(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 627 314**

(51) Int. Cl.:

F03B 15/14 (2006.01)

F03B 3/02 (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.09.2014** **E 14290276 (6)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.04.2017** **EP 2995808**

(54) Título: **Procedimiento de determinación del punto de operación de una maquina hidráulica e instalación para la conversión de energía hidráulica**

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
27.07.2017

(73) Titular/es:

GE RENEWABLE TECHNOLOGIES (100.0%)
82 avenue Léon Blum
38100 Grenoble, FR

(72) Inventor/es:

ALLOIN, QUENTIN;
PERRISSIN-FABERT, NICOLAS y
GUILLAUME, RENAUD

(74) Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 627 314 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

Procedimiento de determinación del punto de operación de una maquina hidráulica e instalación para la conversión de energía hidráulica

La invención se refiere a un procedimiento para determinar el punto de operación de una máquina hidráulica que pertenece a una instalación para la conversión de la energía hidráulica en energía mecánica o eléctrica. La invención se refiere también a una instalación para la conversión de energía hidráulica en energía mecánica o eléctrica en la que se puede implementar el procedimiento.

En el campo de la conversión de energía hidráulica, es importante conocer el punto de operación de una máquina hidráulica. Para este fin, algunos valores físicos, como el caudal o la carga neta de la instalación, se necesitan. El problema es que estos valores físicos no se pueden medir adecuadamente.

De hecho, incluso si las mediciones de carga neta y de caudal son posibles en algunos casos, no son precisas y son difíciles de configurar.

El documento EP1 138 941 divulga un procedimiento para determinar la carga neta mediante la determinación del punto de operación actualmente medible de una máquina hidráulica, comparándolo con un valor de demanda y variando la carga neta alimentada en el regulador de la turbina hasta que los valores real y de demanda coincidan.

Por otra parte, no existe una medición de caudal directo en las grandes plantas de energía hidroeléctrica. Los procedimientos indirectos se utilizan para determinar los valores físicos necesarios. Uno de estos procedimientos es el procedimiento de Winter-Kennedy, que a menudo se utiliza para realizar la medición de la eficiencia en el sitio. Sin embargo, este procedimiento no se puede utilizar en condiciones de caída de agua baja. Además, el procedimiento de Winter-Kennedy se basa en sensores de presión conectados al paso hidráulico por medio de pequeñas tuberías derivadas. Estas tuberías pueden cerrarse por el polvo, moho o arena en condiciones de operación, lo que afecta la precisión de las mediciones.

La invención pretende resolver este inconveniente proponiendo un procedimiento para la determinación del punto de operación de una máquina hidráulica que es más fiable y que se puede implementar en condiciones de caída de agua baja.

Para este fin, la invención se refiere a un procedimiento como se define en la reivindicación 1.

Gracias a la invención, es posible determinar la carga neta y el caudal de la máquina hidráulica mediante la búsqueda de su punto de operación. El punto de operación es el resultado de un cálculo de algoritmo compilado por una unidad de control electrónico, lo que significa que la instalación no incluye ningún dispositivo de medición vinculado al flujo de agua. Por lo tanto, cálculos de la carga neta y del caudal son precisos para el agua "limpia", así como para el agua "sucia", que es el agua que contiene impurezas, tales como polvo o arena.

Otros aspectos del procedimiento que son ventajosos, pero no obligatorios se especifican en las reivindicaciones 2 a 7.

La invención se refiere también a una instalación para la conversión de la energía hidráulica en energía mecánica o eléctrica tal como se define en la reivindicación 8.

Otros aspectos de la instalación que son ventajosos, pero no obligatorios se especifican en las reivindicaciones 9 a 11.

La invención se explicará a continuación en correspondencia con las Figuras, y como un ejemplo ilustrativo, sin limitar el objeto de la invención. En las figuras:

- la Figura 1 es una sección esquemática de una instalación para la conversión de la energía hidráulica en energía eléctrica o energía mecánica de acuerdo con la invención, y
- la Figura 2 es un gráfico que ilustra dos series de puntos de operación potenciales de una máquina hidráulica que pertenece a la instalación de la Figura 1.

