

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 976 203**

51 Int. Cl.:

F03B 13/06 (2006.01)

F03B 15/08 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **13.02.2019 PCT/EP2019/053577**

87 Fecha y número de publicación internacional: **22.08.2019 WO19158600**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **13.02.2019 E 19704820 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.01.2024 EP 3746655**

54 Título: **Método para controlar una central hidráulica**

30 Prioridad:

14.02.2018 FR 1851259

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

26.07.2024

73 Titular/es:

SUPERGRID INSTITUTE (50.0%)

23 rue Cyprian

69100 Villeurbanne, FR y

UNIVERSITE D'EVRY VAL D'ESSONNE (50.0%)

72 Inventor/es:

RODRIGUES, JANAILSON;

DAMM, GILNEY;

BENCHAIB, ABDELKRIM y

LUSCAN, BRUNO

74 Agente/Representante:

MENDIGUTÍA GÓMEZ, María Manuela

ES 2 976 203 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

Método para controlar una central hidráulica

Campo de la invención

5

La invención se refiere a centrales hidráulicas de almacenamiento por bombeo y, en particular, al uso de tales centrales cuando su turbina acciona un generador para alimentar una red eléctrica de CA.

10

Las máquinas hidráulicas generalmente incluyen una bomba-turbina reversible que se utiliza ya sea para bombeo o para generación de electricidad. Preferiblemente, la velocidad de rotación de esta bomba-turbina reversible debe adaptarse a las propiedades del agua que fluye a través de ella, para conseguir una óptima eficiencia de funcionamiento y evitar fenómenos nocivos como la cavitación.

15

La mayoría de las máquinas hidráulicas, durante la generación de electricidad a una red eléctrica de CA, giran a una velocidad sincrónica con la frecuencia de la red eléctrica a suministrar. Para turbinas-bomba reversibles en modo generador, esta velocidad sincrónica generalmente difiere de la velocidad de rotación óptima definida por las propiedades hidráulicas. Como resultado, las turbinas generalmente no funcionan con una eficiencia óptima para la generación de energía.

20

Para permitir una adaptación óptima de la frecuencia de rotación de la turbina al generar electricidad para una red eléctrica de CA, Los diseños de centrales hidráulicas ofrecen ahora tecnologías como DFAM (máquina asíncrona de doble alimentación) o FFMS (máquina sincrónica de alimentación completa). Estas tecnologías permiten operar la turbina en generación a una frecuencia diferente a la de la red eléctrica a suministrar. De este modo, la turbina funciona en puntos de funcionamiento estáticos con una velocidad de rotación adecuada. Como resultado, se puede

25

mejorar la eficiencia de la producción de electricidad y la vida útil de las turbinas.

Con el desarrollo de la producción de electricidad a partir de energías renovables, las fuentes de energía renovables conectadas a la red eléctrica tienen un funcionamiento potencialmente intermitente, lo que puede provocar interrupciones temporales y repentinas en la producción de electricidad. Además, estas fuentes de energía

30

renovables reducen la inercia de la red eléctrica de CA y, por tanto, su estabilidad. En este caso, se debe realizar una rápida compensación de la disminución de la producción eléctrica durante una interrupción temporal de una o más fuentes de energía renovables, para evitar la desestabilización de la red eléctrica de CA.

Antecedentes de la invención

35

El artículo "Optimisation des stratégies de réglage d'une install de pompage-turbinage à vitesse variable (Optimización de estrategias de control para una planta de almacenamiento por bombeo de velocidad variable)" de Yves Pannatier ha propuesto utilizar el efecto de rueda libre de las turbinas de las centrales hidráulicas para obtener un aumento de la potencia eléctrica suministrada a la red eléctrica con un amplio rango dinámico. Cuando la turbina

40

de la central hidráulica no se encuentra funcionando a plena carga en generación, este efecto de rueda libre se

puede utilizar para lograr un aumento muy rápido de la energía eléctrica generada. El uso del efecto de rueda libre de una turbina implica extraer energía eléctrica del generador impulsado por la turbina para aprovechar la energía mecánica almacenada en forma de energía cinética por la velocidad de rotación de la turbina.

5 La demanda de energía eléctrica conduce a una reducción de la velocidad de rotación de la turbina, lo que es posible gracias a las tecnologías de adaptación de la velocidad de rotación. La estabilidad de la turbina, particularmente una turbina tipo Francis, puede verse afectada por su velocidad de rotación. Esto significa que si la velocidad de rotación de la turbina cae por debajo de una velocidad crítica, la estabilidad de la turbina puede verse comprometida y puede que no sea posible volver a acelerar la velocidad de rotación de la turbina. Para evitar un problema de estabilidad, las protecciones de la turbina desconectan el generador de la red eléctrica cuando se detecta el problema. La interrupción de la generación de electricidad mediante una central hidráulica que debería compensar rápidamente la producción de electricidad puede provocar un efecto de cascada que provoque el colapso de la red eléctrica.

10 Para evitar que se activen las protecciones de la turbina, se define una velocidad mínima de rotación de la turbina. El aumento de la producción de energía eléctrica se interrumpe en cuanto la turbina alcanza esta velocidad de rotación mínima. La velocidad de rotación mínima se determina dimensionando la turbina a un punto de operación estática predefinido.

15 La velocidad de rotación mínima elegida limita la posibilidad de un aumento temporal en la producción de energía eléctrica por parte de la central hidráulica. Por lo tanto, el aumento de la potencia eléctrica procedente de la central hidráulica puede resultar insuficiente para realizar la contribución esperada, ya que la interrupción repentina de la producción procedente de una o varias fuentes de energía renovables puede resultar no compensada.

Breve descripción de la invención

25 La invención pretende resolver uno o más de estos inconvenientes. Por tanto, la invención se refiere a un método para controlar una central hidráulica que comprende una turbina de velocidad variable que acciona un generador eléctrico y una estructura de conversión conectada a tal generador por un lado y a una red eléctrica por otro lado, como se define en las reivindicaciones adjuntas.

30 La invención se refiere también a las variantes de las reivindicaciones dependientes. El experto en la materia entenderá que cada una de las características de la descripción o de las reivindicaciones dependientes puede combinarse independientemente con las características de una reivindicación dependiente, sin constituir una generalización intermedia.

35 El documento EP0303170 describe D1 describe un método para controlar una central hidráulica que comprende una turbina de velocidad variable que acciona un generador eléctrico. El método opera la central hidráulica con un valor de consigna inicial de la potencia eléctrica a suministrar a la red eléctrica, obtiene un valor de altura del agua en la entrada de la turbina, obtiene un nuevo valor de consigna de potencia eléctrica mayor que el valor inicial, y determina la velocidad de rotación mínima de la turbina. La planta de energía hidráulica se controla para entregar energía

eléctrica igual al nuevo valor de consigna de energía eléctrica y para mantener la velocidad de rotación de la turbina por encima de la velocidad de rotación mínima determinada.

Breve descripción de las figuras

5

Otras características y ventajas de la invención quedarán claras a partir de la descripción que se proporciona a continuación, a modo de ilustración y sin carácter limitativo, con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

10

- La figura 1 es un diagrama que ilustra la influencia de la reducción de la inercia de una red eléctrica en su respuesta en frecuencia, en función de la proporción de fuentes de energía renovables;

- La figura 2 es un diagrama que ilustra un ejemplo de la evolución de la energía eléctrica suministrada por una central hidráulica durante una compensación repentina de energía;

- La figura 3 es un diagrama que ilustra la potencia mecánica y la velocidad de una turbina a lo largo del tiempo, con una demanda de potencia que induce una inestabilidad de la turbina;

15

- La figura 4 es un diagrama que ilustra una planta de energía hidráulica conectada a una red eléctrica de CA;

- La figura 5 es una representación esquemática de un diagrama que ilustra el método utilizado para controlar la planta de energía hidráulica;

20

- La figura 6 ilustra un ejemplo de la evolución de la velocidad de rotación de una turbina, en comparación con los límites;

- La figura 7 es un diagrama bidimensional que ilustra por un lado la velocidad óptima de una turbina y por el otro su velocidad crítica para diferentes valores de potencia característicos;

- La figura 8 es un ejemplo de la lógica de control de la central hidráulica;

25

- La figura 9 es un diagrama que ilustra un ejemplo de rotación característica de una turbina en función de su velocidad característica para diferentes valores de apertura de válvula;

- La figura 10 es un diagrama que ilustra un ejemplo de flujo característico de una turbina en función de su velocidad característica para diferentes valores de apertura de válvula;

- La figura 11 es un diagrama tridimensional que ilustra la eficiencia hidráulica de la turbina en función de su potencia característica y su velocidad característica;

30

- La figura 12 es un diagrama que ilustra la evolución de varios parámetros de funcionamiento de una central hidráulica según la invención;

- La figura 13 es un diagrama de los diversos parámetros de funcionamiento de una central hidráulica de tipo FFSM;

35

- Las figuras 14 a 16 son diagramas de control simplificados para una central hidráulica de tipo FFSM que funciona con diferentes modos de control de potencia activa;

- La figura 17 es un diagrama que muestra los diferentes niveles de potencia involucrados en una central hidráulica.

40

Descripción detallada la invención

La figura 1 es un diagrama que ilustra la influencia de la reducción de la inercia de una red eléctrica sobre su respuesta en frecuencia, en función de la proporción de fuentes de energía renovables. La curva de línea continua
 5 corresponde a una red eléctrica de CA de referencia sin fuentes de energía renovables. La curva de línea punteada corresponde a una red eléctrica de CA con un nivel de integración de fuentes de energía renovables del 20%. La curva de línea discontinua corresponde a una red eléctrica de CA con un nivel de integración de fuentes de energía renovables del 40%. La curva de la línea de puntos y trazos corresponde a una red eléctrica de CA con un nivel de integración de fuentes de energía renovables del 60%. Por tanto, se puede observar que aumentar el nivel de
 10 integración de las fuentes de energía renovables reduce la inercia de la red de CA y aumenta la dependencia de la red de desconexiones rápidas de una de las fuentes con el riesgo de desestabilizar la red. Este riesgo se cuantifica por la amplitud de la excursión de frecuencia de la red (que debe limitarse a 1 Hz para una red eléctrica de 50 Hz, por ejemplo) y por la velocidad de variación de frecuencia de la red eléctrica. La caída de frecuencia de la red eléctrica puede provocar desconexiones de carga, y el ritmo de variación de frecuencia puede activar la protección de carga y
 15 la desconexión de la misma. Estas desconexiones tienen un efecto en cadena de desestabilización de la red eléctrica.

El objetivo de la invención es facilitar un rápido aumento de la potencia eléctrica suministrada por una central hidráulica. El principio es recuperar más energía eléctrica aprovechando la inercia mecánica de la turbina que
 20 acciona el generador eléctrico. Con una central hidráulica configurada para tener una velocidad de rotación de turbina variable en generación, tal efecto de inercia puede usarse para aumentar rápidamente la potencia eléctrica, debido a la posibilidad de reducir la velocidad de rotación de esta turbina.

