

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 698 051**

51 Int. Cl.:

**G01R 15/24** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **29.05.2012 PCT/EP2012/060065**

87 Fecha y número de publicación internacional: **06.12.2012 WO12163924**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.05.2012 E 12729026 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.08.2018 EP 2715375**

54 Título: **Sensor de tensión de fibra óptica**

30 Prioridad:

**27.05.2011 EP 11167811**

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

**30.01.2019**

73 Titular/es:

**ABB RESEARCH LTD. (100.0%)  
Affolternstrasse 44  
8050 Zürich, CH**

72 Inventor/es:

**STEIGER, OLIVIER;  
JORIS, PASCAL;  
BOHNERT, KLAUS;  
MARCHESE, SERGIO VINCENZO y  
WILDERMUTH, STEPHAN**

74 Agente/Representante:

**ELZABURU, S.L.P**

ES 2 698 051 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 de tensión de fibra óptica

**Campo técnico**

5 La presente invención se relaciona con un método y dispositivo para medir la tensión, en concreto una tensión de AC en el rango de la alta tensión.

**Introducción y antecedentes de la técnica**

10 Los sensores de alta tensión ópticos a menudo dependen de los efectos electro-ópticos (tales como el efecto Pockels y/o el efecto Kerr) en materiales cristalinos tales como el  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  (BGO) (L. Duvillaret, S. Rialland, y J. -L. Coutaz "Sensores electro-ópticos para la medición del campo eléctrico. II. Elección del cristal y la completa optimización de su orientación" J. Opt. Soc. Am. B 19 2704 (2002)).

15 El documento US 4.904.931 y el documento US 5.001.419 describe un sensor en el que la tensión de línea completa (hasta varios 100 kV) se aplica a lo largo de la longitud de un cristal BGO único (normalmente de entre 100 mm y 250 mm de longitud). La clase de cristal de BGO es de simetría tal que el cristal mide la integral de línea  $\int E \cdot ds$  a lo largo de la longitud del cristal, esto es desde la tierra hasta el potencial de alta tensión. Como resultado, los campos de dispersión, por ejemplo, desde las fases vecinas no influyen en la medición. La tensión aplicada introduce un cambio de fase óptica diferencial entre dos ondas de luz polarizadas linealmente ortogonales que se propagan a lo largo de caminos ópticos paralelos a través del mismo cristal. Este cambio de fase es proporcional a la tensión aplicada. Las ondas de luz interfieren en un polarizador al final del cristal. La intensidad de la luz resultante varía en proporción a una función coseno sesgada del cambio de fase. A tensiones normales en subestaciones de alta tensión, el cambio de fase puede corresponder a varios múltiplos de  $\pi$  y por tanto resulta en una salida de sensor ambigua. La ambigüedad se resuelve mediante la adición de una segunda ruta de salida óptica para el cristal que contiene un retardador de cuarto de onda que introduce un cambio de fase de  $90^\circ$  entre las ondas interferentes. Un procesador de señal reconstruye la forma de onda de la tensión aplicada desde las dos señales de salida óptica en cuadratura. En la presente memoria, se aumenta o se disminuye un recuento acumulativo bidireccional de cruces por cero de las dos señales eléctricas dependiendo de cuál de las dos señales eléctricas es la principal. A partir del recuento acumulativo de cruces por cero se genera una aproximación en escalera de la forma de onda. La precisión mejorada de la señal de salida es conseguida mediante la interpolación de la forma de onda de escalera a través de la adición o sustracción de manera selectiva de la magnitud de la menor de las dos señales opto-eléctricas, con el sentido del ajuste siendo determinado por las polaridades relativas de las dos señales eléctricas. Como la intensidad del campo eléctrico en el cristal normalmente es muy alta, el cristal está montado en un aislante de alta tensión hueco hecho de epoxi reforzado con fibra y relleno con gas  $\text{SF}_6$  bajo presión para obtener la suficiente resistencia dieléctrica. El diámetro del aislante es suficientemente grande para mantener la intensidad de campo en el aire fuera del aislante por debajo de los límites críticos.

35 El documento US 6.252.388 describe un sensor de tensión que usa diversos cristales pequeños electro-ópticos montados en posiciones seleccionadas a lo largo del eje longitudinal de un aislante de alta tensión hueco. Los cristales miden los campos eléctricos en sus ubicaciones. La suma de estas mediciones de campo local sirve como una aproximación de la tensión aplicada al aislante. En este caso el cambio de fase electro-óptico en cada cristal está dentro del  $\pm 90^\circ$  a la tensión nominal, esto es no existe ambigüedad en la respuesta del sensor.

40 El documento US 5.247.244 describe un sistema de medición de tensión electro-óptico en reflexión y con compensación de la temperatura. De nuevo, se aplica la alta tensión a lo largo de un único cristal y dos haces de luz ópticamente paralelos son atravesados a través de la longitud completa del cristal y son desplazados en fase en relación el uno con el otro. Se efectúa la compensación de la temperatura a través de la medición de la corriente capacitiva a través del cristal electro-óptico, y se obtiene y aplica un factor de corrección a la tensión de media onda y se usa para calcular el valor de tensión instantáneo.

45 El documento US 5.715.058 describe otro sensor electro-óptico para medir altas tensiones en una configuración reflexiva. La alta tensión se aplica al cristal y el cristal es atravesado hacia adelante y atrás por un único haz de luz. Este haz de luz es dividido sólo después de salir del cristal en dos caminos ópticos que están desplazados en fase en relación el uno con el otro. La compensación de la temperatura es conseguida mediante la medición de la dependencia con la temperatura de la placa de ondas de cambio de fase.

50 Otra técnica es conocida a partir del documento EP1179735.

**Descripción de la invención**

Es un objetivo general de la invención medir de manera precisa las tensiones en un gran intervalo de una manera simple.

55 Este objetivo es conseguido por el método y el dispositivo de las reivindicaciones independientes. Las realizaciones ejemplares se describen en las reivindicaciones dependientes y en las combinaciones reivindicadas.

La invención se relaciona con un método para medir una tensión, en concreto una tensión completa y/o una tensión parcial entre un primer terminal y un segundo terminal, estando el primer terminal separado espacialmente del segundo terminal y creando la tensión un campo eléctrico entre los terminales, comprendiendo el método los pasos de

5 disponer al menos un primer elemento de transmisión de luz electro-óptico en el campo eléctrico entre el primer y el segundo terminal,

pasar la luz a través del primer elemento de transmisión de luz electro-óptico,

10 medir al menos la primera señal, por ejemplo  $S_n$ , a partir del primer elemento de transmisión de luz electro-óptico y medir además una segunda señal, por ejemplo  $S_n'$ , a partir del primer o del segundo elemento de transmisión de luz electro-óptico, en donde ambas señales son funciones periódicas de la tensión y tienen un cambio de fase relativo distinto de cero, esto es un cambio de fase relativo con respecto a la una de la otra, y posiblemente un cambio de fase relativo con la tensión  $V$  o  $V_n$  aplicada,

obtener la tensión y resolver la ambigüedad en la obtención de la tensión ( $V$ ) a partir de la primera y de la segunda señal, caracterizado por los pasos de:

15 (i) usar la primera señal como una señal de base indicativa del campo eléctrico sobre el primer elemento de transmisión de luz electro-óptico,

(ii) usar la segunda señal como una señal de referencia para resolver la ambigüedad en la obtención de la tensión,

(iii) determinar a partir de la primera señal al menos dos hipótesis, por ejemplo  $h^+$  y  $h^-$ , correspondientes a los diferentes valores de tensión posibles, por ejemplo  $V_1^{h^+}$  y  $V_1^{h^-}$ , de la tensión, por ejemplo  $V_n$  para  $n=1$ ,

20 (iv) obtener el valor esperado, por ejemplo  $S_2^{h^+}$  y  $S_2^{h^-}$ , de la segunda señal para cada una de las hipótesis,

(v) comparar los valores esperados con un valor medido de la segunda señal, y

(vi) tomar una decisión binaria entre las hipótesis mediante la validación de la hipótesis para la cual el valor esperado está más cercano al valor medido de la segunda señal.

25 En una realización, se determinan exactamente dos hipótesis y se usa exactamente una señal de referencia por señal de base, y/o la cercanía de los valores esperados al valor medido se determina usando la distancia Euclídea.

En una realización, la señal de base es una cosinusoidal de la tensión  $V$  o  $V_n$ , y la tensión bajo la primera hipótesis se asume es proporcional al  $+\arccos$ , y la tensión bajo la segunda hipótesis se asume es proporcional al  $-\arccos$ .

En una realización, el cambio de fase relativo es diferente de  $90^\circ$ .

30 En una realización, la señal de base se normaliza a un intervalo de valores simétricos alrededor del cero, en concreto la señal de base se escala y se compensa a un intervalo de valores  $[+1, -1]$ .

35 En otra realización, la obtención de la tensión comprende la reconstrucción de una forma de onda mejorada de la tensión con los pasos de: determinar los primeros valores de tensión de la tensión a partir de la señal de base, en concreto mediante el cálculo de un arcocoseno, determinar los segundos valores de tensión a partir de la señal de referencia, en concreto mediante el cálculo de un arcocoseno, y determinar la forma de onda de tensión mejorada a partir de los primeros valores de tensión y los segundos valores de tensión, en concreto en donde la señal de base y la señal de referencia se obtienen a partir del mismo elemento de transmisión de luz.

40 Una realización adicional comprende los pasos de: para cada  $n$ -ésimo elemento de transmisión de luz electro-óptico, en concreto para exactamente un elemento de transmisión de luz electro-óptico, la normalización de la señal de base y de la señal de referencia a la misma amplitud máxima y mínima, en concreto a la unidad, la selección de un parámetro  $\beta_n$  de ponderación con  $0 \leq \beta_n \leq 1$ , y la determinación de la forma de onda de tensión mejorada mediante el cálculo de la suma ponderada  $V = \sum V_n = \sum \{\beta_n * V_{1n} + (1 - \beta_n) * V_{2n}\}$ , con  $V_{1n}$ ,  $V_{2n}$  = primer y segundo valores de tensión del  $n$ -ésimo elemento de transmisión de luz electro-óptico. Por ejemplo en el caso de exactamente un elemento de transmisión de luz electro-óptico, la tensión  $V$  completa es determinada mediante el cálculo de la suma ponderada  $V = \beta * V_{11} + (1 - \beta) * V_{21}$ , con  $V_{11}$ ,  $V_{21}$  = primer y segundo valores de tensión del exactamente un elemento de transmisión de luz electro-óptico.

45 Una realización adicional comprende los pasos de: seleccionar el parámetro  $\beta_n$  de ponderación de manera tal que a la más lineal de entre la señal de base y la señal de referencia como una función de la tensión le sea dado el mayor peso.

50 Una realización adicional comprende los pasos de: seleccionar el parámetro  $\beta_n = 1$  de ponderación cuando el valor absoluto de la señal de base es menor que el valor absoluto de la señal de referencia, y la selección del parámetro  $\beta_n = 0$  cuando el valor absoluto de la señal de referencia es menor que el valor absoluto de la señal de base.

Una realización adicional comprende los pasos de: seleccionar el parámetro  $\beta_n$  de ponderación como una función continua de la tensión, en concreto según  $\beta_n = \cos^2(S_n \cdot \pi/2) / (\cos^2(S_n \cdot \pi/2) + \sin^2(S_n \cdot \pi/2))$ .

5 En otra realización, se usa el segundo elemento de transmisión de luz electro-óptico, y se mide la segunda señal a partir del segundo elemento de transmisión de luz electro-óptico, y las hipótesis corresponden a los diferentes valores de tensión posibles de la tensión parcial aplicada al primer elemento de transmisión de luz electro-óptico.

10 Otra realización comprende los pasos de: usar al menos dos elementos de transmisión de luz electro-ópticos y someterlos a tensiones parciales individuales, midiendo la primera señal para cada n-ésimo elementos de transmisión de luz electro-óptico y usándola como la n-ésima señal de base indicativa del campo eléctrico sobre el n-ésimo elemento de transmisión de luz electro-óptico, determinar la segunda señal para cada n-ésimo elemento de transmisión de luz electro-óptico y usarla como la n-ésima señal de referencia para resolver la ambigüedad en la obtención de la n-ésima tensión parcial sobre el n-ésimo elemento de transmisión de luz electro-óptico, y para cada n-ésimo elemento de transmisión de luz electro-óptico realizar los pasos (iii), (iv), (v) y (vi) del método para desambiguar la tensión parcial sobre el n-ésimo elemento de transmisión de luz electro-óptico, y determinar la tensión total entre el primer y el segundo terminal a partir de las tensiones parciales.

15 En una realización, los elementos de transmisión de luz electro-ópticos son leídos ópticamente en paralelo.

En otra realización, exactamente se usa un elemento de transmisión de luz electro-óptico y las hipótesis corresponden a los diferentes valores de tensión posibles de la tensión completa entre el primer terminal y el segundo terminal.

20 Aún otra realización comprende la realización para cada n-ésimo elemento de transmisión de luz electro-óptico y su correspondiente señal de base y/o señal de referencia ( $S_n'$ ) los pasos de: reconstruir la forma de onda de la tensión medida, en concreto la tensión completa y/o la tensión parcial entre el primer terminal y el segundo terminal, calcular el tiempo medio sobre un número de periodos de la forma de onda reconstruida, determinar a partir del tiempo medio una tensión  $V_{DC}$  de compensación de DC aparente, y calcular la fase  $\Delta_n$  relativa de la señal de base y/o la señal de referencia ( $S_n'$ ), en concreto el cambio de fase relativo con respecto a la tensión  $V_n$  aplicada, según  $\Delta_n = V_{DC} \cdot \pi / V_{n,n}$ , con  $V_{n,n}$  = la tensión de media onda del n-ésimo elemento de transmisión de luz electro-óptico.

Otro aspecto de la invención, en concreto una realización adicional, comprende los pasos de: (i) usar la primera señal como una señal de base indicativa del campo eléctrico sobre el primer elemento de transmisión de luz electro-óptico,

30 (ii) usar la segunda señal como una señal de referencia para resolver la ambigüedad en la obtención de la tensión, (iii) determinar a partir de la primera señal las dos hipótesis correspondientes a los diferentes valores de tensión posibles de la tensión, (iv) determinar el cambio de fase relativo real entre la señal de base y la señal de referencia, (v) determinar a partir de la señal de base, la señal de referencia y el cambio de fase relativo real la señal de cuadratura artificial que tiene un cambio de fase relativo ideal de  $90^\circ$ , y (vi) tomar una decisión binaria entre las hipótesis basada en el signo de la señal en cuadratura artificial.

35 En una realización, el paso (vi) de tomar la decisión binaria comprende; seleccionar el valor más positivo de los posibles valores de tensión  $V_1^{h-}$  y  $V_1^{h+}$ , si el signo es negativo y  $\Delta = +90^\circ$ , y seleccionar el valor más negativo de los posibles valores de tensión  $V_1^{h-}$  y  $V_1^{h+}$ , si el signo es positivo y  $\Delta = +90^\circ$ ; y viceversa si  $\Delta = -90^\circ$ .

En una realización, el paso (v) comprende: calcular la señal de cuadratura artificial ( $S_n'^{cuad}$ ) según la fórmula  $S_n'^{cuad} = \cos^{-1}(2 \cdot \pi \cdot \Delta) \cdot S_n' + \tan(2 \cdot \pi \cdot \Delta) \cdot S_n$ .

40 En una realización, al menos dos elementos de transmisión de luz electro-ópticos (módulos de sensor, por ejemplo, comprendiendo cristales electro-ópticos, guías de onda polarizadas, o dispositivos piezo-eléctricos), se disponen en el campo eléctrico entre dos terminales separados con la tensión a medir aplicada a los terminales. La luz, de manera ventajosa luz linealmente polarizada, pasa entonces a través de los elementos de transmisión de luz electro-ópticos. Por medio de las propiedades de los elementos de transmisión de luz electro-ópticos, y se miden entonces  
45 al menos un primer y un segundo indicativo de señal de los campos eléctricos sobre los respectivos elementos de transmisión de luz electro-ópticos. Estas primera y segunda señales son funciones periódicas de la tensión aplicada. Por tanto, mediante la combinación de al menos dos señales, la tensión entre el primer y el segundo terminal se puede obtener y se resuelven las ambigüedades en la primera señal usando la segunda señal. Por lo tanto, como una ventaja sobre la técnica anterior, sólo una segunda señal (de un elemento de transmisión de luz electro-óptico)  
50 es suficiente para resolver las ambigüedades en el cálculo de la tensión en base a la primera señal a partir del otro elemento de transmisión de luz electro-óptico. Esto resulta en ópticas más simples que son más baratas y ventajosas en términos de tamaño.

55 En una realización, la primera y la segunda señal tienen la misma periodicidad de la tensión  $V$  o se escalan de manera tal que tienen la misma periodicidad de la tensión. Además, la primera y la segunda señales tienen un cambio de fase relativo distinto de cero, esto es, la fase de la segunda señal es desplazada con respecto a la fase de la primera señal. En una realización, el cambio de fase distinto de cero de la segunda señal con respecto a la primera señal es introducido por un elemento de cambio de fase que se dispone en un camino óptico en el segundo

elemento de transmisión de luz electro-óptico. Este elemento de cambio de fase es, por ejemplo, un retardador de  $\lambda/4$  y por tanto se habilita la lectura en cuadratura.

5 En una realización, el cambio de fase de la segunda señal con respecto a la primera señal es dependiente de la temperatura del elemento de cambio de fase. Por tanto, en una realización preferida, la temperatura del elemento de cambio de fase se puede obtener a partir de la segunda señal. Esta temperatura obtenida se puede, por ejemplo usar entonces para la compensación computacional de la dependencia de temperatura de las señales medidas y por tanto para la compensación computacional de la dependencia de temperatura de la tensión obtenida entre el primer y el segundo terminal. Por tanto, se puede proporcionar una mejor precisión.

