

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 980 502**

51 Int. Cl.:

G01R 15/24 (2006.01)

G01R 19/00 (2006.01)

G01R 33/032 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.09.2019 E 19382824 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.05.2024 EP 3798643**

54 Título: **Equipo de medida de corriente basado en fibra óptica para medir la corriente que circula por un conductor, y método asociado**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
01.10.2024

73 Titular/es:

LUMIKER APLICACIONES TECNOLOGICAS, S.L
(100.0%)
Parque Tecnológico de Bizkaia Astondo Bidea,
Edif. 612
48160 DERIO, ES

72 Inventor/es:

BENGOECHEA DE LA LLERA, FRANCISCO
JAVIER

74 Agente/Representante:

IGARTUA IRIZAR, Ismael

ES 2 980 502 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

Equipo de medida de corriente basado en fibra óptica para medir la corriente que circula por un conductor, y método asociado

5

SECTOR DE LA TÉCNICA

La presente invención se relaciona con un equipo de medida de corriente basado en fibra óptica para medir la corriente que circula por un conductor, y con un método para medir la corriente que circula por un conductor con un equipo de medida de corriente basado en fibra óptica.

10

ESTADO ANTERIOR DE LA TÉCNICA

Son conocidos los sensores basados en fibra óptica para medir la corriente que circula por un conductor. Dichos sensores funcionan según el efecto Faraday, es decir, el campo magnético generado por la corriente que circula por el conductor provoca un giro en la polarización de la luz que circula por la fibra óptica dispuesta alrededor del conductor. El funcionamiento de los equipos de medida basados en fibra óptica consiste en emitir luz a través de una fibra óptica hacia una parte sensora en la que se modifican las características de la luz en función de la corriente que circula por el conductor, y analizar el giro provocado en la polarización de la luz para determinar la magnitud de la corriente que transcurre por el conductor.

15

20

WO2016198575A1, perteneciente al mismo solicitante, describe un equipo de medida de corriente basado en fibra óptica y un método asociado. El equipo de medida de corriente comprende un interrogador con un emisor y un receptor, y una parte sensora próxima al conductor. El interrogador y la parte sensora están adaptados para conectarse a través de una fibra intermedia monomodo estándar. El documento de patente describe varios modos de implementar tanto el interrogador como la parte sensora. En una de las realizaciones, la parte sensora comprende una primera rama que comprende un primer polarizador y un giro de fibra a continuación de dicho primer polarizador, una segunda rama que comprende un segundo polarizador, y una rama sensora que comprende un tramo sensor dispuesto en la proximidad del conductor y un espejo. La primera rama y la segunda rama están acopladas a la rama sensora mediante un divisor.

25

30

En el método descrito para esta realización los pulsos emitidos por el emisor se reciben en la rama sensora a través de la primera rama, mientras que los pulsos modificados en función de la corriente que circula por el conductor son recibidos por el receptor desde la segunda rama.

35

Los documentos JPH01292263A, DE4227903C1, US2011/0051145A1 y US6297625B1 también describen sensores basados en fibra óptica.

EXPOSICIÓN DE LA INVENCION

40

El objeto de la invención es el de proporcionar un equipo de medida de corriente basado en fibra óptica para medir la corriente que circula por al menos un conductor, y un método para medir la corriente que circula por al menos un conductor con un equipo de medida basado en fibra óptica, según se define en las reivindicaciones.

45

Un primer aspecto de la invención se refiere a un equipo de medida basado en fibra óptica para medir la corriente que circula por al menos un conductor, según la reivindicación 3.

El equipo de medida comprende un interrogador que comprende un primer emisor, un segundo emisor, un primer receptor y un segundo receptor.

50

El equipo de medida también comprende una parte sensora conectada al interrogador y que está configurada para disponerse en la proximidad del conductor.

La parte sensora comprende una primera rama de entrada que comprende un primer polarizador y un giro de fibra a continuación de dicho primer polarizador, y una segunda rama de entrada que comprende un segundo polarizador.

55

La parte sensora también comprende una primera rama sensora que comprende un primer devanado de fibra óptica dispuesto en la proximidad del conductor y un primer espejo Faraday, y una segunda rama sensora que comprende un segundo devanado de fibra óptica dispuesto en la proximidad del conductor, un segundo espejo Faraday y un retardo entre el segundo devanado de fibra óptica y el segundo espejo Faraday.

60

La primera rama de entrada y la segunda rama de entrada están acopladas a la primera rama sensora y a la segunda rama sensora mediante un divisor.

65

El equipo de medida está configurado para llevar a cabo el método según un segundo aspecto de la invención descrito a continuación.

El segundo aspecto de la invención se refiere a un método para medir la corriente que circula por un conductor según la reivindicación 1 con un equipo de medida de corriente como el descrito arriba.

5 En el método de la invención el primer emisor emite una primera señal que llega a la primera rama sensora a través de la primera rama de entrada, recorre la primera rama sensora y es modificada en función de la corriente que circula por el conductor, y es recibida por el segundo receptor desde la segunda rama de entrada.

10 El segundo emisor emite una segunda señal que llega a la primera rama sensora a través de la segunda rama de entrada, recorre la primera rama sensora y es modificada en función de la corriente que circula por el conductor, y es recibida por el primer receptor desde la primera rama de entrada.

15 La primera señal llega también a la segunda rama sensora a través de la primera rama de entrada, y la segunda señal llega también a la segunda rama sensora a través de la segunda rama de entrada. La primera señal y la segunda señal recorren dicha la segunda rama sensora y son modificadas en función de la corriente que circula por el conductor.

20 El segundo receptor recibe desde la segunda rama de entrada la primera señal modificada en la segunda rama sensora, recibiendo también el primer receptor desde la primera rama de entrada la segunda señal modificada en la segunda rama sensora.

25 La corriente que circula por el conductor se determina combinando la primera señal modificada en la primera rama sensora y recibida por segundo receptor, la segunda señal modificada en la primera rama sensora y recibida por primer receptor, la primera señal modificada en la segunda rama sensora y recibida por segundo receptor, y la segunda señal modificada en la segunda rama sensora y recibida por primer receptor.

30 Mediante estas cuatro señales se obtiene un cálculo preciso de la corriente que circula por el conductor, con un margen dinámico elevado. Al tener los dos devanados de fibra óptica de idéntica longitud pero en contraposición, estos tienen una idéntica respuesta en la desviación de la polarización de la luz, pero en contrafase, es decir con un desfase de 180 grados. Esta configuración permite determinar la corriente que circula por el conductor de una manera muy precisa, en especial en valores en los que la corriente que circula por el conductor es baja y por lo tanto la relación señal/ruido es alta, ya que esta configuración permite una buena cancelación de ruido sin tener que emplear filtros para eliminar dicho ruido. Así mismo, al obtener una eliminación de ruido muy buena ofrece muy buenas mediciones de conductores por los que circula corriente continua en los que no se pueden utilizar filtros. Además, tratando las señales obtenidas en el primer receptor y en el segundo receptor es posible obtener un cálculo preciso del giro de fibra de la primera rama de entrada y de las atenuaciones producidas por las distintas fibras de conexión del equipo de medida.