La figura 2 es un diagrama que ilustra un ejemplo de la evolución de la energía eléctrica suministrada por una central
 25 hidráulica durante una compensación repentina de energía eléctrica. En el momento $t=0$, se realiza una demanda de energía eléctrica adicional a la central hidráulica. Debido al efecto de rueda libre, la potencia eléctrica suministrada por la central hidráulica aumenta rápidamente, en menos de un segundo. El nuevo nivel de potencia eléctrica suministrada por la central hidráulica se mantiene durante un determinado periodo de tiempo. Entonces se elimina el aumento de la demanda de energía eléctrica y la energía eléctrica de la central hidráulica vuelve a su nivel inicial.

La figura 3 ilustra un ejemplo de la potencia mecánica de la turbina (línea continua) y la velocidad de esta turbina
 (línea discontinua) en un ejemplo de funcionamiento defectuoso. En este ejemplo, la central hidráulica suministró un exceso de energía eléctrica, lo que provocó que la turbina se ralentizara a una velocidad demasiado baja. Como resultado, la turbina entra en una zona de funcionamiento inestable, en la que disminuyen tanto la potencia eléctrica
 35 como la potencia mecánica.

La figura 4 es un diagrama que ilustra un ejemplo de una planta de energía hidráulica 1 conectada a una red eléctrica de CA 4 para suministrar dinámicamente energía eléctrica adicional sin entrar en la zona de funcionamiento inestable de su turbina. La central hidráulica 1 comprende un circuito eléctrico 2 y un circuito hidráulico 3. La central hidráulica
 40 1 ilustrada aquí es del tipo FFSM, pero también son posibles otros tipos de centrales hidráulicas, como por ejemplo el

tipo DFIM (máquina de inducción de doble alimentación).

5 El circuito eléctrico 2 comprende, de manera conocida en sí, una estructura de conversión en el lado de la red eléctrica y una estructura de conversión en el lado de la máquina hidráulica, conectadas por un enlace de CC 230. La estructura de conversión del lado de la red eléctrica comprende, de manera conocida en sí, un transformador 250 conectado a la red eléctrica 4, y un convertidor CC/CA 240 conectado al transformador 250. La estructura de conversión en el lado del circuito hidráulico comprende un convertidor CA/CC 220, una máquina eléctrica 210 conectada al convertidor 220 y un circuito de excitación 200 para la máquina eléctrica 210. La máquina eléctrica 210 es, por ejemplo, un motor de tipo síncrono.

10

El circuito hidráulico 3 comprende, de manera en sí conocida, una presa 330 diseñada para formar un depósito de agua, una compuerta forzada 320 conectada a una tubería que entra en el depósito delimitado por la presa 330, una compuerta 310 corriente abajo de la compuerta forzada 320, y una turbina 300 que recibe agua selectivamente en función del estado abierto de la compuerta 310. La turbina 300 está unida al rotor de la máquina eléctrica 210 de manera conocida en sí. En modo generador, la turbina 300 es impulsada por el agua en la tubería forzada 320 y por lo tanto hace girar el rotor de la máquina eléctrica 210. En el modo de bomba, el rotor de la máquina eléctrica 210 hace girar la turbina 300 y suministra agua al depósito a través de la compuerta forzada 320.

15

Un circuito de control (cuyo ejemplo se detalla a continuación) está destinado a controlar la estructura de conversión en el lado de la red eléctrica, la estructura de conversión en el lado de la máquina hidráulica, y el funcionamiento de la turbina 300. Para un funcionamiento estable del circuito eléctrico 2, el voltaje en el enlace de CC 230 se mantiene constante controlando la estructura de conversión en el lado de la red eléctrica. La estructura de control en el lado del circuito hidráulico 3 y la turbina 300 son controladas por este circuito de control para entregar la potencia eléctrica objetivo.

20

Para ello, el circuito de control podrá disponer de un primer modo, denominado modo de control de potencia eléctrica activa, controlar la potencia eléctrica activa entregada por el convertidor 220 a la red eléctrica 4, y controlar la velocidad de rotación de la turbina 300 mediante un punto de ajuste en el nivel de apertura de la compuerta 310.

25

En este modo de funcionamiento, cuando el circuito de control aplica un punto de ajuste de potencia aumentado al convertidor 220, la potencia eléctrica suministrada en realidad aumenta después de un tiempo muy corto (por ejemplo, del orden de 20 ms) a medida que se reduce la velocidad de rotación de la turbina 300. Sin inestabilidad, el circuito de control es capaz de controlar la turbina 300 para devolverla a su velocidad de rotación inicial.

30

El circuito de control puede tener un segundo modo, conocido como modo de control de velocidad angular, en donde la velocidad de rotación de la turbina 300 se controla a través del convertidor 220, mientras que la potencia activa suministrada a la red 4 se controla a través de la turbina 300.

35

En este modo de operación, el circuito de control controla la velocidad de rotación de la turbina 300, de modo que esta velocidad proporcione una eficiencia óptima para el nuevo punto de ajuste de potencia aumentado. El circuito de

control controla entonces el convertidor 220, de modo que la velocidad se ajusta adaptando la potencia de salida a la red eléctrica 4 según la potencia mecánica suministrada por la turbina 300.

5 Para el ejemplo de operación continua de una turbina 300 tipo Francis, el rango de operación continua generalmente se define por las limitaciones de cavitación de entrada, cavitación de salida, vórtice entre paletas de la turbina 300, vórtice de carga completa, o vórtice de carga parcial.

10 Para una bomba de turbina reversible de velocidad fija, el factor limitante para una respuesta dinámica de la turbina 300 es la variación en la presión del agua en la tubería forzada 320 conectada a la turbina 300. La variación de presión debida a la inercia de la columna de agua es entonces un indicador de la estabilidad hidroeléctrica de la turbina 300. Para una turbina 300 que funciona a velocidad variable, es necesario integrar límites de velocidad en la respuesta de potencia dinámica debido a los límites del efecto de rueda libre.

15 Se ha detallado aquí el ejemplo de una turbina tipo Francis 300, pero también se pueden usar otros tipos de turbinas dentro del alcance de la invención, por ejemplo una turbina tipo Kaplan o VLH.

20 El control de la planta de energía hidráulica 1 implementa un método ilustrado esquemáticamente en la figura 5, para determinar una velocidad de rotación mínima de la turbina 300 para garantizar la estabilidad. Este método comprende un conjunto 10 de pasos de diseño y un conjunto 11 de pasos de control de función.

25 El modelado del comportamiento dinámico de la máquina hidráulica o circuito hidráulico 3 se basa en mediciones de puntos de operación para diferentes niveles de apertura estática de la compuerta 310 de la turbina 300. La modelización del comportamiento dinámico del circuito hidráulico 3 se basa en la suposición de que los puntos en los que el circuito hidráulico 3 funciona dinámicamente son idénticos a sus puntos de funcionamiento estático.

30 Los modelos estáticos de operación de máquinas hidráulicas generalmente definen su desempeño en función de 5 variables, generalmente expresadas en unidades [pu]:

- el nivel de apertura de la compuerta 310 de la turbina 300, designado por el parámetro g ;
- la rotación de la turbina 300, designada por el parámetro T ;
- el flujo de agua a través de la turbina 300, designado por el parámetro q ;
- la velocidad de rotación angular de la turbina 300, designada por el parámetro n ;
- la altura del agua en la tubería forzada 320, designada por el parámetro h .

35 La recuperación de información relativa a los puntos de funcionamiento estático del circuito hidráulico 3 corresponde al paso 101 de los pasos de diseño.

40 Para eliminar el parámetro de altura del agua, se realizan transformaciones de parámetros para obtener parámetros característicos, independientes de la altura del agua h :

$$T_{11} = T/h$$

$$n_{11} = n/vh$$

$$q_{11} = q/vh$$

5

La modelización del funcionamiento del circuito hidráulico 3 puede entonces definirse en términos de las variables g , T_{11} , n_{11} , q_{11} . El modelado puede entonces ilustrarse, por un lado, mediante un diagrama del par característico T_{11} en función de la velocidad característica n_{11} para diferentes valores de apertura g (ejemplo en la figura 9) y por otro lado mediante un diagrama de flujo característico q_{11} en función de la velocidad característica n_{11} para diferentes valores de apertura g (ejemplo en la figura 10). Los diagramas de las figuras 9 y 10 muestran un ejemplo de una turbina tipo Francis.

10

Entonces se puede derivar una potencia mecánica característica P_{11} :

$$P_{11} = T_{11} * n_{11} = P_{11}/hvh$$

15

La eficiencia de la turbina puede entonces expresarse como $\eta = P_{11}/q_{11}$

De este modo se pueden generar diagramas correspondientes para los parámetros η y P_{11} .

Las transformaciones de parámetros y la generación de diagramas de modelado de parámetros característicos en función de la velocidad de rotación característica n_{11} se pueden realizar en el paso 102 de los pasos de diseño.

20

Los diagramas de las figuras 9 y 10 se pueden utilizar para derivar un diagrama tridimensional de la eficiencia del circuito hidráulico 3 en función de la potencia mecánica característica P_{11} y la velocidad de rotación característica n_{11} . El diagrama correspondiente se ilustra en la figura 11. La generación de tal diagrama corresponde al paso 103 de los pasos de diseño. El borde derecho del diagrama tridimensional ilustra las velocidades de rotación críticas de la turbina 300 en función de la potencia característica P_{11} . La curva de línea continua corresponde a los puntos de funcionamiento óptimo de la turbina 300 en función de la potencia característica P_{11} . La curva (línea continua) para la velocidad de operación óptima de la turbina 300 y la curva (línea discontinua) para la velocidad crítica de esta turbina 300 se ilustran en el diagrama bidimensional de la figura 7.

25

30

En el caso de esta invención, la velocidad crítica se puede definir como la velocidad mínima a la que la turbina 300 puede mantener la potencia mecánica equivalente a la potencia eléctrica demandada por la red eléctrica 4. Así, más allá de esta velocidad crítica, la máquina hidráulica no es capaz de mantener la potencia eléctrica requerida por la red y entrará en un efecto de cascada que provocará inestabilidad.

35

A continuación se describirá un ejemplo de un conjunto de control 11 para el circuito hidráulico 3 para implementar la invención.

40

En el paso 117, se obtiene el valor de altura del agua h aplicado a la entrada de la turbina 300. Este valor de altura del agua h puede obtenerse mediante cualquier medio adecuado, por ejemplo mediante sensores de presión de manera conocida en sí. La altura del agua h es un parámetro relativamente fácil de obtener y varía a un ritmo muy

lento con el nivel del agua corriente arriba de la presa 330.

