0153 509 A1.
- 5 [9] U. Akesson, D. Andersson, L. Sköld, Y. Petersson, "Circuit breaker", WO 2008/080878 A1.
- [10] C. Piazza, E. Centenaro, K. Bohnert, P. Gabus, H. Brändle, R. Cameroni, "Pole of a circuit breaker with an integrated optical current sensor", US 6 608 481 B1.
- 10 [11] K. Bohnert, H. Brändle, "Gas-insulated switchgear device with integrated current sensor", WO 2009/080109 A1.
- [12] M. Hochlehner, T. Lorek, A. Zekhnini, K. Bohnert, A. Frank, "Generator circuit breaker with fiber optic current sensor", WO 2010/012301 A1.
- 15 [13] J. Haefner, A. Frank, K. Bohnert, "High voltage AC/DC or DC/AC converter station with fiber optic current sensor", WO 2010/012300 A1.
- [14] Kurosawa y colaboradores, "Flexible fiber Faraday effect current sensor using flint glass fiber and reflection scheme", IEICE Trans. Electron. Vol. E83-C, 326 (2000) y Optical Fibre Sensors Conference 13, 1999 abril 12-16, 20 1999, Kyongju, Corea.
- [15] K. Kurosawa y colaboradores, "Development of an optical instrument transformer for DC voltage measurement", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, 1771, 1993.
- 25 [16] WO 2008/077255 A1
- [17] S. Wildermuth, K. Bohnert y H. Brändle, "Interrogation of a birefringent fiber sensor by non-reciprocal phase modulation", IEEE Photonics Technology Letters vol. 22, págs. 1388-1390, 2010.
- 30 [18] X. Feng, L. Li, X. Wang, C. Zhang, J. Yu y C. Li, "Birefringence elimination of bismuth germanate crystal in quasi-reciprocal reflective optical voltage sensor", Applied Optics, vol. 52, págs. 1676-1681, 2013.
- [19] US 2009/0290165 A1.
- 35 [20] US 2011/0050207 A1.
- [21] US 5,715,058.

**Lista de signos de referencia**

- 40 Sensor 10
- Módulo optoelectrónico 11
- 45 Fuente de luz 111
- Detectores 12-1, 12-2
- 50 Unidad de procesado de señal 113
- Cabezal de sensor 13
- Elemento detector 131
- 55 Fibra o fibras ópticas 101
- Conectores de fibra 102
- Módulo divisor de polarización óptica integrado 14
- 60 Divisor/combinador 1x3 140
- Polarizador 141
- 65 Fibra MP 132

	Retardador de cuarto de onda (fibra) 133
	Rotador Faraday 133'
5	Reflector 135
	Canales de detección óptica 142, 143
	Placa retardadora de cuarto de onda (QWR) 144
10	Espejo de rotación de Faraday 144'
	Polarizador 145
15	Espaciador 146
	Unidad de transformación de Fourier rápida FFT
	Filtro de paso bajo (n) LFP (n)
20	Filtro de paso alto (n) HFP (n)
	Sumador +
25	Sustractor -
	Divisor /
	Rectificador R
30	Relación de amplitud A
	Divisor de haz polarizante 16
35	Elemento electroóptico 134
	Conductor 15
	Placas terminales 151
40	Capa aislante 152
	Aislante eléctrico 17
45	Pestaña o pestañas aislantes 171
	Medio aislante 172
	Alojamiento térmicamente aislado 18
50	Resistencia laminar de calentamiento 181
	Alojamiento externo 182
55	Protector de conector 103
	Prensacable 104
60	



**REIVINDICACIONES**

1. Un método de detectar un desplazamiento de fase óptico entre dos conjuntos de ondas de luz inducido por un campo mensurando en un elemento detector (131, 134), incluyendo el método los pasos de:

- pasar a través de dicho elemento detector (131, 134) desde una fuente de luz (111) dichos dos conjuntos de ondas de luz que tienen diferentes velocidades dentro de dicho elemento detector (131, 134) en presencia de un campo mensurando no evanescente;

- introducir un desplazamiento de fase óptico de polarización estática entre dichos dos conjuntos de ondas de luz;

- convertir un desplazamiento de fase óptico total incluyendo dicho desplazamiento de fase óptico de polarización estática y dicho desplazamiento de fase óptico inducido por dicho campo mensurando a cambios de potencia óptica de signos opuestos (antifase) en al menos dos canales de detección (142, 143);