10 En una realización, las dos señales están basadas en los cambios dependientes del campo eléctrico de una propiedad física de los haces de luz, por ejemplo, la fase de dos ondas de luz polarizadas de manera lineal ortogonales por elemento de transmisión de luz electro-óptico. Entonces, por ejemplo después de la interferencia de estas ondas de luz en un polarizador en el extremo de cada elemento de transmisión de luz electro-óptico, las señales de la intensidad de la luz resultante se convierten en una señal eléctrica por cristal, por ejemplo, mediante fotodiodos.

15 En una realización, los elementos de transmisión de luz electro-ópticos se disponen en serie, esto es electrónicamente en serie (esto es uno detrás de otro a lo largo del eje z en una dirección longitudinal o axial) entre los terminales. Por tanto, el campo eléctrico se distribuye sobre los elementos de transmisión de luz electro-ópticos únicos, que llevan a un aislamiento más simple y una implementación más barata.

20 La tensión a medir entre los terminales es en concreto una tensión de AC y/o en intervalo de alta tensión, en concreto en el intervalo entre los 75 kV y los 800 kV o incluso más. Por tanto, se pueden medir las tensiones en las subestaciones de las redes de transmisión de energía.

25 Después de un primer intervalo de tiempo  $[t_1; t_2]$  con intervalos de tensión que llevan a la periodicidad de las señales medidas como funciones de la tensión (esto es se cubre el periodo completo de las señales medidas, o, en otras palabras, las señales medidas como funciones periódicas de la tensión alcanzan sus valores máximo y mínimo), una realización ventajosa del método y/o del dispositivo descrito es adecuada también para medir pequeñas tensiones durante un segundo intervalo de tiempo  $[t_3; t_4]$ . El término "pequeña tensión" se refiere a un intervalo de tensiones que es demasiado pequeño para que las señales medidas alcancen sus valores máximo y mínimo (esto es para cubrir el periodo completo de las señales medidas). La capacidad de medición de pequeñas tensiones es ventajosa en el caso de una caída de tensión debida a, por ejemplo, un mal funcionamiento en la red de transmisión de energía. El salto de tiempo  $(t_3-t_2)$  entre el primer intervalo de tiempo y el segundo intervalo de tiempo es mayor que un periodo de señal de tensión para permitir la detección de "pequeñas tensiones". Entonces, los parámetros de escala y/o compensación que se han o han sido obtenidos durante el primer intervalo  $[t_1; t_2]$  de tiempo están o se mantienen constantes para obtener la tensión V entre los terminales durante el segundo intervalo  $[t_3; t_4]$  de tiempo. Por tanto, es posible una obtención precisa de la tensión incluso para intervalos de tensión que no cubren el periodo completo de las señales medidas.

30

35

En una realización, sólo se mide una señal por elemento de transmisión de luz electro-óptico. Esto resulta en ópticas más simples.

40 En otra realización, al menos un parámetro  $\alpha_n$  interno, por ejemplo la fracción de la tensión total V que se aplica a un elemento de transmisión de luz electro-óptico único (u otro valor descriptivo de una distribución de la tensión sobre los elementos de transmisión de luz electro-ópticos), se obtiene de manera recursiva en base a su valor más común. Debido al seguimiento recursivo del parámetro  $\alpha_n$  interno, no son necesarios sus valores exactos durante una primera inicialización.

45 En otra realización preferida, se disponen al menos tres elementos de transmisión de luz electro-ópticos en serie en el campo eléctrico entre los terminales y al menos se miden tres señales indicativas de los campos eléctricos sobre los respectivos elementos de transmisión de luz electro-ópticos. Mediante la combinación de todas las señales, se puede obtener la tensión entre el primer y el segundo terminal. En este proceso, se pueden resolver las ambigüedades en todas las señales.

Además, se proporciona un dispositivo que se adapta para llevar a cabo la medición de la tensión por medio de un método según la invención.

50 En resumen, en la invención, el paso de resolver la ambigüedad en la primera señal comprende un paso de toma de decisión binaria entre las dos hipótesis. Estas hipótesis corresponden a los diferentes valores de tensión posibles dado el valor medido de la primera señal. La decisión binaria comprende además la obtención de un valor esperado de la segunda señal para cada una de las hipótesis y la comparación del valor esperado con el valor medido de la segunda señal. Por tanto, se puede encontrar una solución no ambigua.

55

**Breve descripción de los dibujos**

La invención se entenderá mejor y objetivos distintos de los anteriormente expuestos resultarán evidentes cuando se tome en consideración la siguiente descripción detallada de la invención. Esta descripción hace referencia a los dibujos adjuntos, en donde;

5 La Fig. 1 (técnica anterior) muestra una representación esquemática de un sensor de tensión óptico.

Las Fig. 2a, 2b, 2c, 2d muestran diferentes configuraciones para los sensores de tensión electro-ópticos.

La Fig. 3 muestra una disposición de dos elementos de transmisión de luz electro-ópticos en el campo eléctrico entre dos terminales,

10 Las Fig. 4a, 4b muestran diagramas de flujo de un método para medir la tensión entre un primer y un segundo terminal con una pluralidad de elementos de transmisión de luz electro-ópticos y con un único elemento de transmisión de luz electro-óptico, respectivamente,

La Fig. 5 muestra una señal con números de periodo, o de manera más precisa un recuento  $k$  de cruces por cero,

Las Fig. 6a, 6b, 6c muestran los procedimientos de desambiguación que usan una señal de referencia o en cuadratura,

15 La Fig. 7 muestra un primer procedimiento para medir la fase entre la señal de base y la señal de referencia,

La Fig. 8 muestra un segundo procedimiento para medir la fase entre la señal de base y la señal de referencia,

La Fig. 9 muestra una disposición de tres elementos de transmisión de luz electro-ópticos en el campo eléctrico entre dos terminales, y

20 Las Fig. 10a, 10b, 10c muestran un métodos para una reconstrucción mejorada de una forma de onda de tensión a partir de una señal de base y una señal de referencia.

**Modos para llevar a cabo la invención**

Se describe un método y un dispositivo para medir la tensión entre dos terminales, en concreto una tensión de AC en el régimen de alta tensión. De manera ventajosa, el método y/o el dispositivo dependen del efecto electro-óptico en un elemento electro-óptico. Este efecto electro-óptico introduce, por ejemplo, un cambio de fase óptica diferente en dos ondas de luz polarizadas perpendicularmente que viajan a través del elemento electro-óptico. Por tanto, se puede medir un indicativo de señal del campo eléctrico en la posición o sobre la longitud del elemento electro-óptico. Las ambigüedades en las señales son resueltas mediante una señal en cuadratura adicional. Disponiendo una pluralidad de estos elementos electro-ópticos en serie entre los terminales, se consiguen ventajas en término de eficiencia de coste y aislamiento, pero resolver las ambigüedades de las señales resulta más desafiante, concretamente para tensiones desiguales y/o variantes sobre los elementos electro-ópticos únicos (y en consecuencia una periodicidad desigual de las señales medidas) así como para las fases relativas variantes de las señales.

La invención se relaciona con un método para reconstruir de manera aproximada la forma de onda de la tensión aplicada entre los terminales, puede ser la tensión total o una tensión parcial o ambas, usando una señal  $S_n$  de base, por ejemplo  $S_1$ , indicativa del campo eléctrico sobre el primer elemento de transmisión de luz electro-óptico y una señal  $S_n'$  de referencia, por ejemplo  $S_2$ , para resolver la ambigüedad en la obtención de la tensión. El método comprende: determinar a partir de la primera señal  $S_n$  al menos dos hipótesis  $h^+$ ,  $h^-$  correspondientes a los diferentes valores  $V^{h^+}$ ,  $V^{h^-}$  o  $V_n^{h^+}$ ,  $V_n^{h^-}$  de tensión, por ejemplo  $V_1^{h^+}$ ,  $V_1^{h^-}$ , de la tensión  $V$  o  $V_n$ , obteniendo un valor esperado  $S_n^{h^+}$ ,  $S_n^{h^-}$ , por ejemplo  $S_2^{h^+}$ ,  $S_2^{h^-}$ , de la segunda señal  $S_n'$  para cada una de las hipótesis  $h^+$ ,  $h^-$ , comparar los valores  $S_n^{h^+}$ ,  $S_n^{h^-}$  esperados a un valor medido de la segunda señal  $S_n'$ , y tomar una decisión binaria entre la hipótesis  $h^+$ ,  $h^-$  mediante la validación de que la hipótesis  $h^+$  o  $h^-$  para la cual el valor  $S_n^{h^+}$  o  $S_n^{h^-}$  esperado está más cerca al valor medido de la segunda señal  $S_n'$ .

En una realización, exactamente se usa un elemento 2 de transmisión de luz electro-óptico, y las hipótesis  $h^+$  o  $h^-$  corresponden a los diferentes valores  $V_1^{h^+}$ ,  $V_1^{h^-}$  de tensiones posibles de la tensión  $V$  completa entre el primer terminal 1a y el segundo terminal 1b.

Las realizaciones describen un método para reconstruir de manera precisa la forma de onda de la tensión aplicada entre los terminales usando una pluralidad de elementos electro-ópticos pero sin requerir una señal en cuadratura para cada elemento electro-óptico. Además, la temperatura del sistema se puede obtener a partir de la fase de la señal en cuadratura y se puede usar para compensar la dependencia con la temperatura del efecto electro-óptico en sí. Además, se describe un método para obtener una pequeña tensión (esto es la tensión que es mucho menor que la tensión nominal y el cambio de fase electro-óptico que está dentro del  $\pm 180^\circ$ ). Además, se describe un dispositivo para medir una alta tensión.

## Definiciones:

El término "alta tensión" designa tensiones de AC que exceden 1 kV o tensiones de DC que exceden 1,5 kV y, en concreto, tensiones que exceden 75 kV.

5 Los términos "radial" y "axial" se entienden con respecto a la dirección axial (paralela al eje del haz  $h_v$  de luz, el eje  $z$ ) del sensor, con "radial" designando una dirección  $r$  perpendicular a la dirección axial y "axial" designando una dirección paralela a la dirección  $z$  axial.

## Descripción de la invención:

10 Como se muestra en la Fig. 1 (técnica anterior), un elemento 2 de transmisión de luz electro-óptico comprende un sensor 21 óptico (por ejemplo un cristal electro-óptico) que introduce un cambio de fase dependiente de campo entre una primera polarización o modo y una segunda polarización o modo de la luz que pasa a través de este. Esta luz puede, por ejemplo, ser guiada al sensor 21 óptico a través de una fibra 27 óptica y una lente 26 de acoplamiento. Idealmente, el elemento 2 de transmisión de luz electro-óptico mide la integral de línea  $\int E^* ds$  del campo eléctrico entre dos potenciales 1a, 1b eléctricos, por ejemplo la tierra 1b y el potencial 1a de alta tensión. Este concepto es particularmente adecuado para instalaciones exteriores por ejemplo subestaciones en las redes de transmisión de energía, ya que la precisión de la medición no se deteriora por las perturbaciones en el campo, por ejemplo debido a la lluvia o al hielo o la diafonía de las fases vecinas. Los cristales 21 electro-ópticos de cierta simetría son bastante adecuados para implementar este concepto.

20 Un campo eléctrico aplicado a un cristal 21 electro-óptico induce un cambio anisotrópico en el índice de refracción del material (birrefringencia). Esta birrefringencia (o cambio de la birrefringencia) provoca un cambio de fase entre dos ondas de luz lineales polarizadas ortogonalmente que atraviesan el cristal 21 (efecto Pockels). Midiendo este cambio de fase, se puede obtener la tensión aplicada. Una configuración de un elemento 2 de transmisión de luz electro-óptico que implementa la integración de línea del campo eléctrico, se muestra en la Fig. 1: La tensión  $V$  se aplica a las caras extremos de un cristal 21 con la luz también entrando y abandonando el cristal a través de las caras extremos. El material de cristal y su orientación axial se eligen de manera tal que sólo los componentes  $E_z$  de campo eléctrico (que apuntan a lo largo del cilindro) contribuyen al cambio de fase electro-óptico. Un material adecuado es el  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  (BGO) en una configuración [001], correspondiente al eje de cristal de 4 pliegues que es paralelo a la dirección de la propagación de la luz. La luz  $h_v$  de entrada (flecha ancha) es linealmente polarizada mediante un primer polarizador 22 (flecha más delgada que indica la dirección de la polarización transmitida; el primer polarizador 22 puede ser un polarizador en fibra, también). Para alcanzar el máximo contraste de modulación, los ejes  $x'$ ,  $y'$  electro-ópticos del cristal se orientan preferiblemente bajo un ángulo de  $45^\circ$  con respecto a la luz polarizada lineal de entrada. El cambio  $\Gamma$  de fase entre los componentes de la luz con polarizaciones paralelas a  $x'$  e  $y'$  está provocado por el campo eléctrico en el cristal 21 y se convierte a una modulación de amplitud de la luz transmitida por un segundo polarizador 23 dispuesto en el extremo de salida del cristal 21. Para sesgar el cambio  $\Gamma$  de fase, se puede colocar un elemento 3 de cambio de fase adicional (añadiendo una fase  $\phi$ ) en el camino óptico (entre los dos polarizadores 22, 23). Los ejes  $e_1$  y  $e_2$  principales del retardador se alinean paralelos a los ejes  $x'$  e  $y'$  electro-ópticos del cristal 21. En general, la intensidad de la luz transmitida después del segundo polarizador 23 es de la forma de  $I \cdot \cos^2(V)$ . El retardador 3 es ventajosamente una lámina de onda de  $\lambda/4$ .

40 Para tensiones  $V$  normales en subestaciones de alta tensión, generalmente se consigue una respuesta ambigua del sensor. Esta ambigüedad es resuelta clásicamente trabajando con dos caminos de salida óptica por cristal que están sustancialmente  $\pi/2$  ( $90^\circ$ ) fuera de fase, esto es que están en cuadratura, o que tienen cualquier otro cambio de fase relativo que no es múltiplo de  $\pi$ .

Las Fig. 2a-2d muestran disposiciones de sensores ópticos que se pueden usar en el método de medición de la presente invención.

45 En la Fig. 2a, el cristal 21 de sensor se usa en la reflexión usando un prisma 28 de reflexión, y en la Fig. 2d en la transmisión. La luz se transmite a través de la óptica 27, la lente 26 de acoplamiento y un primer polarizador 26 dentro del cristal 21. Después del cristal 21, la luz se divide a través del divisor 24 de haz en dos caminos ópticos, es decir un camino que comprende, por ejemplo, un prisma 25 de desviación y un segundo polarizador 23 y un fotodetector 4a (mostrado en la Fig. 3) acoplado a la unidad optoelectrónica, y otro camino que comprende un elemento 3 de cambio de fase y un segundo polarizador 23 adicional y un fotodetector adicional acoplado a la unidad 4 optoelectrónica. Por tanto, el cambio de fase de  $90^\circ$  se puede generar dividiendo la luz que abandona el cristal 21 en dos caminos por medio de un divisor 24 de haz y del prisma 25 de desviación y disponiendo el elemento 3 de cambio de fase en uno de los caminos.

55 En un sensor de tensión que comprende al menos un primer y un segundo elemento 2a y 2b de transmisión de luz electro-óptico (Fig. 3), una señal  $S_1$  de base o en general  $S_n$  y una señal  $S_1' = S_2$  o en general  $S_n'$  en cuadratura pueden ser generadas mediante la inserción de un retardador 3 de fase en el camino óptico de uno de los elementos de transmisión de luz electro-ópticos (aquí: el elemento 2b de transmisión de luz electro-óptico como en la Fig. 2c) y haciendo funcionar el otro elemento o elementos de transmisión de luz electro-ópticos (aquí: el elemento 2a de transmisión de luz electro-óptico como en la Fig. 2b) sin un retardador. Como consecuencia, existe sólo un camino

de salida por cristal (como en las Fig. 2b y 2c). Se evitan por tanto los divisores 24 de haz y los primas 25 de desviación adicionales para un camino en cuadratura por cristal 21 (como en la Fig. 2a). Como resultado el dispositivo resulta significativamente más pequeño (y barato), lo que permite montar los elementos de detección en un agujero relativamente estrecho.

- 5 En la realización mostrada, la luz es guiada hacia y desde los elementos 2a, 2b de transmisión de luz electro-ópticos a través de las fibras 27 ópticas. La luz es producida normalmente por una fuente 4c de luz (por ejemplo un LED o un láser) dentro de un módulo 4 de procesamiento de luz o unidad 4 optoelectrónica. La luz transmitida es detectada dentro de la unidad 4 optoelectrónica mediante un fotodetector 4a, 4b, así como un fotodiodo, por canal, lo que aquí implica, por ejemplo, por elemento 2a, 2b de transmisión de luz electro-óptico debido al camino único que está presente por elemento. De manera alternativa, los fotodetectores 4a, 4b se podrían integrar dentro de los elementos 2a, 2b de transmisión de luz electro-ópticos en sí. Se miden por tanto una primera y una segunda señal  $S_1$  y  $S_2$ , esto es  $S_n$  con  $n=1$  y  $n=2$ , que son indicativas del campo eléctrico sobre los respectivos elementos 2a y 2b de transmisión de luz electro-ópticos. Una unidad de control 41 (que consiste en una CPU 41a y una memoria 41b) deriva el voltaje  $V$  entre los terminales 1a y 1b en base a las señales  $S_1$  y  $S_2$ . Durante la obtención, las ambigüedades en la señal única – o, en el caso de más de dos señales, las ambigüedades en un subconjunto de las señales – son resueltas mediante la señal  $S_1=S_2$  en cuadratura. En otras palabras, todas las parejas de señales medidas producen una salida ambigua, en concreto si una de, preferiblemente exactamente una de, las señales es cambiada de fase con respecto a la otra. Por lo tanto, es posible medir sólo una señal  $S_1$  y  $S_2$  por elemento 2a y 2b de transmisión de luz electro-óptico y sin embargo llegar a una señal  $V$  de tensión ambigua.
- 20 El sensor de tensión mostrado en la Fig. 9 es muy similar al sensor de tensión discutido anteriormente, con la excepción de que comprende un elemento, por ejemplo un tercero, adicional 2c de transmisión de luz electro-óptico desde el cual se mide una tercera señal  $S_3$  a través de un tercer fotodetector 4d.