En la etapa 116, se obtiene un nuevo valor de consigna de potencia mecánica P_{ch} , con el fin de satisfacer una demanda de aumento dinámico de la potencia eléctrica que se va a suministrar a la red 4. El punto de ajuste de potencia mecánica corresponde a la potencia mecánica de la turbina 300 necesaria para entregar una potencia eléctrica P_{es} deseada a la red 4. La consigna de potencia mecánica P_{ch} puede determinarse, por ejemplo, a partir de una consigna de potencia eléctrica P_{ec} :

- aplicando una transformación que tenga en cuenta la eficiencia de conversión entre la potencia mecánica y la potencia eléctrica suministrada a la red, en funcionamiento estático;

- teniendo en cuenta la siguiente relación en funcionamiento dinámico:

$P_{elec} = \eta * P_{meca} + d(Ht * n^2)/dt$, siendo η la eficiencia de conversión entre la potencia mecánica y la potencia eléctrica suministrada a la red, Ht la inercia de la masa giratoria del circuito hidráulico 3 (combinación de la turbina 300 y el rotor del motor eléctrico 210) expresada en segundos, y n la velocidad de rotación de la turbina 300 a la potencia eléctrica nominal.

La potencia eléctrica nominal P_{ec} puede corresponder, por ejemplo, a la siguiente relación:

$$P_{ec} = P_{ei} + P_{ea}$$

Donde P_{ei} es la potencia eléctrica inicial suministrada a la red 4, y P_{ea} es la potencia eléctrica adicional requerida por la red eléctrica 4.

La figura 17 ilustra esquemáticamente las diferentes potencias implicadas en la central hidráulica 1. Las flechas que apuntan hacia abajo corresponden a pérdidas de potencia, las flechas que apuntan hacia arriba corresponden a energías intercambiadas transitoriamente.

La presa 330 tiene un E_{pot} de energía potencial.

Una energía hidráulica P_{hyd} fluye a través de la tubería forzada 320, se producen pérdidas por fricción P_{fri} y se intercambia transitoriamente una energía ΔE_W .

Se desarrolla una potencia mecánica P_{mec} en el conjunto de válvula 300 y turbina 310. Se pierde una potencia P_{lt} a través de pérdidas hidráulicas en este conjunto, y se intercambia transitoriamente una energía ΔE_{PT} .

A la máquina eléctrica 210 se suministra una energía eléctrica P_{elec} . Se pierde una potencia P_{lm} y se intercambia transitoriamente una energía ΔE_{RI} debido a la inercia giratoria del conjunto giratorio.

En el enlace de CC 230, se transmite una potencia P_{trans} . Se pierde una potencia P_{lc} y se intercambia transitoriamente una energía ΔE_C por efecto capacitivo.

Se suministra una potencia P_{out} al transformador 250 y a la red eléctrica 4. Se pierde una potencia P_{ltr} a través de pérdidas de transformación.

5 En el paso 115, la consigna de potencia mecánica P_{ch} se convierte en una potencia característica P_{11} , teniendo en cuenta la altura del agua h , utilizando la fórmula $P_{11} = P_{ch}/h/\sqrt{h}$.

10 En el paso 111, se determina la velocidad de rotación característica crítica n_{11crit} de la turbina 300 para esta potencia característica P_{11} , por ejemplo, del diagrama de la figura 7 o del diagrama de la figura 11. Esta velocidad de rotación característica crítica n_{11crit} se convierte en el paso 112 en la velocidad de rotación crítica n_{crit} de la turbina 300, usando la relación $n_{11} = h/\sqrt{h}$.

15 Ventajosamente, la velocidad de rotación característica óptima n_{11opt} de la turbina 300 para esta potencia característica P_{11} en estado estacionario también se determina en el paso 111. Esta velocidad característica óptima n_{11opt} se convierte en el paso 113 en la velocidad de rotación óptima n_{opt} de la turbina 300.

20 En el paso 114, el circuito hidráulico 3 se regula para garantizar que la velocidad de rotación de la turbina 300 permanezca por encima del valor n_{crit} durante el aumento dinámico de la potencia suministrada por la central hidráulica 1. De esta manera, se puede asegurar que la velocidad de rotación de la turbina 300 se mantenga a un nivel que evite activar las salvaguardas de detección de inestabilidad, evitando así una desconexión de la central hidráulica 1 de la red 4.

25 Ventajosamente, la central eléctrica 1 puede regularse de manera que se garantice que la velocidad de rotación de la turbina 300 permanezca por encima de un valor n_s , con $n_s > n_{crit}$ (por ejemplo $n_s = 1.05 * n_{crit}$) para mantener un margen de seguridad con respecto a la velocidad de rotación crítica n_{crit} .

En el paso 114, el circuito hidráulico 3 también puede regularse para funcionar con una eficiencia óptima después de que la potencia mecánica haya alcanzado el valor de la potencia mecánica P_{ch} . De hecho, una vez establecida esta potencia mecánica, conviene estabilizar el circuito hidráulico 3 para que funcione con una eficacia óptima.

30 Los valores n_{opt} y n_{crit} pueden suministrarse al circuito de control de la central hidráulica 1 para su control en tiempo real.

Cuando se recibe una solicitud de aumento de potencia eléctrica desde la red 4, el método de control de la central hidráulica podrá implementarse según el siguiente bucle:

- 35
- a) recibir la potencia eléctrica deseada P_{es} ;
 - b) obtener el valor de la altura del agua en la entrada de la turbina 300;
 - c) calcular la velocidad de rotación crítica n_{crit} de la turbina 300 para la potencia P_{es} ;
 - d) determinar la velocidad de rotación segura n_s de la turbina 300;
 - e) obtener el valor de la velocidad de rotación n de la turbina 300;
 - 40 f) determinar si $n \geq n_s$;

- g) si $n \geq n_s$, definiendo $P_{ec}=P_{es}$;
- h) si $n < n_s$, definiendo $P_{ec}=P_{es} * (n - n_{crit})/(n_s - n_{crit})$;
- i) volver al paso a)

5 Un método de este tipo garantiza que la turbina 300 volverá gradualmente a una velocidad de rotación mayor que el valor n_s .

Si se piensa en términos de potencia mecánica, los valores P_{es} y P_{ec} respectivamente pueden sustituirse por P_{ch} y P_{minter} respectivamente, siendo P_{minter} un valor de consigna intermedio de potencia mecánica.

10

La figura 6 muestra un ejemplo de cómo cambia la velocidad de una turbina 300 durante un aumento dinámico de la energía eléctrica suministrada por la central hidráulica. En el momento $t=0$, la central hidráulica recibe una mayor demanda de energía. La central hidráulica 1 suministra la potencia eléctrica aumentada a la red 4 en muy poco tiempo. La velocidad de rotación de la turbina 300 disminuye gradualmente, como resultado del frenado por el motor 210 utilizado como generador para suministrar la potencia eléctrica aumentada. Cuando la velocidad de rotación de la turbina 300 alcanza el valor n_s , el circuito de control de la central hidráulica reacciona para evitar que la velocidad caiga por debajo del límite n_{crit} . Por ejemplo, el circuito de control reduce ligeramente la potencia eléctrica suministrada a la red 4 o aumenta la apertura de la válvula 310.

15

20 Según un modo de funcionamiento deseable, la cantidad de energía cinética disponible desde la turbina 300 puede anticiparse de antemano sin desestabilizarla, para determinar una potencia eléctrica transitoria que puede ser demandada por la red eléctrica 4 y durante cuánto tiempo se puede demandar esta potencia eléctrica transitoria.

Así, el método descrito anteriormente ha permitido calcular los valores n_{opt} y n_{crit} . La cantidad de energía cinética disponible W_{ec} puede definirse mediante la siguiente relación:

25

$$W_{ec} = Ht * (n_{optinit}^2 - n_{crit}^2)$$

30 Donde Ht es la inercia de la masa giratoria del circuito hidráulico 3 (combinación de la turbina 300 y el rotor del motor eléctrico 210), expresada en segundos, y $n_{optinit}$ es la velocidad de rotación óptima de la turbina 300 utilizada antes de la demanda de energía adicional.

La inercia Ht puede determinarse mediante la siguiente fórmula para una velocidad de rotación nominal:

35

$$Ht = J * n_{nom}^2 / (2 * Sn)$$

Siendo J el momento de inercia de la masa impulsada giratoria en $Kg.m^2$, n_{nom} la velocidad nominal (por ejemplo, para un punto de operación con eficiencia óptima) en rad/s , y Sn la potencia nominal del motor eléctrico en VA.

40

Se han realizado simulaciones, por ejemplo, para un circuito hidráulico 3 que tiene una inercia de 3.2 segundos para la altura nominal del agua de la central hidráulica.

5 Si la red eléctrica 4 requiere un aumento W_{req} de energía suministrada inferior a la cantidad de energía cinética disponible W_{ec} , la central hidráulica es adecuada para suministrar esta energía.

El aumento de energía W_{req} se define como sigue. Inicialmente, la central hidráulica 1 cumple con la condición $P_{mecainit} * R = P_{elecinit}$, donde $P_{mecainit}$ es la potencia mecánica inicial de la turbina 300, R es la eficiencia de conversión de la energía mecánica de la turbina 300 en energía eléctrica suministrada a la red 4, y $P_{elecinit}$ es la potencia eléctrica inicial suministrada a la red 4. Cuando la red 4 demanda una potencia eléctrica aumentada $P_{ec} = P_{ch} * R$, la potencia eléctrica aumenta muy rápidamente hasta el valor de P_{ec} . Según un modelo, se puede estimar que el aumento de potencia mecánica de la turbina 300 es lineal en el tiempo entre el valor $P_{mecainit}$ y P_{ch} . Por tanto, se requiere un tiempo t_p antes de que la potencia mecánica alcance el valor P_{ch} , que puede traducirse en una pendiente designada por RoCoP. El valor W_{req} puede entonces definirse mediante la siguiente relación:

15

$$W_{req} = (P_{ch} - P_{mecainit})^2 / (2 * RoCoP)$$

20 De esta manera, se puede determinar de antemano si la central hidráulica 1 es capaz de suministrar la energía W_{req} sin inducir inestabilidad en el circuito hidráulico 3. Por lo tanto, el valor máximo de P_{ec} o P_{ch} disponible cuando la central hidráulica 1 está funcionando en un punto de operación determinado se puede calcular de antemano.

25 Si se determina que $W_{req} > W_{ec}$, se podrá calcular un valor de potencia mecánica P_{lim} , verificando $P_{lim} < P_{ch}$ y $(P_{lim} - P_{mecainit})^2 / (2 * RoCoP) < W_{ec}$. Este valor P_{lim} se puede utilizar transitoriamente como punto de ajuste para que la central hidráulica 1 aumente la potencia eléctrica suministrada a la red 4 por el efecto de rueda libre.

30 RoCoP se aproxima aquí como una pendiente fija (los resultados de las pruebas han demostrado que esta suposición es bastante precisa), pero en la práctica puede ser un parámetro variable dependiendo de la eficiencia de la turbina, la inercia de la columna de agua, el efecto del golpe de ariete y el tiempo de respuesta de la válvula 310. RoCoP puede expresarse como la tasa máxima de cambio de potencia mecánica P_m de la turbina 300, es decir, dP_m/dt .