35 Estas y otras ventajas y características de la invención se harán evidentes a la vista de las figuras y de la descripción detallada de la invención.

40 DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

45 La figura 1 muestra esquemáticamente un equipo de medida de corriente basado en fibra óptica según una primera realización de la invención.

La figura 2 muestra esquemáticamente un equipo de medida de corriente basado en fibra óptica según una segunda realización de la invención.

50 EXPOSICIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

La figura 1 muestra una primera realización del equipo de medida 1 de corriente basado en fibra óptica para medir la corriente que circula por un conductor 4.

55 El equipo de medida 1 comprende un interrogador 2 que comprende un primer emisor 20 y un segundo emisor 21. El interrogador 2 comprende también un primer receptor 22 y un segundo receptor 23.

Además, el equipo de medida 1 comprende una parte sensora 3 conectada al interrogador 2 y que está configurada para disponerse en la proximidad del conductor 4.

60 La parte sensora 3 comprende una primera rama de entrada 30 que comprende un primer polarizador 300 y un giro de fibra 301 a continuación de dicho primer polarizador 300. Preferentemente el primer polarizador 300 es un polarizador lineal que filtra la señal de entrada dejando únicamente pasar una determinada dirección de oscilación del campo eléctrico de la luz. Preferentemente, el primer polarizador 300 deja pasar solo la parte de señal que oscila a 0 grados. Preferentemente el giro de fibra 301 es un girador geométrico que se obtiene mediante la torsión de la fibra 302 que conecta el primer polarizador 300 al divisor 34.

65

ES 2 980 502 T3

La parte sensora 3 comprende también una segunda rama de entrada 31 que comprende un segundo polarizador 310. Preferentemente dicho segundo polarizador 310 es un polarizador lineal que filtra la señal de entrada dejando únicamente pasar una determinada dirección de oscilación del campo eléctrico de la luz. Preferentemente, el segundo polarizador 310 deja pasar solo la parte de señal que oscila a 0 grados.

5 La parte sensora 3 comprende también una primera rama sensora 32 que comprende un primer devanado de fibra óptica 320 dispuesto en la proximidad del conductor 4 y un primer espejo Faraday 321.

10 Además, la parte sensora 3 comprende una segunda rama sensora 33 que comprende un segundo devanado de fibra óptica 330 dispuesto en la proximidad del conductor 4, un segundo espejo Faraday 331 y un retardo 332 entre el segundo devanado de fibra óptica 330 y el segundo espejo Faraday 331. El retardo 332 de la segunda rama sensora 33 es necesario para que el primer receptor 22 y el segundo receptor 23 puedan distinguir la señal recibida desde la primera rama sensora 32 de la señal recibida desde la segunda rama sensora 33, es decir, permite la gestión de las señales recibidas en los receptores 22 y 23 del interrogador 2. Preferentemente, el retardo 332 consiste en disponer una longitud de fibra adicional entre el segundo devanado de fibra óptica 330 y el segundo espejo Faraday 331, de modo que, la señales que circulan por dicha segunda rama sensora 33 recorren una distancia mayor que las que recorren la primera rama sensora 32, alcanzando las señales que recorren la segunda rama sensora 33 los receptores 22 y 23 del interrogador 2 con un decalaje respecto a las señales que recorren la primera rama sensora 32. Al ser los espejos 321 y 331 utilizados para reflejar las señales de las ramas sensoras 32 y 33 espejos del tipo Faraday, el retardo 332 a modo de fibra adicional dispuesto entre el segundo devanado de fibra óptica 330 y el espejo Faraday 331 no afecta en la medida de la corriente que circula por el conductor 4. Además, el hecho de utilizar espejos Faraday hace que se establezca la respuesta del primer devanado de fibra óptica 320 y del segundo devanado de fibra óptica 330, mejorando el cálculo de la corriente del conductor 4.

25 La parte sensora 3 comprende también un divisor 34 (también conocido como “*splitter*”) que acopla la primera rama de entrada 30 y la segunda rama de entrada 31 a la primera rama sensora 32 y a la segunda rama sensora 33.

30 Tal y como se observa en la figura 1, el divisor 34 de la primera realización es un divisor 34 que comprende dos entradas 340 y 341 y dos salidas 342 y 343. En esta primera realización la primera rama de entrada 30 de la parte sensora 3 está conectada a la primera entrada 340 del divisor 34, la segunda rama de entrada 31 está conectada a la segunda entrada 341 del divisor 34, la primera rama sensora 32 está conectada a la primera salida 342 del divisor 34, y la segunda rama sensora 33 está conectada a la segunda salida 343 del divisor 34. Cuando una primera señal emitida por el primer emisor 20 llega a la primera entrada 340 del divisor 34, el divisor 34 divide la potencia de dicha primera señal en dos, saliendo por cada una de las salidas 342 y 343 del divisor 34 la primera señal, pero con la mitad de potencia. Del mismo modo, cuando una segunda señal emitida por el segundo emisor 21 llega a la segunda entrada 341 del divisor 34, el divisor 34 divide la potencia de dicha segunda señal en dos, saliendo por cada una de las salidas 342 y 343 del divisor 34 la segunda señal, pero con la mitad de potencia. Cuando una señal circula en sentido contrario, es decir, cuando la primera señal modificada o la segunda señal modificada en la primera rama sensora 32 llega a la primera salida 342 del divisor 34, el funcionamiento de dicho divisor 34 es el mismo, dividiendo la potencia de dicha señal modificada en dos, saliendo por cada una de las entradas 340 y 341 del divisor 34 la señal modificada, pero con la mitad de potencia. Del mismo modo, cuando la primera señal modificada o la segunda señal modificada en la segunda rama sensora 33 llega a la segunda salida 343 del divisor 34, el divisor 34 divide la potencia de dicha señal modificada en dos, saliendo por cada una de las entradas 340 y 341 del divisor 34 la señal modificada, pero con la mitad de potencia.

45 El primer devanado de fibra óptica 320 de la primera rama sensora 32 y el segundo devanado de fibra óptica 330 de la segunda rama sensora 33 comprenden el mismo número de vueltas pero devanados en sentidos opuestos. Es decir, uno de los devanados de fibra óptica estará devanado en sentido horario mientras que el otro devanado de fibra óptica estará devanado en sentido antihorario, obteniendo una parte sensora que comprende dos devanados de fibra óptica de idéntica longitud pero en contraposición. Al tener el primer devanado de fibra óptica 320 y el segundo devanado de fibra óptica 330 idéntica longitud, tienen una idéntica respuesta en la desviación de la polarización de la luz, pero al estar devanados en sentidos opuestos dichas respuestas están en contrafase, es decir, desfasadas en 180 grados.