La Figura 1 representa una instalación 2 para la conversión de la energía hidráulica en energía mecánica o eléctrica. La instalación 2 incluye una máquina hidráulica. En el ejemplo, esta máquina hidráulica es una turbina 20 Francis que utiliza energía hidráulica para establecer un eje 201 en giro alrededor de un eje Z201. En el ejemplo considerado, el eje 201 se fija a un rotor no representado de un alternador para producir electricidad.

La turbina 20 incluye una voluta 200 que se soporta por bloques 22 y 24 de hormigón. Una tubería de carga no representada se extiende entre un depósito corriente arriba no representado y la voluta 200. Esta tubería de carga genera un flujo F de agua forzado para alimentar la turbina 20. La turbina 20 incluye un conducto 202 que está rodeado por la voluta 200 y que incluye álabes 208 entre los que se hace fluir el agua en condiciones de operación. Como resultado, el conducto 202 gira alrededor de un eje Z202 que se superpone con el eje Z201 de giro.

Un distribuidor se dispone alrededor del conducto 202. Incluye una pluralidad de álabes 206 de guía móviles que se distribuyen uniformemente alrededor del conducto 202. Un distribuidor previo se dispone corriente arriba de y alrededor del distribuidor. El distribuidor previo se forma por una pluralidad de álabes 204 fijos distribuidos uniformemente alrededor del eje Z202 de giro del conducto 202.

Una tubería 26 de aspiración se dispone debajo del conducto 202 y se adapta para evacuar el agua corriente abajo.

Los álabes 206 de guía del distribuidor tienen cada uno un paso ajustable alrededor de un eje Z206 paralelo al eje Z202 de giro del conducto 202. En consecuencia, se pueden girar alrededor del eje Z206 para regular el caudal de agua. Los álabes 206 de guía se orientan todos con el mismo ángulo con respecto a una posición cerrada. En otras palabras, los mismos están sincronizados. La apertura de los álabes de guía, que es el grado de apertura de los álabes de guía con relación a su posición cerrada, se conoce ya que es un parámetro que se controla.

El diagrama de colina de una turbina es una colección de puntos de operación que son cada uno definido por un cuádruple de los valores N11, T11, Q11, Y en los que Y es la apertura de los álabes 206 de guía. En una Y dada Y= Y_real, una curva de "iso-apertura" se puede extraer del diagrama de colina. Para facilitar la comprensión, los tripletes de los valores N'11, T'11, Q'11 se refieren a toda la colección de puntos de operación de una curva de iso-apertura. Los tripletes de los valores N'11, T'11, Q'11 forman una primera serie de posibles puntos de operación.

La Figura 2 muestra una curva C1 de iso-apertura ejemplar. En esta Figura, los puntos de operación se colocan solamente en función de sus ejes de coordenadas a lo largo de N11 y sobre sus coordenadas a lo largo del eje T11. La curva de iso-apertura se representa en línea de puntos. Se sabe que, en la apertura de los álabes de guía considerada, el punto de operación de la turbina 20 está en algún lugar en la curva C1 de iso-apertura. La serie de posibles puntos N'11, T'11, Q'11 de operación se actualiza si, por cualquier razón, la apertura de los álabes de guía cambia.

A continuación, se explica un procedimiento para determinar el punto de operación de la turbina 20. El punto de operación de la turbina 20 es un punto que tiene por coordenadas N11_real, T11_real, Q11_real.

En la Figura 2, el cuadrante superior derecho se corresponde con el modo de turbina, en el que se necesita determinar el punto de operación de la máquina. El modo de turbina corresponde al cuadrante en el que N11 y T11 son ambos positivos.

Por definición, T11, N11 y P11 son parámetros característicos de la máquina hidráulica 20. Lo mismos vienen dados por las siguientes ecuaciones:

$$T11 = \frac{T}{D^3 * H}$$

(Ecuación 1)

$$N11 = \frac{N * D}{\sqrt{H}}$$

(Ecuación 2)

$$Q11 = \frac{Q * D^2}{\sqrt{H}}$$

(Ecuación 3)

en las que T es el par ejercido por el flujo F de agua en el conducto 202, N es la velocidad de giro de la turbina 20, D es el diámetro del conducto 202, H es la carga neta de la instalación 2 y Q es el caudal de la instalación 2.