25 El procedimiento para reconstruir de manera precisa la forma de onda de la tensión  $V$  aplicada (incluso bajo tensiones  $V_n$  de cristal desiguales y parcialmente variantes, y en consecuencia bajo periodicidades desiguales de las señales  $S_n$  ópticas) así como bajo fases de señal relativas variantes se resume en la Fig. 4a para diversos elementos de transmisión de luz electro-ópticos y en la Fig. 4b para exactamente uno de dichos elementos.

El procedimiento comienza con una etapa de inicialización, donde (no necesariamente de manera precisa) se establecen los valores iniciales  $\alpha_n^{inic}$  y  $\Delta_n^{inic}$  para cada elemento de transmisión de luz electro-óptico (véase más adelante). Estos parámetros se pueden determinar de una manera (semi) automática o se pueden proporcionar de manera manual por el operador. Entonces, para cada señal  $S_n$  medida (por ejemplo de los fotodiodos 4a, 4b, ...) que representa un nivel  $I$  de intensidad de luz de cada  $n$ -ésimo elemento 2a, 2b, ... de transmisión de luz electro-óptico, se verifica si la tensión aplicada es "grande", esto es si la señal o las señales  $S_n$  alcanzan un mínimo y un máximo, o si la tensión es igual a o excede la tensión de media onda o es menor que la tensión de media onda, por ejemplo si se induce el cambio de fase electro-óptico  $>\pm 180^\circ$  o, en otras palabras, el valor absoluto del cambio de fase electro-óptico excede los  $180^\circ$ , o "pequeño", esto es si la señal o las señales  $S_n$  no alcanzan un mínimo y un máximo, por ejemplo si el cambio de fase electro-óptico se mantiene dentro de  $\pm 180^\circ$  o, en otras palabras, el valor absoluto del cambio de fase electro-óptico es menor que o igual a  $180^\circ$ . Cuando la tensión es "grande", la amplitud de la señal  $S_n$  adquirida es normalizada a un intervalo dado, por ejemplo al intervalo  $[-1;1]$ , para eliminar las diferencias de ganancia y compensación entre los canales o los caminos debidas a la cadena de mediciones (aquí por ejemplo fotodiodo-amplificador). Cuando la tensión es "pequeña", la señal  $S_n$  no está normalizada para preservar la correcta información sobre la amplitud, y por tanto sobre la tensión aplicada (véase más adelante). En otras palabras, cuando la tensión es "pequeña", la actualización de los parámetros de normalización, tales como la ganancia, la compensación, etc., se deshabilita. Por lo tanto, se usan los parámetros de normalización más recientes que se han obtenido, esto es actualizado, con una tensión "grande".

45 La Fig. 4b muestra un procedimiento en gran parte similar para el caso de exactamente un elemento 2 de transmisión de luz electro-óptico, con los mismos pasos o similares siendo aplicados como se describió anteriormente. La señal de base se designa como  $S$  y la señal de referencia como  $S'$ . En concreto, las  $\alpha_n$  no son necesarias, los cambios  $\Delta_n^{inic}$ ,  $\Delta_n^{inic'}$  de fase iniciales de la señal de base y de la señal de referencia, o su cambio  $\Delta_n^{inic}-\Delta_n^{inic'}$  de fase inicial relativo, son usados, y la tensión  $V$  completa se puede determinar directamente sin la suma sobre  $n$ . Además, un bucle de control auxiliar puede comprender la actualización o refinamiento de los cambios  $\Delta$  y  $\Delta'$ , o  $\Delta-\Delta'$ , de fase mediante la separación de los componentes de tensión de ac y de dc el uno del otro y el cálculo de  $\Delta$  y  $\Delta'$ , o de  $\Delta-\Delta'$ , a partir de la componente de dc (véase la Fig. 8). Dicha actualización o refinamiento se puede aplicar tanto en la Fig. 4a como en la Fig. 4b.

55 Continuando ahora con la Fig. 4a, la tensión parcial  $V_n$  aplicada a cada  $n$ -ésimo elemento 2a, 2b,... de transmisión de luz electro-óptico se determina a partir de  $S_n$  en dos pasos: El primer paso es contar los cruces por cero en  $S_n$ , como se ilustra en la Fig. 5. Esto se usa para determinar el periodo  $K$  de la respuesta cosinusoidal y proporcionar una primera aproximación burda, de la tensión  $V_n$  aplicada. Esta aproximación puede entonces (si es necesario) ser refinada calculando el resto o el error de aproximación, que está dado por la respuesta inversa (normalmente la función arcocoseno) del sensor. La suma de la aproximación de cruces por cero y del resto da la tensión  $V_n$  aplicada.

La tensión V total entre los terminales 1a y 1b está dada finalmente por la suma de todas las tensiones V<sub>n</sub> parciales: En la realización de la invención de la Fig. 3, el sensor de alta tensión está compuesto de varios elementos 2a, 2b de transmisión de luz electro-ópticos. Cada elemento 2a, 2b de transmisión de luz electro-óptico se puede insertar en un aislante con un agujero central que contiene, por ejemplo, un cristal 21 BGO. La tensión total entre los terminales 1a y 1b es denotada por V. La tensión total aplicada al elemento 2a, 2b,... de transmisión de luz electro-óptico es denotado por V<sub>n</sub>. La tensión total V es por tanto la suma de todas las tensiones parciales: V=ΣV<sub>n</sub>. Al contrario, las tensiones V<sub>n</sub> parciales son definidas por la fracción α<sub>n</sub> de la tensión V total que se aplica al módulo correspondiente: V<sub>n</sub>= α<sub>n</sub>\*V. Como se mencionó anteriormente, las tensiones parciales pueden diferir y variar en el tiempo. Por lo tanto, puede ocurrir que α<sub>n</sub>≠ α<sub>m</sub> si n≠m y α<sub>n</sub>= α<sub>n</sub>(t). La intensidad I<sub>n</sub> del haz de luz que sale de cada elemento 2a, 2b,... de transmisión de luz electro-óptico está dada por la siguiente expresión:

$$I_n = I_{n,0} \cdot \cos^2(\pi(\Gamma_n + \Delta_n)) \quad (1)$$

$$\Gamma_n = \frac{V_n}{2V_{h,n}} \quad (2)$$

donde I<sub>n,0</sub> es la intensidad del haz que sale con cero retardo, Γ<sub>n</sub> expresa el retardo dependiente de la tensión (cambio de fase dependiente del campo) entre los dos componentes de luz polarizada cuando salen del cristal 21, y Δ<sub>n</sub> es la fase relativa de la n-ésima señal con respecto a la tensión aplicada. V<sub>h,n</sub> es la tensión de media onda del cristal 21 BGO en el canal n óptico. Esta es la tensión que lleva al retardo de Γ<sub>n</sub>=1/2. En la ecuación (1), se asume que la profundidad de modulación de la señal óptica es igual a la unidad. Las fases Δ<sub>n</sub> relativas de las señales pueden diferir y variar en el tiempo dependiendo de la temperatura como se mencionó anteriormente. Por lo tanto, puede ocurrir que Δ<sub>n</sub>≠ Δ<sub>m</sub> si n≠m y Δ<sub>n</sub>=Δ<sub>n</sub>(t).

Las señales S<sub>n</sub> eléctricas producidas por la cadena de medición (fotodiodo –amplificador) es dada entonces por

$$S_n = G_n \cdot I_n + b_n + e_n \quad (3)$$

donde G<sub>n</sub> es la ganancia acumulada de todos los componente en la cadena de medición, y b<sub>n</sub> es una compensación. El término e<sub>n</sub> es un término de ruido.

#### Medición de la tensión aplicada

Como se mencionó anteriormente, en la primera etapa de procesamiento de la señal (Fig. 4a, 4b), la amplitud de cada señal eléctrica se puede normalizar al intervalo [-1; 1]. Esta operación elimina los parámetros de ganancia y compensación de la ecuación (3) (el término e<sub>n</sub> de ruido se ha omitido aquí):

$$S_n^{Norm} = 2 \cdot \cos^2(\pi(\Gamma_n + \Delta_n)) - 1 \quad (4)$$

La normalización de la señal se consigue de manera simple mediante la aplicación de los factores de escala y compensación que hacen corresponder el mínimo o el máximo de la respuesta real al mínimo o máximo normalizado, deseado (esto es, -1 y 1):

$$escala = 0,5 \cdot (\max - \min) \quad (5)$$

$$compensación = \min + escala \quad (6)$$

$$S_n^{Norm} = \frac{S_n - compensación}{escala} \quad (7)$$

Para solucionar las ecuaciones anteriores, se determinan ambos extremos min (=mínimo) y max (=máximo) de la respuesta. Esto significa a su vez que la normalización de la respuesta sólo se puede hacer cuando el cambio de fase electro-óptico inducido por la tensión aplicada entre los terminales 1a y 1b está por encima de ±180°, esto es se mide una tensión "grande". De lo contrario, los factores de escala y de compensación se deben mantener constantes hasta que la condición anterior se cumpla de nuevo (véase la "Medición de pequeñas tensiones" anterior). En la segunda etapa, todas las tensiones V<sub>n</sub> parciales están determinadas mediante la solución de las ecuaciones (1)-(4) para V<sub>n</sub>. Esto lleva a

$$V_n = \frac{V_{h,n}}{\pi} \left( \left( \pm \arccos \left( \frac{2(S_n - b_n)}{G_n \cdot I_{n,0}} - 1 \right) + K \cdot 2\pi \right) - 2\pi\Delta_n \right) \quad (8)$$

Observe que después de la normalización de la señal,  $G_n=1$  y  $b_n=0$ . En la ecuación (8), es evidente que debido a la periodicidad del (arco) coseno,  $V_n$  puede ser resuelta sólo hasta el factor  $2 \cdot K \cdot V_{h,n}$  cuando  $K$  = número de periodos es desconocido. Para determinar  $K$ , esto es el periodo de la respuesta cosinusoidal del elemento de transmisión de luz electro-óptico que corresponde a la tensión  $V_n$  aplicada, se usa un recuento  $k$  bidireccional del número de cruces por cero de la señal  $S_n$  medida. De hecho, el número  $k$  de cruces por cero cambia dos veces por periodo  $K$ . El procedimiento de recuento de los cruces por cero se obtiene a partir del documento US 5.001.419, que en su totalidad se hace parte de la presente descripción como referencia. Se consideran dos señales ópticas en cuadratura: El recuento  $k$  es aumentado según la forma de onda representada por la señal de base resulte más positiva y es disminuido según la magnitud de la forma de onda representada resulte más negativa. La señal de base es la señal para la cual se determina el parámetro de interés, por ejemplo aquí el número de cruces por cero. La señal en cuadratura es otra señal – en nuestro caso de un elemento 2a, 2b,... de transmisión de luz electro-óptico diferente – que se ha retrasado con respecto a la señal de base, por ejemplo mediante el uso de un elemento 3 de cambio de fase. La dirección en la que se mueve la forma de onda está determinada por cuál de las señales (la señal de base o la señal en cuadratura) es la principal. La inversión de la dirección de la forma de onda de la tensión resulta en un cambio en el que una señal está liderando y puede por lo tanto ser detectada por dos cruces por cero consecutivos en la misma señal.

Para evitar la indexación aleatoria del recuento  $k$  acumulativo bidireccional de cruces por cero, que podría ocurrir con pequeñas señales, se crea una banda muerta alrededor del eje cero. Los cruces por cero no se cuentan mientras la señal esté en la banda muerta. En su lugar, se toma la determinación de que cuando la señal abandone de nuevo la banda muerta los cruces por cero se deberían indexar.

- Si la señal sale de la banda muerta en el mismo lado que entró, entonces la señal objetivo ha cambiado de dirección y  $k$  no debería indexarse;
- Si la señal sale de la banda muerta en el lado opuesto al que entró, entonces ha habido un cruce por cero y  $k$  se indexa;

Observe que si el recuento  $k$  de cruces por cero se puede establecer a cero cuando la tensión es cero, entonces las mediciones posteriores de tensión serán correctas. En general, sin embargo, la tensión al comienzo (durante la inicialización) no es conocida y por lo tanto  $k$  es arbitrario. Bajo la suposición de que la tensión aplicada es puramente de AC,  $k$  se puede ajustar en pasos enteros hasta que el valor medio de la tensión calculada sobre un ciclo es cero. Después de que  $k$  haya sido ajustado de manera apropiada, las tensiones calculadas serán correctas hasta que el programa se interrumpa.

Es evidente en la ecuación (8) que la tensión  $V_n$  medida está dada por la suma de dos términos distintos. El primer término,  $K \cdot 2\pi$ , es aproximado usando el recuento de cruces por cero acumulativo como se discutió anteriormente. El cálculo del segundo término,  $\arccos(2(S_n - b_n)/(G_n \cdot I_{n,0}) - 1)$ , se discutirá a continuación: Fundamente, la ecuación (8) se debe resolver para  $V_n$  dada la señal  $S_n$ , con el número  $K$  de periodo conocido a partir del recuento  $k$  de cruces por cero. El signo del arcocoseno no se puede determinar sólo a partir de  $S_n$ . Por lo tanto, la señal en cuadratura se usa de manera adicional para desambiguar el signo. El procedimiento correspondiente se ilustra en la Fig. 6a, e incluso en mayor detalle en las Fig. 6b y 6c. La Fig. 6a muestra la señal  $S_1$  de base, o la más general  $S_n$ , con cambio de fase cero  $\Delta=0$  y la señal  $S_1'$  de referencia, o la más general  $S_n'$ , con cambio  $\Delta'=90^\circ$  de fase en cuadratura ideal, ambas normalizadas a un intervalo  $[-1; 1]$  como una función de la alta tensión en kilovoltios. Las Fig. 6b y 6c muestran la correspondiente señal  $S_1$  de base sin procesar y la señal  $S_1'$  de referencia sin procesar que oscilan entre cero y la máxima intensidad  $I_0$  de luz, o la potencia óptica respectivamente, alrededor de una potencia  $I_0/2$  de luz media. Como comentario, en este caso, el recuento  $k$  de cruces por cero, o los periodos equivalentes, corresponderían al recuento de cruces de la potencia  $I_0/2$  de luz media.

La Fig. 6b muestra el caso de dos cristales 21 idénticos o de elementos 2a, 2b de transmisión de luz opto-eléctricos expuestos a las mismas tensiones  $V_1 = V_2 = V/2$  parciales y la señal  $S_1$  de base obtenida a partir de uno de ellos y la señal  $S_1'$  de referencia a partir del otro, o de manera equivalente el caso de un cristal 21 o un elemento 2 de transmisión de luz electro-óptico con tanto la señal  $S_1$  de base como la señal  $S_1'$  de referencia obtenidas del mismo. El eje  $x$  muestra la tensión  $V$  normalizada a la tensión  $V_\pi$  de media onda. La señal  $S_1$  es la base para las dos hipotéticas tensiones  $V_1^{h-}$  y  $V_1^{h+}$  de referencia, de las cuales  $V_1^{h-}$  está validada encontrando la mayor similitud de cercanía de la señal  $S_2^{h-}$  de referencia hipotética con la señal  $S_1' = S_2$ .

La Fig. 6c muestra el caso de dos cristales 21 o elementos 2a, 2b de transmisión de luz electro-ópticos expuestos a diferentes tensiones  $V_1, V_2$ , esto es con diferentes  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ . La señal  $S_1$  de base se obtiene a partir de una de ellas y la señal  $S_1'$  de referencia de la otra. El eje  $x$  muestra la tensión  $V$  normalizada a la tensión  $V_\pi$  de media onda (común). La señal  $S_1$  ampliada es la base para las dos tensiones  $V_1^{h-}$  y  $V_1^{h+}$  de referencia hipotéticas, obtenidas a partir de los valores  $S_1$  relevantes (puntos completos) multiplicando con la relación  $\alpha_2/\alpha_1$ , de la cual la  $V_1^{h-}$  está validada encontrando la mayor similitud de cercanía de la señal  $S_2^{h-}$  de referencia hipotética con la señal  $S_1' = S_2$ .

En más detalle, se generan las dos hipótesis  $h^+$  y  $h^-$ :

$$h^+ : V_n^{h^+} \propto + \arccos(\cdot)$$

$$h^- : V_n^{h^-} \propto - \arccos(\cdot)$$

la tensión  $V_n$  bajo ambas hipótesis,  $V_n^{h^+}$  y  $V_n^{h^-}$ , se calculan después usando la ecuación (8). Posteriormente, se calcula la respuesta de la señal en cuadratura bajo ambas hipótesis  $S_n^{h^+}$  y  $S_n^{h^-}$ . Esto se hace mediante la inserción de  $V_n^{h^+}$  y  $V_n^{h^-}$  en la siguiente expresión, obtenida a partir de las ecuaciones (1)-(4):

$$S_{n'}^h = G_{n'} \cdot I_{n',0} \cdot \cos^2 \left( \pi \left( \frac{V_{n'}^h}{2V_{h,n'}} + \Delta_{n'} \right) \right) + b_{n'} \quad (9)$$

Observe que en la ecuación (9),  $n'$  es el índice de la señal en cuadratura (por ejemplo,  $n'=2$ ) que se usa para desambiguar la señal, no el índice  $n$  de la señal cuya tensión se calcula:  $n' \neq n$ . Finalmente, se valida la hipótesis con la respuesta  $S_{n'}^h$  de la señal en cuadratura (valor esperado) que es más cercana (en términos de distancia Euclídea) a la respuesta  $S_{n'}$  de la señal en cuadratura medida.