55 Esta configuración permite determinar la corriente que circula por el conductor 4 de una manera muy precisa, en especial en valores en los que la corriente que circula por el conductor 4 es baja y por lo tanto la relación señal/ruido es alta, ya que esta configuración permite una buena cancelación de ruido sin tener que emplear filtros para eliminar dicho ruido. Asimismo, al obtener una buena eliminación de ruido ofrece muy buenas mediciones de conductores 4 por los que circula corriente continua en los que no se pueden utilizar filtros. Además, tratando las señales obtenidas en el primer receptor 22 y en el segundo receptor 23 es posible obtener un cálculo preciso del giro de fibra 301 de la primera rama de entrada 30 y de las atenuaciones α_1 , α_2 , α_{m1} y α_{m2} producidas por las distintas fibras de conexión del equipo de medida 1.

65 En esta primera realización el interrogador 2 comprende un primer girador 24 (también conocido como “*circulator*”) que conecta el primer emisor 20 y el primer receptor 22 del interrogador 2 a la primera rama de entrada 30 de la parte sensora 3. Además, en esta primera realización el primer girador 24 y la primera rama de entrada 30 de la parte

5 sensora 3 se conectan a través de una primera fibra intermedia 60, tal y como se observa en la figura 1. De este modo, el primer girador 24 acopla señal emitida por el primer emisor 20 a la primera rama de entrada 30 de la parte sensora 3 a través de la primera fibra intermedia 60. El primer girador 24 también acopla la señal modificada en la parte sensora 3 al primer receptor 22 a través de la primera fibra intermedia 60.

10 Del mismo modo, en esta primera realización el interrogador 2 comprende un segundo girador 25 que conecta el segundo emisor 21 y el segundo receptor 23 del interrogador 2 a la segunda rama de entrada 31 de la parte sensora 3. Además, en esta primera realización el segundo girador 25 y la segunda rama de entrada 31 de la parte sensora 3 se conectan a través de una segunda fibra intermedia 61, tal y como se observa en la figura 1. De este modo, el segundo girador 25 acopla la señal emitida por el segundo emisor 21 a la segunda rama de entrada 31 de la parte sensora 3 a través de la segunda fibra intermedia 61. El segundo girador 25 también acopla la señal modificada en la parte sensora 3 al segundo receptor 23 a través de la segunda fibra intermedia 61.

15 Preferentemente la primera fibra intermedia 60 y la segunda fibra intermedia 61 son fibras monomodo estándar (también conocidas como convencionales SM "single mode"). Para poder unir el interrogador 2 a la parte sensora 3 a través de fibras intermedias 60 y 61 del tipo monomodo estándar, se utiliza el concepto descrito en el documento de patente WO2016198575A1, perteneciente al mismo solicitante. Así, preferentemente tanto la señal emitida por el primer emisor 20 como la señal emitida por el segundo emisor 21 es una señal compuesta por un conjunto de al menos dos pulsos de luz polarizada, estando dichos pulsos polarizados con una diferencia de grados determinada, siendo preferentemente dicha diferencia de polarización de 90 grados. Es decir, preferentemente el primer emisor 20 y el segundo emisor 21 del interrogador 2 están configurados para emitir señales que comprenden un conjunto de al menos dos pulsos de luz polarizada, estando dichos pulsos polarizados con una diferencia de grados determinada. Para ello, el primer emisor 20 y el segundo emisor 21 del interrogador 2 pueden ser de cualquier tipo descrito en el documento de patente WO2016198575A1 o de cualquier otro tipo conocido por el experto en la materia y que cumpla los requisitos anteriormente descritos.

20 Tal y como se describe en el documento de patente WO2016198575A1, si se utilizan fibras monomodo estándar 60 y 61 para unir el interrogador 2 con la parte sensora 3, estas pueden hacer variar las características de la señal de luz emitida desde el emisor, por ejemplo en su polarización. Dichas fibras intermedias pueden modificar la polarización de la luz debido a diferentes aspectos tales como la temperatura de dichas fibras, las vibraciones sufridas por las mismas, etc. El hecho de emitir señales compuestas por conjuntos de al menos dos pulsos de luz polarizada, estando dichos pulsos polarizados con una diferencia de grados determinada, hace que el equipo de medida pueda compensar las alteraciones en la polarización producidas por las fibras intermedias. Los pulsos de luz polarizada del conjunto de pulsos pueden ser simultáneos o pueden emitirse en un intervalo pequeño de tiempo entre dichos pulsos, ya que de este modo se asegura que el comportamiento de la fibra intermedia es la misma para todos los pulsos del conjunto de pulsos. De este modo, tal y como se explica en el documento de patente WO2016198575A1, como las características de la fibra intermedia no afectan a la medida de la corriente se puede utilizar una fibra intermedia de la largura que sea necesaria. Así, es posible disponer la parte sensora 3 y el interrogador 2 a una distancia de varios kilómetros sin que la medida se vea afectada por dichas fibras intermedias 60 y 61. De este modo se puede medir la corriente de conductores situados en sitios remotos sin que sea necesario poner el interrogador 2 en dichos lugares, en los que pueden que no se cumplan los requisitos necesarios para el funcionamiento de dichos interrogadores, por ejemplo, o pueden no disponer de energía eléctrica segura.

25 Tal y como se ha comentado anteriormente, la primera rama de entrada 30 de la parte sensora 3 comprende un giro de fibra 301. Idealmente, dicho giro de fibra 301 es de 45 grados aproximadamente. Tal y como se describe en la solicitud de patente de patente europea EP18196585.6, perteneciente al mismo solicitante, con un giro de 45 grados se cancelan los términos cuadráticos de las señales utilizadas para calcular la corriente que circula por el conductor 4. De este modo se maximiza la sensibilidad del equipo de medida 1, además de aportar información de fase.

30 En esta primera realización, la fibra 312 que conecta el segundo polarizador 310 al divisor 34 no proporciona ningún giro a la señal que la atraviesa. En otras posibles realizaciones, no mostradas en las figuras, la segunda rama de entrada podría comprender un giro de fibra adicional a continuación del segundo polarizador, siendo preferentemente la suma del giro de fibra de la primera rama de entrada y del giro de fibra adicional de la segunda rama de entrada de 45 grados aproximadamente.