35 Un método de control correspondiente se ilustra con referencia a la figura 8. Aquí el método de control implementa un ejemplo de un conjunto de control 12 para el circuito hidráulico 3. Los pasos de control 111 a 113 y 115 a 117 son idénticos a los descritos anteriormente.

En el paso 118, se obtiene el valor de inercia H_t descrito anteriormente.

40 En el paso 119, la cantidad de energía cinética W_{ec} disponible por el efecto de rueda libre se calcula según la relación descrita anteriormente, basándose en los valores disponibles H_t , $n_{optinit}$ y n_{crit} . Este cálculo puede utilizarse, por

ejemplo, para informar al operador de la central hidráulica 1 o al operador de la red 4 del valor de esta cantidad de energía W_{ec} , con el fin de anticipar la gestión de un aumento de capacidad de la energía eléctrica producida por la central hidráulica 1.

- 5 En el paso 120, se verifica si $W_{req} > W_{ec}$, como se detalla anteriormente. Si este no es el caso, se puede utilizar P_{ch} como punto de ajuste de potencia mecánica en el paso 122. Si $W_{req} > W_{ec}$, se implementa el paso 121: se calcula el valor de la potencia mecánica P_{lim} , verificando que $P_{lim} < P_{ch}$ y $(P_{lim} - P_{mecainit})^2 / (2 * R_{oCoP}) < W_{ec}$. Con esta consigna mecánica de potencia P_{lim} se controla entonces de forma transitoria la central hidráulica 1.
- 10 La invención permite prever nuevos modelos económicos para el funcionamiento de una central hidráulica. Un operador de central hidráulica podrá operar la planta con carga baja y comercializar una reserva de energía dinámica al operador de la red eléctrica. De hecho, el operador de la red eléctrica puede verse obligado a pagar por esta reserva de energía relativamente costosa para compensar posibles interrupciones en el servicio de las fuentes de energía renovables. Un modelo económico de este tipo es tanto más rentable cuanto que la invención permite
- 15 determinar con precisión la reserva de marcha, lo que permite comercializar una reserva de marcha de importe mayor.

El gestor de la red eléctrica 4 a la que está conectada la central hidráulica puede anticipar la gestión de su red, teniendo potencialmente acceso en tiempo real a la reserva de energía de la central hidráulica 1.

20

La figura 12 es un diagrama que ilustra la evolución de varios parámetros de funcionamiento de una central hidráulica 1 a lo largo del tiempo, según una modalidad ejemplar de la invención. La curva de línea continua corresponde a la potencia eléctrica suministrada a la red 4, la curva de línea de puntos corresponde a la potencia mecánica de la central hidráulica 1, la curva de línea discontinua corresponde a la velocidad de rotación de la turbina 300, el límite de trazos y puntos corresponde a la velocidad de rotación de seguridad n_s de la turbina 300, el límite de trazos y dobles

25 puntos corresponde a la velocidad de rotación crítica n_{crit} .

- En $t = 0$, la potencia mecánica y eléctrica de la central hidráulica 1 se encuentra en el nivel de 0.3 in [pu], es decir, el 30% de su valor nominal. Se recibe una demanda de potencia eléctrica de 0.9 [pu] para la red 4 en $t=0$. Controlando
- 30 la estructura de conversión, la potencia eléctrica de 0.9 [pu] se entrega en un tiempo del orden de 0.3 s. La turbina 300 se controla con un valor de consigna de potencia P_{ch} , correspondiente a la potencia eléctrica de 0.9 [pu]. Se aplica un nivel de apertura correspondiente a la válvula 310.

- Entre el tiempo $t = 0.3$ s y $t = 1.2$ s, la mayor parte de la potencia eléctrica adicional es proporcionada por el efecto de
- 35 rueda libre de la turbina 300. Por lo tanto, la velocidad de rotación de la turbina 300 disminuye progresivamente y la potencia mecánica aumenta progresivamente en este intervalo. La potencia eléctrica se mantiene en una meseta de 0.9 [pu].

- Entre el tiempo $t=1.2$ s y $t=2.3$ s, la potencia eléctrica se mantiene en una meseta de 0.9 [pu]. La potencia mecánica
- 40 aumenta más lentamente durante este intervalo, debiéndose el aumento de la potencia mecánica esencialmente al

aumento del nivel de apertura de la válvula 310. La velocidad de rotación de la turbina 300 continúa disminuyendo, pero permanece por encima del valor n_s .

5 En el momento $t = 2.3$ s, la velocidad de rotación de la turbina 300 alcanza el valor n_s . Entre el tiempo $t = 2.3$ s y $t = 2.6$ s, se requiere una limitación de potencia eléctrica, como se describe cuando se cumple la condición $n < n_s$. La potencia eléctrica disminuye, mientras que la potencia mecánica aumenta. La velocidad de rotación de la turbina 300 disminuye pero permanece por encima del valor n_{crit} . En el tiempo $t = 2.6$ s, la potencia mecánica alcanza el valor de la potencia eléctrica, aproximadamente 0.61 [pu].

10 Entre el tiempo $t = 2.6$ s y $t = 3.5$ s, la potencia mecánica de la turbina 300 y la potencia eléctrica aumentan, alcanzando un valor de 0.9 [pu]. La velocidad de rotación de la turbina 300 aumenta hasta que se excede el valor n_s .

15 Después de $t = 3.5$ s, la potencia mecánica supera los 0.9 [pu], de modo que la velocidad de rotación de la turbina 300 continúa aumentando. La turbina 300 se controla para mantener una potencia mecánica superior a 0.9 [pu] de modo que su velocidad de rotación continúe aumentando hasta $n = n_{opt}$.

20 El cálculo de la velocidad de rotación crítica de la turbina 300 se basa en los parámetros hidráulicos del circuito hidráulico 3. Otras limitaciones de naturaleza eléctrica también pueden limitar el aumento de potencia eléctrica que puede ser suministrada por la central hidráulica 1. Las limitaciones de corriente o flujo en el circuito eléctrico 2 también pueden limitar el aumento de potencia eléctrica que la central hidráulica 1 puede suministrar dinámicamente. Tales límites eléctricos se definen generalmente durante el diseño de la central hidráulica 1 y normalmente no requieren cálculos en tiempo real.

25 La figura 13 muestra un diagrama de control simplificado para una central hidráulica 1 de tipo FFSM.

Las diversas variables de funcionamiento de la central hidráulica 1 son:

- V_{trd} , V_{trq} : las tensiones activa y reactiva en el transformador 250, respectivamente;
- 30 - V_d , V_q : el punto de ajuste de voltaje activo y el punto de ajuste de voltaje reactivo en el convertidor 240, respectivamente;
- V_d' , V_q' : el punto de ajuste de voltaje activo y el punto de ajuste de voltaje reactivo en el convertidor 220, respectivamente;
- V_{DC} : la tensión en el enlace 230;
- V_{exc} : la tensión en el circuito de excitación 200;
- 35 - g : el nivel de apertura de la puerta peatonal incorporada;
- I_d , I_q : la corriente activa y reactiva entre el convertidor 240 y el transformador 250, respectivamente;
- I_d' , I_q' : la corriente activa y la corriente reactiva entre el convertidor 220 y la máquina eléctrica 210, respectivamente;
- I_f : la corriente inducida;
- 40 - ω : la velocidad de rotación de la máquina eléctrica 210;

- QSM: la potencia reactiva de la máquina eléctrica.

Los grados de libertad de control de la central hidráulica 1 son:

- 5
- V_d, V_q ;
 - $V_{d'}, V_{q'}$
 - g ;
 - V_{exc} .

10 Estos grados de libertad permiten controlar los objetivos para las siguientes métricas de salida:

- V_{DC} ;
 - V_{trd}, V_{trq} ;
 - la potencia reactiva de la máquina eléctrica;
- 15
- I_f : o el flujo electromagnético proporcional a I_f ;
 - la velocidad de rotación de la máquina eléctrica;
 - V_s : la tensión del estator de la máquina eléctrica.

La siguiente tabla muestra la influencia de cada grado de libertad en las métricas de salida:

20

| Grado de libertad | Posibles métricas de salida |
|-------------------|---|
| V_d | I_d, V_{DC} |
| V_q | I_q, V_{trd}, V_{trq} |
| $V_{d'}$ | Potencia activa de la máquina (torque, $I_{d'}$), V_{DC}, ω |
| $V_{q'}$ | Potencia reactiva de la máquina ($V_s, I_{q'}$) |
| g | Par de la máquina eléctrica, ω |

(continuación)

| Grado de libertad | Posibles métricas de salida |
|-------------------|---|
| V_{exc} | Flujo electromagnético (potencia reactiva de la máquina, V_s, I_f) |

Entre las variables globales de la central hidráulica 1 se pueden identificar las siguientes:

- 25
- potencia activa de salida: necesaria para el sistema de alimentación;
 - la tensión V_{DC} : necesaria para el funcionamiento de los convertidores, indicativa del equilibrio de potencia activa entre el convertidor 220 y el convertidor 240;
 - la velocidad de rotación ω : necesaria para una eficiencia óptima, indicativa del equilibrio de potencia activa entre la máquina eléctrica y el sistema hidráulico.

30

Las variables locales que permiten optimizar la operación incluyen:

- potencia reactiva de salida: impacta el funcionamiento del sistema de energía. Sólo afecta al convertidor 240;
- 5 - la potencia reactiva de la máquina: influye en el funcionamiento óptimo de la máquina. Sólo afecta al convertidor 220 y al circuito de excitación 200;
- flujo electromagnético de la máquina: influye en el funcionamiento óptimo de la máquina.

10 Debe controlarse para evitar una saturación del circuito magnético o una sobretensión en los terminales de la máquina. Sólo afecta al sistema de excitación y al convertidor 220.

Se pueden prever, por ejemplo, los siguientes modos de control de la central hidráulica 1:

- 15 - modo de control de potencia activa. Este tipo de control proporciona una respuesta rápida de la potencia activa, del orden de diez milisegundos. El objetivo es controlar la potencia activa de salida de la central hidráulica 1. Las variables de control utilizadas son, por orden de prioridad, la tensión activa V_d y la tensión activa V_d y el nivel de apertura g ;
- 20 - modo de control de tensión V_{DC} . El objetivo es controlar el voltaje V_{DC} . Las variables de control utilizadas son, por tanto, por orden de prioridad, la tensión activa V_d y la tensión activa V_d y el nivel de apertura g ;
- modo de control de velocidad angular ω . Las variables de control utilizadas son, por orden de prioridad, nivel de apertura g , tensión activa V_d y tensión activa V_d .

25 La figura 14 muestra con mayor precisión el diagrama principal de cómo se controla la central hidráulica en modo de control de potencia activa.

30 La referencia 301 se refiere a un módulo de cálculo y control hidráulico. La referencia 311 se refiere a un circuito de control para la válvula asociada con la turbina 300 (por ejemplo, un servomotor de esta válvula). La referencia 201 se refiere a un módulo de control de excitación. La referencia 202 se refiere a un limitador de flujo. La referencia 221 se refiere a un circuito de control del convertidor 220. La referencia 241 se refiere a un circuito de control del convertidor 240.