Basándose en las ecuaciones anteriores, T11 puede expresarse en función de N11, como se presenta en la siguiente ecuación:

$$T11 = \frac{T}{D^5 * N^2} N11^2$$

(Ecuación 4)

La velocidad N de giro de la turbina 20 se puede determinar mediante la medición de la frecuencia del alternador

acoplado al eje 201. El par T de torsión ejercido por el flujo F de agua en la máquina 20 se puede calcular tomando como base la ecuación de momento dinámico aplicada al eje 201 de la máquina 20. Esta ecuación se detalla a continuación:

$$\frac{\pi}{30} * J * \frac{dN}{dt} = M + T$$

(Ecuación 5)

en la que J es el momento de inercia del eje 201 y M es el par ejercido por el alternador sobre el eje 201.

A continuación, es posible calcular las dos coordenadas N11, T11 de una segunda serie de posibles puntos de operación basándose en la ecuación 4. En la Figura 2, los puntos de operación se posicionan en función de su coordenada a lo largo del eje N11 y de su coordenada a lo largo del eje T11. Para la claridad del gráfico, los puntos de operación posibles de la segunda serie están representados por una curva C2 en línea sólida. Esta segunda serie de posibles puntos de operación es dinámica ya que depende de la velocidad N de giro de la turbina y del par T ejercido por el flujo F de agua en el conducto 202. Como resultado, la segunda serie de posibles puntos de operación se actualiza en función de la variación de la velocidad N de giro y/o de la variación del par T.

La segunda serie incluye los puntos de operación posibles de la turbina 20 a una cierta velocidad N de giro del conducto 202 y a un par T de torsión determinado ejercido por el flujo F de agua en el conducto 202. En otras palabras, se sabe que a una velocidad N de giro y a un par T determinados, el punto de operación de la turbina 20 está en algún lugar en la curva C2 que une los puntos de la segunda serie.

Dos coordenadas del punto de operación real de la turbina 20 a continuación, se pueden deducir mediante la determinación del punto que pertenece tanto a la primera como a la segunda serie. Este punto de operación real se encuentra en la intersección entre la curva C1 de iso-apertura y la curva C2. N11_real denota la coordenada del punto de operación real a lo largo del eje N11 y T11_real denota la coordenada del punto de operación real a lo largo del eje T11. En la práctica, las dos coordenadas N11_real y T11_real del punto de operación real se pueden interpolar numéricamente. El punto de operación real, se deduce en el intervalo de operación considerado de la máquina, que está en modo de turbina en el ejemplo. Tomando como base la ecuación 1 o 2, la determinación de las coordenadas N11_real, T11_real del punto de operación real permite calcular la carga H neta de la instalación 2. Este cálculo de la carga neta es especialmente útil cuando una medida directa de la carga neta no es posible o no es exacta. Por ejemplo, el cálculo de la carga neta puede integrarse en un sistema de control de bucle destinado a la estabilización de la carga neta de una máquina hidráulica con S-características. S-características se pueden encontrar durante la puesta en marcha de una bomba-turbina en el modo de turbina o con una turbina de Francis bajo condiciones de caída de agua alta.

El conocimiento de N11_real y T11_real permite determinar la tercera coordenada Q11_real por medio de una interpolación del diagrama de colina. El caudal Q del flujo F de agua que pasa a través de la turbina 20 se puede calcular después tomando como base la ecuación 3.

Las etapas de cálculo del algoritmo para la determinación de la carga H neta y del caudal Q se realizan automáticamente por una unidad de control electrónico no representada que puede estar integrada en el controlador de la turbina.

Alguna derivada parcial asociada al cuádruple N11_real, Q11_real, T11_real, Y del punto de operación real, puede además calcularse. Por ejemplo, algunas derivadas parciales son $\frac{\partial N11}{\partial Q11}|_Y, \frac{\partial N11}{\partial T11}|_{Q11}, \frac{\partial T11}{\partial Q11}|_Y \cdots$ Las mismas son intrínsecas al cuádruple de valores de puntos de operación y se utilizan como entrada para determinar los parámetros de control para la turbina 20, tal como la orientación álabes de guía.