35 En el método de la invención aplicado a esta primera realización, el primer emisor 20 emite una primera señal que llega a la primera rama sensora 32 a través de la primera rama de entrada 30, recorre dicha primera rama sensora 32 y es modificada en función de la corriente que circula por el conductor 4, y es recibida por el segundo receptor 23 desde la segunda rama de entrada 31. Además, el segundo emisor 21 emite una segunda señal que llega a la primera rama sensora 32 a través de la segunda rama de entrada 31, recorre la primera rama sensora 32 y es modificada en función de la corriente que circula por el conductor 4, y es recibida por el primer receptor 22 desde la primera rama de entrada 30.

40 Por otro lado, dicha primera señal emitida por el primer emisor 20 llega también a la segunda rama sensora 33 a través de la primera rama de entrada 30, y dicha segunda señal emitida por el segundo emisor 21 llega también a la segunda rama sensora 33 a través de la segunda rama de entrada 31. La primera señal y la segunda señal recorren dicha la

segunda rama sensora 33 y son modificadas en función de la corriente que circula por el conductor 4. El segundo receptor 23 recibe desde la segunda rama de entrada 31 la primera señal modificada en la segunda rama sensora 33, mientras que el primer receptor 22 recibe desde la primera rama de entrada 30 la segunda señal modificada en la segunda rama sensora 33.

Así, la corriente que circula por el conductor 4 se determina combinando la primera señal modificada en la primera rama sensora 32 y recibida por segundo receptor 23, la segunda señal modificada en la primera rama sensora 32 y recibida por primer receptor 22, la primera señal modificada en la segunda rama sensora 33 y recibida por segundo receptor 23, y la segunda señal modificada en la segunda rama sensora 33 y recibida por primer receptor 22.

En el contexto de la invención se considerará señal propia aquella señal que se emite por el primer emisor 20 y tras ser reflejada en la parte sensora 3 es recibida por el primer receptor 22, y aquella señal que se emite por el segundo emisor 21 y tras ser reflejada en la parte sensora 3 es recibida por el segundo receptor 23. Por el contrario, se considerará señal cruzada a aquella señal que se emite por el primer emisor 20 y tras ser reflejada en la parte sensora 3 es recibida por el segundo receptor 23, y aquella señal que se emite por el segundo emisor 21 y tras ser reflejada en la parte sensora 3 es recibida por el primer receptor 22.

Así, para la determinación de la corriente que circula por el conductor 4 se utilizan las señales cruzadas, mientras que las señales propias, que también alcanzarán el primer receptor 22 y el segundo receptor 23, se descartan.

En esta primera realización el primer receptor 22 y el segundo receptor 23 comprenden un fotodiodo respectivo. Tal y como se ha comentado anteriormente, el primer receptor 22 recibirá la segunda señal modificada en la primera rama sensora 32 y en la segunda rama sensora 33, mientras que el segundo receptor 23 recibirá la primera señal modificada en la primera rama sensora 32 y en la segunda rama sensora 33. Los fotodiodos convierten la luz en intensidad, de modo que la unidad de control, no mostrada en las figuras, puede determinar la corriente que circula por el conductor 4 procesando y combinando la intensidad que recibe del fotodiodo del primer receptor 22 y la intensidad que recibe del fotodiodo del segundo receptor 23.

Por un lado tendremos las dos señales cruzadas que han sido modificadas en el primer devanado de fibra óptica 320 de la primera rama sensora 32:

$$R_{12} = \alpha_{m1} P_{12} [\cos^2(2\gamma\varphi) \sin^2\theta_a + \gamma^2 \sin^2(2\gamma\varphi) \cos^2\theta_a - 2\gamma \sin(2\gamma\varphi) \cos(2\gamma\varphi) \cos\theta_a \sin\theta_a]$$

$$R_{21} = \alpha_{m1} P_{21} [\cos^2(2\gamma\varphi) \sin^2\theta_a + \gamma^2 \sin^2(2\gamma\varphi) \cos^2\theta_a + 2\gamma \sin(2\gamma\varphi) \cos(2\gamma\varphi) \cos\theta_a \sin\theta_a]$$

Por otro lado tendremos las dos señales cruzadas que han sido modificadas en el segundo devanado de fibra óptica 330 de la segunda rama sensora 33:

$$Q_{12} = \alpha_{m2} P_{12} [\cos^2(2\gamma\varphi) \sin^2\theta_a + \gamma^2 \sin^2(2\gamma\varphi) \cos^2\theta_a + 2\gamma \sin(2\gamma\varphi) \cos(2\gamma\varphi) \cos\theta_a \sin\theta_a]$$

$$Q_{21} = \alpha_{m2} P_{21} [\cos^2(2\gamma\varphi) \sin^2\theta_a + \gamma^2 \sin^2(2\gamma\varphi) \cos^2\theta_a - 2\gamma \sin(2\gamma\varphi) \cos(2\gamma\varphi) \cos\theta_a \sin\theta_a]$$

Siendo

R_{12} = La intensidad lumínica medida por el segundo receptor 23 relativa a la primera señal modificada en la primera rama sensora 32.

R_{21} = La intensidad lumínica medida por el primer receptor 22 relativa a la segunda señal modificada en la primera rama sensora 32.

Q_{12} = La intensidad lumínica medida por el segundo receptor 23 relativa a la primera señal modificada en la segunda rama sensora 33.

Q_{21} = La intensidad lumínica medida por el primer receptor 22 relativa a la segunda señal modificada en la segunda rama sensora 33.

α_{m1} = La atenuación de la primera rama sensora 32.

α_{m2} = La atenuación de la segunda rama sensora 33.

$$P_{12} = P_1 \alpha_1 \alpha_2 R_2$$

Siendo:

P_1 = Potencia de luz emitida por el primer emisor 20

α_1 = Atenuación de las fibras 60 y 302

α_2 = Atenuación de las fibras 312 y 61

R_2 = Ganancia de la recepción del segundo receptor 23.

$$P_{21} = P_2 \alpha_2 \alpha_1 R_1$$

Siendo:

P_2 = Potencia de luz emitida por el segundo emisor 21

α_1 = Atenuación de las fibras 60 y 302

α_2 = Atenuación de las fibras 312 y 61

R_1 = Ganancia de la recepción del primer receptor 22.

$$\gamma = \frac{\left(\frac{\delta_c}{2} + \psi\right)}{\sqrt{\left(\frac{\delta_l}{2}\right)^2 + \left(\frac{\delta_c}{2} + \psi\right)^2}}$$

Siendo:

- 5 δ_c = birrefringencia circular de la fibra del devanado de fibra óptica 320 y 330
 ψ = giro de la fibra del devanado de fibra óptica 320 y 330
 δ_l = birrefringencia lineal de la fibra del devanado de fibra óptica 320 y 330
 Dado que siempre $\delta_l < \left(\frac{\delta_c}{2} + \psi\right)$ ello supone que en todos los casos γ sea aproximadamente 1.

