

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 776 410**

51 Int. Cl.:

H02J 3/24

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.11.2016** **E 16198705 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.12.2019** **EP 3322060**

54 Título: **Método de amortiguación de oscilaciones electromecánicas en un sistema de alimentación**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
30.07.2020

73 Titular/es:

**NORDEX ENERGY GMBH (100.0%)
Langenhorner Chaussee 600
22419 Hamburg, DE**

72 Inventor/es:

**HAMANN, NIELS;
DE RIJCKE, SIMON y
BODE, FLORIAN**

74 Agente/Representante:

ROEB DÍAZ-ÁLVAREZ, María

ES 2 776 410 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 de amortiguación de oscilaciones electromecánicas en un sistema de alimentación.

5 La presente invención se refiere a un método de amortiguación de oscilaciones electromecánicas en un sistema de alimentación y a un parque eólico adaptado para proporcionar amortiguación de oscilaciones electromecánicas en el sistema de alimentación.

El término sistema de alimentación se usa en el sentido de la red eléctrica, así como el término voltaje del sistema se
10 usa como sinónimo de voltaje de red. Los términos turbina de energía eólica y parque eólico significan generador de turbina eólica (WTG) y planta de energía eólica (WP), respectivamente.

El documento WO 2013/004252 A2 se refiere a un método para amortiguar las oscilaciones del sistema. Las
15 oscilaciones pueden amortiguarse controlando, por ejemplo, generadores de turbinas eólicas para inyectar potencia al sistema en antifase con las oscilaciones del sistema. En lugar de controlar uno o más generadores de turbina eólica para generar la misma señal de potencia antifásica, se controla una pluralidad de generadores de turbina eólica de modo que cada uno de ellos solo genera una parte de la señal de potencia antifásica mientras todos los generadores de turbina eólica en combinación generan toda la señal de potencia antifásica. Para la amortiguación de las
20 oscilaciones del sistema, siempre se determinan al menos dos señales de referencia para dos unidades generadoras de potencia diferentes.

El documento EP 2 499 714 A2 desvela una turbina eólica para controlar las oscilaciones de potencia en un sistema de un sistema de alimentación. La turbina eólica comprende palas de rotor para girar por el viento, un generador eléctrico acoplado rotativamente a las palas del rotor, un convertidor de potencia que responde a una electricidad
25 generada por el generador eléctrico, el convertidor de potencia para convertir la electricidad generada a una frecuencia y un voltaje adecuados para el suministro al sistema de alimentación, y un convertidor de potencia para regular el voltaje en el sistema complementado por la modulación de la potencia real para amortiguar las oscilaciones de potencia. Para lograr la amortiguación de las oscilaciones de potencia, el convertidor de potencia regula al menos el voltaje del sistema en función de la potencia real para la amortiguación. Además, se desvela en este documento que
30 la amortiguación de la oscilación de potencia para oscilaciones de potencia entre áreas se realiza mediante los llamados dispositivos STATCOM que modulan el voltaje en el punto de interconexión. Se sabe que la potencia entre áreas se produce en sistemas de transmisión con líneas largas y grandes distancias físicas entre las principales fuentes de generación. Típicamente, después de una perturbación, grupos de generadores en una primera región geográfica oscilan contra otro grupo de generadores en una segunda región geográfica separada de la primera región
35 por una serie de largas líneas de transmisión. Naturalmente, estas oscilaciones son de muy baja frecuencia (típicamente entre 0,1 Hz y 0,7 Hz) y están pobremente amortiguadas en ausencia de amortiguación suplementaria.

El documento US 8.618.694 B2 desvela un método para amortiguar las oscilaciones de la potencia eléctrica en un sistema de alimentación. Un controlador está configurado para generar una primera señal de control para hacer que
40 un inversor de la primera turbina eólica module la salida de potencia eléctrica de la primera turbina eólica para amortiguar las oscilaciones de una frecuencia en la potencia eléctrica en el sistema de alimentación y generar una segunda señal de control para controlar el inversor de la segunda turbina eólica para modular la salida de potencia eléctrica por la segunda turbina eólica para amortiguar las oscilaciones de una frecuencia diferente en la potencia eléctrica en el sistema de alimentación.

45 Los documentos EP 2 516 164 A2 y US 2016/0141991 A1 se refieren a las oscilaciones de resonancia subsíncrona (SSR) en el sistema de alimentación. Las oscilaciones de SSR se producen cuando el sistema de alimentación eléctrica intercambia energía con el generador de turbina a una o más frecuencias por debajo de la frecuencia síncrona del sistema eléctrico. Por lo general, se deben considerar dos frecuencias. Tomando un sistema de 60 Hz, una
50 frecuencia supersíncrona puede producirse aproximadamente a unos 70 Hz, mientras que la frecuencia SSR es de aproximadamente 10 Hz. Por lo general, la frecuencia supersíncrona está amortiguada por los componentes del sistema mecánico, mientras que la frecuencia subsíncrona a aproximadamente 10 Hz requiere una amortiguación adicional.

55 El documento EP 2 594 004 B1 se refiere a oscilaciones entre áreas que típicamente se producen en grandes sistemas de alimentación interconectados con dos o más áreas interconectadas a través de líneas de transmisión de corriente alterna (CA) relativamente débiles. Si se excita una oscilación de potencia entre dos áreas de un sistema de alimentación, los ángulos del rotor de las máquinas síncronas en un área comenzarán a oscilar en contrafase con las máquinas síncronas en la otra área y, por lo tanto, forzarán un flujo de potencia activa de un lado a otro entre las áreas.

60 Para amortiguar las oscilaciones de potencia en la red eléctrica, un controlador de dispositivo cambia la referencia de

velocidad de rotación del sistema mecánico del generador de potencia para extraer o depositar energía de la potencia de salida eléctrica del dispositivo convertidor. Por lo tanto, la potencia de salida eléctrica se modula para amortiguar las oscilaciones de potencia.

- 5 El documento US 2010/0109447 A1 se refiere a un control de transmisión de área amplia de parques eólicos en el que la estabilidad dinámica y de voltaje de los sistemas de transmisión de servicios públicos se mejora mediante un control coordinado. Las mediciones eléctricas del sistema, incluidos los fasores sincronizados, se suministran a uno o más controladores de parques eólicos que a su vez realizan una función de regulación que mejora la amortiguación de las oscilaciones electromecánicas o el rendimiento de voltaje en el sistema de servicios públicos. La estructura de control
10 es de naturaleza descentralizada.

El problema técnico de la invención es proporcionar un método, así como un parque eólico para una amortiguación mejorada de las oscilaciones electromecánicas en el sistema de alimentación.

- 15 El problema se resuelve con el método según la reivindicación 1 y un parque eólico según la reivindicación 8.