- convertir la potencia óptica en dichos al menos dos canales de detección (142, 143) a señales eléctricas de detección;

- filtrar componentes espectrales de las señales eléctricas de detección de dichos al menos dos canales de detección (142, 143) y combinar dichos componentes espectrales o un parámetro de normalización derivado de ellos con al menos una señal de detección para producir señales de detección normalizadas correspondientes a una potencia óptica media igual en ausencia de dicho campo mensurando;

- combinar las señales de detección de dichos al menos dos canales de detección incluyendo las señales de detección normalizadas para producir una señal de sensor dependiente del desplazamiento de fase óptico total, pero esencialmente independiente de la intensidad de dicha fuente de luz y de diferente pérdida o de diferente ganancia en dichos al menos dos canales de detección (142, 143),

donde los componentes espectrales filtrados son una CA o un contenido transitorio de las señales de detección y los componentes espectrales CA filtrados son promediados en el tiempo.

2. El método de la reivindicación 1, donde los dos conjuntos de ondas de luz incluyen dos estados de polarización diferentes, en particular dos estados de polarización lineales ortogonales o estados circularmente polarizados izquierdo y derecho; y/o

donde uno o varios elementos polarizantes (141, 145, 16) se usan para generar los cambios de potencia óptica que tienen signos opuestos (antifase).

3. El método de la reivindicación 1 o 2, donde el desplazamiento de fase óptico de polarización estática es aproximadamente  $(2n + 1) \times 90^\circ$ , en particular dentro de  $(2n + 1) \times 90^\circ \pm 20^\circ$  o dentro de  $(2n + 1) \times 90 \pm 5^\circ$ , donde n es cualquier número entero; y/o

donde el desplazamiento de fase óptico de polarización estática es introducido usando al menos un retardador de cuarto de onda (144) o un rotador Faraday (144').

4. El método de alguna de las reivindicaciones precedentes, donde el elemento detector es un elemento detector de corriente o campo magnético (131) o un elemento detector de voltaje o campo eléctrico (134); en particular

donde el elemento detector de corriente (131) es una fibra óptica (131) con bucle alrededor de un conductor de corriente (15) o donde el elemento detector de campo eléctrico o voltaje (134) es un cristal electroóptico (134) o una fibra electroóptica cristalina o polarizada (134).

5. El método de alguna de las reivindicaciones precedentes, donde se usan una transformada Fourier rápida (FFT) y un filtro de paso bajo (LPF, LPF1) para filtrar componentes espectrales de CA promediados en el tiempo; y/o

donde se usa una serie de un filtro de paso alto (HPF1), un rectificador (R), y un filtro de paso bajo (LPF) para filtrar componentes espectrales de CA promediados en el tiempo.

6. El método de alguna de las reivindicaciones precedentes, donde los componentes espectrales filtrados están en un rango alrededor de la frecuencia nominal del campo mensurando, en particular en un rango de 45 Hz a 65 Hz; y/o

donde se pone un valor de amplitud umbral para los componentes espectrales filtrados y los componentes espectrales filtrados debajo de dicho umbral o el parámetro de normalización derivado de él son sustituidos por valores por defecto o por componentes de señal filtrados de paso bajo.