35 El módulo de control 301 recibe la altura del agua h y el punto de ajuste de potencia P_{ref} como parámetros de entrada. El módulo de control 301 determina un punto de ajuste de velocidad de rotación ω_{ref} y lo proporciona al circuito de control 311. El circuito de control 311 proporciona un punto de ajuste de control de nivel de apertura g y recibe el valor de la velocidad de rotación ω de la turbina.

40 El limitador de flujo 202 recibe el valor ω de la turbina 300 y proporciona un punto de ajuste $VSREF$ al módulo de control de excitación 201. El módulo 201 recibe un valor de voltaje V_s y aplica un punto de ajuste de voltaje de excitación V_{exc} al circuito de excitación 200.

El circuito 221 recibe el valor P_{ref} , la potencia P (potencia eléctrica real en la red 4 o potencia real de la máquina 210) suministrada a la red 4 y el valor de potencia reactiva Q_{SM} de la máquina 210. El circuito 221 aplica los puntos de ajuste de tensión V_d y V_q al convertidor 220. El circuito 241 recibe el valor Q_{ref} , el voltaje V_{DC} y la potencia reactiva Q_{tr} entre el convertidor 240 y el transformador 250. El circuito 241 aplica los puntos de ajuste de voltaje V_d y V_q al convertidor 240.

Por ejemplo, si la central hidráulica 1 recibe una orden de cambio de potencia activa P_{ref} desde la red 4, el convertidor 220 adapta la potencia de salida de la máquina eléctrica 210 a la nueva referencia de potencia. Esta adaptación normalmente se puede implementar dentro de los 50 ms posteriores al comando de cambio de potencia activa.

El convertidor 240 adapta entonces la potencia activa extraída para regular la tensión V_{DC} . La regulación de voltaje puede, por ejemplo, ser efectiva dentro de aproximadamente 200 milisegundos después de la orden de cambio de potencia activa.

La velocidad óptima para la turbina 300 se calcula por medio del módulo 301 para la potencia de salida requerida. El cálculo se puede realizar dentro de unas pocas decenas de milisegundos después del comando de cambio de potencia activa. La velocidad de rotación de la turbina 300 se ajusta entonces mediante la válvula, por ejemplo para aumentar la potencia mecánica suministrada por el sistema hidráulico, con el fin de ajustar la velocidad de rotación de la turbina 300 a su valor óptimo. El ajuste de la velocidad de rotación y el uso del efecto de marcha libre normalmente pueden continuar durante aproximadamente 120 segundos después de la orden de cambio de potencia activa.

La figura 15 muestra con mayor precisión el diagrama de control principal de la planta de energía hidráulica en modo de control basado en el voltaje CC V_{DC} . Los componentes ilustrados aquí son idénticos a los descritos en referencia a la figura 14.

El módulo de control 301 recibe la altura del agua h y el punto de ajuste de potencia P_{ref} como parámetros de entrada. El módulo de control 301 determina un punto de ajuste de velocidad de rotación ω_{ref} y lo proporciona al circuito de control 311. El circuito de control 311 proporciona un punto de ajuste de control del nivel de apertura g y recibe el valor de la velocidad de rotación ω de la turbina.

El limitador de flujo 202 recibe el valor ω de la turbina 300 y proporciona un punto de ajuste V_{SREF} al módulo de control de excitación 201. El módulo 201 recibe un valor de voltaje V_s y aplica un punto de ajuste de voltaje de excitación V_{exc} al circuito de excitación 200.

El circuito 221 recibe el valor P_{ref} , el voltaje V_{DC} y el valor de potencia reactiva Q_{SM} de la máquina 210. El circuito 221 aplica los puntos de ajuste de tensión V_d y V_q al convertidor 220. El circuito 241 recibe el valor Q_{ref} , la potencia P y la potencia reactiva Q_{tr} entre el convertidor 240 y el transformador 250. El circuito 241 aplica los puntos de ajuste de voltaje V_d y V_q al convertidor 240.

Por ejemplo, si la central hidráulica 1 recibe una orden de cambio de potencia activa P_{ref} desde la red 4, el convertidor 240 adapta la potencia de salida a la nueva referencia de potencia. Esta adaptación normalmente se puede implementar dentro de los 50 ms posteriores al comando de cambio de potencia activa.

- 5 El convertidor 220 adapta entonces la potencia activa de la máquina 210 para regular la tensión V_{DC} . La regulación del voltaje V_{DC} puede, por ejemplo, ser efectiva dentro de aproximadamente 200 milisegundos después de la orden de cambio de potencia activa.

- 10 La velocidad de rotación óptima para la turbina 300 se calcula por medio del módulo 301 para la potencia de salida requerida. El cálculo se puede realizar dentro de unas pocas decenas de milisegundos después del comando de cambio de potencia activa. La válvula ajusta entonces la velocidad de rotación de la turbina 300, por ejemplo para aumentar la potencia mecánica suministrada por el sistema hidráulico, para ajustar la velocidad de rotación de la turbina 300 a su valor óptimo. El ajuste de la velocidad de rotación y el uso del efecto de marcha libre normalmente pueden continuar durante aproximadamente 120 segundos después de la orden de cambio de potencia activa.

- 15 La figura 16 ilustra con mayor precisión el esquema de control del modo de control de la planta de energía hidráulica basado en la velocidad angular ω . Los componentes ilustrados aquí son idénticos a los descritos en referencia a la figura 14.

- 20 El módulo de control 301 recibe la altura del agua h y el punto de ajuste de potencia P_{ref} como parámetros de entrada. El módulo de control 301 determina un punto de ajuste de velocidad de rotación ω_{ref} y lo proporciona al circuito de control 311. El circuito de control 311 proporciona un punto de ajuste de control del nivel de apertura g y recibe el valor de la velocidad de rotación ω de la turbina 300.

- 25 El limitador de flujo 202 recibe el valor ω de la turbina 300 y proporciona un punto de ajuste V_{SREF} al módulo de control de excitación 201. El módulo 201 recibe un valor de voltaje V_s y aplica un punto de ajuste de voltaje de excitación V_{exc} al circuito de excitación 200.

- 30 El circuito 221 recibe el valor ω , el valor ω_{ref} y el valor de potencia reactiva Q_{SM} de la máquina 210. El circuito 221 aplica los puntos de ajuste de tensión V_d y V_q al convertidor 220. El circuito 241 recibe el valor Q_{ref} , el voltaje V_{DC} y la potencia reactiva Q_{tr} entre el convertidor 240 y el transformador 250. El circuito 241 aplica los puntos de ajuste de voltaje V_d y V_q al convertidor 240.

- 35 Por ejemplo, si la central hidráulica 1 recibe una orden de cambio de potencia activa P_{ref} desde la red 4, la velocidad de rotación óptima de la turbina 300 se calcula por medio del módulo 301, para la salida de potencia requerida. El cálculo se puede realizar dentro de unas pocas decenas de milisegundos después del comando de cambio de potencia activa.

- 40 La potencia mecánica de la máquina 300 es entonces regulada por la válvula, por ejemplo para aumentar la potencia mecánica suministrada por el sistema hidráulico, con el fin de converger hacia la consigna de potencia requerida por

la red 4.

Luego, el convertidor 220 adapta la velocidad de rotación de la turbina 300 de modo que la velocidad de rotación real converja hacia la velocidad de rotación óptima calculada.

5

A lo largo de este proceso, el convertidor 240 adapta la potencia eléctrica transferida a la red 4 para regular la tensión V_{DC} a su valor nominal.

10

En caso de caída de frecuencia en la red AC 4, por ejemplo, debido a la pérdida de una fuente conectada al mismo, la invención puede ayudar ventajosamente a compensar la correspondiente caída de inercia. Para este fin, la central hidráulica 1 puede ser accionada para emular una inercia mayor que su inercia real. Para ello, la velocidad de rotación de la turbina 300 se modifica proporcionalmente a la variación de frecuencia en la red 4, según la siguiente relación:

15

$$\Delta n = K_{synth} * \Delta f,$$

20

Con Δn la variación controlada de la velocidad de rotación, Δf el valor de la variación de frecuencia transitoria en la red 4, y K_{synth} una constante de inercia emulada. En virtud de las propiedades de variación de velocidad de la turbina 300, es posible emular una inercia de la masa giratoria en el valor K_{synth} mayor que su inercia real. Mientras la velocidad de rotación de la masa giratoria se mantenga por encima de la velocidad crítica n_{crit} , la velocidad de rotación de la turbina 300 puede reducirse para ayudar a compensar la inercia reducida de la red 4.

El valor máximo K_{sm} de la constante de inercia emulada K_{synth} se puede definir de la siguiente manera:

25

$$K_{sm} = (n_{optinit} - n_{crit}) / \Delta f_{max}$$

Con Δf_{max} el límite inferior de la variación máxima de frecuencia transitoria especificada por el operador de red 4.

30

En el ejemplo descrito anteriormente, la red 4 es del tipo AC. También es posible conectar la central hidráulica 1 a una red CC 4, utilizando una estructura de conversión adecuada.

En los ejemplos descritos anteriormente, la máquina hidráulica 300 funciona en modo turbina. También se pueden proporcionar los mismos modos de control para la central hidráulica 1 operada en modo de bomba.

35

REIVINDICACIONES

1. Método para controlar una central hidráulica (1), que comprende una turbina de velocidad variable (300) que acciona un generador eléctrico (210), una estructura de conversión (220, 230, 240) conectada a tal generador (210) por un lado y a una red eléctrica (4) por otro lado, estando configurada tal estructura de conversión para convertir un voltaje de CA generado por el generador en un voltaje de CA de una frecuencia diferente a la generada por el generador o en un voltaje de DC, que comprende las etapas de:
- tener una ley que regula la velocidad de rotación característica mínima en función de una potencia mecánica característica entregada por la turbina, asegurando tal velocidad de rotación característica mínima la estabilidad de la turbina;
 - operar la central hidráulica con un valor de consigna inicial de la potencia eléctrica a suministrar a la red eléctrica;
 - obtener un valor de altura del agua en la entrada de la turbina (300);
 - se determina una caída de frecuencia en tal red eléctrica (4);
 - definir un nuevo valor de consigna de potencia eléctrica (Pes) superior al valor inicial, para que la velocidad de rotación de la turbina (300) disminuya en proporción a la caída de frecuencia determinada cuando se recibe el nuevo valor de potencia eléctrica a suministrar a la red eléctrica;
 - convertir tal nuevo valor de potencia eléctrica (Pes) a suministrar en un nuevo valor de consigna de potencia mecánica P_{ch} ;
 - transformar tal nuevo valor de consigna de potencia mecánica P_{ch} en una potencia mecánica característica (P11) a entregar transformando tal nuevo valor de consigna de potencia eléctrica (Pes) en tal potencia mecánica característica (P11) a entregar;
 - con base en tal ley, para que se entregue tal potencia mecánica característica (P11), determinar la velocidad de rotación mínima n_{crit} de la turbina (300);
 - controlar la central hidráulica (1) para entregar una potencia eléctrica igual al nuevo valor de consigna de potencia eléctrica (Pec) y para mantener la velocidad de rotación de la turbina (300) por encima de la velocidad de rotación mínima determinada n_{crit} .
2. Método de control de conformidad con la reivindicación 1, en donde tal etapa de controlar la central hidráulica (1) para entregar una potencia eléctrica igual al nuevo valor de consigna de potencia eléctrica (Pec) comprende la aplicación de sucesivos puntos de consigna de potencia eléctrica que aumentan entre el valor de consigna de potencia eléctrica inicial y tal nuevo valor de consigna de potencia eléctrica (Pec).
3. Método de control de conformidad con la reivindicación 2, que comprende las etapas de:
- transformar sucesivas consignas de potencia eléctrica en sucesivas consignas de potencia

mecánica características;

- en base a tal ley, para cada una de las consignas características de potencia mecánica, determinar la velocidad de rotación mínima correspondiente de la turbina (300).