Según la invención, se proporciona un método para amortiguar las oscilaciones electromecánicas en un sistema de alimentación. La amortiguación en forma de atenuación tiene lugar inyectando potencia reactiva generada por una o más turbinas de energía eólica en el sistema de alimentación. El controlador de potencia reactiva está adaptado para
20 determinar un valor de potencia reactiva de referencia en función del voltaje real del sistema ($Q = f(U)$). Un aspecto importante del controlador de potencia reactiva es estabilizar el voltaje del sistema inyectando potencia reactiva. El método según la invención comprende medir datos de oscilación asociados con el sistema de alimentación. Los datos de oscilación medidos se filtran para eliminar un desplazamiento de estado estable de los datos. El método según la invención comprende además una etapa de determinar un valor de frecuencia y un valor de amplitud a partir de los
25 datos de oscilación filtrados y activar la amortiguación si el valor de frecuencia de los datos de oscilación filtrados pertenece a un intervalo de frecuencia predeterminado y/o el valor de amplitud de los datos de oscilación filtrados excede un valor umbral predeterminado. Si se activó la amortiguación de las oscilaciones electromecánicas en el sistema de alimentación, la amortiguación de los datos de oscilación se controla para compensar una ganancia y un retraso causado por el controlador de potencia reactiva al valor de potencia reactiva de referencia. Por lo tanto, la
30 activación de la amortiguación compensa el retraso del bucle de control de potencia reactiva inyectada. El método de amortiguación de oscilaciones electromecánicas utiliza un valor de frecuencia y/o un valor de amplitud para detectar las oscilaciones electromecánicas y activar la amortiguación. La amortiguación según la invención a veces se denomina amortiguación conmutable, debido a su etapa de activación. La ventaja de la amortiguación conmutable para oscilaciones electromecánicas es que se evita cualquier interferencia con la dinámica del controlador durante las
35 operaciones normales. En particular, las partes de la dinámica del controlador regidas por los requisitos de un código de red no cambian siempre que los datos de oscilación medidos no indiquen ninguna oscilación electromecánica. Por razones de claridad, se debe observar que los términos "pertenece" o "que pertenece" se refieren a una cantidad determinada dentro de un determinado intervalo de frecuencia.

40 Además de la amortiguación de oscilación de potencia conmutable mencionada anteriormente, se proporciona una amortiguación de oscilación de potencia continua según la invención. La amortiguación de oscilación de potencia continua comprende las etapas de corregir una ganancia y un cambio en los datos de oscilación filtrados. Estos datos de oscilación se proporcionan como datos de oscilación corregidos. La corrección de los datos de oscilación corregidos logra compensar una ganancia y un retraso del valor de potencia reactiva de referencia causado por el controlador de
45 potencia reactiva. Se proporciona un punto de ajuste de potencia reactiva basado en el valor de potencia reactiva de referencia corregido y la diferencia entre los datos de oscilación y los datos de oscilación corregidos. La última etapa compensa la influencia de las oscilaciones electromecánicas en el valor de la potencia reactiva de referencia. La ventaja de la amortiguación de oscilación de potencia de operación continua es que la dinámica del sistema no se ve alterada por la conmutación o activación de la amortiguación según los datos de oscilación.
50

En una realización preferida de la invención, los datos de oscilación medidos corresponden al voltaje real del sistema o al valor de potencia reactiva de referencia según lo determinado por el controlador de potencia activa, dependiendo del voltaje real del sistema. Con respecto a la amortiguación deseada de las oscilaciones electromecánicas, ambos valores son igualmente adecuados para determinar una cantidad de potencia reactiva al sistema que logre una
55 amortiguación adecuada.

Los datos de oscilación medidos se filtran preferentemente con paso de banda para eliminar cualquier influencia en frecuencias más altas y/o más bajas que las frecuencias de las oscilaciones electromecánicas en la amortiguación. Las frecuencias más altas y/o más bajas que las frecuencias de las oscilaciones electromecánicas no contribuyen al
60 comportamiento dinámico. Dependiendo de los detalles de la implementación, el filtro de paso de banda también puede

ser un filtro de parada de banda.

El intervalo de frecuencia predeterminado utilizado para detectar oscilaciones electromecánicas se encuentra entre 0,2 Hz y 1,5 Hz. El intervalo de frecuencia predeterminado puede elegirse entre 0,5 Hz y 1,1 Hz y más preferentemente entre 0,6 Hz y 1,0 Hz puede ser suficiente.

Para el procesamiento de los datos de oscilación preferentemente se usa después de filtrar un elemento de retraso de 2º orden. El elemento de retraso de 2º orden en lo sucesivo también se denomina elemento PT2. El comportamiento del elemento de retraso de 2º orden ha demostrado, en particular, ser adecuado para compensar la dinámica del sistema y, en particular, el comportamiento dinámico del controlador de potencia reactiva. En una realización preferida de la invención, los parámetros del elemento PT2 dependen de al menos uno de los siguientes datos: frecuencia, ganancia, fase y amplitud. Para la configuración del elemento de retraso de 2º orden, la amplitud puede omitirse, sin embargo, la amplitud puede ser utilizada para proporcionar más flexibilidad al elemento de retraso de 2º orden en el modelado de una ganancia. Cada uno de estos valores, en particular, todos estos valores ayudan a definir un elemento PT2 adecuado que proporciona la atenuación y el cambio de fase correctos a los datos de oscilación medidos.

El problema subyacente de la invención también se resuelve mediante un parque eólico según la reivindicación 8.

El parque eólico inventivo está conectado al sistema de alimentación. El parque eólico comprende una pluralidad de turbinas de energía eólica. Además, el parque eólico comprende un controlador de parque eólico dispuesto para generar puntos de ajuste para potencia activa y potencia reactiva para cada una de las turbinas de energía eólica. El parque eólico comprende además un dispositivo de medición para medir datos de oscilación en el sistema de alimentación. Cada una de las turbinas de energía eólica comprende un generador de potencia impulsado por un rotor eólico y un convertidor adaptado para proporcionar potencia activa y potencia reactiva a un sistema de alimentación. Para estabilizar el sistema de alimentación, se proporciona un controlador de potencia reactiva para proporcionar un valor de potencia reactiva de referencia dependiendo del valor real del sistema. El valor real del sistema es el voltaje real del sistema. Además, se incluye una unidad de filtro dentro del controlador del parque. La unidad de filtro puede ser una parte de software del controlador de potencia reactiva o un elemento de hardware separado. La unidad de filtro está adaptada para eliminar un desplazamiento de estado estable de los datos de oscilación. Un dispositivo de amortiguación de oscilación de potencia (dispositivo POD) está incluido adicionalmente dentro del controlador del parque. El dispositivo POD está dispuesto para amortiguar los datos de oscilación para compensar una ganancia y un retraso aplicado al valor de potencia reactiva de referencia por el controlador de potencia reactiva. El retraso del valor de potencia reactiva de referencia corresponde a un retraso en la potencia reactiva inyectada. El controlador del parque está adaptado para emitir un punto de ajuste de potencia reactiva a al menos una de la pluralidad de las turbinas de energía eólica en función del valor de potencia reactiva de referencia y la salida compensada del dispositivo POD. El dispositivo POD funciona a nivel del controlador del parque y busca compensar una ganancia y un retraso en el valor de potencia reactiva de referencia generada por las oscilaciones electromecánicas en el voltaje del sistema.

En una realización preferida de la invención, el controlador del parque comprende una unidad de conmutación para determinar un valor de frecuencia y un valor de amplitud a partir de los datos de oscilación filtrados. Además, se proporciona un valor umbral para el valor de amplitud y un intervalo de frecuencia predeterminado para los valores de frecuencia para detectar oscilaciones electromecánicas en el sistema de alimentación. El dispositivo de conmutación está adaptado para cambiar el dispositivo POD en su estado de encendido según los siguientes criterios: el valor de frecuencia determinado a partir de los datos de oscilación filtrados que pertenecen al intervalo de frecuencia predeterminado y/o el valor de amplitud determinado a partir de los datos de oscilación filtrados que exceden el valor umbral predeterminado. Al cambiar el dispositivo de conmutación a su estado activado, se activa la amortiguación de las oscilaciones electromecánicas.