7. El método de alguna de las reivindicaciones precedentes, incluyendo además el paso de aplicar un filtro de paso alto (HPF, HPF2) a la señal después del paso de combinación; y/o
- 5 incluyendo además el paso de compensar la dependencia de temperatura del elemento detector y/o de componentes pasivos adicionales (14, 16, 141, 144, 144', 145); y/o
- incluyendo además una linearización de las características de señal de sensor, teniendo en cuenta en particular el desplazamiento de fase óptico de polarización estática.
- 10 8. El método de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, incluyendo además el paso de derivar de la señal de sensor otra señal representativa del desplazamiento de fase de polarización estática.
- 15 9. El método de la reivindicación 8, donde el paso de derivar una señal representativa de la polarización de fase óptica estática incluye dividir la señal de sensor en un canal de desplazamiento de fase total y un canal de desplazamiento de fase de polarización estática y aplicar un filtro de paso bajo (LPF2) al canal de desplazamiento de fase de polarización estática; y/o
- 20 donde el desplazamiento de fase de polarización estática es indicativo de la temperatura de componentes (14, 144, 144') que introducen el desplazamiento de fase óptico de polarización estática y/o de un elemento detector (131, 134), incluyendo además en particular el paso de usar el desplazamiento de fase de polarización estática para compensar la dependencia de temperatura de la señal de sensor producida por un módulo divisor de polarización óptica integrado (14) y/o por el elemento detector (131, 134); y/o
- 25 donde el método incluye otra compensación de temperatura proporcionada por un retardador (133) acoplado al elemento detector (131).
- 30 10. Unidad de procesado de señal que tiene entradas para cada una de las señales medidas por dos o más detectores (12-1, 12-2) y filtros (FFT, HPF, LPF, LPF1, LPF2, HPF1, HPF2) y más componentes (R, X, /, +, -), **caracterizada porque** la unidad de procesado de señal está configurada para ejecutar un método según alguna de las reivindicaciones precedentes.
- 35 11. Un sensor de corriente o de cambio magnético o de tensión o de campo eléctrico de fibra óptica (10), incluyendo la unidad de procesado de señal de la reivindicación 10, incluyendo además el sensor (10) al menos una fuente de luz (111) y al menos uno o dos detectores de luz (12-1, 12-2), al menos dos o tres canales de transmisión óptica, proporcionando un canal un canal directo para la luz a un elemento detector (131, 134) y proporcionando uno o dos canales (142, 143) canales de detección de retorno de la luz al detector o los detectores (12-1, 12-2), uno o varios elementos ópticos pasivos (14, 16, 141, 144, 144', 145) para introducir un desplazamiento de fase óptico de polarización estática entre dos conjuntos de ondas de luz diferentes que tienen diferentes velocidades dentro de dicho elemento detector (131, 134) en presencia de un campo mensurando no evanescente, y para convertir un desplazamiento de fase óptico total incluyendo dicho desplazamiento de fase óptico de polarización estática y un desplazamiento de fase óptico inducido por el campo mensurando a cambios de potencia óptica, siendo la potencia óptica en el caso de dos canales de detección (142, 143) de signos opuestos (antifase), y conectándose una fibra de mantenimiento de polarización (MP) (132) directa o indirectamente mediante al menos un retardador (133) o elemento rotador Faraday a dicho elemento detector (131, 134), donde al menos partes de dicho uno o varios elementos ópticos pasivos (14, 16, 141, 144, 144', 145) están en contacto térmico con una unidad de estabilización de temperatura (181) que proporciona un entorno de temperatura controlada para dicho uno o varios elementos ópticos pasivos (14, 16, 141, 144, 144', 145); en particular donde la unidad de estabilización de temperatura (181) incluye al menos una resistencia de calentamiento autorregulada, en particular al menos una lámina de resistencia de calentamiento autorregulada.
- 40 45 50
12. El sensor de la reivindicación 11, donde el uno o varios elementos ópticos pasivos (14, 16, 141, 144, 145) están a potencial de tierra y donde la fibra MP (132) proporciona una conexión óptica desde el potencial de tierra al potencial del elemento detector (131, 134) que es diferente del potencial de tierra.
- 55 13. El sensor de la reivindicación 11 o 12, donde el uno o varios elementos ópticos pasivos (144) para introducir un desplazamiento de fase óptico de polarización estática y el uno o varios elementos ópticos pasivos (141, 145) que convierten un desplazamiento de fase óptico total se combinan en un módulo divisor de polarización óptica integrado (14) con al menos tres puertos en el lado de fuente óptica/detector y un puerto en el lado de elemento detector, estando conectado dicho puerto en el lado de elemento detector a la fibra MP (132).
- 60 14. El sensor de cualquiera de las reivindicaciones 11 a 13, donde la fibra MP (132) pasa a través del interior de una columna aislante y la columna aislante (17) es un aislante central hueco lleno de un fluido o gel aislante rodeando la fibra MP (132),
- 65 incluyendo opcionalmente dicho fluido o gel una silicona o silicona con material de relleno compresible, o un gas, incluyendo opcionalmente nitrógeno o hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>); o incluyendo el fluido o gel aislante una mezcla

5 de fluidos de aislamiento dieléctrico o mezcla de gases un compuesto de organofluor, seleccionándose tal compuesto de organofluor del grupo que consta de: un fluoroéter, un oxirano, una fluoroamina, una fluorocetona, una fluoroolefina, y sus mezclas y/o productos de descomposición, y en particular incluyendo además el fluido o gel aislante un gas de fondo o gas portador diferente del compuesto de organofluor y seleccionándose del grupo que consta de: aire, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, un gas noble, H<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO, N<sub>2</sub>O; fluorocarbonos y en particular perfluorocarbonos, tales como CF<sub>4</sub>, CF<sub>3</sub>I, SF<sub>6</sub>; y sus mezclas.