5 4. Método de control de conformidad con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la central hidráulica (1) se controla para entregar una potencia eléctrica P_{es} a la red eléctrica igual al nuevo valor de consigna de potencia eléctrica P_{ec} y para mantener la velocidad de rotación de la turbina (300) por encima de una velocidad de seguridad n_s , donde $n_s > n_{crit}$.

10 5. Método de control de conformidad con la reivindicación 4, que comprende las etapas de:

- a) obtener la velocidad de rotación instantánea n de la turbina (300);
- b) si $n_s > n > n_{crit}$, controlar la central hidráulica (1) con una consigna de potencia eléctrica $P_{ec} = P_{es} * (n - n_{crit}) / (n_s - n_{crit})$;
- c) repetir los pasos a) y b).

15

6. Método de control de conformidad con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende las etapas de:

- obtener la velocidad máxima de variación $RoCoP$ de la potencia mecánica P_m de la turbina (300), donde $RoCoP = dP_m/dt$;
- obtener la inercia H_t de la masa incluyendo la turbina (300) y el generador (220);
- calcular una cantidad de energía cinética W_{ec} disponible debido al efecto de rueda libre, donde $W_{ec} = H_t * (n_{optinit}^2 - n_{crit}^2)$, donde $n_{optinit}$ es la velocidad para el valor de consigna de potencia eléctrica inicial a suministrar a la red eléctrica.

20

25 7. Método de control de conformidad con la reivindicación 6, que comprende las etapas de:

- determinar un valor de consigna de potencia mecánica inicial $P_{mecainit}$ correspondiente al valor de potencia eléctrica inicial a suministrar a la red eléctrica;
- si $W_{req} > W_{ec}$, donde $W_{req} = (P_{ch} - P_{mecainit})^2 / (2 * RoCoP)$, calcular un valor de potencia mecánica P_{lim} confirmando $P_{lim} < P_{ch}$ y $(P_{lim} - P_{mecainit})^2 / (2 * RoCoP) < W_{ec}$;
- controlar temporalmente la central hidráulica (1) con un valor de consigna de potencia mecánica igual a P_{lim} o con un valor de consigna de potencia eléctrica a suministrar a la red eléctrica correspondiente a tal valor de consigna de potencia mecánica P_{lim} .

30

8. Método de control de conformidad con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde tal planta de energía hidráulica controlada (1) incluye una estructura de conversión de tipo FFSSM (220, 230, 240) que incluye un primer convertidor CA/DC (220) conectado a tal motor eléctrico (210).

35

9. Método de control de conformidad con la reivindicación 8, en donde tal central eléctrica (1) se controla en un modo de control de potencia activa aplicando el nuevo valor de potencia eléctrica (P_{es}) a suministrar a la red eléctrica a un circuito de control del primer convertidor CA/CC (220).

40

10. Método de control de conformidad con la reivindicación 8, en donde tal planta de energía (1) se controla en un modo de control basado en un voltaje de CC en la estructura de conversión aplicando un punto de ajuste para tal voltaje de CC a un circuito de control del primer convertidor de CA/CC (220).
- 5 11. Método de control de conformidad con la reivindicación 8, en donde tal central hidráulica (1) se controla en un modo de control basado en la velocidad de rotación de la turbina aplicando un punto de ajuste para tal velocidad de rotación de la turbina a un circuito de control del primer convertidor CA/CC (220).