Como se mencionó anteriormente, el signo del arccoseno es desambiguado mediante la "proyección" de ambas tensiones  $V_n^{h^+}$  y  $V_n^{h^-}$  en la respuesta en cuadratura para verificar que hipótesis produce una imagen que coincide con la señal en cuadratura medida de manera más cercana. Ya que es posible que las fracciones de tensión aplicadas al camino de base y al camino en cuadratura difieran ( $\alpha_n \in [0;1]$ ), es necesario convertir la tensión sobre un elemento a la tensión sobre el otro elemento antes de la comparación. Esto se logra expresando una respuesta como una función de la otra:

$$\begin{aligned} V_n &= \alpha_n \cdot V \\ V_{n'} &= \alpha_{n'} \cdot V \\ \Rightarrow V_{n'} &= \frac{\alpha_{n'}}{\alpha_n} \cdot V_n \end{aligned} \quad (10)$$

#### Determinación de las alfas

Se ha mencionado anteriormente que las tensiones parciales pueden no ser iguales y variar en el tiempo. Esto es,  $\alpha_n \neq \alpha_m$  si  $n \neq m$  y  $\alpha_n = \alpha_n(t)$ . La tensión parcial aplicada a cada uno de los elementos 2a, 2b,... de transmisión de luz electro-ópticos, se puede determinar reescribiendo la definición de  $\alpha_n$ :

$$\alpha_n = \frac{V_n}{V} \quad (11)$$

En la ecuación (11),  $\alpha_n$  se calcula usando las tensiones  $V_n$  parciales medidas y la tensión  $V$  total. Por otro lado, la  $\alpha_n$  debe ser conocida para calcular  $V_{n'}$  y por tanto  $V$ , usando la ecuación (8). Esto implica que en general,  $\alpha_n$  debe ser conocida para calcular  $V_n$  y  $V$ , y se requieren las tensiones para calcular  $\alpha_n$ .

Sin embargo, esta aparente contradicción se reduce observando que en la medición de la tensión aplicada, el propósito de  $\alpha_n$  es sólo desambiguar el signo del arccoseno. Específicamente, la compensación para diferentes  $\alpha_n$  se hace antes del paso de asociación de datos ilustrado en las Fig. 6a, 6b, 6c. Ya que el resultado de este paso es una decisión binaria, esto es un signo positivo o negativo, la decisión será correcta incluso con una  $\alpha_n$  ligeramente errónea siempre que la respuesta  $S_{n'}$  de la señal en cuadratura medida sea "mucho más cercana" a la respuesta  $S_{n'}^h$  que la otra.

Con la tensión de AC, la observación anterior implica que la mayor parte del tiempo (o de manera equivalente, para la mayor parte de las tensiones  $V_n$ ), la  $\alpha_n = f(V_n(t))$  calculada usando la ecuación (8) será correcta.  $\alpha_n$  será errónea sólo cuando  $V_{n'}$ , y por tanto  $V$ , sea incorrecta debido a la selección de hipótesis. Por lo tanto,  $\alpha_n$  es correcta "la mayor parte del tiempo" o, de manera equivalente, la  $\alpha_n$  correcta está dada por el valor o el modo más común de  $\alpha_n$ .

#### Bucle de control de seguimiento de $\alpha_n$

Normalmente, la  $\alpha_n$  exacta no se conoce durante la inicialización. De hecho, normalmente no son conocidas en ningún momento ya que  $\alpha_n$  depende de campos en dispersión, variaciones mecánicas del sensor, etc. Por lo tanto, el bucle de control auxiliar se debería inicializar con una estimación de  $\alpha_n$  para todos los canales  $n$  ópticos.

Entonces, se toman una primera serie de medidas y en base a la  $V_n$  resultante, se calculan las  $\alpha_n$  más exactas usando la ecuación (11) y el modo de la  $\alpha_n$ . Estas nuevas estimaciones de  $\alpha_n$  se usan para los cálculos siguientes de  $V_n$ , que a su vez se usan para refinar  $\alpha_n$ , etc. Por tanto, las  $\alpha_n$  son convergentes.

- 5 Lo anterior describe un bucle de control auxiliar que sigue  $\alpha_n$  en base a las mediciones de tensión entrantes. La tasa de refresco óptima del bucle de control se debe determinar de manera experimental; sin embargo, se espera que corresponda con unos pocos periodos de la tensión (AC) aplicada.

Medición de la delta y extracción de la temperatura del retardador

- 10 El retardo real introducido por el elemento 3 de cambio de fase varía (de manera aproximadamente lineal) con la temperatura, mientras que la dependencia con la temperatura de la fase de los canales ópticos sin retardador es débil. Por lo tanto, la temperatura del retardador se puede extraer de la diferencia de fase entre la señal  $S_n'$  en cuadratura (con el elemento 3 de cambio de fase) y la señal  $S_1$  de base (sin retardador). Esta información se usará a su vez para compensar la salida del sensor por la dependencia con la temperatura del efecto electro-óptico.

- 15 Para medir la fase  $\Delta_n$  de la señal relativa para cualquier canal, se soluciona la ecuación (8) para  $\Delta_n$  cuando  $V_n=0$  (por lo tanto,  $k=0$ ), como se ilustra en la Fig. 7, o de manera alternativa en la Fig. 8 (véase más adelante). Con la señal normalizada ( $G_n=1$  y  $b_n=0$ ), esto lleva a la siguiente expresión:

$$\Delta_n = \pm \frac{V_{h,n}}{2\pi^2} \arccos\left(\frac{2(S_n)}{I_{n,0}} - 1\right) \quad (12)$$

Resolver la ecuación (8) cuando  $V_n=0$  es útil ya que en este punto específico, la respuesta es dependiente de la fase  $\Delta_n$  relativa, pero no de la fracción  $\alpha_n$  de tensión aplicada. Sin embargo, esto implica que el instante de tiempo correcto (muestra) se debe determinar cuando  $V_n=0$ .

- 20 El procedimiento para encontrar este instante de tiempo cuando  $V_n=0$  se resume a continuación: Primero, los puntos R1 y R2 de retorno de la tensión aplicada se pueden ubicar bajo la suposición de que la señal de excitación es puramente de AC (esto es valor medio=0). Esta es una suposición razonable bajo condiciones de funcionamiento normales; cuando la suposición no se sostiene, se deshabilita el cálculo de  $\Delta_n$  de manera temporal. Los componentes de DC en la tensión aplicada pueden ser detectados mediante el cálculo del valor medio de la tensión V reconstruida sobre uno o varios periodos.

Una manera fácil de ubicar R1 y R2 es escanear la señal de respuesta para dos extremos sucesivos que no son iguales ni a 0,5 ni a -0,5. Sin embargo, esto no funciona para ciertos valores de amplitudes de la señal de entrada.

- 30 Un método alternativo para ubicar los puntos R1 y R2 de retorno es usar la salida k de cuenta de cruces por cero. Los puntos R1 y R2 de retorno se ubican en los extremos (ya sea el mínimo o el máximo, determinado, por ejemplo, por la segunda derivada) de la señal medida (de base o en cuadratura) que se ubican dentro del periodo de tiempo donde la salida k del recuento es máxima o mínima. Estos extremos de k indican los puntos de retorno de la tensión V aplicada, ya que k es una aproximación de V.

- 35 En la Fig. 8 se muestra un método alternativo para medir la fase  $\Delta$  relativa entre una señal de base y la tensión V aplicada. En un sensor de tensión óptico ideal, las dos señales ópticas que son producidas por el sensor están en cuadratura exacta. Normalmente, la señal S de base tiene un cambio  $\Delta=0^\circ$  de fase, donde la señal S' de referencia está dada con un cambio  $\Delta'=90^\circ$  de fase mediante la inserción de un retardador de cuarto de onda en el camino óptico correspondiente. En los sistemas reales, los cambios de fase generalmente no son iguales a sus valores ideales  $\Delta=0^\circ$  y  $\Delta'=90^\circ$ . Esto es debido a la dependencia con la temperatura y las imprecisiones del retardador de cuarto de onda así como otros efectos ópticos. Por lo tanto para asegurar la reconstrucción precisa de la tensión aplicada, se deben determinar los cambios  $\Delta$  y  $\Delta'$  de fase reales.

- 40 El procedimiento propuesto para determinar los cambios de fase está basado en la siguiente observación: el efecto en la señal S de intensidad de un cambio de fase distinto de cero  $\Delta \neq 0$  es idéntico al efecto de una tensión aplicada con la componente de DC distinta de cero  $DC \neq 0$ . Esto se ilustra en la Fig. 8. Una tensión de AC pura ( $DC=0$ ) se aplica a ambos caminos ópticos con  $\Delta=0$  y con  $\Delta \neq 0$ . La señal S de intensidad resultante se muestra en negro para  $\Delta=0$  y en gris para  $\Delta \neq 0$ , respectivamente. Además, se traza en gris la señal de intensidad con  $\Delta=0$  para una tensión aplicada que no es de AC pura ( $DC \neq 0$ ). Claramente, la señal gris debida al cambio de fase distinto de cero y la señal gris debida a la componente de DC en la tensión aplicada son idénticas.

- 50 Si se supone ahora que la tensión aplicada real es puramente de AC, entonces cualquier compensación de DC que sea evidente en la tensión reconstruida puede ser completamente debida al cambio de fase  $\Delta \neq 0$ . Por lo tanto, el cambio de fase se puede determinar mediante:

La determinación de la compensación de DC aparente en la tensión V reconstruida mediante el cálculo  $DC = \text{media}(V_{\text{reconstruida}})$ , y

El cálculo del cambio  $\Delta$  de fase correspondiente:

$$\Delta = \frac{DC * \pi}{V_h}$$

con  $V_h$  = tensión de media onda. El mismo procedimiento se puede aplicar para determinar el cambio  $\Delta'$  de fase de la señal  $S'$  de referencia con respecto a la tensión  $V$  aplicada.

5 Medición de pequeñas tensiones

La invención también proporciona un mecanismo para determinar la tensión  $V$  aplicada entre los terminales 1a y 1b en los casos en los que la tensión  $V$  es mucho menor que la tensión nominal y el cambio de fase electro-óptico está por lo tanto dentro de los  $\pm 180^\circ$ . Específicamente, la medición de las tensiones que lleva a los cambios de fase menores que o dentro de los  $\pm 180^\circ$  es idéntico a las grandes tensiones (como se describe anteriormente), pero con dos diferencias:

- No normalización de la señal. Los cambios de fase menores que o dentro de los  $\pm 180^\circ$  llevan a señales que no cubren todo el intervalo de amplitud de salida posible. Esto es, la intensidad  $I$  del haz de luz que sale del elemento 2a, 2b,... de transmisión de luz electro-óptico según está dado por la ecuación (1) no cubre todo el intervalo admisible  $[0; I_{n,0}]$ . Por lo tanto, la actualización de la normalización de la señal se debe deshabilitar para preservar la correcta información sobre la amplitud de la señal, y por tanto sobre la tensión aplicada.
- No medición de la delta. Ya que la estimación de la  $\Delta_n$  y por tanto de la temperatura, depende de los cruces por cero en la señal de respuesta, esto no se puede realizar cuando el cambio de fase electro-óptico está dentro de los  $\pm 180^\circ$ .

Para detectar las tensiones  $V$  con cambio de fase por debajo o dentro de los  $\pm 180^\circ$ , no se puede depender de la medición de la tensión en sí, ya que ésta obviamente sólo está disponible después de que se haya hecho la normalización de la señal. En su lugar, se depende de los factores de escala y de compensación producidos por el procedimiento de normalización en las ecuaciones (5)-(6) cuando la tensión era aún "grande". De hecho, en un primer periodo  $[t_1; t_2]$  de tiempo con  $t_2 < t_1$  el cambio de fase debe estar por encima o fuera de los  $\pm 180^\circ$  (esto es, intervalo de amplitud de salida completo cubierto, intervalo "grande" de tensiones aplicado a los terminales 1a y 1b). Entonces la escala y la compensación se mantienen aproximadamente constantes. Cuando en un segundo periodo  $[t_3; t_4]$  de tiempo (con  $t_4 > t_3$ ), el cambio de fase cae por debajo o dentro de los  $\pm 180^\circ$ , al menos uno de estos factores cambiaría rápidamente (esto es, dentro de un periodo de la tensión  $V$ ), ya que la señal  $S_n$  necesita volverse a escalar.

Por lo tanto, la tensión  $V$  o  $V_n$  se considera "pequeña" (cambio de fase  $< \pm 180^\circ$ ) cuando bien

$$escala(t) - escala(t - \Delta) > \delta_{escala} \quad (14) \quad o$$

$$compensación(t) - compensación(t - \Delta) > \delta_{compensación} \quad (15)$$

Aquí,  $\delta_{escala}$  y  $\delta_{compensación}$  son valores de umbral que se usan para detectar cambios significativos o rápidos en los parámetros correspondientes.  $\Delta$  es el intervalo de tiempo que separa dos evaluaciones consecutivas de escala y/o compensación. (Nota: ¡el intervalo  $\Delta$  de tiempo no se refiere a un cambio de fase aquí!). Para el funcionamiento apropiado del método, este intervalo  $\Delta$  de tiempo debe ser suficientemente pequeño para asegurar el tiempo de reacción apropiado (sin tensiones que cambian lentamente), pero mayor que un periodo de señal (esto es 20 ms a 50 Hz o 16,6 ms a 60 Hz).

Las Fig. 10a, 10b, 10c muestran en otro aspecto de la invención un método para mejorar la forma de onda de la tensión reconstruida a partir de la señal de base y de la señal de referencia.

La Fig. 10a muestra la respuesta del sensor (línea sólida: señal  $S_n$  de base, línea punteada: señal  $S_n'$  en cuadratura de referencia) normalizada a  $[-1, 1]$  para el caso ideal en el que el cambio de fase entre las dos señales es de  $\lambda/4$ .

Si sólo se usa una de las dos señales para la reconstrucción de la tensión, se termina con las regiones de alta sensibilidad del sensor, por ejemplo, alrededor de  $\pm V_{\pi}/2$  para a señal  $S_1$  de base, y las regiones en las que la sensibilidad es baja, por ejemplo cerca de  $0 V$  o  $\pm V_{\pi}$ . Si la sensibilidad del sensor es baja, incluso un pequeño error de medición de la intensidad de la luz, por ejemplo debido al ruido o cualquier error en la normalización de la señal, se traducirá en un gran error en la tensión reconstruida. Es por tanto ventajoso evitar el uso de estas regiones de baja sensibilidad para la reconstrucción de la tensión.

Las líneas en negrita en la Fig. 10a muestran la señal que tiene una mayor sensibilidad en una cierta región de tensión. Debido a la naturaleza de la respuesta de la señal es siempre que la señal es menor en magnitud y por tanto más cercana a la región lineal de la función coseno.

- Reconstrucción mejorada usando la señal más lineal.

Por tanto, una realización es para reconstruir la tensión usando siempre la señal “más lineal”, esto es la señal en negrita en la Fig. 10a. Se puede usar la fórmula mostrada en la Fig. 10b. El parámetro  $\beta_n$  se puede elegir para ser bien 0 o 1, dependiendo de qué señal tiene la menor magnitud. Por tanto, la tensión se reconstruye ya sea mediante la señal  $S_n$  de base sola ( $\beta_n = 1$ ) o mediante la señal  $S_n'$  en cuadratura sola ( $\beta_n = 0$ ). Esto mejora de manera significativa la calidad y la precisión de la forma de onda de la tensión reconstruida ya que se evitan las regiones de baja sensibilidad del sensor.

El método también funciona para los casos en los que el cambio de fase entre las dos señales  $S_n$ ,  $S_n'$  difieren significativamente de  $\lambda/4$ . Observe que la tensión se reconstruye aun usando una función arcocoseno, y por lo tanto no se usan aproximaciones al contrario que la técnica anterior.

- Reconstrucción mejorada usando una media ponderada para dos señales

En el método de reconstrucción mejorado que usa la señal más lineal descrita anteriormente terminamos con un cambio repentino entre las señales  $S_n$ ,  $S_n'$  de base y de referencia usadas para la reconstrucción. Esto puede producir discontinuidades en la forma de onda de la tensión reconstruida. En concreto, los errores provocados por ejemplo por una normalización errónea tienden a tener un signo opuesto para las dos señales  $S_n$ ,  $S_n'$  cerca de la ubicación donde se cambia desde una a la otra señal.

Mezclando los resultados de la reconstrucción de ambos canales, dichas discontinuidades pueden por tanto ser eliminadas y, además, se pueden compensar dichos errores de signo opuesto. Con este propósito, la fórmula en la Fig. 10c puede ser usada mediante el reemplazo de la función cuadrada para el parámetro  $\beta_n$  con una función, que oscila de manera continua entre 0 y 1, en concreto  $\beta_n = \cos^2(S_n \cdot \pi/2) / (\cos^2(S_n \cdot \pi/2) + \sin^2(S_n \cdot \pi/2))$ . En la Fig. 10c este parámetro  $\beta_n$  se representa por consiguiente de manera ejemplar por una función  $\sin^2(V_n \cdot \pi/V_\pi)$  de la tensión aplicada, pero podría ser también una curva triangular o una curva más compleja con bordes más pronunciados y mínimos y máximos más planos como una función de la tensión. En la presente memoria,  $V_n$  = tensión sobre el n-ésimo elemento de transmisión de luz electro-óptico y  $V_\pi$  = tensión de media onda, por ejemplo  $V_\pi = V_{h,n}$  = tensión de media onda del cristal en el n-ésimo elemento de transmisión de luz electro-óptico.

Notas:

Las Fig. 2a-2c muestran disposiciones en las que los elementos 2, 2a, 2b de transmisión de luz electro-ópticos se hacen funcionar en modo reflexión usando un reflector 28, esto es, la luz pasa el sensor 21 óptico dos veces. De manera alternativa, el elemento 2 de transmisión de luz electro-óptico se puede hacer funcionar en modo transmisión como en la Fig. 1 o en la Fig. 2d, esto es la luz pasa el cristal 21 sólo una vez.

Otra opción para eliminar la ambigüedad en lugar de o de manera adicional a usar una señal en cuadratura es hacer funcionar el sensor con luz de dos longitudes de onda diferentes.

Las realizaciones descritas aquí se refieren a uno, dos o tres elementos de transmisión de luz electro-ópticos. Se debería observar, sin embargo, que el método y/o el dispositivo según la invención son adecuados para cualquier número de elementos de transmisión de luz electro-ópticos mayores de uno o dos y/o más de dos señales medidas. La señal medida a partir de cualquier elemento de transmisión de luz electro-óptico se puede usar para desambiguar la señal o las señales a partir de cualquier otro elemento o elementos de transmisión de luz electro-ópticos, en concreto si al menos una señal medida está cambiada de fase con respecto a la otra señal o señales medidas (por ejemplo, un elemento tiene un elemento de cambio de fase, el otro o los otros no).