- 10 $\varphi = V * B * l$
 Siendo:

V = constante de Verdet de la fibra óptica a la longitud de onda de trabajo
 B = el campo magnético generado por conductor 4.
 l = la longitud del devanado de fibra óptica 320 y 330.

- 15 Θ_d = El giro proporcionado por el giro de fibra 301 de la primera rama de entrada 30.

Realizando la resta, suma y raíces cuadradas de estas ecuaciones tendríamos las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} [\sqrt{R_{21}} - \sqrt{Q_{21}}] + [\sqrt{Q_{12}} - \sqrt{R_{12}}] &= \frac{\sqrt{(\alpha_{m1} + \alpha_{m2})(P_{21} + P_{12})} \sin(2\varphi) \cos\theta_d + \sqrt{(\alpha_{m1} - \alpha_{m2})(P_{21} - P_{12})} \cos(2\varphi) \operatorname{sen}\theta_d}{\sqrt{(\alpha_{m1} + \alpha_{m2})(P_{21} + P_{12})} \sin(2\varphi) \cos\theta_d + \sqrt{(\alpha_{m1} - \alpha_{m2})(P_{21} - P_{12})} \cos(2\varphi) \operatorname{sen}\theta_d} \\ [\sqrt{R_{21}} - \sqrt{R_{12}}] + [\sqrt{Q_{12}} - \sqrt{Q_{21}}] &= \frac{\sqrt{(\alpha_{m1} + \alpha_{m2})(P_{21} + P_{12})} \sin(2\varphi) \cos\theta_d + \sqrt{(\alpha_{m1} - \alpha_{m2})(P_{21} - P_{12})} \cos(2\varphi) \operatorname{sen}\theta_d}{\sqrt{(\alpha_{m1} + \alpha_{m2})(P_{21} + P_{12})} \sin(2\varphi) \cos\theta_d + \sqrt{(\alpha_{m1} - \alpha_{m2})(P_{21} - P_{12})} \cos(2\varphi) \operatorname{sen}\theta_d} \end{aligned}$$

- 20 Teniendo en cuenta que:

$$\begin{aligned} \alpha_{m1} &\approx \alpha_{m2} = \alpha_m \\ P_{12} &\approx P_{21} = P \\ \gamma &\approx 1 \end{aligned}$$

- 25 El término de error posee un coeficiente $(\alpha_{m1} - \alpha_{m2})(P_{12} - P_{21})$, que es un doble cero. Por tanto si asumimos que $(\alpha_{m1} - \alpha_{m2})(P_{12} - P_{21}) \approx 0$, se obtienen los siguientes cálculos finales para la señal:

$$\begin{aligned} \sin(2\gamma\varphi) &= \frac{[\sqrt{R_{21}} - \sqrt{Q_{21}}] + [\sqrt{Q_{12}} - \sqrt{R_{12}}]}{\sqrt{(\alpha_{m1} + \alpha_{m2})(P_{21} + P_{12})} \cos\theta_d} \\ \sin(2\gamma\varphi) &= \frac{[\sqrt{R_{21}} - \sqrt{R_{12}}] + [\sqrt{Q_{12}} - \sqrt{Q_{21}}]}{\sqrt{(\alpha_{m1} + \alpha_{m2})(P_{21} + P_{12})} \cos\theta_d} \end{aligned}$$

- 30 De estas fórmulas se podrá obtener el valor B relativo al campo magnético generado alrededor del conductor 4 y por lo tanto se podrá determinar la intensidad que circula por dicho conductor 4 de una manera muy precisa.

Para poder realizar dicho cálculo, se obtendrá el valor de $\alpha_m P$ de las siguientes formulas:

35

$$\begin{aligned} 2\alpha_m P &= \frac{[\sqrt{R_{21}} + \sqrt{R_{12}}]^2}{\operatorname{sen}^2\theta_d} + \frac{[\sqrt{R_{21}} - \sqrt{R_{12}}]^2}{\operatorname{cos}^2\theta_d} \\ 2\alpha_m P &= \frac{[\sqrt{Q_{21}} + \sqrt{Q_{12}}]^2}{\operatorname{sen}^2\theta_d} + \frac{[\sqrt{Q_{21}} - \sqrt{Q_{12}}]^2}{\operatorname{cos}^2\theta_d} \\ 2\alpha_m P &= \frac{[\sqrt{R_{12}} + \sqrt{Q_{12}}]^2}{\operatorname{sen}^2\theta_d} + \frac{[\sqrt{R_{12}} - \sqrt{Q_{12}}]^2}{\operatorname{cos}^2\theta_d} \\ 2\alpha_m P &= \frac{[\sqrt{R_{21}} + \sqrt{Q_{21}}]^2}{\operatorname{sen}^2\theta_d} + \frac{[\sqrt{R_{21}} - \sqrt{Q_{21}}]^2}{\operatorname{cos}^2\theta_d} \end{aligned}$$

- 40 Tal y como se puede observar en las fórmulas que hacen referencia al cálculo final de la señal, la medida de la corriente depende del giro de fibra 301. El valor del giro de fibra 301 se define en el proceso de fabricación, sin embargo puede sufrir pequeñas variaciones durante el uso del equipo de medida 1. Es por ello por lo que si se quiere hacer un cálculo muy preciso de la corriente del conductor 4 es conveniente ir adaptando el valor de dicho giro de fibra 301 para evitar

que se generen términos de error. Dicho valor puede también calcularse mediante de las dos señales cruzadas que han sido modificadas en el primer devanado de fibra óptica 320 de la primera rama sensora 32.

Tal y como se puede observar, en las ecuaciones obtenidas para el cálculo de la corriente que circula por el conductor 4 no aparecen términos cuadráticos. Esto ocurre gracias a la doble medida simétrica realizada, es decir, gracias a la combinación de las señales cruzadas. Tal y como se describe en la solicitud de patente europea EP18196585.6, perteneciente al mismo solicitante, con la simetría de las señales cruzadas de cada rama sensora 32 y 33 se consigue eliminar los términos cuadráticos de la señal, incluso en condiciones donde el giro proporcionado a la señal el giro de fibra 301 no sea 45 grados, obteniendo una señal resultante que mantiene la forma de la señal y que por lo tanto permite obtener la información deseada. En el caso de la presente invención, al tener primer devanado de fibra óptica 320 y el segundo devanado de fibra óptica 330 de idéntica longitud, tienen una idéntica respuesta en la desviación de la polarización de la luz, pero en contrafase. Así, en vez de tener dos señales cruzadas para realizar el cálculo de la corriente como en el caso de EP18196585.6, se obtienen 4 señales cruzadas, de las cuales se puede obtener un cálculo más preciso de la corriente que circula por el conductor 4, ya que el término de error posee un coeficiente $(\alpha_{m1} - \alpha_{m2})(P_{12} - P_{21})$ que es un doble cero. Además, el hecho de tener estas cuatro señales cruzadas permite hacer una buena valoración de las atenuaciones de las fibras de conexión y de las atenuaciones de las ramas sensoras, y también permite poder ajustar el giro de fibra 301. Por todo ello se obtiene una medida de la corriente muy precisa y con un margen dinámico elevado.