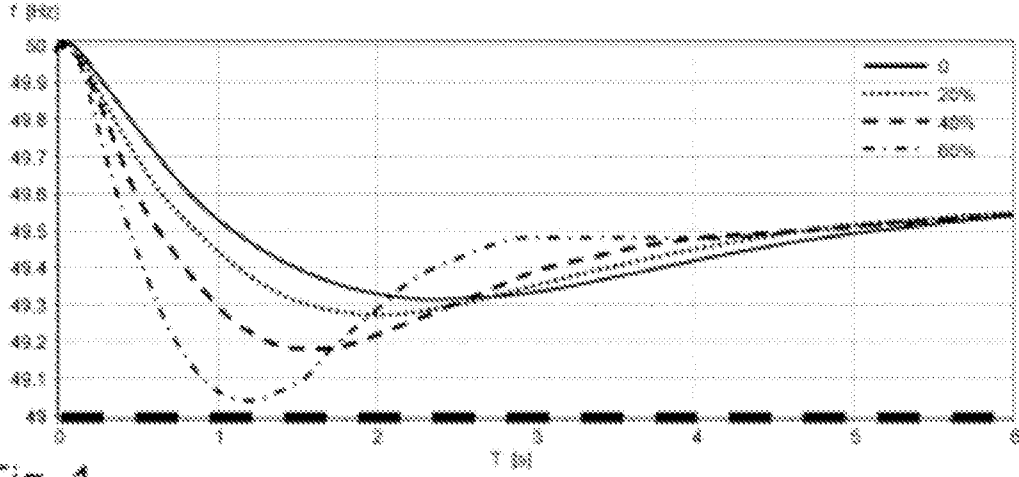


Fig. 1

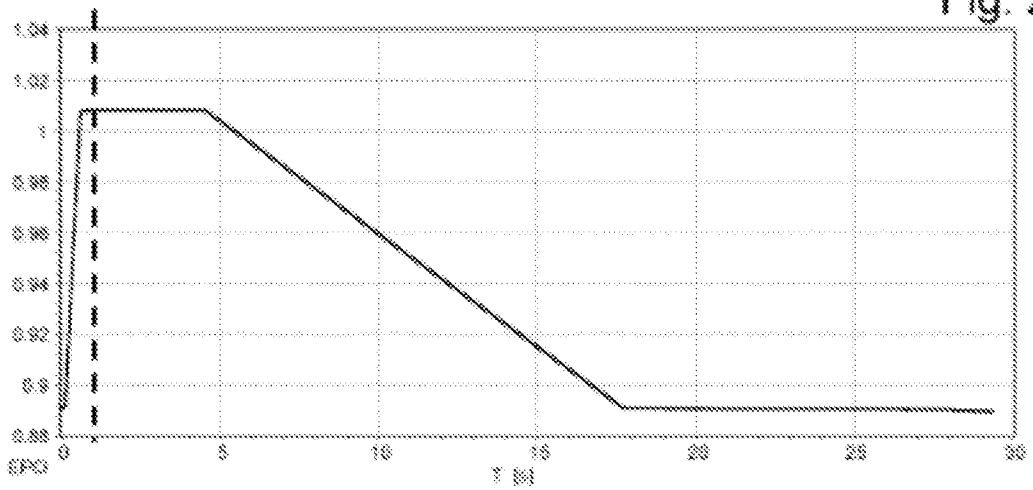


Fig. 2

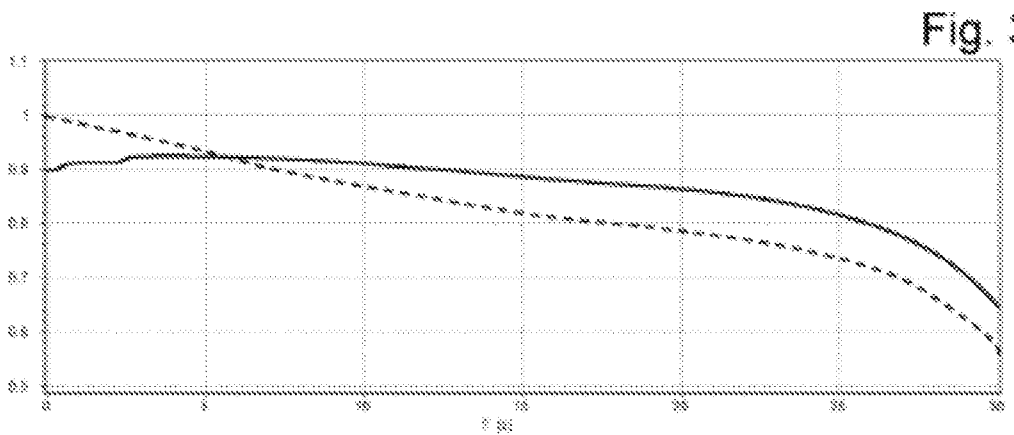


Fig. 3

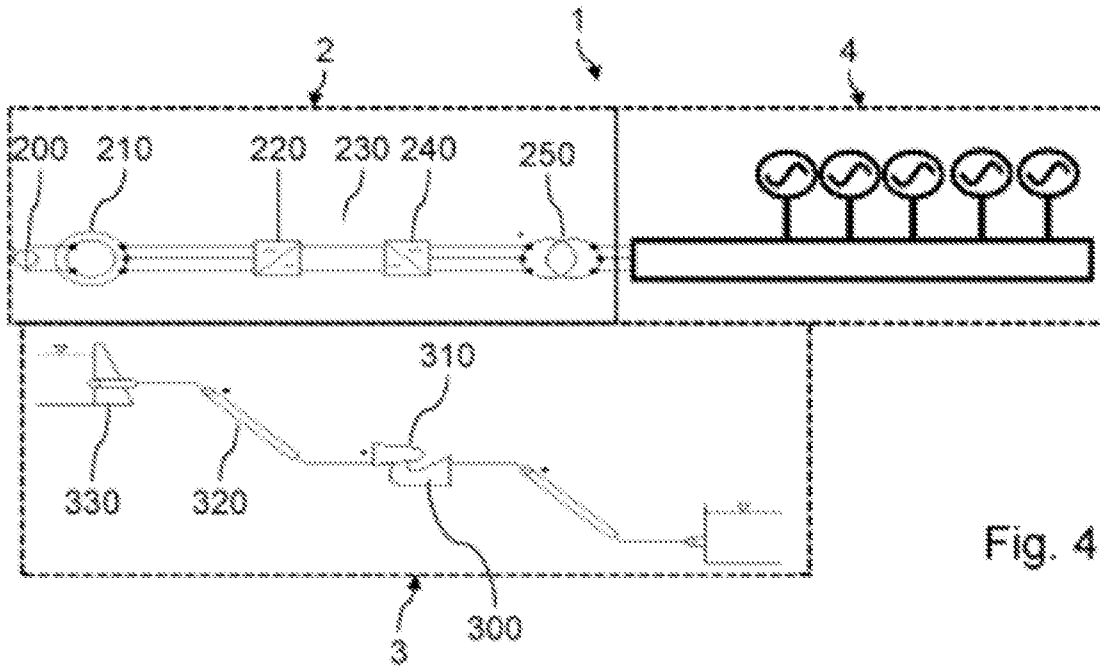


Fig. 4

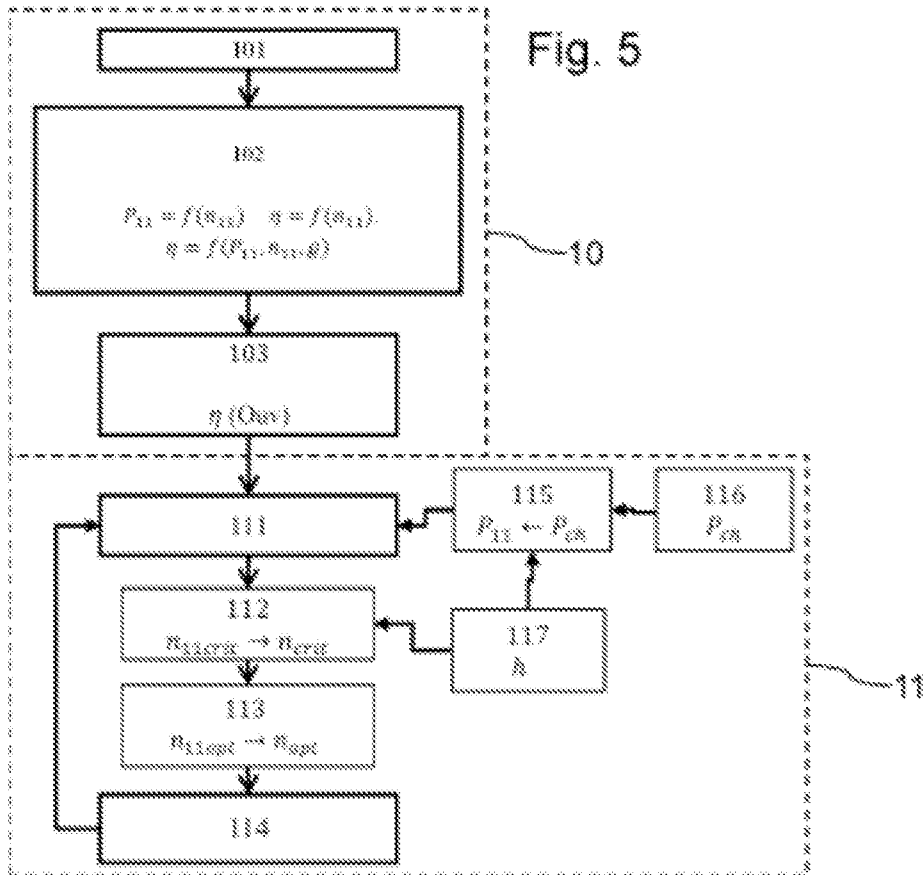


Fig. 5

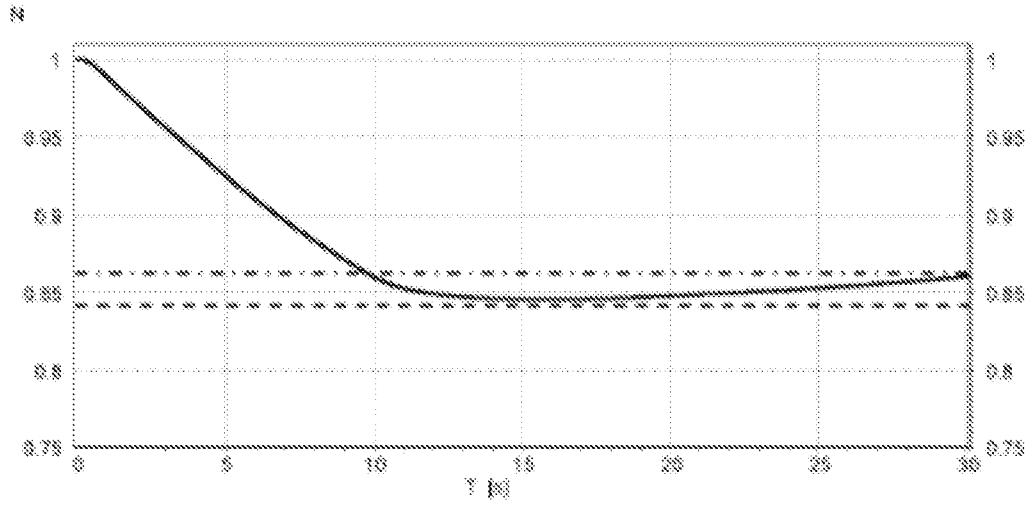


Fig. 6

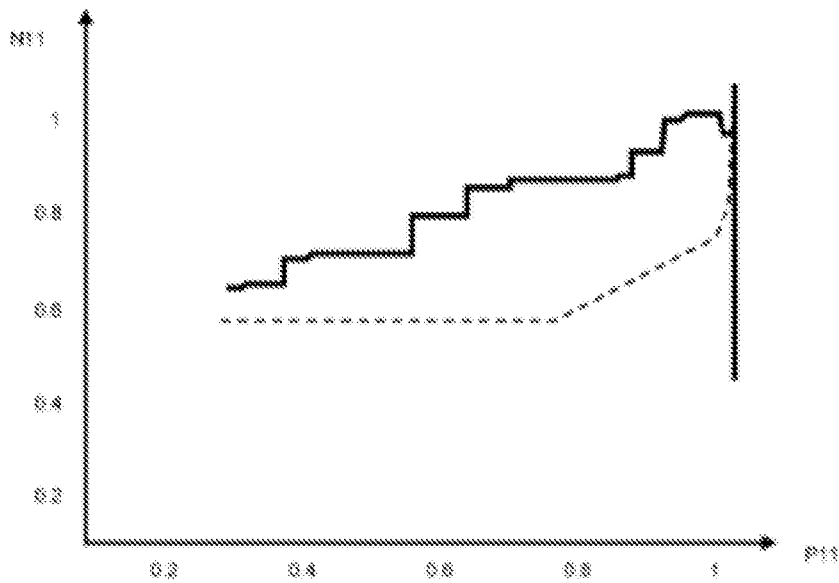
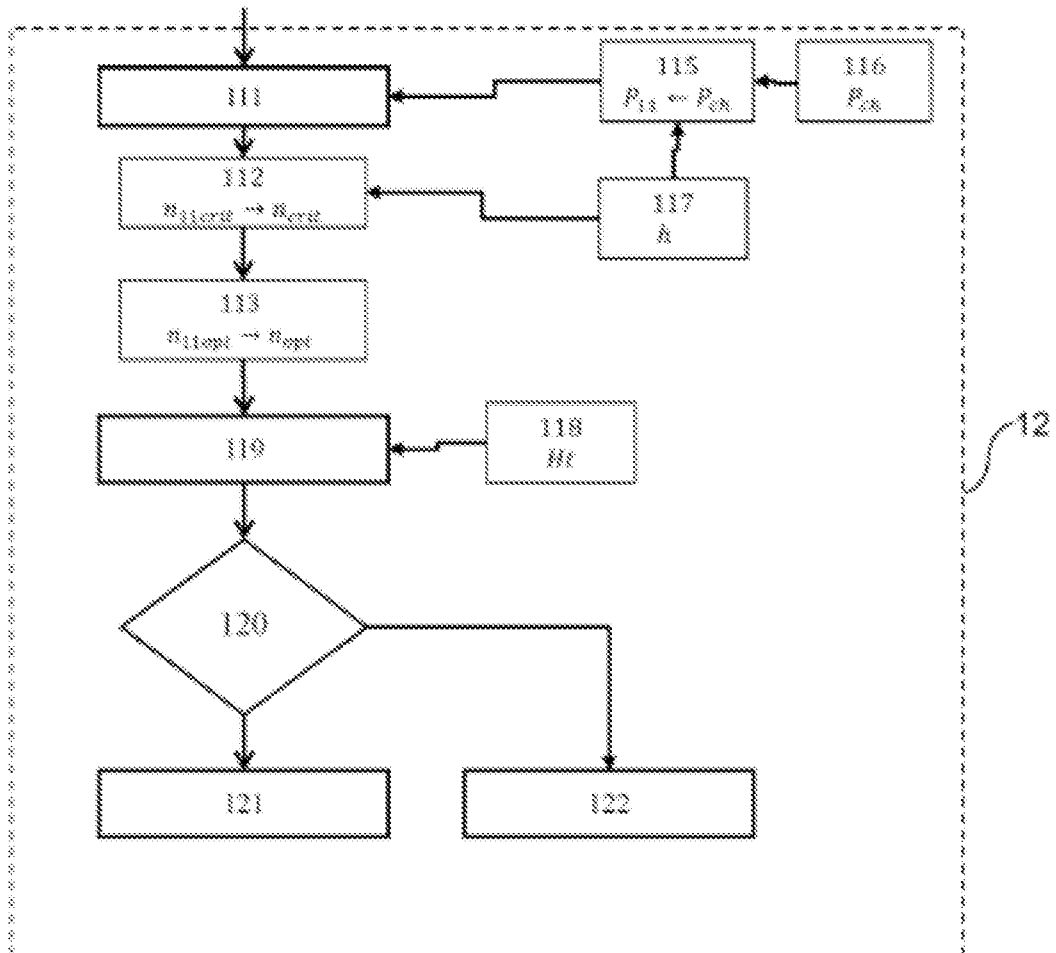