El rol de las señales de “base” y en “cuadratura” en esta invención es intercambiable, esto es, la señal en cuadratura se puede usar para resolver las ambigüedades en la obtención de la tensión a partir de la señal de base, y/o la señal de base se puede usar para resolver las ambigüedades en la obtención de la tensión a partir de la señal en cuadratura.

Se debería observar que el método de hipótesis descrito en la sección de “Medición de la tensión aplicada” - es en principio adecuado también para desambiguar una señal de “base” con una señal en “cuadratura” en un sensor en el cual ambas señales son originales del mismo elemento de transmisión de luz electro-óptico, por ejemplo un sensor clásico en el que se leen dos caminos (uno con y otro sin retardador de cuarto de onda) a partir del mismo elemento de transmisión de luz electro-óptico.

Durante toda esta solicitud, el índice n designa la numeración de los elementos de transmisión de luz electro-ópticos. El índice n es un entero que comienza a partir de n=1, 2, 3,....

El canal n óptico corresponde al n-ésimo elemento 2, 2a, 2b, 2c,... de transmisión de luz electro-óptico del sensor de tensión. El n-ésimo elemento 2, 2a, 2b, 2c,... de transmisión de luz electro-óptico o, por ejemplo, el n-ésimo cristal 21 es sometido a y está midiendo la n-ésima tensión  $V_n$  parcial, y en el caso de exactamente un elemento 2, la tensión  $V=V_1$  total.

La división en dos caminos ópticos corresponde a crear una señal  $S_1$  de base y una señal  $S_1'$  de referencia. En general para  $n$  canales ópticos, la división en dos caminos ópticos para el  $n$ -ésimo canal corresponde a crear una señal  $S_n$  de base y una señal  $S_n'$  de referencia. Esta señal  $S_1$  de base o de manera general  $S_n$  y la señal  $S_1'$  de referencia o de manera general  $S_n'$  se puede generar a partir del mismo elemento 2, 2a, 2b, 2c de transmisión de luz electro-óptico o del mismo cristal 21, o a partir de diferentes elementos 2, 2a, 2b, 2c de transmisión de luz diferentes o cristales 21. Por ejemplo, se puede generar una señal  $S_1$  de base a partir del primer elemento y la señal  $S_1'=S_2$  de referencia a partir del segundo elemento, o la señal  $S_2$  de base a partir del segundo elemento y la señal  $S_2'=S_1$  a partir del primer elemento, o tanto la señal  $S_1$  o de manera general  $S_n$  de base y la señal  $S_1'$  o de manera general  $S_n'$  de referencia a partir del mismo elemento  $n=1$  o de manera general  $n$ . La señal  $S_1$  de base o de manera general la  $S_n$  es la única que se desambigua con la ayuda de la señal  $S_1'$  o de manera general  $S_n'$  de referencia usando la prueba de hipótesis según la invención. La  $n$ -ésima señal  $S_n$  de base es indicativa de la tensión  $V$  o de la tensión  $V_n$  parcial sobre el  $n$ -ésimo elemento de transmisión de luz electro-óptico. Sin embargo, en concreto cuando tanto la señal  $S_1$  o de manera general  $S_n$  de base como la señal  $S_1'$  o de manera general  $S_n'$  de referencia se obtienen a partir del mismo elemento de transmisión de luz electro-óptico, tanto la señal  $S_1$  o de manera general  $S_n$  de base como la señal  $S_1'$  o de manera general  $S_n'$  de referencia se pueden usar en la reconstrucción de una forma de onda mejorada de la tensión  $V$  total o de la tensión  $V_n$  parcial.

Por favor, observe, que la nomenclatura del elemento 2, 2a, 2b, 2c de transmisión de luz electro-óptico como "primero", "segundo" etc. no necesita corresponderse con el índice "n" que es 1 o 2 etc, ya que al menos se puede presentar un "primer" elemento. Además, la nomenclatura de las señales como "primera", "segunda" etc no necesita corresponderse con el índice "n" que es 1 o 2 etc, ya que al menos puede haber presente una "primera" señal.

Además, las señales  $S_n$  de base y las señales  $S_n'$  de referencia mencionadas serán señales sin procesar o señales parcialmente normalizadas (por ejemplo una compensada para ser simétrica en relación con la línea de cero, o escalada en amplitud) o señales totalmente normalizadas (por ejemplo compensadas y escaladas a un intervalo [-1; +1] de valores), según sea necesario o apropiado para el paso del método bajo consideración.

En una realización, el método comprende además los pasos de:

disponer al menos una tercer elemento 2c de transmisión de luz electro-óptico en el campo eléctrico entre el primer terminal 1a y el segundo terminal 1b,

pasar la luz a través del tercer elemento 2c de transmisión de luz electro-óptico,

medir al menos una tercera señal  $S_3$  a partir del tercer elemento 2c de transmisión de luz electro-óptico en donde la tercera señal  $S_3$  es indicativa del campo eléctrico sobre el tercer elemento 2c de transmisión de luz electro-óptico, y en donde la tercera señal  $S_3$  es una función periódica de la tensión  $V$ ,

obtener la tensión  $V$  a partir de la primera señal  $S_n$ , la segunda señal  $S_n'$ , y la tercera señal  $S_3$ , en donde la segunda señal  $S_n'$  se usa para resolver la ambigüedad en la obtención de la tensión  $V$  que usa la primera señal  $S_n$  y la tercera señal  $S_3$ .

### 35 **Números de referencia**

- 1a, 1b: terminales
- 2, 2a, 2b, 2c: elemento de transmisión de luz electro-óptico (módulo sensor)
- 3: elemento de cambio de fase
- 4: módulo de procesamiento de la luz, unidad optoelectrónica
- 40 4a, 4b, 4d: fotodetector
- 4c: fuente de luz
- 21: sensor óptico, por ejemplo cristal electro-óptico
- 22: primer polarizador
- 23: segundo polarizador
- 45 24: divisor de haz
- 25: prisma de desviación
- 26: lente de acoplamiento
- 27: fibra óptica

	28:	reflector
	41:	unidad de control
	41a:	unidad central de procesamiento (CPU)
	41b:	memoria
5	$S_1, S_2, S_3, S_n$ :	señales
	$S_n$ :	señal de base del n-ésimo elemento o canal
	$S_n'$ :	señales de referencia del n-ésimo elemento o canal
	V:	tensión
	I:	intensidad

10

REIVINDICACIONES

1. Un método para medir una tensión ( $V$ ,  $V_n$ ), en concreto una tensión ( $V$ ) total y/o una tensión ( $V_n$ ) parcial, entre un primer terminal (1a) y un segundo terminal (1b), en donde el primer terminal (1a) está separado espacialmente del segundo terminal (1b) y en donde la tensión ( $V$ ,  $V_n$ ) crea un campo eléctrico entre los terminales (1a, 1b),  
 5 comprendiendo el método los pasos de disponer al menos un primer elemento (2, 2a) de transmisión de luz electro-óptico en el campo eléctrico entre al primer terminal (1a) y el segundo terminal (1b),  
 pasar la luz a través del primer elemento (2, 2a) de transmisión de luz electro-óptico,  
 medir al menos una primera señal ( $S_n$ ) a partir del primer elemento (2, 2a) de transmisión de luz electro-óptico y medir además una segunda señal ( $S_n'$ ) a partir de un segundo elemento (2, 2a, 2b, 2c) de transmisión de luz electro-  
 10 óptico, en donde ambas señales ( $S_n$ ,  $S_n'$ ) son funciones periódicas de la tensión ( $V$ ) y tienen un cambio de fase relativo distinto de cero,  
 obtener la tensión ( $V$ ,  $V_n$ ) y resolver la ambigüedad en la obtención de la tensión ( $V$ ,  $V_n$ ) a partir de la primera señal ( $S_n$ ) y de la segunda señal ( $S_n'$ ), caracterizado por los pasos de:  
 15 (i) usar la primera señal ( $S_n$ ) como una señal ( $S_n$ ) de base indicativa del campo eléctrico sobre el primer elemento (2, 2a) de transmisión de luz electro-óptico,  
 (ii) usar la segunda señal ( $S_n'$ ) como señal de referencia ( $S_n'$ ) para resolver la ambigüedad en la obtención de la tensión ( $V$ ,  $V_n$ ),  
 (iii) determinar a partir de la primera señal ( $S_n$ ) al menos dos hipótesis ( $h^+$ ,  $h^-$ ) correspondientes a los diferentes valores ( $V_n^{h^+}$ ,  $V_n^{h^-}$ ) de la tensión ( $V$ ,  $V_n$ ),  
 20 (iv) obtener el valor ( $S_n^{h^+}$ ,  $S_n^{h^-}$ ) esperado de la segunda señal ( $S_n'$ ) para cada una de las hipótesis ( $h^+$ ,  $h^-$ ),  
 (v) comparar los valores ( $S_n^{h^+}$ ,  $S_n^{h^-}$ ) esperados con un valor medido de la segunda señal ( $S_2$ ), y  
 (vi) tomar una decisión binaria entre las hipótesis ( $h^+$ ,  $h^-$ ) validando la hipótesis ( $h^+$ ,  $h^-$ ) para la cual el valor ( $S_n^{h^+}$ ,  $S_n^{h^-}$ ) esperado está más cerca al valor medido de la segunda señal ( $S_n'$ ),  
 en donde la forma de onda de la tensión ( $V$ ) aplicada entre el primer terminal (1a) y el segundo terminal (1b) se reconstruye usando una pluralidad de elementos (2a, 2b) de transmisión de luz electro-ópticos sin requerir una señal en cuadratura para cada uno de los elementos (2a, 2b) de transmisión de luz electro-ópticos,  
 25 en donde los elementos (2a, 2b) de transmisión de luz electro-ópticos se disponen en serie en una dirección axial entre los terminales (1a, 1b), y  
 en donde además sólo se mide una señal ( $S_n$ ) por elemento (2, 2a, 2b) de transmisión de luz electro-óptico.  
 30 2. El método de la reivindicación 1, en donde se determinan exactamente dos hipótesis ( $h^+$ ,  $h^-$ ) y exactamente se usa una señal de referencia ( $S_n'$ ) por señal ( $S_n$ ) de base, y/o en donde la cercanía de los valores ( $S_n^{h^+}$ ,  $S_n^{h^-}$ ) esperados al valor ( $S_n'$ ) medido se determina usando la distancia Euclídea.  
 3. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la primera señal ( $S_n$ ) y la segunda señal ( $S_n'$ ) tienen la misma periodicidad de la tensión ( $V$ ).  
 35 4. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el cambio de fase relativo entre la primera señal ( $S_n$ ) y la segunda señal ( $S_n'$ ) es introducido por un elemento (3) de cambio de fase que se dispone en un camino óptico en el segundo elemento (2b) de transmisión de luz electro-óptico en concreto en donde el elemento (3) de cambio de fase es un retardador de  $\lambda/4$ .  
 40 5. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el cambio de fase relativo entre la primera señal ( $S_n$ ) y la segunda señal ( $S_n'$ ) es diferente de  $90^\circ$ .  
 6. El método de la reivindicación 5, en donde el cambio de fase relativo entre la primera señal ( $S_n$ ) y la segunda señal ( $S_n'$ ) es una función de la temperatura del elemento (3) de cambio de fase, y la temperatura del elemento (3) de cambio de fase se obtiene a partir de la señal ( $S_n'$ ).  
 7. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en concreto  
 45 en donde la tensión está en el intervalo de alta tensión y/o la tensión es una tensión de AC, en donde la primera señal ( $S_n$ ) y la segunda señal ( $S_n'$ ) están basadas en un cambio dependiente del campo eléctrico de una propiedad física de la luz, que se pasa a través de los elementos (2a, 2b) de transmisión de luz electro-ópticos, cuyo cambio está inducido por los elementos (2a, 2b) de transmisión de luz electro-ópticos.

8. El método de las reivindicaciones 6 y 7, en donde el cambio dependiente del campo eléctrico es una función de la temperatura del elemento (2, 2a, 2b) de transmisión de luz electro-óptico y la temperatura obtenida del elemento (3) de cambio de fase se usa en la obtención de la tensión (V).
- 5 9. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde en un primer intervalo [t1; t2] de tiempo entre un primer tiempo t1 y un segundo tiempo t2>t1 el intervalo de tensiones (V) sobre los terminales (1a, 1b) es suficientemente grande para que las señales (S<sub>n</sub>) alcancen sus valores máximos y mínimos como funciones de las tensiones (V) y
- 10 en donde en un segundo intervalo [t3; t4] de tiempo entre un tercer tiempo t3>t2 y un cuarto tiempo t4>t3 el intervalo de tensiones (V) no es suficientemente grande para que las señales (S<sub>n</sub>) alcancen sus valores máximos y mínimos como funciones de las tensiones (V) y
- en donde al menos se usa o usan una escala y/o una compensación de las señales (S<sub>n</sub>) que se obtuvo u obtuvieron en el primer intervalo [t1; t2] de tiempo en la obtención de la tensión (V) en el segundo intervalo [t3; t4].
- 15 10. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde elemento (2, 2a, 2b) de transmisión de luz electro-óptico comprende un sensor (21) óptico que introduce un cambio de fase dependiente del campo entre una primera polarización o modo y una segunda polarización o modo de la luz que pasa a través del elemento (2, 2a, 2b) de transmisión de luz electro-óptico, y en concreto en donde el sensor (21) óptico comprende
- un dispositivo electro-óptico con birrefringencia dependiente de campo, en concreto un cristal, en concreto de la línea de cristales de Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub> (BGO) o Bi<sub>4</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>12</sub> (BSO),
- o una guía de onda piezo-eléctrica que muestra un efecto Pockels,
- 20 o un dispositivo piezo-eléctrico, en concreto de cuarzo cristalino o una cerámica piezo-eléctrica, y una guía de onda que soporta al menos dos modos, en donde la guía de onda se conecta al dispositivo piezo-eléctrico de manera tal que la longitud de la guía de onda es dependiente del campo.
- 25 11. El método de la reivindicación 4, en donde el elemento (3) de cambio de fase es un retardador de λ/4, y durante la obtención se elimina la ambigüedad de manera adicional a usar una señal en cuadratura mediante el uso de luz de dos longitudes de onda diferentes.
12. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde las señales (S<sub>n</sub>, S<sub>n</sub>'), en concreto la señal (S<sub>n</sub>) de base y/o la señal (S<sub>n</sub>') de referencia, está o están normalizadas a un intervalo de valor simétrico alrededor del cero, en concreto es o están escaladas y compensadas a un intervalo de valor [+1, -1].
- 30 13. El método de la reivindicación 12, en donde un recuento k acumulativo bidireccional del número de cruces por cero está determinado por la señal (S<sub>n</sub>) de base y se usa en la obtención de la tensión (V, V<sub>n</sub>).
14. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la obtención de la tensión (V, V<sub>n</sub>) comprende la reconstrucción de una forma de onda (V, V<sub>n</sub>) mejorada de la tensión (V, V<sub>n</sub>) con los pasos de:
- determinar los primeros valores de tensión (V<sub>1</sub>, V<sub>1n</sub>) de la tensión (V, V<sub>n</sub>) a partir de la señal (S<sub>n</sub>) de base, en concreto mediante el cálculo del arcocoseno,
- 35 determinar los segundos valores de tensión (V<sub>2</sub>, V<sub>2n</sub>) de la tensión (V, V<sub>n</sub>) a partir de la señal (S<sub>n</sub>') de referencia, en concreto mediante el cálculo del arcocoseno, y
- determinar la forma de onda (V) de la tensión mejorada a partir de los primeros valores (V<sub>1</sub>) de tensión y de los segundos valores (V<sub>2</sub>) de tensión, comprendiendo el método además los pasos de:
- 40 para cada n-ésimo elemento (2, 2a) de transmisión de luz electro-óptico normalizar la señal (S<sub>n</sub>) de base y la señal (S<sub>n</sub>') de referencia a la misma amplitud máxima y mínima, en concreto a un intervalo [+1, -1] de valor,
- seleccionar un parámetro β<sub>n</sub> de ponderación con 0=< β<sub>n</sub><=1, y
- determinar la forma de onda (V, V<sub>n</sub>) de tensión mejorada mediante el cálculo de una suma ponderada  $V = \sum V_n = \sum \{\beta_n * V_{1n} + (1 - \beta_n) * V_{2n}\}$ , con V<sub>1n</sub>, V<sub>2n</sub>= primer y segundo valor n-ésimo de tensión del elemento (2) de transmisión de luz electro-óptico, en donde el índice n es un entero que empieza a partir de n=1, 2, 3,.
- 45 15. El método de la reivindicación 14, que comprende los pasos de:
- seleccionar el parámetro β<sub>n</sub> de ponderación de manera tal que se le dé un mayor peso a la más lineal de entre la señal (S<sub>n</sub>) de base y la señal (S<sub>n</sub>') de referencia como una función de la tensión (V, V<sub>n</sub>), en concreto que la señal que sea menor en amplitud y por tanto más cercana a la región lineal de la función coseno se use para reconstruir la tensión y el parámetro β<sub>n</sub> se elige para ser bien 0 o 1, dependiendo de qué señal tiene la menor magnitud.
- 50 16. El método de cualquiera de las reivindicaciones 14-15, que comprende los pasos de:

seleccionar el parámetro  $\beta_n$  de ponderación como una función continua de la tensión ( $V$ ,  $V_n$ ), en concreto según  $\beta_n = \cos^2(S_n \cdot \pi/2) / (\cos^2(S_n \cdot \pi/2) + \sin^2(S_n \cdot \pi/2))$ .

17. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1-13, en donde el primer elemento (2a) de transmisión de luz electro-óptico se hace funcionar sin un retardador.

5 18. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde las hipótesis ( $h^+$ ,  $h^-$ ) corresponden a diferentes valores ( $V_1^{h^+}$ ,  $V_1^{h^-}$ ) de la tensión ( $V_n$ ) parcial aplicada al primer elemento (2a) de transmisión de luz electro-óptico.

19. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores,

10 midiendo la primera señal ( $S_n$ ) para cada n-ésimo elemento (2, 2a, 2b) de transmisión de luz electro-óptico y usándola como la n-ésima señal ( $S_n$ ) de base indicativa del campo eléctrico sobre el n-ésimo elemento (2a) de transmisión de luz electro-óptico,

determinando la segunda señal ( $S_n'$ ) para cada n-ésimo elemento (2, 2a, 2b) de transmisión de luz electro-óptico y usándola como la n-ésima señal ( $S_n'$ ) de referencia para resolver la ambigüedad en la obtención de la n-ésima tensión ( $V_n$ ) parcial sobre el n-ésimo elemento (2, 2a, 2b) de transmisión de luz electro-óptico.

15 en donde la n-ésima señal ( $S_n$ ) de base y la n-ésima señal ( $S_n'$ ) de referencia se generan a partir de diferentes elementos (2a, 2b) de transmisión de luz electro-ópticos, y el índice n designa la numeración de los elementos (2, 2a, 2b) de transmisión de luz electro-ópticos y es un entero que comienza a partir de  $n=1, 2, 3, \dots$ , y

realizando para cada elemento (2, 2a, 2b) de transmisión de luz electro-óptico los pasos (iii), (iv), (v) y (vi) del método para desambiguar la tensión ( $V_n$ ) parcial sobre el elemento (2, 2a, 2b) de transmisión de luz electro-óptico, y

20 determinando la tensión ( $V$ ) total entre el primer (1a) y el segundo (1b) terminal a partir de las tensiones ( $V_n$ ) parciales.

20. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde los elementos (2a, 2b) de transmisión de luz electro-ópticos se leen ópticamente en paralelo.

21. El método de la reivindicación 19, que comprende:

25 aplicar a cada elemento (2a, 2b) de transmisión de luz electro-óptico una tensión ( $V_n$ ) parcial,

determinar a partir de la primera y la segunda señales ( $S_n$ ,  $S_n'$ ) la tensión ( $V_n$ ) parcial para cada elemento (2a, 2b) de transmisión de luz electro-óptico, y

determinar la tensión ( $V$ ) total entre el primer terminal (1a) y el segundo terminal (1b) mediante el cálculo de la suma ( $V = \sum V_n$ ) de todas las tensiones ( $V_n$ ) parciales.

30 22. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además los pasos de:

definir al menos un parámetro  $\alpha_n = V_n/V$  interno, en donde  $V_n$  = tensión parcial aplicada al n-ésimo elemento (2a, 2b) de transmisión de luz electro-óptico y  $V$  = tensión total entre el primer terminal (1a) y el segundo terminal (1b),

determinar una estimación de  $\alpha_n$  para todos los elementos (2a, 2b) de transmisión de luz electro-ópticos, y

usar la  $\alpha_n$  para resolver la ambigüedad en la obtención de la tensión ( $V$ ,  $V_n$ ) a partir de la primera señal ( $S_n$ ).

35 23. El método de la reivindicación 22 cuando no depende de la reivindicación 7, que comprende además los pasos de:

estar la tensión en el intervalo de alta tensión y/o ser la tensión una tensión de AC,

con la primera señal ( $S_n$ ) y la segunda señal ( $S_n'$ ) estando basadas en el cambio dependiente del campo eléctrico de una propiedad física de la luz, que se pasa a través de los elementos (2a, 2b) de transmisión de luz electro-ópticos, cambio el cual es inducido por los elementos (2a, 2b) de transmisión de luz electro-ópticos,

40 medir las señales  $S_n$  eléctricas como una función de las intensidades de la luz que sale del elemento (2a, 2b) de transmisión de luz electro-óptico,

determinar todas las tensiones  $V_n$  parciales según a

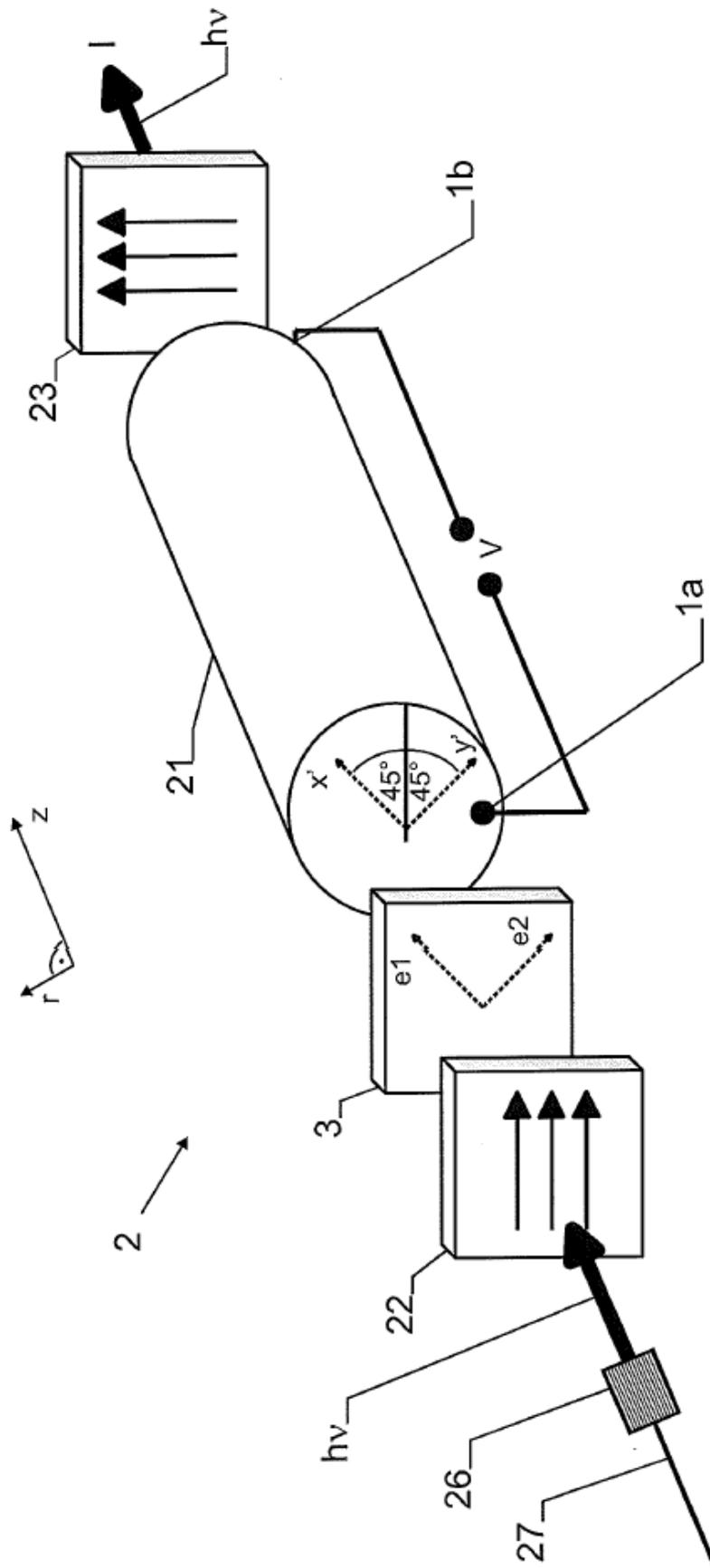
$$V_n = \frac{V_{h,n}}{\pi} \left( \left( \pm \arccos \left( \frac{2(S_n - b_n)}{G_n \cdot I_{n,0}} - 1 \right) + K \cdot 2\pi \right) - 2\pi\Delta_n \right)$$

- 5 con  $V_{h,n}$  = tensión de media onda de un cristal (21) en el n-ésimo elemento (2a, 2b) de transmisión de luz electro-  
 óptico,  $b_n$  = compensación de señal,  $G_n$  = ganancia acumulada de todos los componentes en una cadena de  
 medición desde un fotodiodo a un amplificador,  $I_{n,0}$  = intensidad de la luz que sale con cero retardo,  $K$  = recuento de  
 los periodos de la respuesta cosinusoidal, y  $\Delta_n$  = fase relativa de la señal con respecto a la tensión ( $V$ ,  $V_n$ ) para  
 cualquier canal  $n$ , y
- usar la  $\alpha_n$ , en concreto una estimación de la  $\alpha_n$  para desambiguar el signo del arcocoseno.
24. El método de cualquiera de las reivindicaciones 22-23, en donde el paso de tomar la decisión binaria para  
 desambiguar la primera señal ( $S_n$ ) del primer elemento (2a) electro-óptico con una tensión ( $V_1$ ) parcial aplicada  
 comprende usar la  $\alpha_n$  para calcular a partir de al menos dos hipótesis ( $V_1^{h+}$ ,  $V_1^{h-}$ ) las correspondientes hipótesis  
 10 ( $V_2^{h+}$ ,  $V_2^{h-}$ ) de tensión para el segundo elemento (2b) electro-óptico con la tensión ( $V_2$ ) parcial aplicada, y seleccionar  
 el valor ( $S_2^{h+}$ ,  $S_2^{h-}$ ) esperado de la segunda señal ( $S_2$ ) que está más cercano al valor medido de la segunda señal  
 ( $S_2$ ).
25. El método de cualquiera de las reivindicaciones 22-24, en donde las  $\alpha_n$  fuertemente erróneas son detectadas a  
 partir de una selección de hipótesis incorrecta, en concreto a partir de una discontinuidad en la tensión ( $V$ ) medida, y  
 15 que se determinen los valores más comunes de  $\alpha_n$  que se usan la mayoría de las veces para ser la  $\alpha_n$  correcta.
26. El método de cualquiera de las reivindicaciones 22-25 anteriores, que comprende además el paso de obtener de  
 manera recursiva al menos uno de los parámetros ( $\alpha_n$ ) internos mediante:
- la inicialización de un bucle de control auxiliar con la estimación de  $\alpha_n$  para todos los canales ópticos, en donde el  
 20 parámetro ( $\alpha_n$ ) interno es descriptivo de una distribución de la tensión ( $V$ ) sobre los elementos (2a, 2b) de  
 transmisión de luz electro-ópticos,
- la toma de una primera serie de mediciones, y
- en base a la  $V_n$  resultante calcular una  $\alpha_n$  más exacta usando la ecuación  $\alpha_n = V_n/V$  y los valores más comunes de  $\alpha_n$ .
27. El método de la reivindicación 26, que comprende además los pasos de:
- usar la  $\alpha_n$  más exacta como una nueva estimación de  $\alpha_n$ , y
- 25 converger la  $\alpha_n$ , y/o seguir la dependencia  $\alpha_n(t)$  con el tiempo de  $\alpha_n$ .
28. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, para que cada n-ésimo elemento (2a, 2b) de  
 transmisión de luz electro-óptico y su correspondiente señal ( $S_n$ ) de base y/o señal ( $S_n'$ ) de referencia realicen los  
 pasos de:
- reconstruir la forma de onda de la tensión ( $V$ ,  $V_n$ ) medida, en concreto la tensión ( $V$ ) total y/o la tensión ( $V_n$ ) parcial  
 30 entre el primer terminal(1a) y el segundo terminal (1b),
- calcular un intervalo de tiempo sobre un número de periodos de la forma de onda reconstruida,
- determinar a partir de la media de tiempo una tensión  $V_{DC}$  de compensación de DC aparente, y
- calcular una fase  $\Delta_n$  de la señal ( $S_n$ ) de base y/o la señal ( $S_n'$ ) de referencia con respecto a la tensión aplicada según  
 35 a  $\Delta_n = V_{DC} * \pi / V_{h,n}$ , con  $V_{h,n}$  = tensión de media onda del n-ésimo elemento (2a, 2b) de transmisión de luz electro-  
 óptico.
29. El método para medir la tensión ( $V$ ,  $V_n$ ) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por los  
 pasos de:
- (i) usar la primera señal ( $S_n$ ) como una señal ( $S_n$ ) de base indicativa del campo eléctrico sobre el primer elemento  
 (2a) de transmisión de luz electro-óptico,
- 40 (ii) usar la segunda señal ( $S_n'$ ) como una señal ( $S_n'$ ) de referencia para resolver la ambigüedad en la obtención de la  
 tensión ( $V$ ,  $V_n$ ),
- (iii) determinar a partir de la primera señal ( $S_n$ ) dos hipótesis ( $h^+$ ,  $h^-$ ) correspondientes a los valores ( $V_n^{h+}$ ,  $V_n^{h-}$ ) de la  
 tensión ( $V$ ,  $V_n$ ),
- (iv) determinar el cambio  $\Delta$  de fase relativo real entre la señal  $S_n$  de base y la señal  $S_n'$  de referencia,
- 45 (v) determinar a partir de la señal  $S_n$  de base, la señal  $S_n'$  de referencia y el cambio  $\Delta$  de fase relativo real una señal  
 $S_n'^{cuad}$  en cuadratura artificial que tiene un cambio de fase relativo ideal de  $90^\circ$  mediante el cálculo de la  $S_n'^{cuad}$   
 según la fórmula

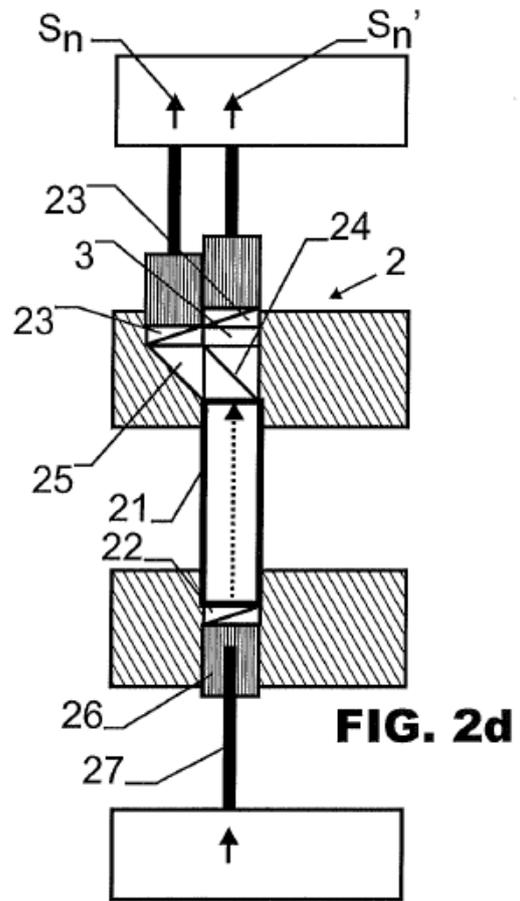
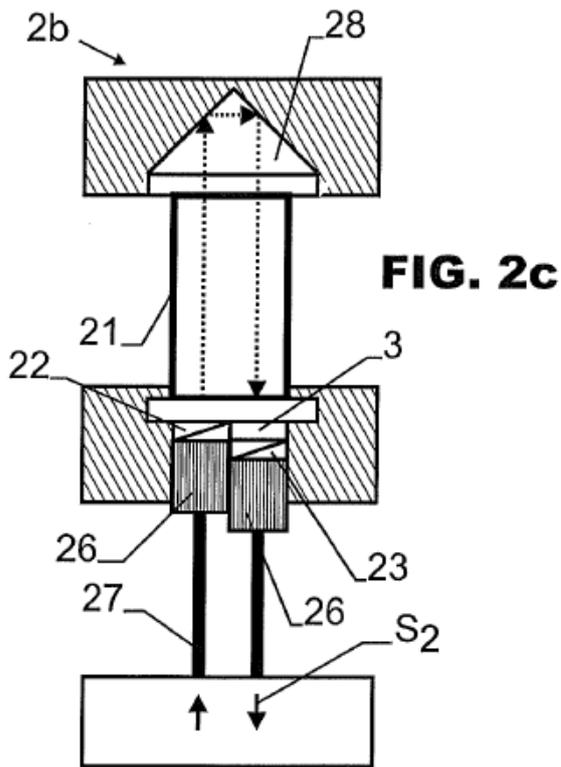
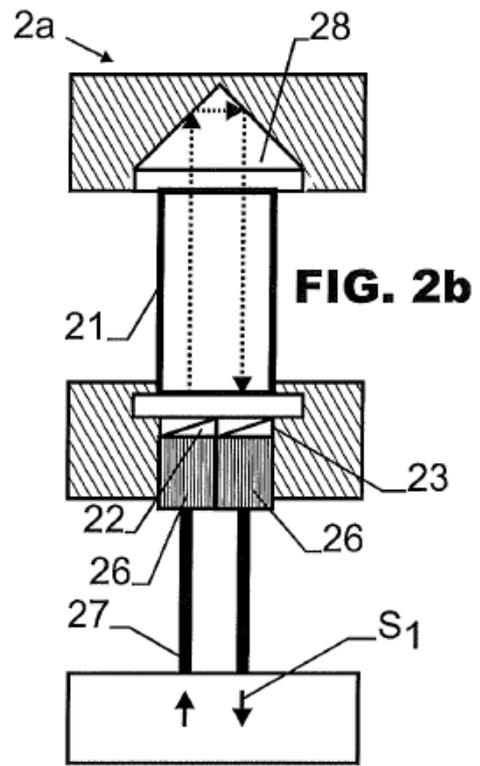
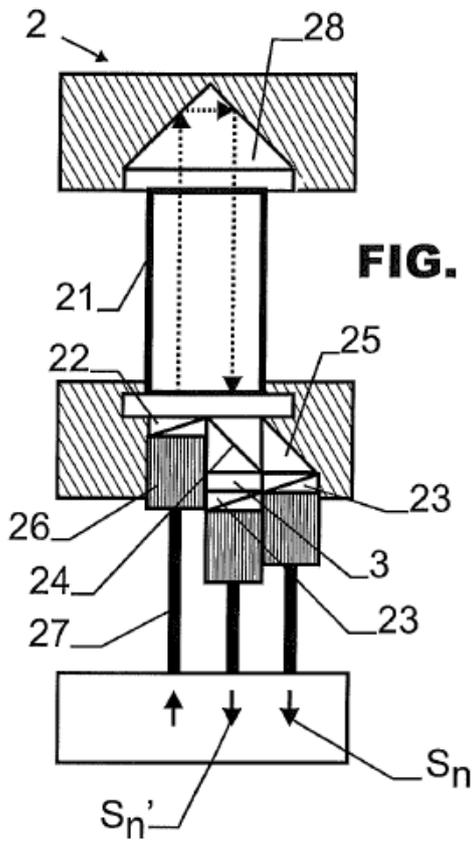
$$S_n'^{cuad} = \cos^{-1}(2 * \pi * A) * S_n' + \tan(2 * \pi * A) * S_n, \text{ y}$$