La invención se describe en detalle con referencia a las siguientes figuras:

La figura 1 muestra resultados de simulación con voltaje y potencia reactiva en un punto de acoplamiento de una turbina de energía eólica a un sistema de alimentación que muestra oscilaciones electromecánicas sin ninguna amortiguación, la figura 2 muestra el bucle de control de la turbina de energía eólica para el voltaje, la figura 3 muestra la integración de dos dispositivos de amortiguación de oscilación de potencia (POD) integrales en un controlador de parque eólico, la figura 4 muestra un dispositivo POD conmutable integrado en un controlador de parque eólico, la figura 5 muestra un diagrama de bloques para un dispositivo POD conmutable, la figura 6 muestra un segundo dispositivo POD basado en la amortiguación del voltaje del sistema medido, la figura 7 muestra una simulación y resultados de medición para ambos dispositivos POD, y

la figura 8 muestra el efecto de un dispositivo POD en el voltaje del sistema.

Las oscilaciones electromecánicas limitan la capacidad de transmisión cuando la distancia eléctrica desde un área excedente de producción al centro de carga principal es significativa. Las oscilaciones electromecánicas se producen cuando el ángulo del rotor de una máquina síncrona comienza a oscilar después de una perturbación en el sistema de alimentación. Si la amortiguación es insuficiente, es posible que la oscilación angular provoque una pérdida de estabilidad, separación del sistema y, en el peor de los casos, un apagón a gran escala.

Las modernas plantas de energía eólica no participan directamente en la oscilación clásica del ángulo del rotor que se produce durante las oscilaciones electromecánicas. Sin embargo, la energía eólica afecta la amortiguación de las oscilaciones electromecánicas, porque el rotor de una turbina de energía eólica moderna se desacopla de manera síncrona del sistema.

Dependiendo del sistema y su capacidad para amortiguar las oscilaciones electromecánicas, puede producirse una situación en la que la integración de un parque eólico con ajustes de control estándar conduzca a una oscilación del sistema de alimentación no amortiguada. Incluso puede producirse que las oscilaciones se amplifiquen utilizando el controlador estándar.

La figura 1 muestra una simulación, en la cual, en el punto de acoplamiento común (PCC), el voltaje y la potencia reactiva de una turbina de energía eólica que usan configuraciones de control estándar conduce a una oscilación amplificada. La potencia reactiva está casi en fase con el voltaje del sistema, amplificando las oscilaciones de voltaje y, en consecuencia, las oscilaciones electromecánicas. Tal situación y su análisis no están cubiertos de manera estándar por el diseño y ajuste del controlador; el controlador de voltaje está diseñado principalmente para cumplir con la dinámica de potencia reactiva después de las variaciones de voltaje, y la obtención de amortiguación para las oscilaciones electromecánicas se aborda de manera bastante excepcional. Los resultados en la figura 1 enfatizan la necesidad de garantizar que la turbina de energía eólica no amplifique las oscilaciones del sistema de alimentación.

El comportamiento amplificador mostrado en la figura 1 se convierte en una disminución de las oscilaciones por un cambio de fase adecuado de la potencia reactiva al voltaje. El cambio de fase original es el resultado de diversos retrasos y dinámicas en el bucle general de control de potencia reactiva. El diseño del modo de control activado en el que la potencia reactiva es una función del voltaje ($Q = f(U)$) incorpora el efecto de estos retrasos y dinámicas adecuadamente para cumplir con la dinámica de potencia reactiva requerida, es decir, alcanzar el 90 % del valor del punto de ajuste dentro de 1,0 segundos. Sin embargo, estos ajustes del controlador conducen a una respuesta de potencia reactiva no deseada a las oscilaciones de voltaje entre 0,6 Hz y 1,0 Hz. Para una amortiguación adecuada es necesario combinar la amortiguación de las oscilaciones electromecánicas con la dinámica de potencia reactiva requerida.

Una estrategia adecuada puede entenderse mejor utilizando un análisis de función de transferencia del bucle de control. La figura 2 muestra el bucle de control con X como punto de ajuste de voltaje, C la turbina de energía eólica, G el sistema y H la medición. El uso de la estrategia de la función de transferencia conduce a la siguiente dependencia de la señal de salida Y de ambas señales de entrada, el punto de ajuste de voltaje X y la perturbación D:

$$Y = \frac{CG}{1+CGH} X + \frac{1}{1+CGH} D.$$

La segunda parte de la ecuación determina en qué medida las perturbaciones D son suprimidas o amplificadas por la turbina de energía eólica. Por lo tanto, para la atenuación de las oscilaciones electromecánicas es necesario que la amplitud de $1/(1 + CGH)$ tenga una amplitud negativa en el intervalo de frecuencia de interés y, simultáneamente, garantice una respuesta escalonada deseada con un margen de fase suficiente para evitar la inestabilidad del controlador.

Un aspecto adicional para las oscilaciones de potencia electromecánica es garantizar los requisitos dinámicos mencionados anteriormente a valores variables de potencia de cortocircuito en el punto de acoplamiento. La potencia de cortocircuito no influye directamente en el cambio de fase establecido, aunque la dinámica del controlador cambia ligeramente. Una potencia de cortocircuito más baja provoca desviaciones de voltaje más altas en el sistema para la misma inyección de potencia reactiva, el margen de fase del controlador típicamente se reduce, haciendo que el controlador sea más sensible.

La figura 3 muestra esquemáticamente una estrategia para la amortiguación de las oscilaciones electromecánicas

utilizando un controlador de parque eólico. La figura 3 muestra un parque eólico 10 con una pluralidad de turbinas de energía eólica WTG1-WTG5. El parque eólico 10 está controlado por un controlador de parque eólico 12. El controlador de parque eólico 12 proporciona una suma de puntos de ajuste de potencia reactiva (Q_{ajuste, WTG_s}) 42 para las turbinas de energía eólica en el parque eólico 10. La suma de puntos de ajuste de potencia reactiva 42 se divide en puntos de
 5 ajuste de potencia reactiva individuales, para cada turbina de energía eólica en el parque eólico 10. El controlador de parque eólico 12 está conectado al punto de acoplamiento común 14 del parque eólico 10.

El parque eólico 10 está conectado al sistema de alimentación 16 a través de un transformador de parque eólico 18.

10 Para comprender las diferentes estrategias del dispositivo POD1 21 y el dispositivo POD2 22, es útil considerar primero el controlador de potencia reactiva 24. El controlador de potencia reactiva 24 recibe un punto de ajuste de voltaje constante U_{ajuste} 26 y un valor de voltaje medido U_{medido} 28. Si el valor de voltaje medido U_{medido} 28 se desvía del punto de ajuste de voltaje constante U_{ajuste} 26, el controlador de potencia reactiva 24 suministra un valor de potencia reactiva de referencia Q_{ref} 30. La función principal del valor de potencia reactiva de referencia Q_{ref} 30 es estabilizar el voltaje
 15 del sistema de alimentación.