Fig. 7

Fig. 8



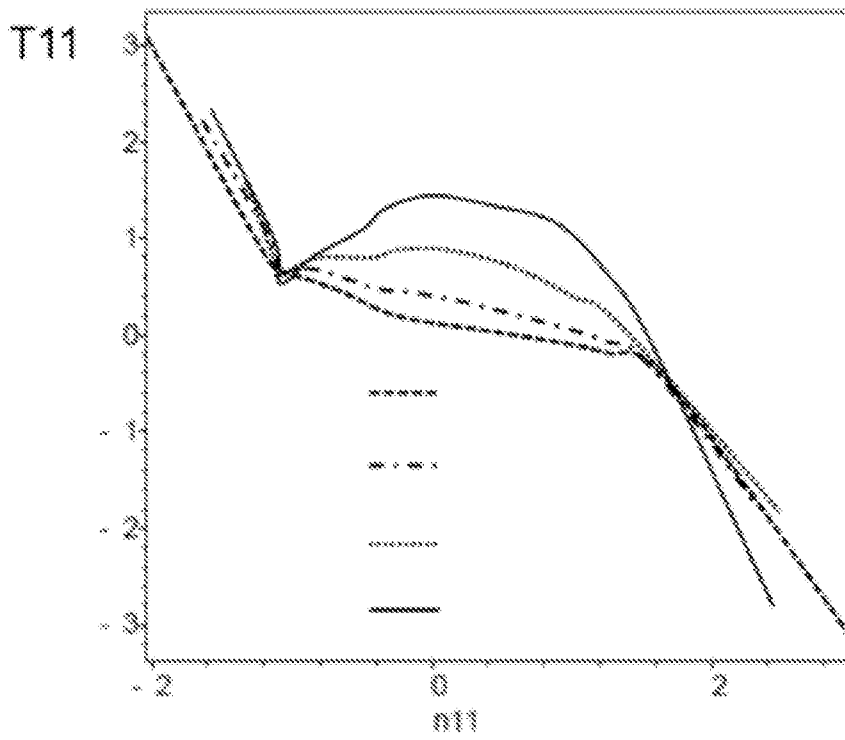


Fig. 9

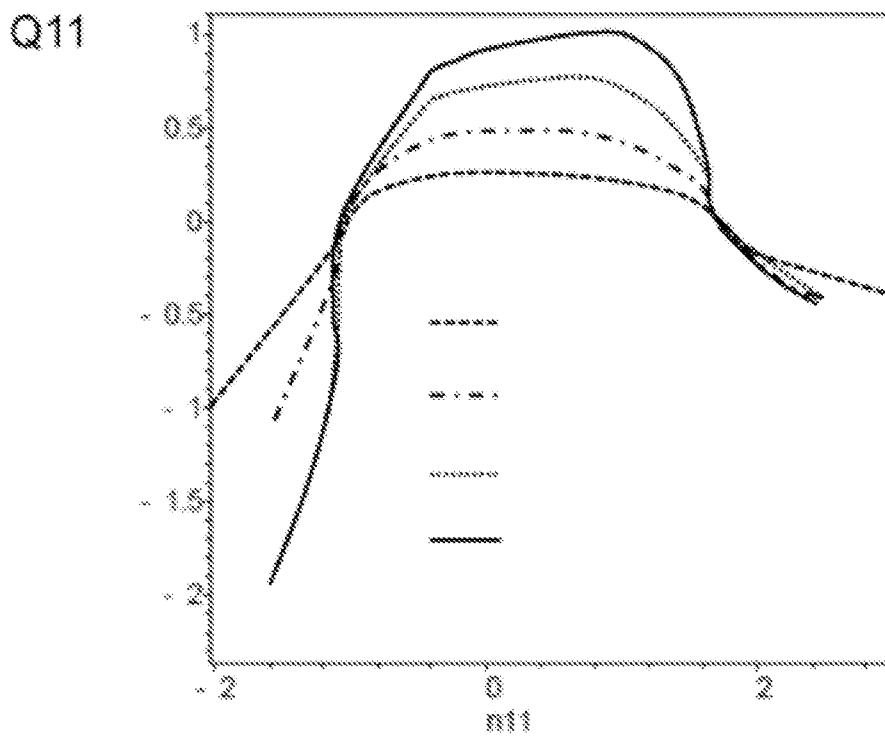


Fig. 10

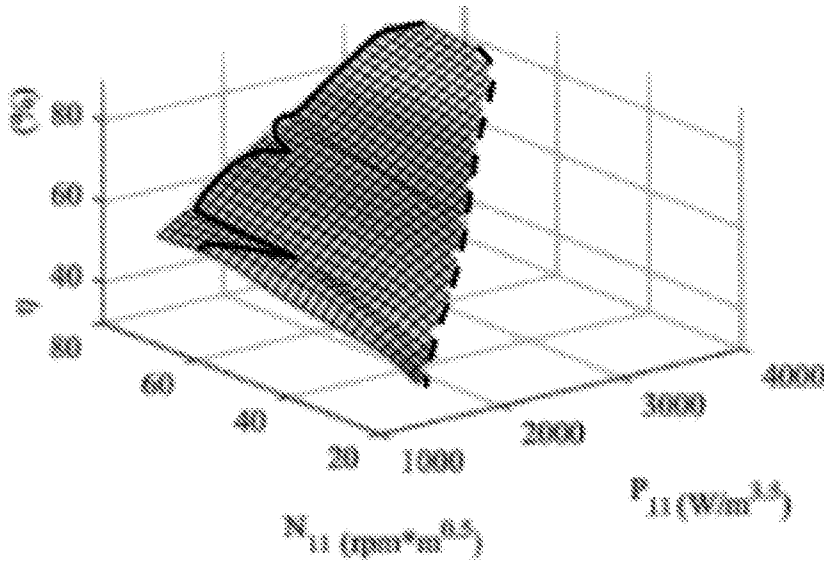


Fig. 11

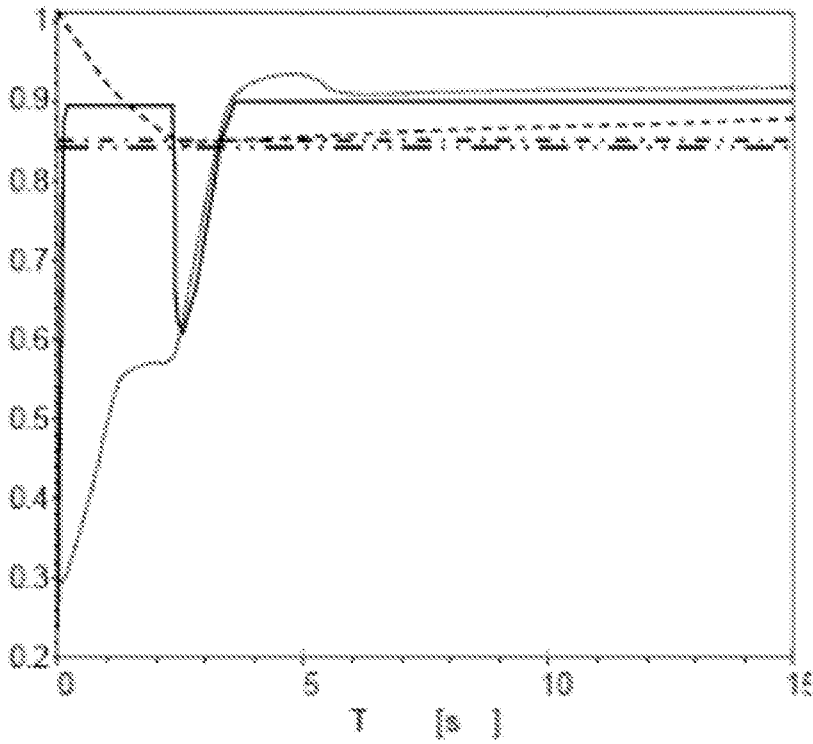


Fig. 12

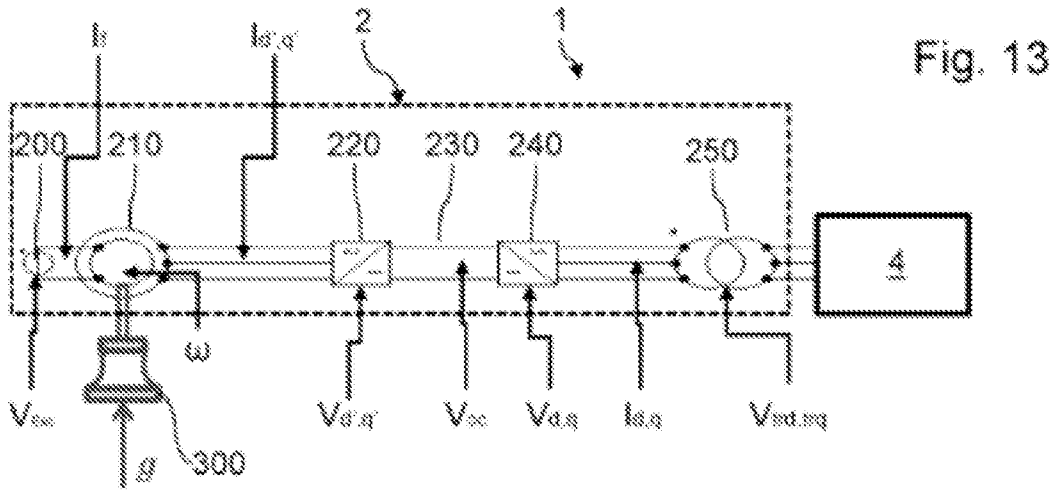


Fig. 13

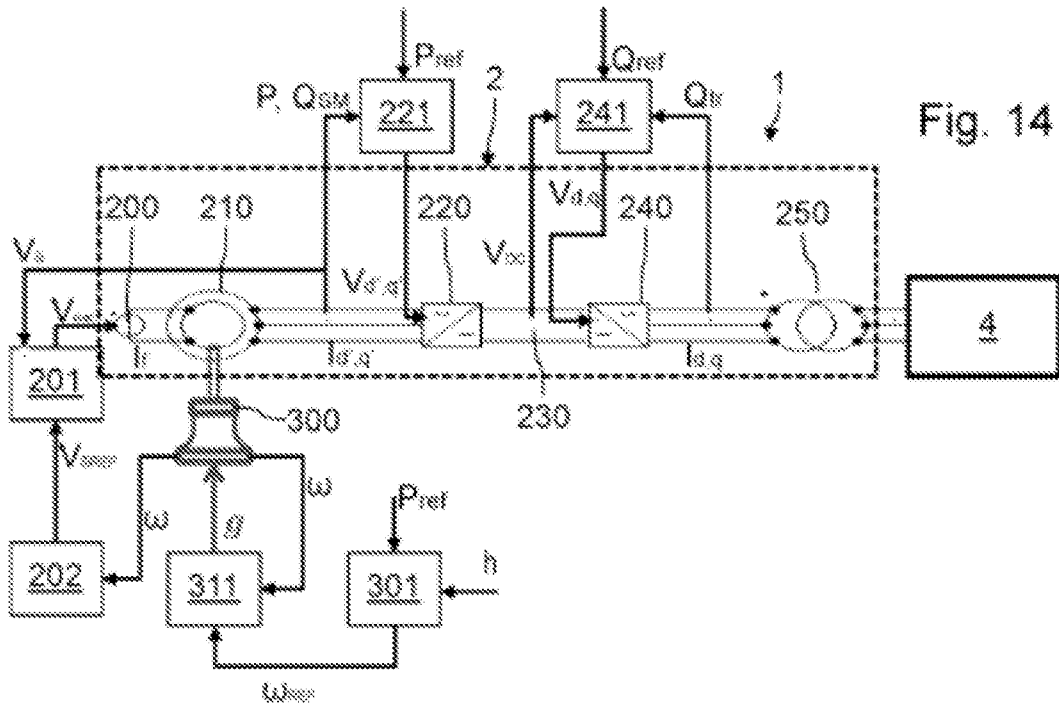


Fig. 14

Fig. 17