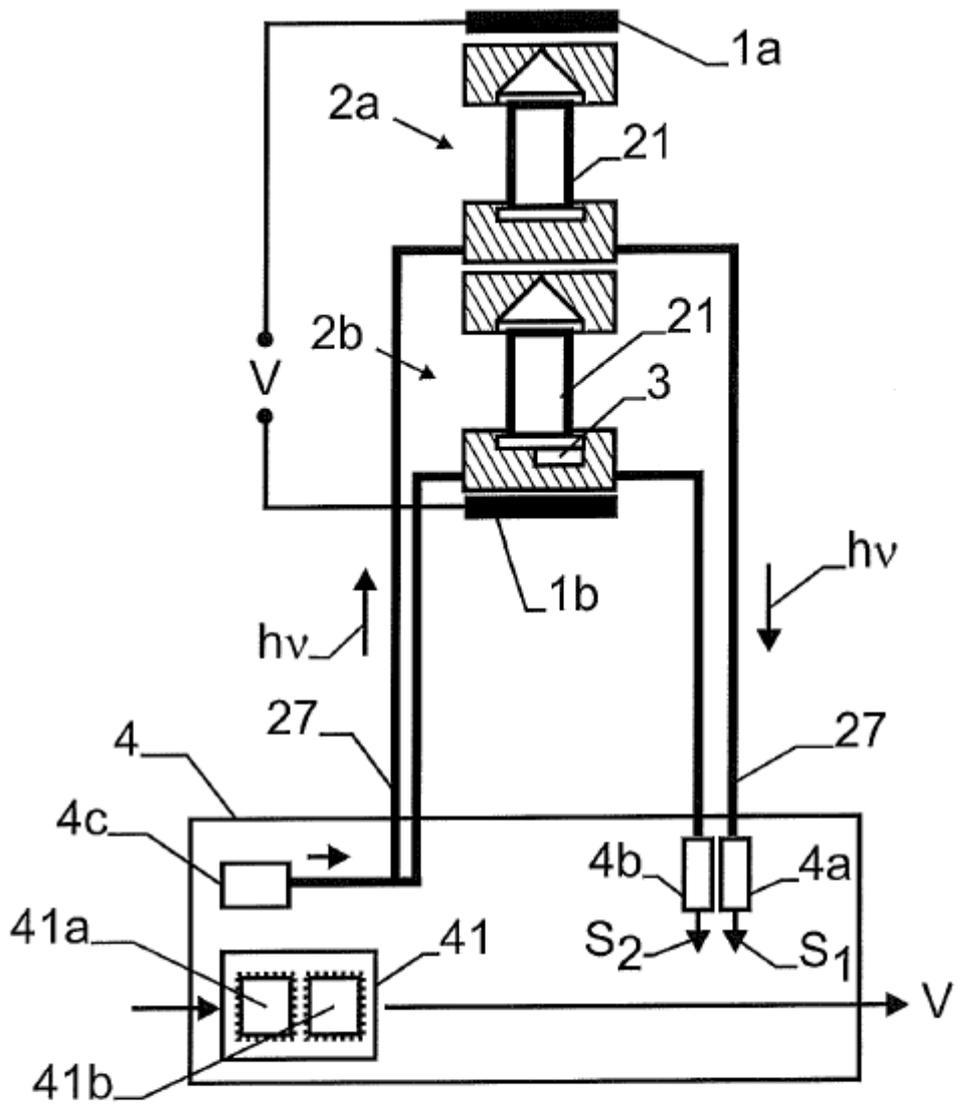
(vi) tomar una decisión binaria entre las hipótesis ( $h^+$ ,  $h^-$ ) en base al signo de la señal  $S_n^{\text{cuad}}$  en cuadratura artificial.

30. Un dispositivo para medir la tensión (V) que comprende los medios que lleven a cabo los pasos del método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores.