El dispositivo POD2 22 es un dispositivo conmutable y funciona utilizando el valor de potencia reactiva de referencia Q_{ref} 30 como entrada. El dispositivo POD2 22 emite un punto de ajuste de potencia reactiva Q_{ajuste} 32. Una potencia reactiva medida Q_{medida} 29 se resta del punto de ajuste de potencia reactiva 32 para proporcionar la suma de los puntos de ajuste de potencia reactiva Q_{ajuste, WTG_s} 42 para las turbinas de energía eólica del parque eólico.
 20

El dispositivo POD1 21 funciona en función del voltaje medido del sistema U_{medido} 28. La salida del dispositivo POD1 21 es la suma de los puntos de ajuste de potencia reactiva (Q_{ajuste, WTG_s}) 42 de los puntos de ajuste para las turbinas de energía eólica WTG1-5 del parque eólico 10.
 25

La función del dispositivo POD1 21 se explica en detalle con referencia a la figura 6. La figura 6 muestra un punto de ajuste de voltaje constante U_{ajuste} 26 y el voltaje medido del sistema U_{medido} 28. El dispositivo POD1 21 recibe el voltaje medido del sistema U_{medido} 28 como entrada. El dispositivo POD1 21 consiste en un filtro 34, una ganancia 36 y una compensación de adelanto-retraso 38.
 30

El filtro 34 está adaptado como un filtro de paso alto para eliminar un desplazamiento de estado estable del bucle de control de POD en la respuesta general. Además, las señales de baja frecuencia son bloqueadas por el filtro. Solo las señales por encima de una frecuencia definida se pasan para amortiguarse. Alternativamente, se puede usar un filtro de paso de banda para eliminar también las influencias de la amortiguación en el contenido de frecuencia más alta en
 35 la entrada oscilatoria.

La ganancia 36 determina la cantidad de amortiguación introducida. La ganancia debe ser lo suficientemente alta como para proporcionar una amortiguación suficiente (si, por ejemplo, la ruta $Q(U)$ no proporciona el cambio de fase deseado, la ruta POD debe ser dominante) y lo suficientemente baja como para evitar un comportamiento inestable
 40 del controlador general. Para ello, el equilibrio de ganancias entre la ruta de control sin POD y la ruta de POD necesita estar bien ajustado.

También es posible incluir técnicas de programación de ganancia adaptativa para compensar los efectos no lineales del sistema, por ejemplo, grandes diferencias en la respuesta de sistemas en todo el intervalo de funcionamiento.
 45

La compensación de adelanto-retraso 38 sirve como compensación del retraso causado por los tiempos de ciclo y la dinámica en el bucle de control general. Este elemento de compensación debe garantizar que la potencia reactiva se inyecte con un ángulo de fase deseado con respecto a la entrada oscilatoria.

50 Una potencia reactiva de salida Q_{POD} 40 del dispositivo POD1 21, la potencia reactiva medida Q_{medida} 29 junto con la potencia reactiva de referencia Q_{ref} 30 como salida por el controlador de potencia reactiva 24 se utilizan para determinar un punto de ajuste de potencia reactiva de control 42. Preferentemente, un elemento de suma 41 resume los valores determinados como el punto de ajuste de potencia reactiva de control 42. El punto de ajuste de potencia reactiva de control 42 se aplica a un controlador PI 44 y se divide en uno o más puntos de ajuste para diferentes
 55 turbinas de energía eólica.

La función del dispositivo POD2 22 se muestra en las figuras 4 y 5. La figura 4 muestra en una vista esquemática el dispositivo de medición 46 que proporciona un valor de voltaje medido U_{medido} 28 y un valor de potencia reactiva medida Q_{medida} 29 midiendo el un voltaje U y una I de corriente cerca del punto de acoplamiento común 14. El comportamiento
 60 dinámico del dispositivo de medición 46 puede describirse usando un elemento PT1 48 y un elemento de tiempo

muerto 50. El elemento PT1 48 corresponde a un elemento de retraso de 1^{er} orden. El valor de voltaje medido U_{medido} 28 junto con el punto de ajuste de voltaje U_{ajuste} 26 se aplican al controlador de potencia reactiva 24. El controlador de potencia reactiva 24 emite una potencia reactiva de referencia Q_{ref} 30 que se aplica a un controlador PI 60 junto con el valor de potencia reactiva medida Q_{medida} 29 pasando el controlador de potencia reactiva 24 y la unidad de conmutación 58. La unidad de conmutación puede ser un conmutador de hardware o un conmutador de software.

Durante el funcionamiento normal, una unidad de conmutación 58 proporciona la potencia reactiva de referencia Q_{ref} 30 al controlador PI 60. Si un valor de frecuencia y un valor de amplitud del voltaje medido U_{medido} 28 indican oscilaciones electromecánicas en el sistema de alimentación, la unidad de conmutación 58 desconecta la potencia reactiva de referencia Q_{ref} 30 del controlador PI 60 y conecta el dispositivo POD2 22 con su valor de salida al controlador PI 60. La conmutación se activa si un elemento de detección 76 (cp. figura 5) detecta oscilaciones electromecánicas en el sistema de alimentación.

La figura 5 explica la función del dispositivo POD2 22 en detalle. Como lo indica una unidad de conmutación adicional 62, el dispositivo POD2 22 puede configurarse para usar el voltaje medido U_{medido} 28 en una entrada 64 o la potencia reactiva de referencia Q_{ref} 30 en una entrada alternativa 66.

En una primera etapa, se describe el uso de la potencia reactiva de referencia Q_{ref} 30 en la entrada alternativa 66. La potencia reactiva de referencia Q_{ref} 30 se aplica a un filtro de paso de banda 68. El filtro de paso de banda 68 también puede considerarse como un filtro de parada de banda que bloquea las frecuencias dentro de su(s) banda(s). La diferencia de la salida del filtro de paso de banda 68 y la potencia reactiva de referencia Q_{ref} 30 constituye una señal de CA 72. Junto con la potencia reactiva de referencia original Q_{ref} 30. La diferencia proporcionada por un sustractor 70 se aplica al elemento de retraso de 2^o orden (elemento PT2) 74. Para el procesamiento de la potencia reactiva de referencia Q_{ref} 30 como entrada, la unidad de conmutación 62 se establece en 0.

La detección de oscilaciones electromecánicas se lleva a cabo por el elemento de detección 76. Basado en una señal de CA 78 que es la salida de un sustractor 71 que resta el voltaje medido del sistema U_{medido} 28 y una señal filtrada de paso de banda 84. El elemento de detección 76 determina si la señal de CA 78 del voltaje medido U_{medido} 28 pertenece a un intervalo de frecuencia de oscilaciones electromecánicas. El intervalo de frecuencia generalmente está entre 0,2 Hz y 1,5 Hz. El elemento de detección 76 también determina si la amplitud de la señal de CA 78 excede un valor umbral predefinido. El valor de frecuencia de la señal de AC 78 se emite como frecuencia de oscilación f_{osc} 80 y se aplica al elemento de retraso de 2^o orden 74 (elemento PT2). Si el elemento de detección 76 detecta oscilaciones electromecánicas, se establece un bit POD y se procesa en el conmutador 82. Si se configura el bit POD, el conmutador 82 cambia a su estado activado (1) y reenvía la potencia reactiva Q_{ajuste} , POD 32 en función de la salida 83 de un elemento de suma 85. El elemento PT2 74 usa una ganancia PT2 y una fase PT2 y la frecuencia detectada f_{osc} 80 para proporcionar un ajuste de fase a la señal de CA 72 de la potencia reactiva de referencia Q_{ref} 30 para la amortiguación. La salida 75 del elemento de retraso de 2^o orden 74 se añade a la señal de CC 77 proporcionada por el filtro de paso de banda 68 usando un elemento de suma 85.