Tal y como se ha comentado anteriormente, preferentemente tanto la señal emitida por el primer emisor 20 como la señal emitida por el segundo emisor 21 es una señal compuesta por un conjunto de al menos dos pulsos de luz polarizada, estando dichos pulsos polarizados con una diferencia de grados determinada, siendo preferentemente dicha diferencia de polarización de 90 grados. El hecho de emitir señales de este tipo permite compensar los posibles cambios en la polarización de la luz producidos por las fibras intermedias 60 y 61 que unen el interrogador 2 con la parte sensora 3.

La figura 2 muestra una segunda realización del equipo de medida 1.

El equipo de medida 1 de la segunda realización se diferencia del equipo de medida 1 de la primera realización en que la parte sensora 3 comprende también una rama de salida 35. Dicha rama de salida 35 está acoplada a la primera rama de entrada 30 y la segunda rama de entrada 31 mediante el divisor 34. El resto de la configuración del equipo de medida 1 es análogo al de la primera realización por lo que no se considera necesario volver a describirlo.

La rama de salida 35 de esta segunda realización está configurada dicha para devolver al divisor 34 la misma señal que recibe. Así, las señales provenientes de la primera rama de entrada 30 y la segunda rama de entrada 31, llegan a la rama de salida 35 a través del divisor 34, son reflejadas en la rama de salida 35 y vuelven hacia la primera rama de entrada 30 y la segunda rama de entrada 31 a través del divisor 34. Las señales reflejadas en la rama de salida 35 y recibidas en el primer receptor 22 y segundo receptor 23 permiten ajustar algunos parámetros necesarios para realizar un cálculo preciso de la corriente que circula por el conductor 4 de una manera más directa que ajustando dichos valores utilizando únicamente las señales cruzadas de la primera rama sensora 32 y la segunda rama sensora 33.

Así, la rama de salida 35 ofrece información adicional para ajustar aún mejor los distintos parámetros a la hora de calcular la corriente que circula por el conductor 4, mejorando el margen dinámico del equipo de medida 1.

Para que la rama de salida 35 refleje/devuelva devolver la misma señal que recibe, una de las opciones sería simplemente realizar un corte "limpio" en el propio terminal de salida 344 correspondiente del divisor, de modo que dicho corte haría que la señal rebotase en el terminal de salida 343 debido al cambio brusco del índice de refracción que provocaría dicho corte. Otra opción sería colocar un espejo convencional 350, tal y como se muestra en la figura 2. En otras posibles realizaciones la devolución de la señal podría realizarse de cualquier otra forma conocida por el experto en la materia siempre que se cumpla que la señal devuelta por la rama de salida es la misma que la que recibe dicha rama de salida.

En las realizaciones en las que el equipo de medida comprende una rama de salida además de las dos ramas sensoras, puede ser necesario que la primera rama sensora comprenda un retardo entre el primer devanado de fibra óptica y el espejo primer Faraday, siendo el retardo de primera la rama sensora y el retardo de la segunda rama sensora distintos para que los receptores del interrogador puedan gestionar de las señales provenientes de las ramas sensoras y la rama de salida. De todas formas, el retardo entre el primer devanado de fibra óptica 320 y el espejo primer Faraday 321 puede ser prescindible si la fibra con la que se realiza dicho primer devanado de fibra óptica 320 es lo suficientemente largo como para retardar las señales que recorren dicha primera rama sensora 32 lo necesario para que los receptores 22 y 23 del interrogador 2 puedan gestionar las señales provenientes de las dos ramas sensoras 23 y 33 y la rama de salida 35, tal y como se muestra en la realización de la figura 2.

En el método de la invención aplicado a esta segunda realización, el primer emisor 20 emite una primera señal que llega a la primera rama sensora 32 a través de la primera rama de entrada 30, recorre dicha primera rama sensora 32 y es modificada en función de la corriente que circula por el conductor 4, y es recibida por el segundo receptor 23

desde la segunda rama de entrada 31. Además, el segundo emisor 21 emite una segunda señal que llega a la primera rama sensora 32 a través de la segunda rama de entrada 31, recorre la primera rama sensora 32 y es modificada en función de la corriente que circula por el conductor 4, y es recibida por el primer receptor 22 desde la primera rama de entrada 30.

5 Por otro lado, dicha primera señal emitida por el primer emisor 20 llega también a la segunda rama sensora 33 a través de la primera rama de entrada 30, y dicha segunda señal emitida por el segundo emisor 21 llega también a la segunda rama sensora 33 a través de la segunda rama de entrada 31. La primera señal y la segunda señal recorren dicha la segunda rama sensora 33 y son modificadas en función de la corriente que circula por el conductor 4. El segundo receptor 23 recibe desde la segunda rama de entrada 31 la primera señal modificada en la segunda rama sensora 33, mientras que el primer receptor 22 recibe desde la primera rama de entrada 30 la segunda señal modificada en la segunda rama sensora 33.

15 Además, la señal emitida por el primer emisor 20 llega a la rama de salida 35 a través de la primera rama de entrada 30, se refleja en dicha rama de salida 35, y es recibida por el primer receptor 22 desde la primera rama de entrada 30 y por el segundo receptor 23 desde la segunda rama de entrada 31, y la señal emitida por el segundo emisor 21 llega a la rama de salida 35 a través de la segunda rama de entrada 31, se refleja en dicha rama de salida 35, y es recibida por el primer receptor 22 desde la primera rama de entrada 30 y por el segundo receptor 23 desde la segunda rama de entrada 31,

20 La corriente que circula por el conductor 4 se determina, al igual que en el método aplicado a la primera realización, combinando la primera señal modificada en la primera rama sensora 32 y recibida por segundo receptor 23, la segunda señal modificada en la primera rama sensora 32 y recibida por primer receptor 22, la primera señal modificada en la segunda rama sensora 33 y recibida por segundo receptor 23, y la segunda señal modificada en la segunda rama sensora 33 y recibida por primer receptor 22.

30 En este caso, tendremos además de las señales cruzadas descritas en la primera realización las señales reflejadas en la rama de salida 35. En el caso de las señales reflejadas en la rama de salida 35 se utilizan tanto las señales propias como las señales cruzadas. Estas señales ofrecen información adicional para ajustar aún mejor los distintos parámetros a la hora de calcular la corriente, mejorando el margen dinámico del equipo de medida 1.