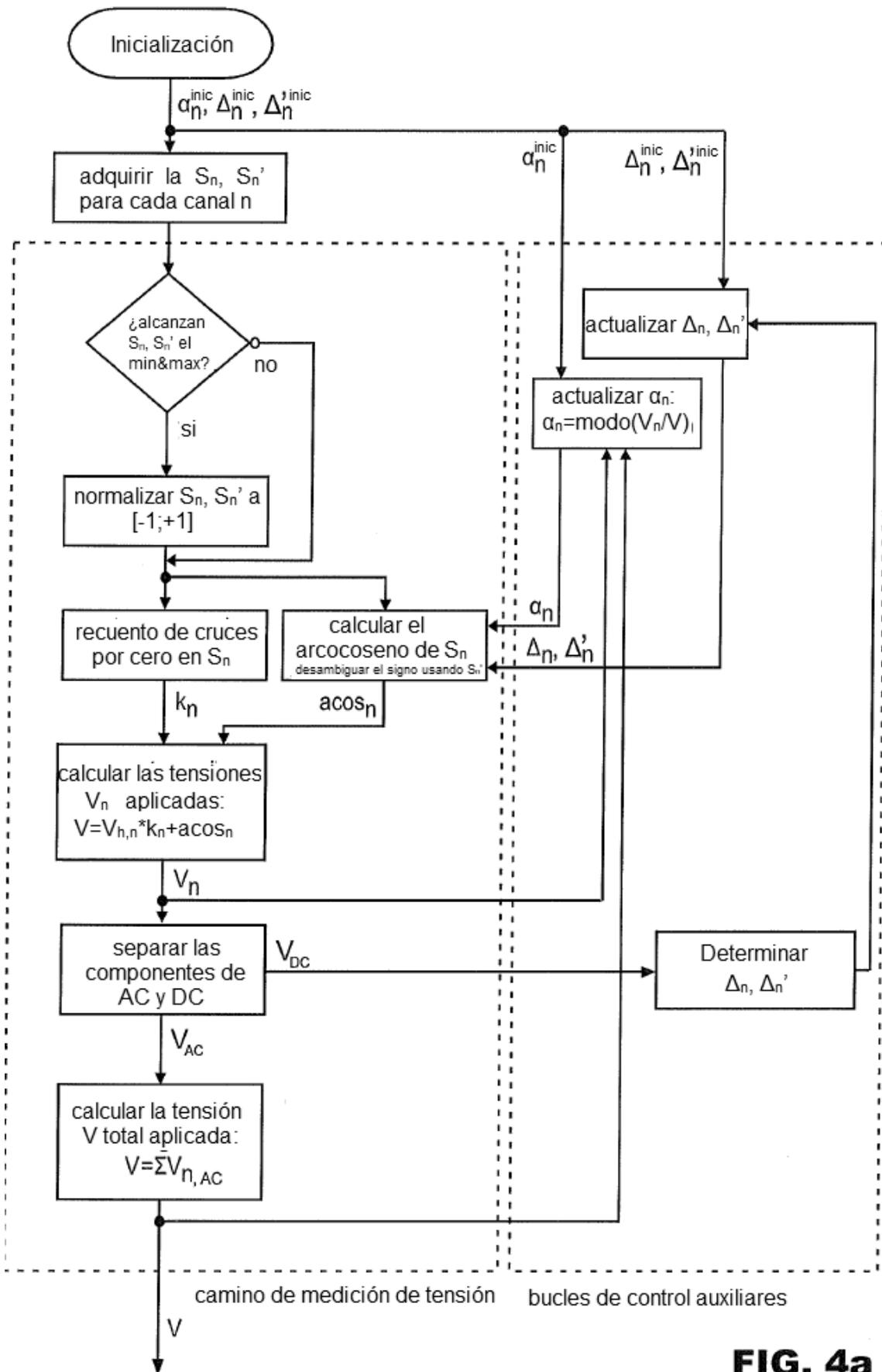


**FIG. 1**

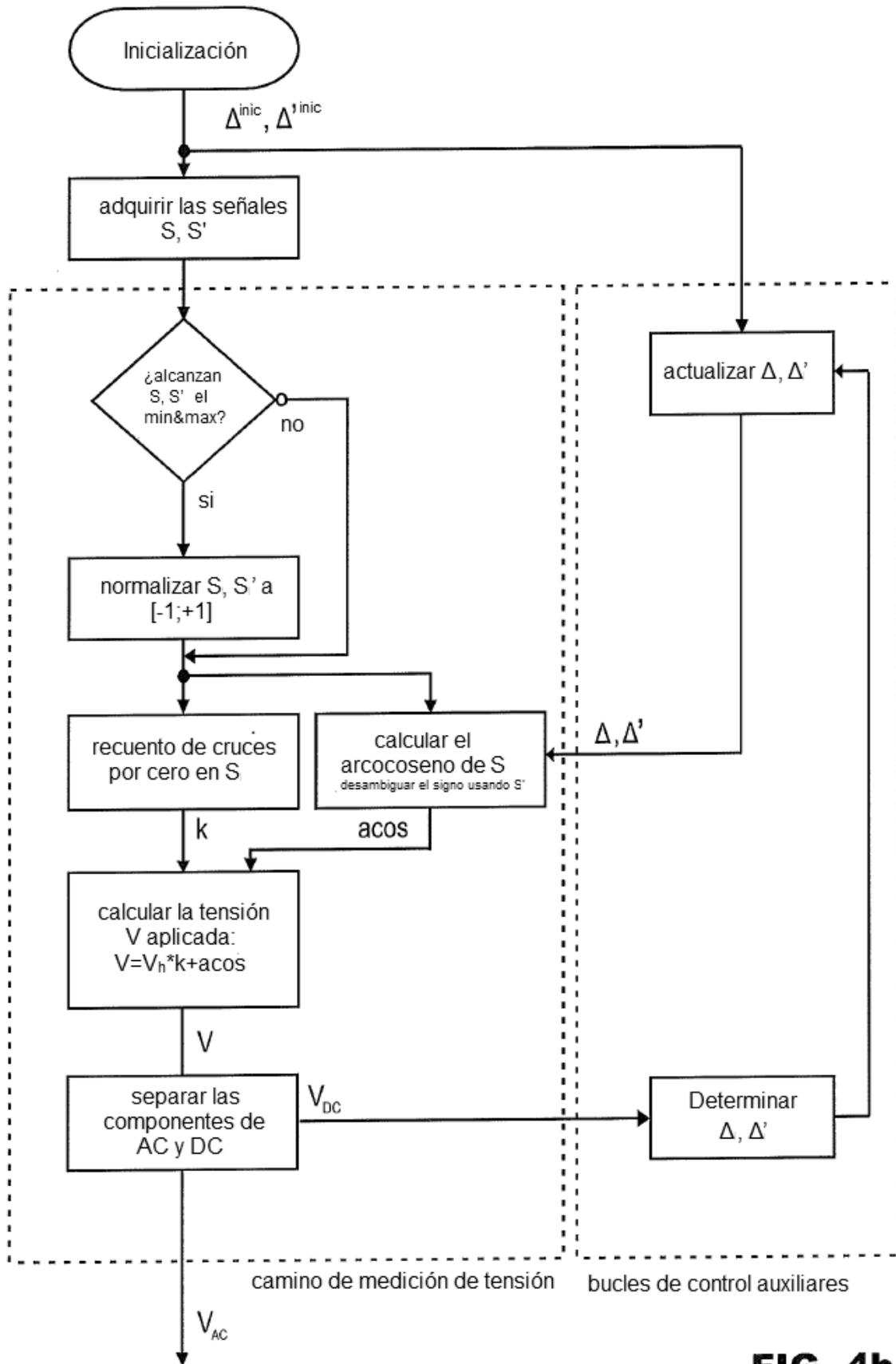




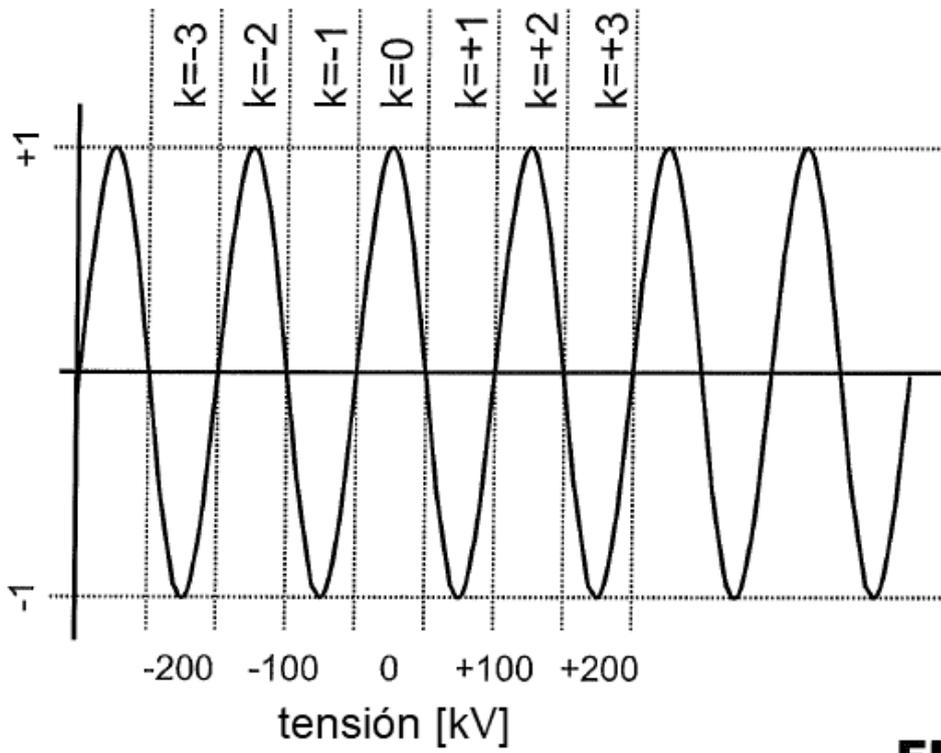
**FIG. 3**



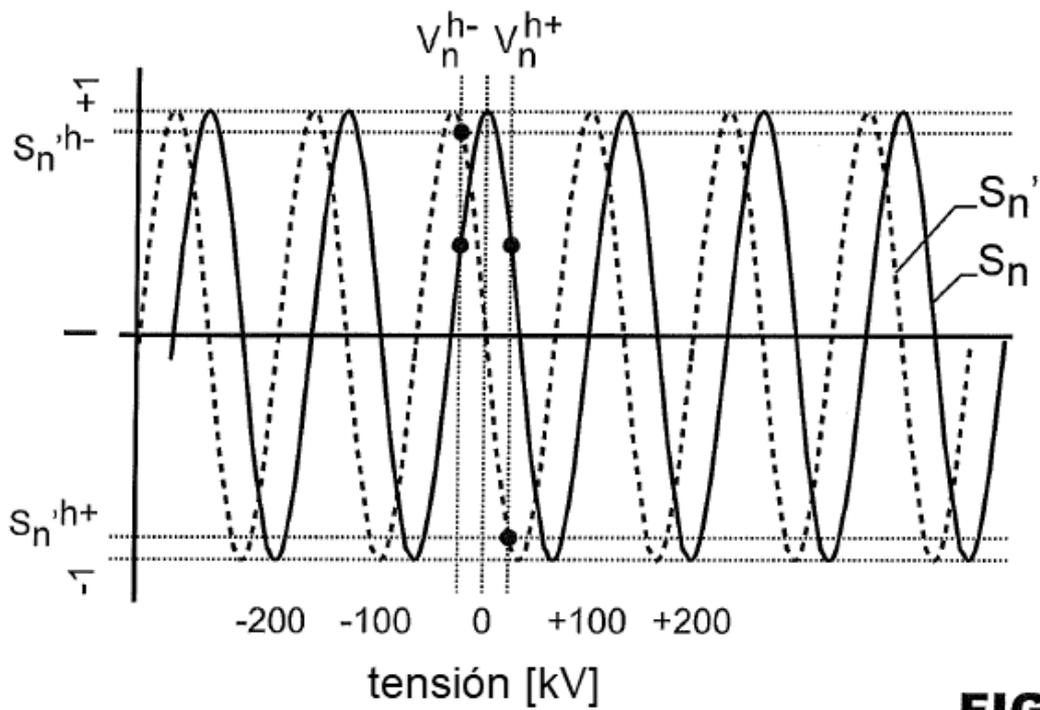
**FIG. 4a**



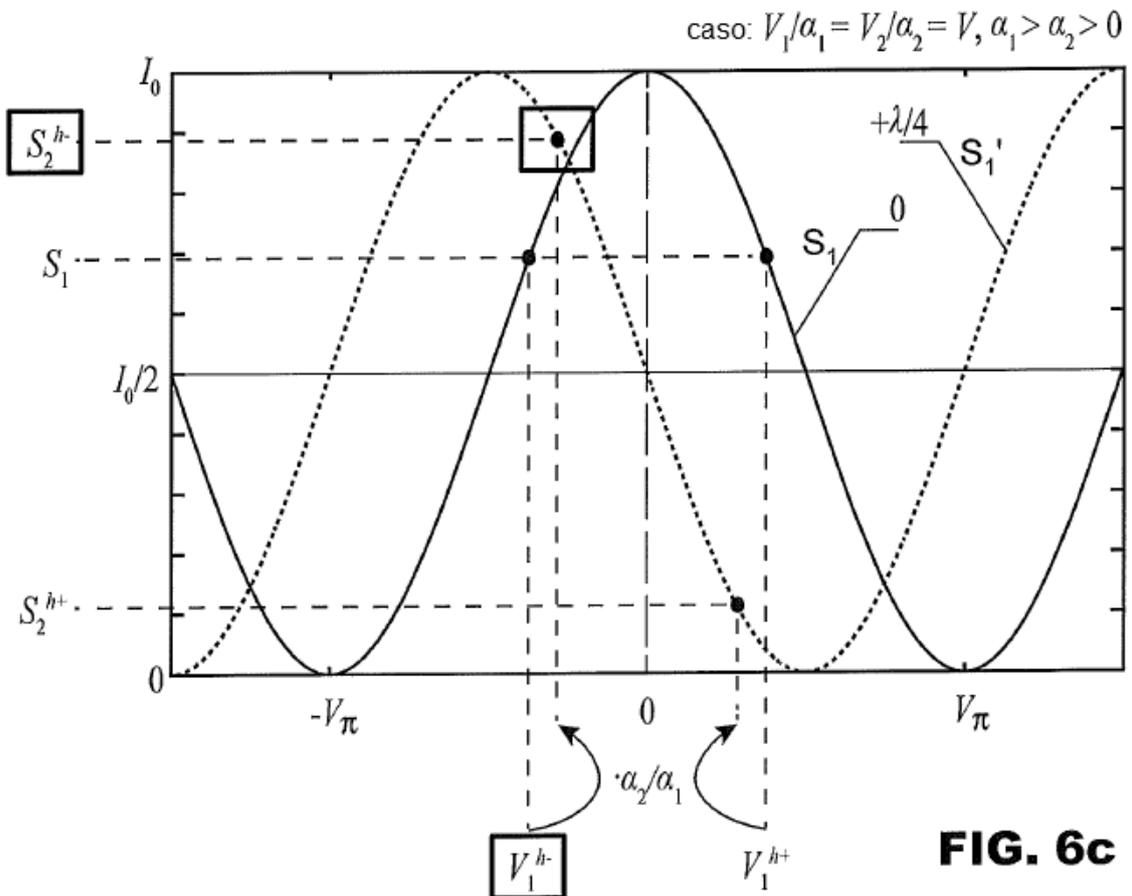
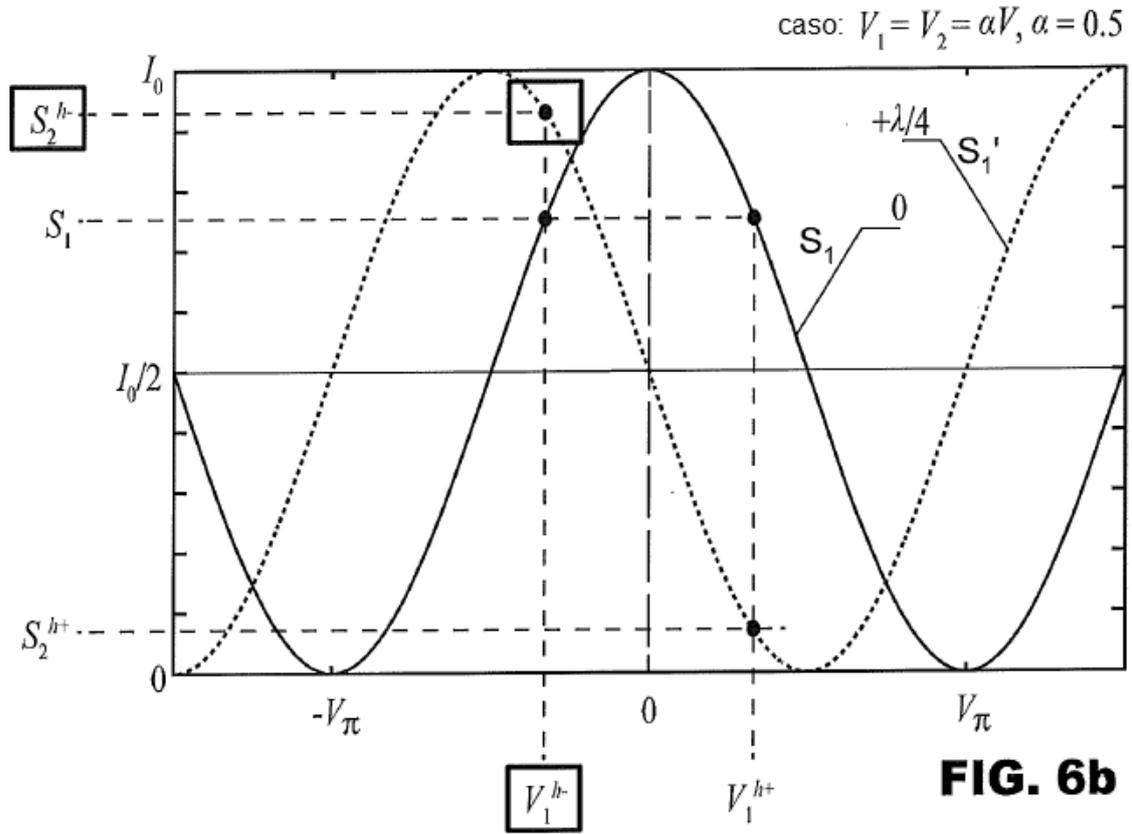
**FIG. 4b**

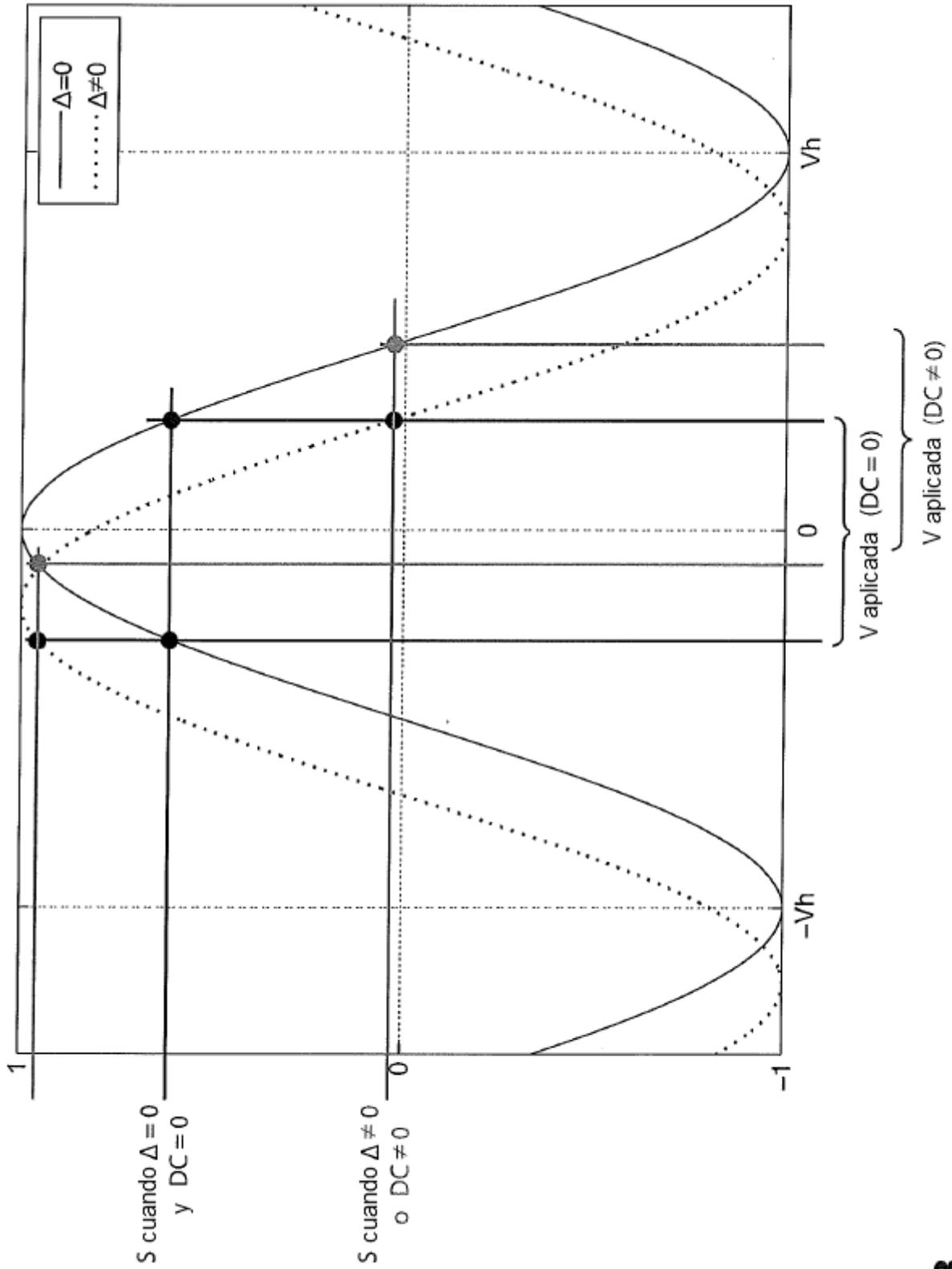


**FIG. 5**

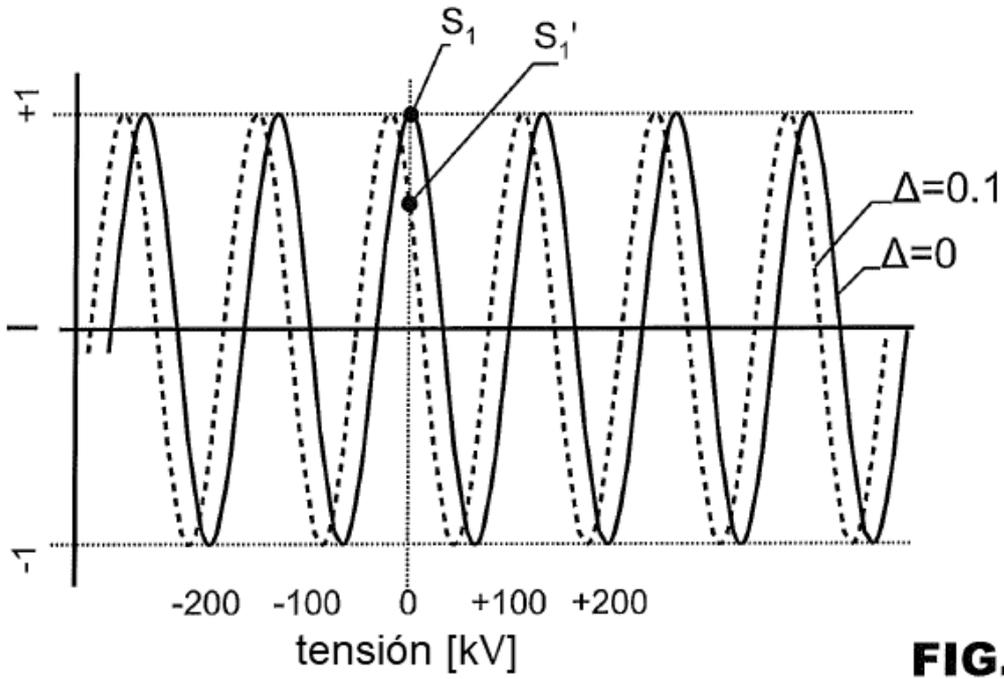


**FIG. 6a**

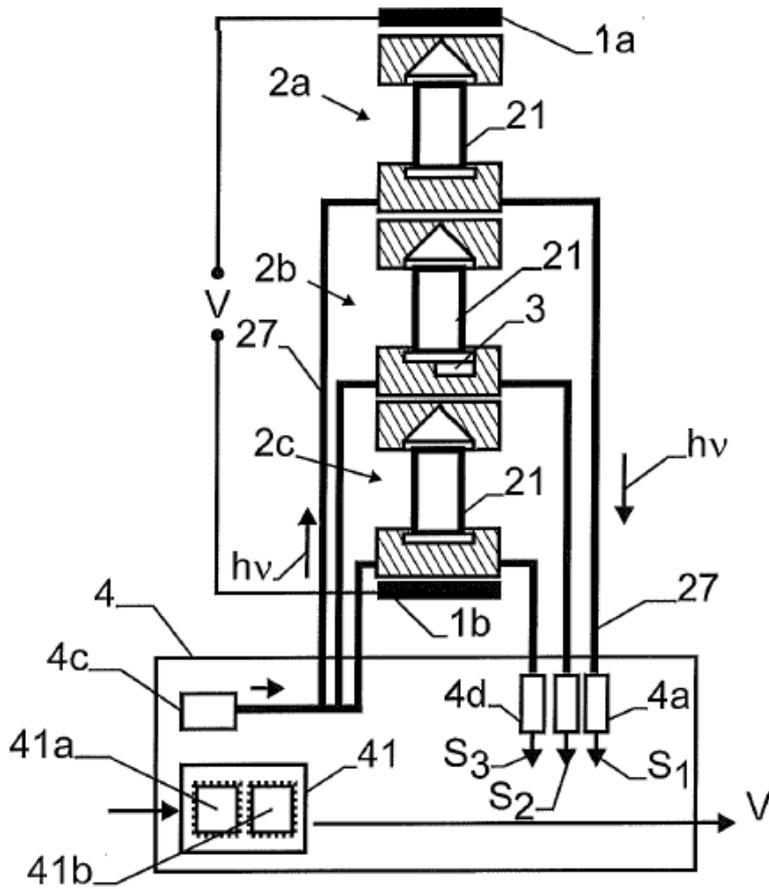




**FIG. 8**

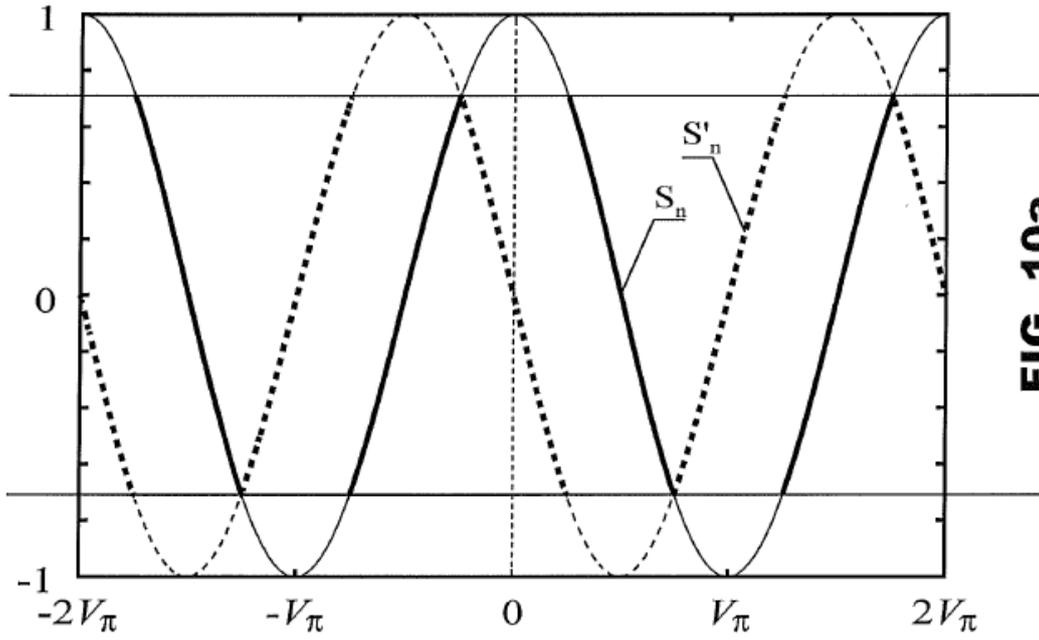


**FIG. 7**



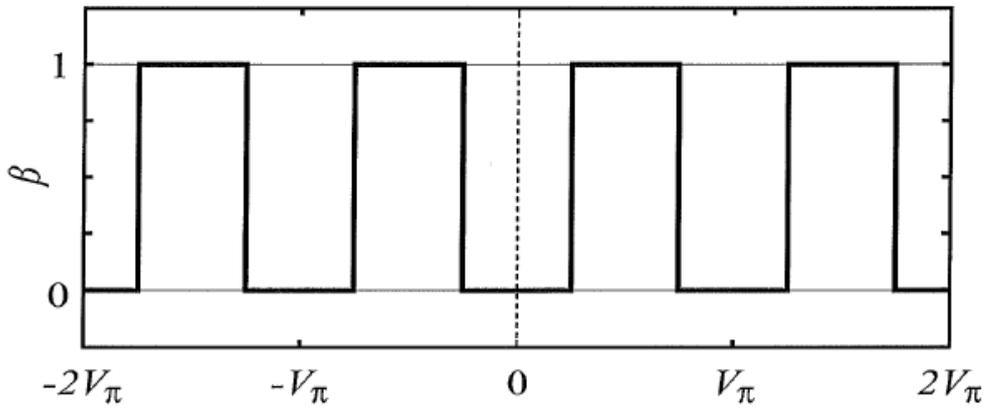
**FIG. 9**

Fig. 9



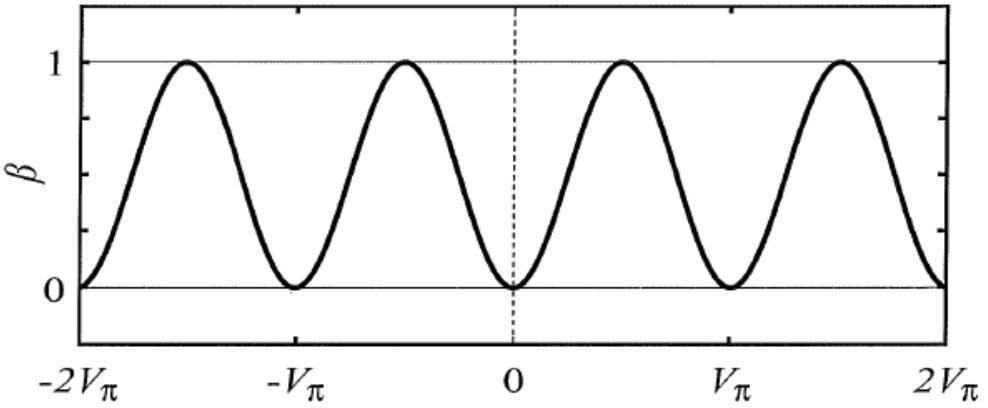
**FIG. 10a**

$$V_n = \beta_n \cdot V_{1n} + (1 - \beta_n) \cdot V_{2n}$$



**FIG. 10b**

$$V_n = \beta_n \cdot V_{1n} + (1 - \beta_n) \cdot V_{2n}$$



**FIG. 10c**