10 15. El sensor de cualquiera de las reivindicaciones 11 a 14, donde el elemento detector incluye una fibra detectora (131) que estará en bucle alrededor de un conductor (15) y que en la operación estará expuesta a un campo magnético de una corriente en dicho conductor; y/o siendo el sensor un sensor para medir corriente CC; y/o

donde el elemento detector incluye un cristal electroóptico (134) o una fibra electroóptica (134) o una fibra óptica montada en un material piezoeléctrico.

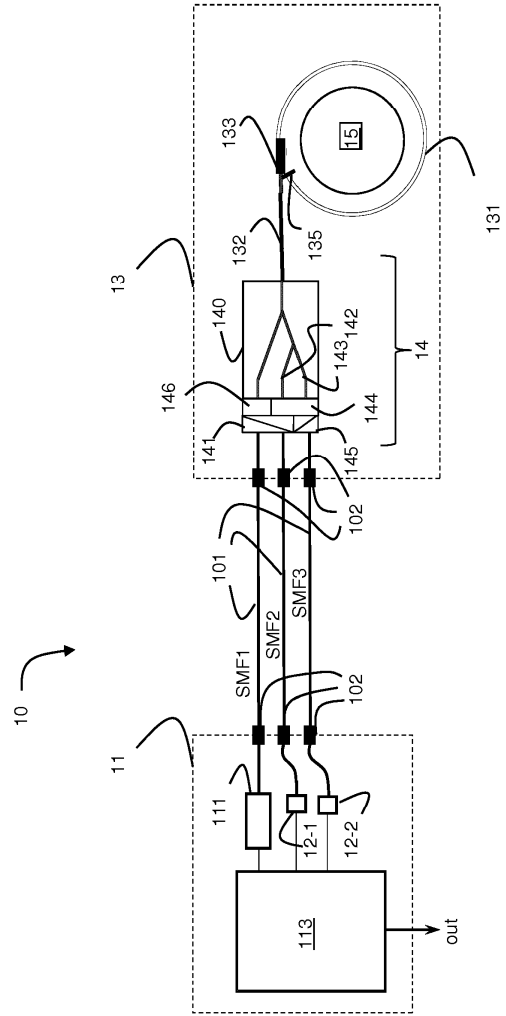


FIG. 1

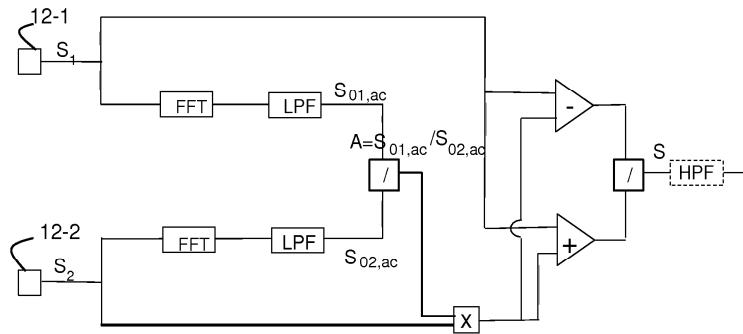


FIG. 2A

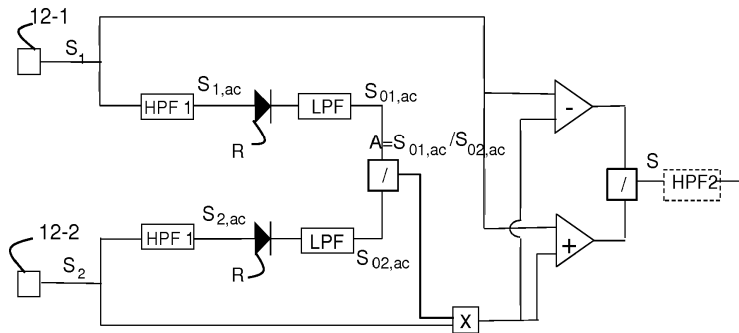


FIG. 2B

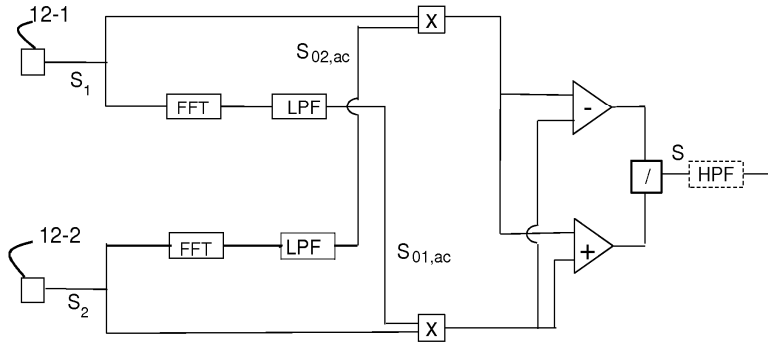


FIG. 2C

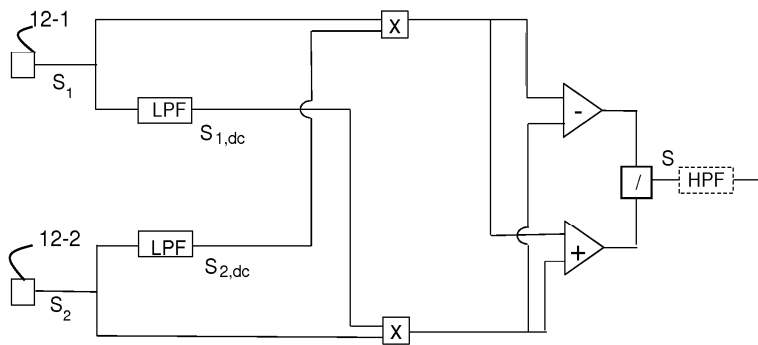