Si la unidad de conmutación 62 se cambia a 0, la señal de CA 72 aplicada al elemento PT2 74 se basa en la potencia reactiva de referencia Q_{ref} 30. Sin embargo, la señal de CA 78 todavía se usa para detectar oscilaciones electromecánicas. La potencia reactiva de referencia Q_{ref} 30 aplicada la entrada 66 se envía a un filtro de paso de banda 68 que funciona como filtro de parada de banda para proporcionar una señal de CC 77. Un sustractor 70 resta la señal de CC 77 de la señal original de la potencia reactiva de referencia Q_{ref} 30 para proporcionar la señal de CA 72 que se aplica al elemento de retraso de 2^o orden 74.

La figura 7 muestra resultados de simulación y resultados de medición para el voltaje y la potencia reactiva para un dispositivo POD1 21 y un dispositivo POD2 22. Para el dispositivo POD2 22 es dentro de la señal de potencia reactiva Q visible que el dispositivo POD2 22 se activa en un tiempo de aproximadamente 7,5 segundos. Para los valores medidos de la potencia reactiva, el dispositivo POD2 22 se activa a aproximadamente 148 segundos.

Las características del dispositivo POD1 y del dispositivo POD2 se pueden resumir de la siguiente manera:

En la estrategia continua del dispositivo POD1, la activación continua garantiza un cambio de fase adecuado entre el voltaje y la potencia reactiva en el punto de acoplamiento, también durante las oscilaciones del sistema de alimentación con baja amplitud. Se utiliza una estrategia de control limpio con amortiguación inmediata en cuanto se producen los primeros cambios de oscilación. No se necesita detección de oscilación. Esto contribuye a una alta confiabilidad y una baja susceptibilidad al fallo. La estrategia conmutable del dispositivo POD2 se puede resumir como evitar interferencias con la dinámica del controlador durante el funcionamiento normal. El dispositivo POD2 solo se activa cuando se detectan oscilaciones del sistema de alimentación. La configuración del dispositivo POD2 se puede establecer sin

influir en la dinámica de respuesta escalonada del sistema. Las interacciones del sistema se evitan durante el funcionamiento normal. La detección de oscilaciones hace posible el evento POD2.

La figura 8 muestra el comportamiento del voltaje con una amortiguación de oscilación de potencia activada frente a una amortiguación de oscilación de potencia desactivada. Como se puede ver claramente en la figura 8, la oscilación de voltaje con POD1 es más amortiguada que sin el POD.

Lista de números de referencia

10	Parque eólico
10	WTG 1-5
12	Turbina de energía eólica
16	Controlador de parque eólico
16	Sistema de alimentación
18	Transformador de parque eólico
21	Dispositivo POD 1
15	22
	Dispositivo POD 2
	24
	Controlador de potencia reactiva
	26
	Punto de ajuste de voltaje constante
	28
	Valor de voltaje medido
	29
	Valor de potencia reactiva medida
20	30
	Potencia reactiva de referencia
	32
	Punto de ajuste de potencia reactiva
	40
	Potencia reactiva de salida Q_{POD}
	42
	Suma del punto de ajuste de potencia reactiva $Q_{set, WTGs}$
	46
	Dispositivo de medición
25	48
	Dispositivo PT1
	58
	Unidad de conmutación
	60
	Controlador PI
	62
	Unidad de conmutación adicional
	64
	Entrada
30	66
	Entrada alternativa
	68
	Filtro de paso de banda
	70
	Sustractor
	71
	Sustractor
	72
	Señal de CA
35	74
	Elemento de retraso de 2º orden/elemento PT2
	76
	Elemento de detección
	78
	Señal de CA
	80
	Frecuencia de oscilación f_{osc}
	82
	Conmutador
40	84
	Señal filtrada de paso de banda
	85
	Elemento de suma

REIVINDICACIONES

1. Método de amortiguación de oscilaciones electromecánicas en un sistema de alimentación (16) mediante la inyección de potencia reactiva generada por una o más turbinas de energía eólica (WTG 1-5), en el que un controlador de potencia reactiva (24) está adaptado para determinar un valor de potencia reactiva de referencia (Q_{ref}) (30) dependiendo del voltaje real del sistema U_{medido} (28), comprendiendo el método:
 - medir (46) datos de oscilación (28) asociados con el sistema de alimentación (16), filtrar (84, 71) los datos de oscilación medidos (28) para eliminar un desplazamiento de estado estable, obteniendo así datos de oscilación filtrados, determinar (76) un valor de frecuencia (80) y un valor de amplitud a partir de los datos de oscilación filtrados (78), y activar (82) una amortiguación de oscilación de potencia conmutable (74) según al menos un criterio de los siguientes:
 - o el valor de frecuencia (80) determinado a partir de los datos de oscilación filtrados (78) que pertenecen a un intervalo de frecuencia predeterminado, y
 - o el valor de amplitud determinado a partir de los datos de oscilación filtrados (78) que exceden un valor umbral predeterminado,
 en el que la amortiguación de oscilación de potencia conmutable (74) se consigue compensando una ganancia y un retraso causado por el controlador de potencia reactiva (24) al valor de potencia reactiva de referencia (Q_{ref}), obteniendo así un valor de potencia reactiva de referencia corregido en el que, adicionalmente a la amortiguación de oscilación de potencia conmutable (82) anterior, se proporciona una amortiguación de oscilación de potencia continua (60), que comprende las etapas de corregir una ganancia y un cambio en el valor de potencia reactiva de referencia corregido en caso de que se active la amortiguación de oscilación de potencia conmutable, o en el valor de potencia reactiva de referencia (Q_{ref}) en caso de que no se active la amortiguación de oscilación de potencia conmutable, compensando así una ganancia y un retraso causados por el controlador de potencia reactiva (24), emitir un punto de ajuste de potencia reactiva ($Q_{ajuste, WTGs}$) a al menos una de la pluralidad de turbinas de energía eólica (WTG 1-5) basado en al menos uno de: el valor de potencia reactiva de referencia (Q_{ref}) y el valor de potencia reactiva de referencia corregido.
2. Método según la reivindicación 1, en el que los datos de oscilación medidos corresponden al voltaje real del sistema (U_{medido}).
3. Método según la reivindicación 1, en el que los datos de oscilación medidos corresponden a la potencia reactiva de referencia (Q_{ref}) determinada en función del voltaje real del sistema (U_{medido}).
4. Método según una de las reivindicaciones 1 a 3, en el que la etapa de filtrado de los datos de oscilación medidos incluye filtrar con paso de banda para eliminar una influencia de frecuencias más altas y más bajas que las frecuencias de las oscilaciones electromecánicas sobre la amortiguación.
5. Método según una de las reivindicaciones anteriores, en el que el intervalo de frecuencia predeterminado está entre 0,2 Hz y 1,5 Hz, preferentemente entre 0,5 Hz y 1,1 Hz, y más preferentemente 0,6 Hz y 1 Hz.
6. Método según una de las reivindicaciones anteriores, en el que los datos de oscilación se aplican a un elemento de retraso de 2º orden (PT2).
7. Método según la reivindicación 6, en el que el elemento de retraso de 2º orden (PT2) depende de al menos uno de los siguientes datos obtenidos de los datos de oscilación: frecuencia, ganancia, fase y amplitud.
8. Un parque eólico (10) conectado a un sistema de alimentación (16), comprendiendo el parque eólico (10) una pluralidad de turbinas de energía eólica (WTG 1-5), que comprende un controlador de parque eólico (12) dispuesto para proporcionar puntos de ajuste para potencia activa y reactiva ($Q_{ajuste, WTGs}$) para cada una de la pluralidad de turbinas de energía eólica (WTG 1-5) y un dispositivo de medición para medir datos de oscilación (28) asociados con el sistema de alimentación (16), comprendiendo el controlador del parque eólico:
 - una unidad de filtro (34) adaptada para eliminar un desplazamiento de estado estable de los datos de oscilación