En concreto se pueden utilizar estas señales para ajustar las variaciones en el giro de fibra 301 a través de la siguiente fórmula:

$$\theta_d = \arccos \sqrt{\frac{E_{12} * E_{21}}{E_{11} * E_{22}}}$$

35 Siendo

E_{11} = La intensidad lumínica medida por el primer receptor 22 relativa a la primera señal reflejada en la rama de salida 35.

E_{12} = La intensidad lumínica medida por el segundo receptor 23 relativa a la primera señal reflejada en la rama de salida 35.

40 E_{22} = La intensidad lumínica medida por el segundo receptor 23 relativa a la segunda señal reflejada en la rama de salida 35.

E_{21} = La intensidad lumínica medida por el primer receptor 22 relativa a la segunda señal reflejada en la rama de salida 35.

45 Las señales reflejadas en la rama de salida 35, también se pueden utilizar para determinar las atenuaciones α_1 , α_2 , α_{m1} y α_{m2} producidas por las distintas fibras del equipo de medida 1.

50

REIVINDICACIONES

1. Método para medir la corriente que circula por al menos un conductor (4) con un equipo de medida (1) basado en fibra óptica, comprendiendo el equipo de medida (1)
- un interrogador (2) que comprende un primer emisor (20), un segundo emisor (21), un primer receptor (22) y un segundo receptor (23), y
 - una parte sensora (3) conectada al interrogador (2) y que está configurada para disponerse en la proximidad del conductor (4), comprendiendo la parte sensora (3)
 - o una primera rama de entrada (30) que comprende un primer polarizador (300) y un giro de fibra (301) a continuación de dicho primer polarizador (300),
 - o una segunda rama de entrada (31) que comprende un segundo polarizador (310),
 - o una primera rama sensora (32) que comprende un primer devanado de fibra óptica (320) configurado para ser dispuesto en la proximidad del conductor (4) y un primer espejo Faraday (321), y
 - o una segunda rama sensora (33) que comprende un segundo devanado de fibra óptica (330) configurado para ser dispuesto en la proximidad del conductor (4), un segundo espejo Faraday (331) y un retardo (332) entre el segundo devanado de fibra óptica (330) y el segundo espejo Faraday (331),
 - o estando la primera rama de entrada (30) y la segunda rama de entrada (31) acopladas a la primera rama sensora (32) y a la segunda rama sensora (33) mediante un divisor (34), y
 - o comprendiendo el primer devanado de fibra óptica (320) y el segundo devanado de fibra óptica (330) el mismo número de vueltas pero devanados en sentidos opuestos,
- en donde en el método
- i. el primer emisor (20) emite una primera señal que llega a la primera rama sensora (32) a través de la primera rama de entrada (30), recorre la primera rama sensora (32) y es modificada en función de la corriente que circula por el conductor (4), y es recibida por el segundo receptor (23) desde la segunda rama de entrada (31),
 - ii. el segundo emisor (21) emite una segunda señal que llega a la primera rama sensora (32) a través de la segunda rama de entrada (31), recorre la primera rama sensora (32) y es modificada en función de la corriente que circula por el conductor (4), y es recibida por el primer receptor (22) desde la primera rama de entrada (30),
 - iii. la primera señal llega también a la segunda rama sensora (33) a través de la primera rama de entrada (30), y la segunda señal llega también a la segunda rama sensora (33) a través de la segunda rama de entrada (31), recorriendo la primera señal y la segunda señal dicha segunda rama sensora (33) y siendo modificadas en función de la corriente que circula por el conductor (4),
 - iv. el segundo receptor (23) recibe desde la segunda rama de entrada (31) la primera señal modificada en la segunda rama sensora (33), recibiendo también el primer receptor (22) desde la primera rama de entrada (30) la segunda señal modificada en la segunda rama sensora (33), y
 - v. determinándose la corriente que circula por el conductor (4) combinando la primera señal modificada en la primera rama sensora (32) y recibida por segundo receptor (23), la segunda señal modificada en la primera rama sensora (32) y recibida por primer receptor (22), la primera señal modificada en la segunda rama sensora (33) y recibida por segundo receptor (23), y la segunda señal modificada en la segunda rama sensora (33) y recibida por primer receptor (22).
2. Método según la reivindicación 1, en donde la parte sensora (3) comprende una rama de salida (35) configurada para devolver la misma señal que recibe, estando la primera rama de entrada (30) y la segunda rama de entrada (31) acopladas también a la rama de salida (35) mediante un divisor (34), en donde
- en donde la señal emitida por el primer emisor (20) llega a la rama de salida (35) a través de la primera rama de entrada (30), se refleja en dicha rama de salida (35), y es recibida por el primer receptor (22) desde la primera rama de entrada (30) y por el segundo receptor (23) desde la segunda rama de entrada (31), y
 - la señal emitida por el segundo emisor (21) llega a la rama de salida (35) a través de la segunda rama de entrada (31), se refleja en el espejo convencional (350), y es recibida por el primer receptor (22) desde la primera rama de entrada (30) y por el segundo receptor (23) desde la segunda rama de entrada (31),
- utilizándose las señales reflejadas en la rama de salida (35) para poder ajustar continuamente el valor del giro de fibra (301).
3. Equipo de medida basado en fibra óptica para medir la corriente que circula por al menos un conductor (4), comprendiendo el equipo de medida (1)
- a) un interrogador (2) que comprende un primer emisor (20), un segundo emisor (21), un primer receptor (22) y un segundo receptor (23), y
 - b) una parte sensora (3) conectada al interrogador (2) y que está configurada para disponerse en la proximidad del conductor (4), comprendiendo la parte sensora (3)
 - una primera rama de entrada (30) que comprende un primer polarizador (300) y un giro de fibra (301) a continuación de dicho primer polarizador (300),