En realización no representada alternativa de la invención, un procedimiento similar se puede implementar para determinar el punto de operación de una turbina doblemente regulada, tal como una turbina Kaplan o una turbina de Bulbo. Una turbina doblemente regulada incluye un cubo equipado con álabes móviles. El caudal de agua que circula alrededor del cubo se regula también gracias a una serie de álabes de guía. En este caso, la primera serie de posibles puntos N'11, T'11 de operación se determina para la orientación afectada de los álabes móviles de la turbina doblemente regulada y para la apertura afectada de los álabes de guía. Utilizando el procedimiento descrito anteriormente, el mismo cálculo se puede hacer para obtener la carga neta y el caudal de agua que fluye a través de la turbina doblemente regulada.

En una realización alternativa no representada, el giro del eje 201 se utiliza para alimentar un dispositivo mecánico. La instalación 2 convierte, a continuación, la energía hidráulica en energía mecánica.

En una realización alternativa no representada, el procedimiento se puede implementar en una bomba o una bomba-turbina.

En una realización alternativa no representada, el intervalo de operación en el que se determina el punto de operación corresponde al modo de bomba.

Las características técnicas de las diferentes realizaciones y de las realizaciones alternativas de la invención descrita aquí anteriormente se pueden combinar juntos para generar nuevas realizaciones de la invención.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para la determinación del punto de operación de una máquina (20) hidráulica en un intervalo de operación considerado, tal como el modo de turbina, estando el procedimiento **caracterizado porque** incluye las etapas que consisten en:

a) determinar dos coordenadas (N'11, T'11) de una primera serie de posibles puntos de operación de la máquina (20) hidráulica para una orientación afectada de los álabes (206) de guía de la máquina,
b) medir la velocidad (N) de giro de la máquina,
c) determinar el par (T) ejercido por el flujo (F) de agua en la máquina,
d) calcular dos coordenadas (N11, T11) de una segunda serie de posibles puntos de operación de la máquina en función de la velocidad (N) de giro medida en la etapa b) y el par (T) determinado en la etapa c), y
e) deducir dos coordenadas (N11_real, T11_real) del punto de operación que pertenece tanto a la primera como a la segunda series en dicho intervalo de operación considerado de la máquina.

2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque** incluye una etapa f) posterior a la etapa e) que consiste en calcular la carga (H) neta sometida a la máquina (20) hidráulica basándose en las dos coordenadas del punto (N11_real, T11_real) de operación deducidas en la etapa e) y en la velocidad (N) de giro o el par (T) determinado en la etapa b) o c).

3. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, **caracterizado porque** incluye una etapa g) posterior a la etapa e) que consiste en calcular, basándose en las dos coordenadas (N11_real, T11_real) del punto de operación deducidas en la etapa e), una tercera coordenada (Q11_real) del punto de operación de la máquina (20).

4. Procedimiento de acuerdo con las reivindicaciones 2 y 3, **caracterizado porque** incluye una etapa h) posterior a las etapas f) y g) que consiste en calcular el caudal (Q) de agua que pasa a través de la máquina (20) basándose en la carga (H) neta calculada en la etapa f) y la tercera coordenada (Q11_real) del punto de operación calculada en la etapa g).

5. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 3 o 4, **caracterizado porque** incluye además una etapa que consiste en calcular alguna derivada parcial asociada a las coordenadas (N11_real, Q11_real, T11_real) del punto de operación de la máquina.

6. Procedimiento de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, **caracterizado porque**, en la etapa d), el punto de operación real (N11_real, T11_real) se deduce por interpolación.

7. Procedimiento de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, **caracterizado porque** la máquina hidráulica es una turbina doblemente regulada, que comprende un cubo equipado con álabes móviles y **porque**, en la etapa a), las dos coordenadas (N'11, T'11) de la primera serie de posibles puntos de operación se determinan también para una orientación afectada de los álabes móviles de la máquina.

8. Instalación (2) para convertir la energía hidráulica en energía mecánica o eléctrica, que comprende una máquina (20) hidráulica y **caracterizada porque** incluye, además:

- medios para determinar dos coordenadas (N'11, T'11) de una primera serie de posibles puntos de operación de la máquina (20) hidráulica para una orientación afectada de los álabes (206) de guía de la máquina,
- medios para medir la velocidad (N) de giro de la máquina, y
- medios para determinar el par (T) ejercido por el flujo (F) de agua en la máquina,
- medios para calcular dos coordenadas de una segunda serie de puntos (N11, T11) de operación potenciales de la máquina en función de la velocidad (N) de giro medida en la etapa b) y el par (T) determinado en la etapa c), y
- medios para deducir dos coordenadas (N11_real, T11_real) del punto de operación que pertenece tanto a la primera como la segunda series en un intervalo de operación considerado de la máquina, tal como el modo de turbina.