- medidos (28), obteniendo así datos de oscilación filtrados,
 un controlador de potencia reactiva (24) dispuesto para proporcionar un valor de potencia reactiva de referencia (Q_{ref}) en función de un voltaje real del sistema (U_{medido}),
 un dispositivo de amortiguación de oscilación de potencia conmutable (POD) adaptado para amortiguar las oscilaciones electromecánicas en el sistema de alimentación (16) y para compensar al menos uno de los siguientes efectos causados por el controlador de potencia reactiva:
- 5 ○ ganancia aplicada al valor de potencia reactiva de referencia (Q_{ref}) por el controlador de potencia reactiva (24) y
 - 10 ○ un retraso aplicado al valor de potencia reactiva de referencia (Q_{ref}) por el controlador de potencia reactiva (24) obteniendo así un valor de potencia reactiva de referencia corregido,
 un elemento de detección (76) adaptado para determinar un valor de frecuencia (80) y un valor de amplitud a partir de los datos de oscilación filtrados (28), y para activar (82) la amortiguación del dispositivo de amortiguación de oscilación de potencia conmutable según al menos un criterio de los siguientes:
 - 15 ○ el valor de frecuencia (80) determinado a partir de los datos de oscilación filtrados (78) que pertenecen a un intervalo de frecuencia predeterminado, y
 - el valor de amplitud determinado a partir de los datos de oscilación filtrados (78) que exceden un valor umbral predeterminado
- 20 un dispositivo de amortiguación de oscilación de potencia continua (60), adaptado para llevar a cabo las etapas de corregir una ganancia y un cambio en el valor de potencia reactiva de referencia corregido en caso de que se active la amortiguación de oscilación de potencia conmutable, o en el valor de potencia reactiva de referencia (Q_{ref}) en caso de que no se active la amortiguación de oscilación de potencia conmutable, compensando así una ganancia y un retraso causados por el controlador de potencia reactiva,
- 25 en el que el controlador del parque eólico (12) está adaptado para emitir un punto de ajuste de potencia reactiva ($Q_{ajuste, WTGs}$) a al menos una de la pluralidad de turbinas de energía eólica (WTG 1-5) basado en al menos uno de: el valor de potencia reactiva de referencia (Q_{ref})-la salida del valor de potencia reactiva de referencia corregida del dispositivo de amortiguación de oscilación de potencia conmutable (POD).
- 30 9. El parque eólico según la reivindicación 8, en el que el controlador del parque eólico comprende una unidad de conmutación dispuesta para determinar un valor de frecuencia y un valor de amplitud a partir de los datos de oscilación filtrados y para cambiar el dispositivo POD basado en al menos uno de los siguientes criterios:
- 35 ○ el valor de frecuencia determinado a partir de los datos de oscilación filtrados que pertenecen a un intervalo de frecuencia predeterminado y
 - el valor de amplitud determinado a partir de los datos de oscilación filtrados que exceden un valor umbral predeterminado.
10. El parque eólico según la reivindicación 8 o 9 que está adaptado para amortiguar oscilaciones electromecánicas en el sistema de alimentación según una de las reivindicaciones 1 a 8 del método anterior.
- 40