FIG. 3

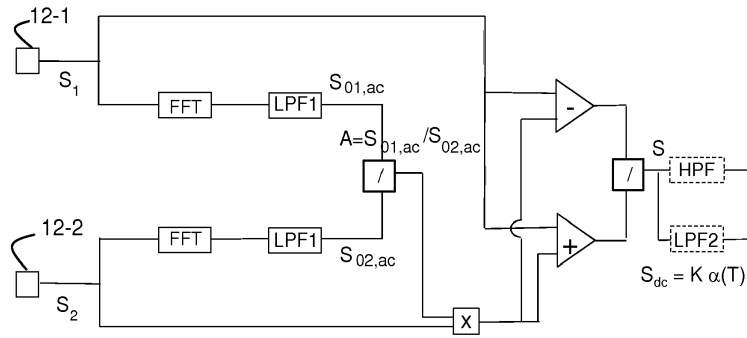


FIG. 4

FIG. 5

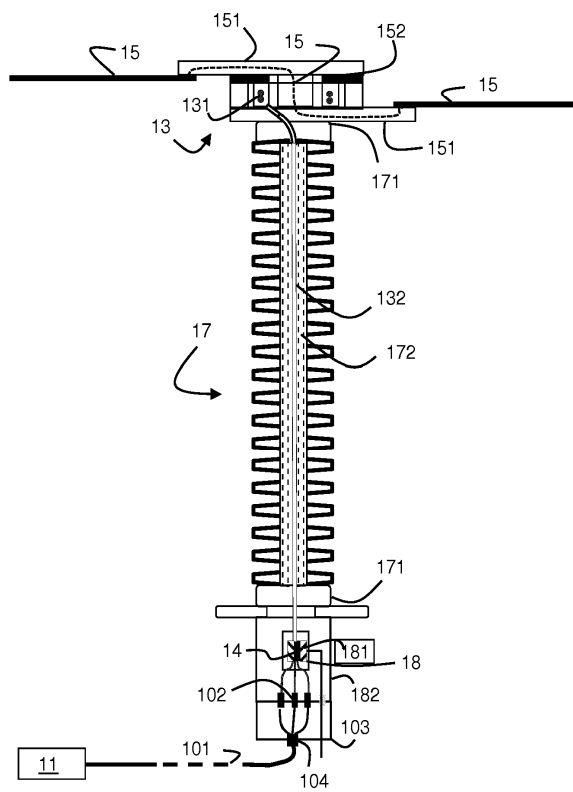




FIG. 6A

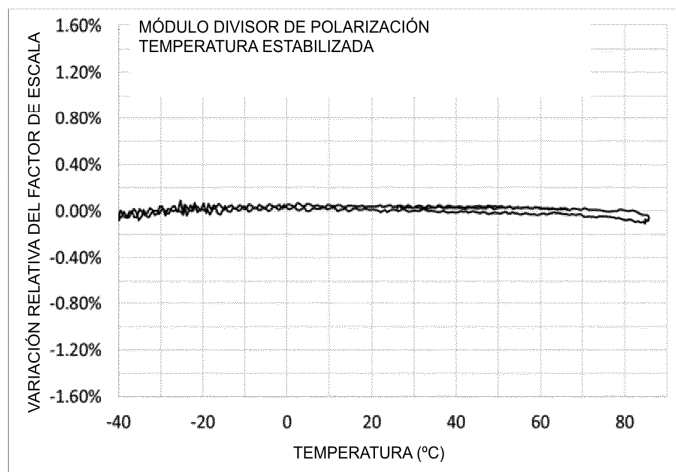
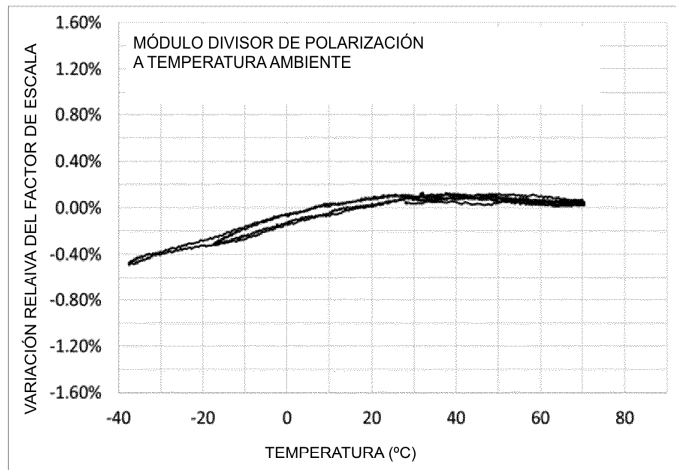


FIG. 6B

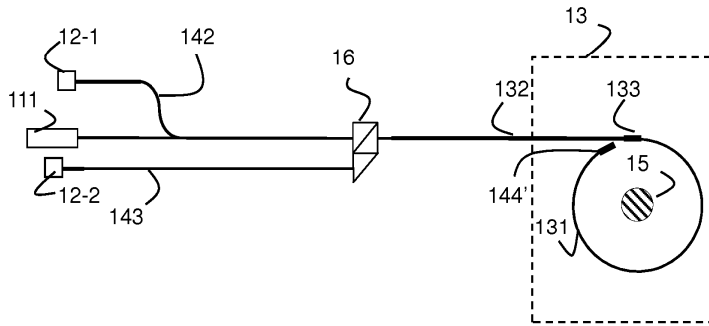


FIG. 7A

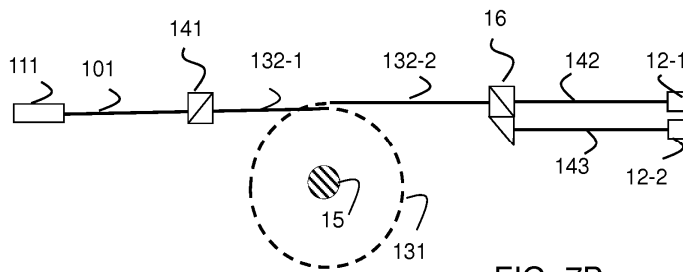


FIG. 7B

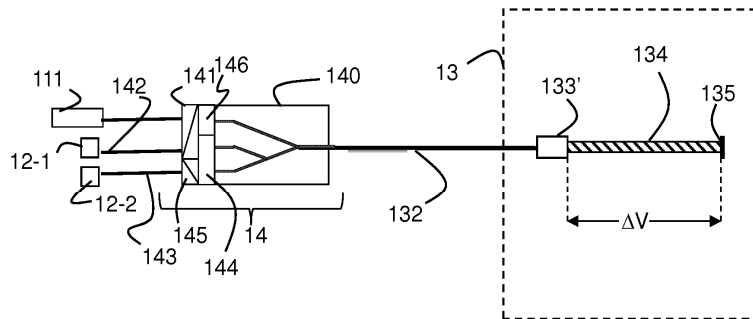


FIG. 8