9. Instalación de acuerdo con la reivindicación 8, **caracterizada porque** la máquina (20) hidráulica es una turbina Francis.

10. Instalación de acuerdo con la reivindicación 8, **caracterizada porque** la máquina hidráulica es una bomba-turbina.

11. Instalación de acuerdo con la reivindicación 8, **caracterizada porque** la máquina hidráulica es una turbina doblemente regulada, que comprende un cubo equipado con álabes móviles y **porque** los medios para determinar las dos coordenadas (N'11 T'11) de la primera serie de puntos de operación consideran también una orientación afectada de los álabes móviles de la máquina.

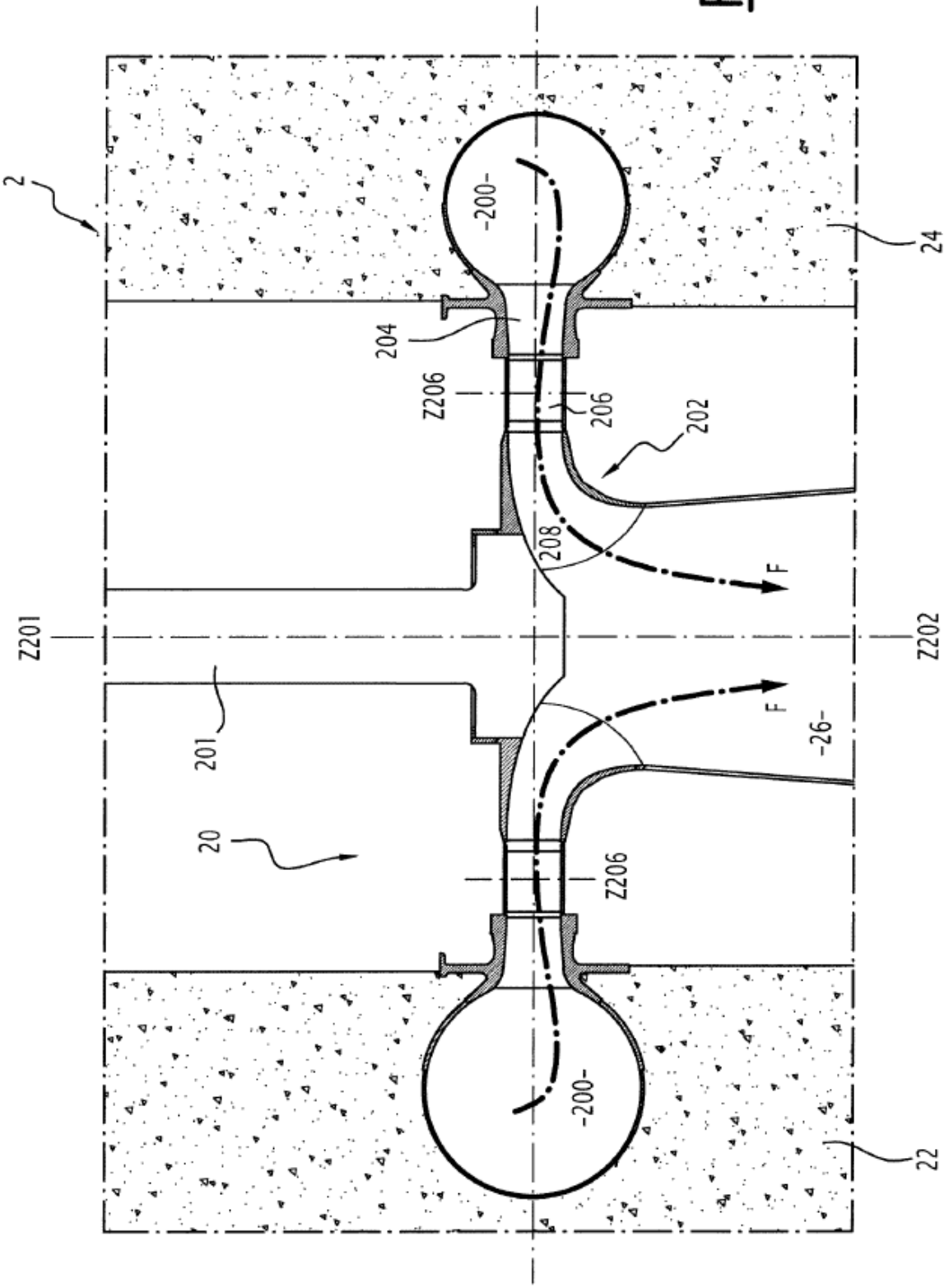

FIG.1

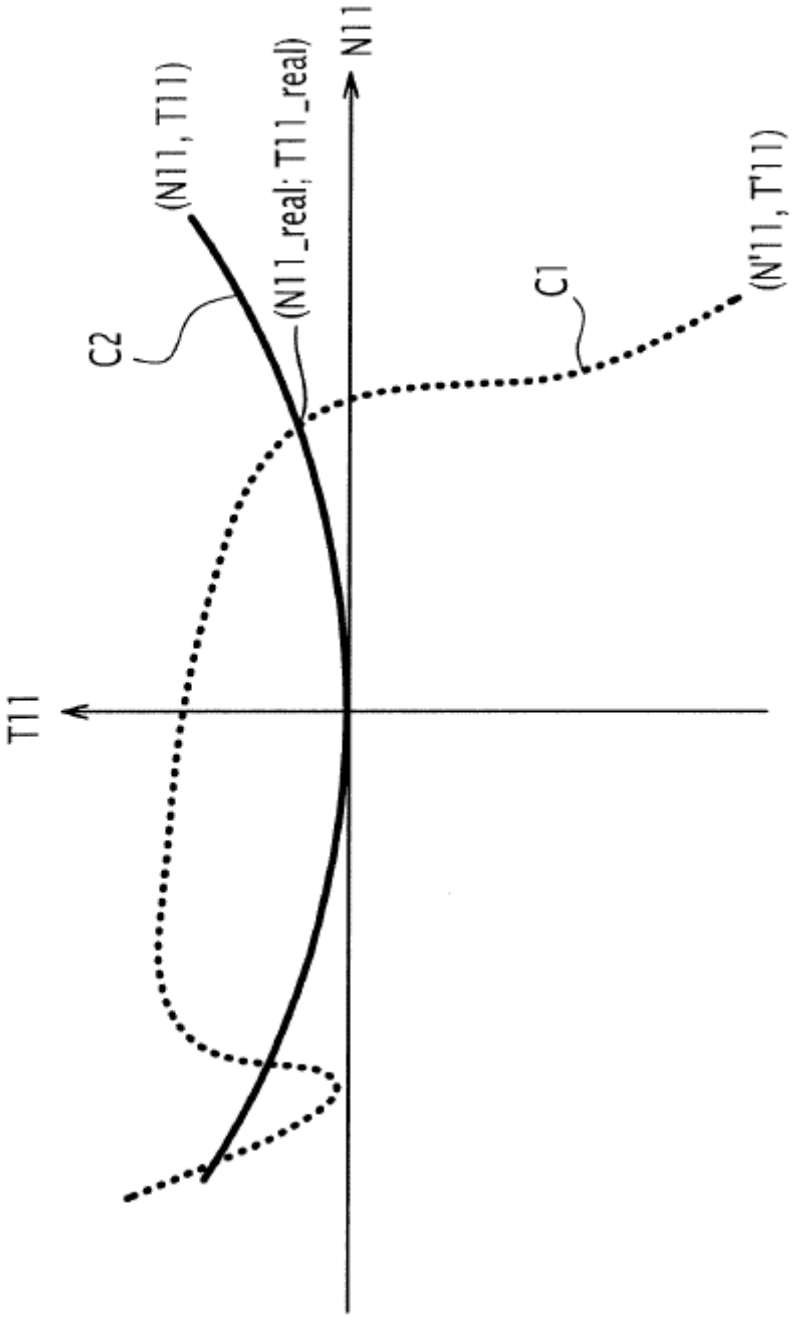

FIG.2