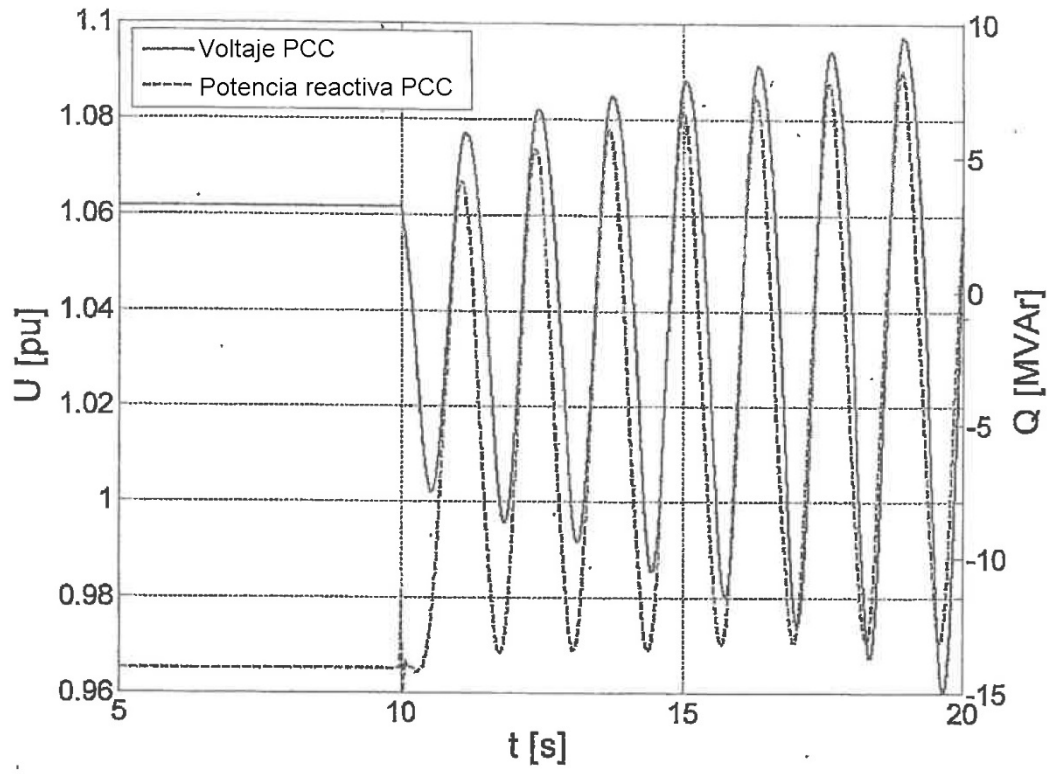


Fig. 1

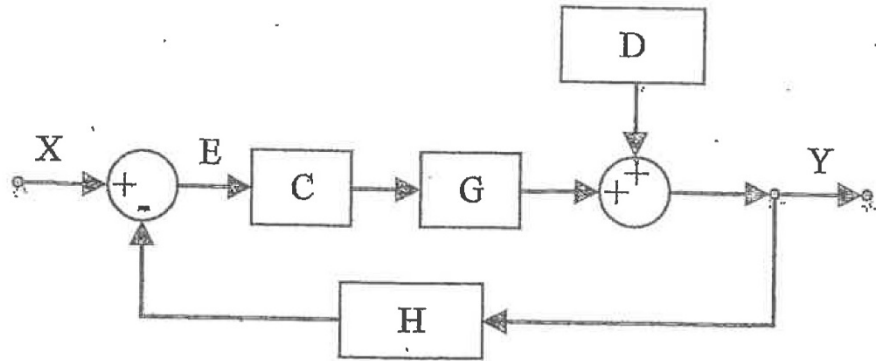


Fig. 2

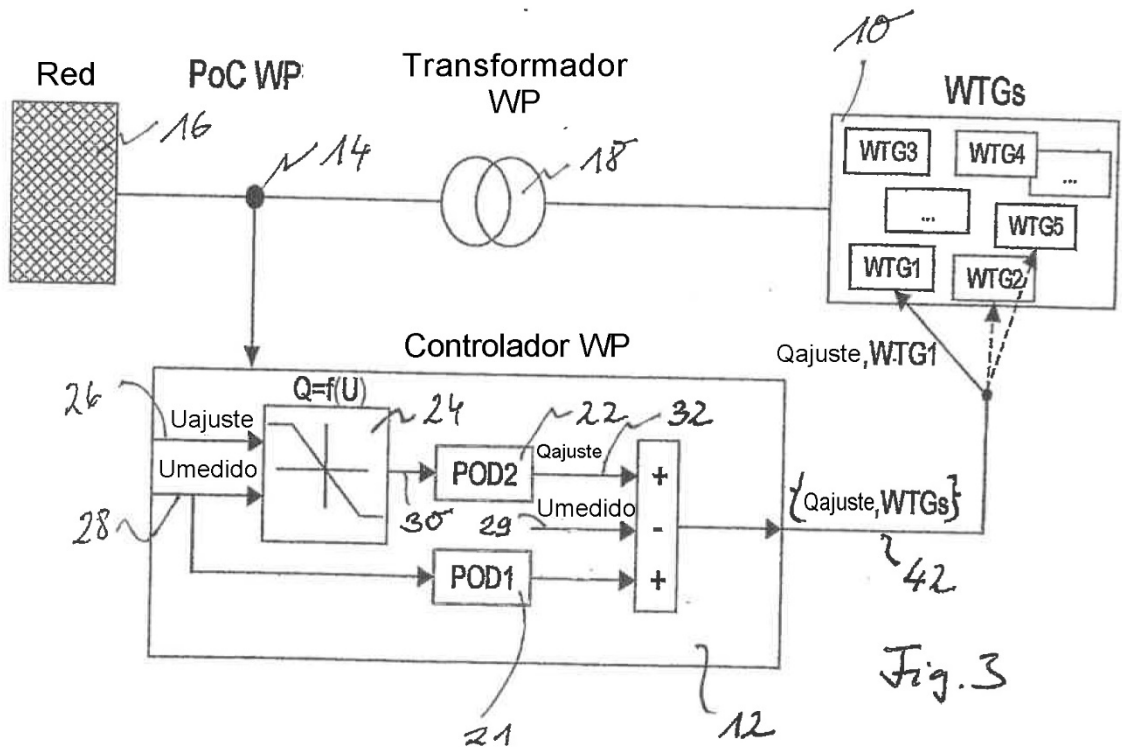


Fig. 3

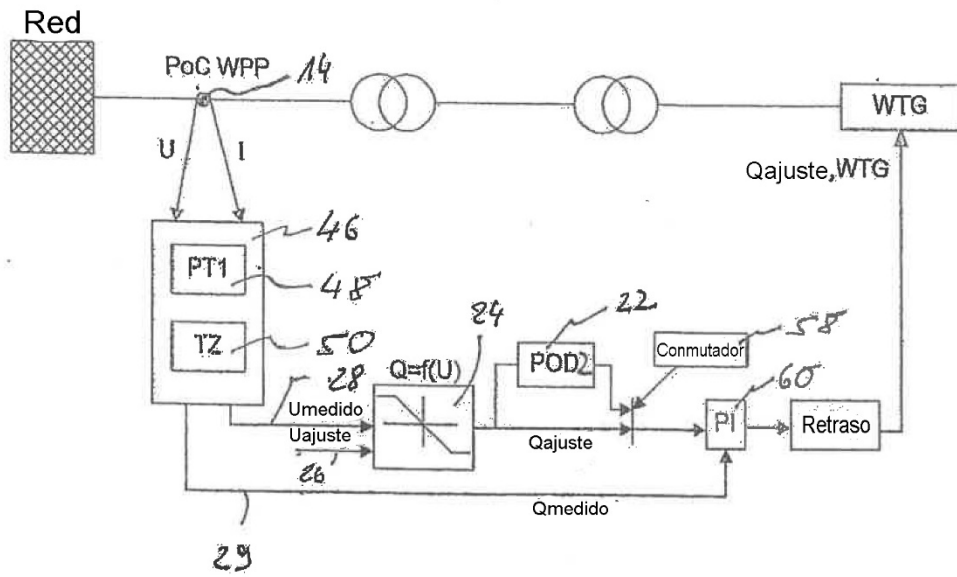
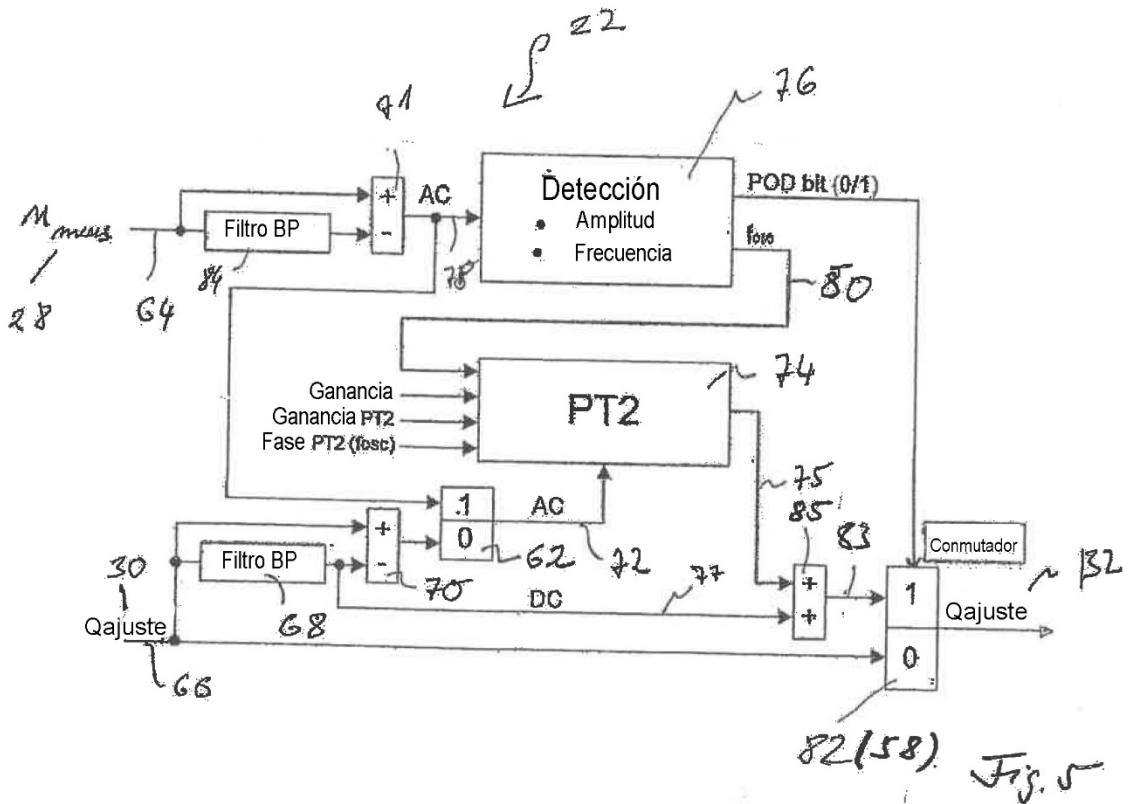