- una segunda rama de entrada (31) que comprende un segundo polarizador (310),
- una primera rama sensora (32) que comprende un primer devanado de fibra óptica (320) configurado para disponerse en la proximidad del conductor (4) y un primer espejo Faraday (321), y
- 5 – una segunda rama sensora (33) que comprende un segundo devanado de fibra óptica (330) configurado para disponerse en la proximidad del conductor (4), un segundo espejo Faraday (331) y un retardo (332) entre el segundo devanado de fibra óptica (330) y el segundo espejo Faraday (331),
- 10 – estando la primera rama de entrada (30) y la segunda rama de entrada (31) acopladas a la primera rama sensora (32) y a la segunda rama sensora (33) mediante un divisor (34),
- el primer devanado de fibra óptica (320) y el segundo devanado de fibra óptica (330) comprenden el mismo número de vueltas que están devanados en sentidos opuestos, y estando el equipo de medida (1) configurado para llevar el método según la reivindicación 1.
- 15 4. Equipo de medida según la reivindicación 3, que comprende una rama de salida (35) acoplada a la primera rama de entrada (30) y la segunda rama de entrada (31) mediante el divisor (34), estando configurada dicha rama de salida (35) para devolver al divisor (34) la misma señal que recibe, estando el equipo de medida (1) configurado para llevar a cabo el método según la reivindicación 2.
- 20 5. Equipo de medida según la reivindicación 4, en donde la rama de salida (35) comprende un espejo convencional (350).
- 25 6. Equipo de medida según la reivindicación 4 o 5, en donde la primera rama sensora (32) comprende un retardo entre el primer devanado de fibra óptica (320) y el primer espejo Faraday (321), siendo el retardo de primera la rama sensora (32) y el retardo (332) de la segunda rama sensora (33) distintos.
- 7. Equipo de medida según cualquiera de las reivindicaciones a 3 a 6, en donde el giro de fibra (301) de la primera rama de entrada (30) es de 45 grados aproximadamente.
- 30 8. Equipo de medida según cualquiera de las reivindicaciones 3 a 6, en donde la segunda rama de entrada (31) comprende un giro de fibra adicional a continuación del segundo polarizador (310), siendo preferentemente la suma del giro de fibra (301) de la primera rama de entrada (30) y del giro de fibra adicional de la segunda rama de entrada (31) de 45 grados aproximadamente.

35

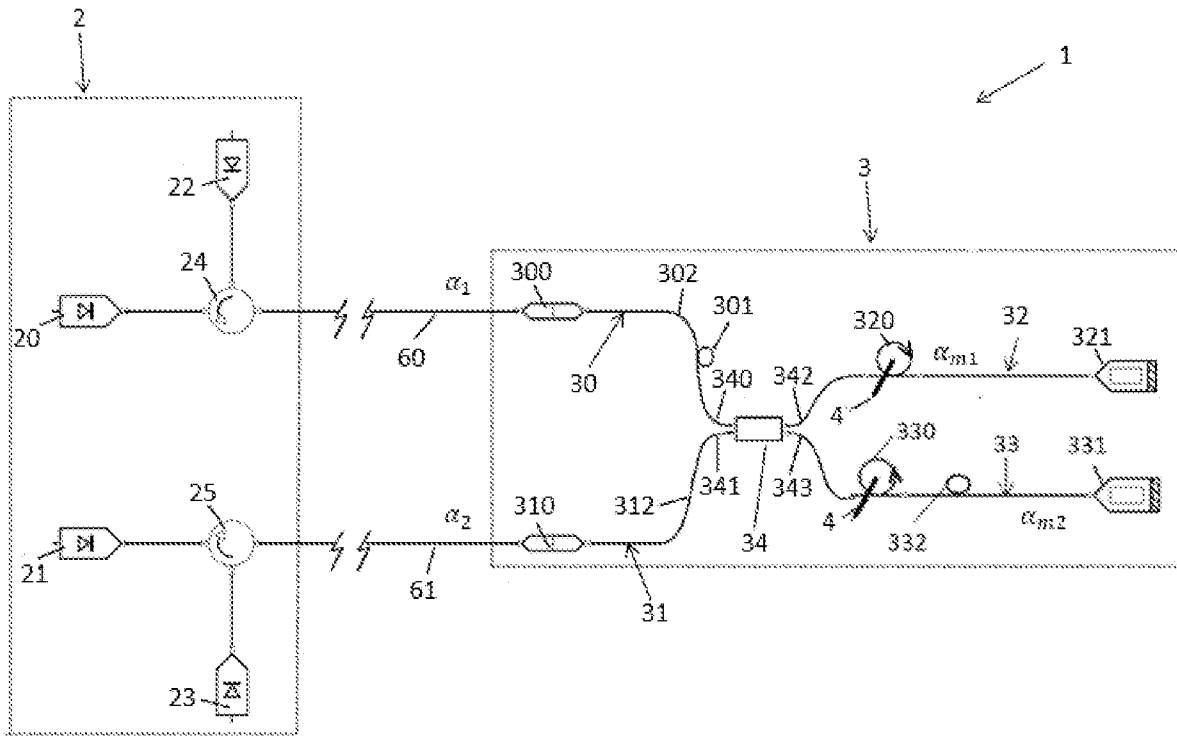


FIG. 1

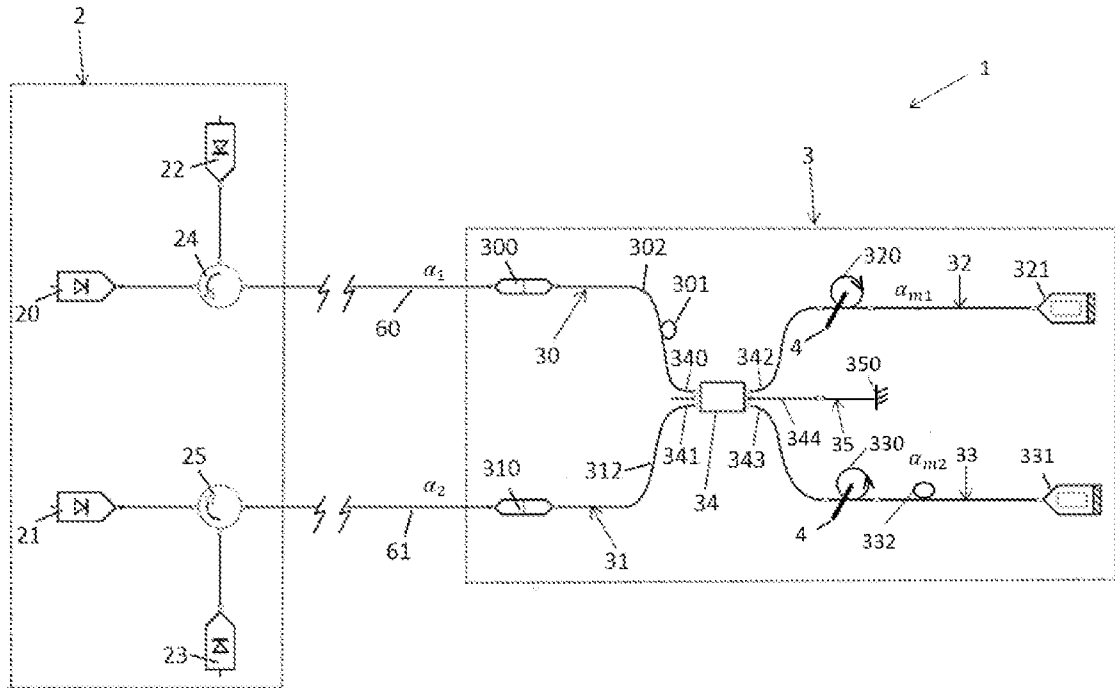


FIG. 2