Fig. 4



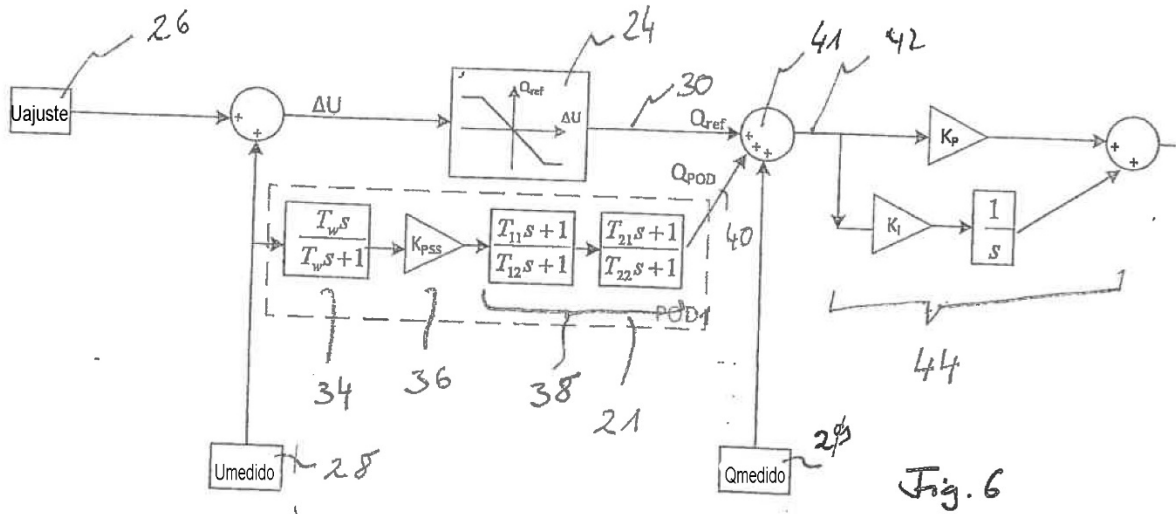


Fig. 6

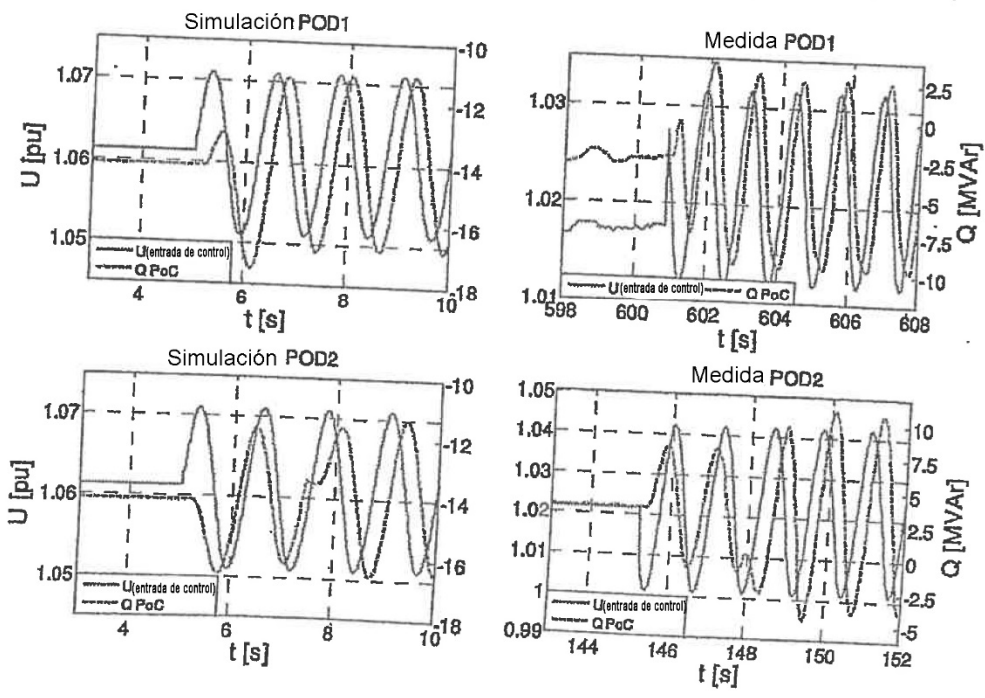


Fig. 7

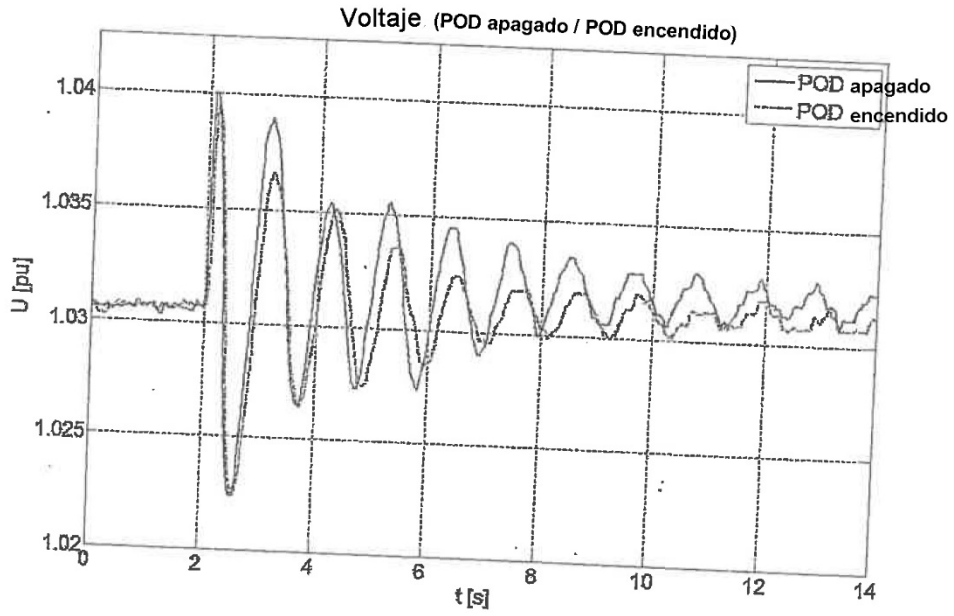


Fig. 8