

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 384 357**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02 (2006.01)

F03D 7/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **08758271 .4**

96 Fecha de presentación: **11.07.2008**

97 Número de publicación de la solicitud: **2176544**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **21.04.2010**

54 Título: **Turbina eólica y método para compensar las discrepancias en un sistema de paso de pala de rotor de turbina eólica**

30 Prioridad:
14.07.2007 DK 200701048

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
04.07.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
04.07.2012

73 Titular/es:
**Vestas Wind Systems A/S
Hedeager 44
8200 Aarhus N, DK**

72 Inventor/es:
CHRISTENSEN, Poul Brandt

74 Agente/Representante:
Arias Sanz, Juan

ES 2 384 357 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

Turbina eólica y método para compensar las discrepancias en un sistema de paso de pala de rotor de turbina eólica

Antecedentes de la invención

5 La presente invención se refiere a una turbina eólica que comprende un rotor que incluye una o más palas de rotor, a un método para compensar las discrepancias en un sistema de paso de pala de rotor de turbina eólica y al uso de un método.

Descripción de la técnica relacionada

Los accionadores de paso para controlar el ángulo de paso de una o más palas de rotor de una turbina eólica son ampliamente conocidos dentro del campo técnico.

10 Cada pala de rotor se ve afectada por discrepancias, por ejemplo debidas a variaciones de producción en el accionador, diversas tolerancias de componentes del accionador de paso, variaciones en la fricción del cojinete de pala que se originan por ejemplo por diferencias de montaje, por variaciones de temperatura o por variaciones en la desviación de la pala, variaciones en la densidad del aire, error en la guiñada según la condición del viento, cortante del viento, cambios de temperatura, velocidades del viento alternantes, etc. El sistema de paso puede considerarse por tanto como un sistema no lineal con parámetros variables. Un problema de dicho sistema es que dichos parámetros variables pueden dar como resultado un control deteriorado de las palas de rotor y a su vez una fatiga innecesaria en la turbina eólica.

20 El documento Bossanyi E.A., "The Design of Closed Loop Controllers for Wind Turbines", Wind Energy 2000, vol. 3, págs. 149-163 y la solicitud de patente US 41896481-D2 dan a conocer una turbina eólica con un ángulo de paso de pala ajustable que tiene un sensor de ángulo de paso de pala, que proporciona una medición del ángulo de paso de pala para compensar una discrepancia entre el valor medido y la señal del ángulo de paso preestablecida emitida por un controlador de paso.

25 El documento Bossanyi E.A., "Individual Blade Pitch Control for Load Reduction", Wind Energy 2003, vol. 6, págs. 119-128 y las solicitudes de patente WO 01/33075 A y WO 2004/074681 A describen un método con las etapas de medir valores de los ángulos de paso de pala, compararlos con señales de control que representan los ángulos de paso de pala preestablecidos y compensar las señales de control en caso de discrepancia.

Es un objeto de la presente invención proporcionar un método ventajoso para controlar uno o más accionadores de paso de una turbina eólica sin las desventajas mencionadas anteriormente.

La invención

30 La presente invención se refiere a una turbina eólica que comprende

- un rotor que incluye una o más palas de rotor,

35 - un sistema de paso para controlar el ángulo de paso de dichas una o más palas de rotor, comprendiendo dicho sistema de paso al menos un accionador de paso, un controlador de paso para generar señales de control de accionador de paso, caracterizada porque el sistema de paso comprende además elementos sensores de paso dispuestos para establecer valores de frecuencia de paso y fuerza de paso y

- un controlador de compensación dispuesto para compensar las discrepancias entre dichas señales de control de accionador de paso y dichos valores de frecuencia de paso y fuerza de paso ajustando parámetros de un algoritmo de control de dicho controlador de compensación dependiendo de dichas discrepancias.

40 Por la expresión "sistema de paso" se quiere decir componentes enlazados requeridos para realizar la actividad de paso, que comprenden fuente de alimentación, elementos de control de energía, accionadores, elementos de procesamiento de datos que incluyen sistemas electrónicos programables, elementos sensores y elementos de transmisión de datos.

45 Por la expresión "discrepancias" se quiere decir discrepancias que afectan a la relación entre las señales de control de accionador y los valores de frecuencia de paso y fuerza de paso, es decir diferencias entre parámetros especificados/esperados y medidos/estimados.

50 Compensando dichas discrepancias se garantiza que se compensa cualquier desviación en relación con un rendimiento deseado, por ejemplo debida a variaciones de producción en el accionador, tolerancias de la válvula hidráulica, cambio en la viscosidad del fluido hidráulico, variaciones en la fricción del cojinete de pala, que se originan por ejemplo por diferencias de montaje, por variaciones de temperatura o por variaciones en la desviación de la pala, variaciones en la densidad del aire, error en la guiñada según la condición del viento, cortante del viento, etc. También se compensan desviaciones en relación con sistemas de paso eléctricos.

Además se garantiza que pueden compensarse discrepancias permanentes, discrepancias de cambio lento relacionadas por ejemplo con cambios de temperatura y/o discrepancias de cambio más rápido tales como con la velocidad del viento promedio.

5 Es más, mediante la compensación se garantiza que se minimizan criterios de rendimiento de la turbina eólica importantes tales como cargas en la torre relativas al empuje, cargas en el tren de engranajes, cargas en el sistema de paso, desgaste del accionador, etc., garantizando además una producción de energía óptima y una vida útil prolongada para diversos componentes de la turbina eólica.

Otra ventaja es que puede conseguirse una compensación óptima para condiciones de funcionamiento diferentes y con perturbaciones de carga diferentes.

10 En un aspecto de la invención, dicho controlador de compensación comprende al menos un controlador adaptativo con parámetros ajustables. Ajustando de manera adaptativa parámetros de funcionamiento del controlador de compensación durante el funcionamiento se garantiza que se compensa de manera eficaz cualquier desviación en relación con un rendimiento deseado, por ejemplo debida a variaciones de producción en el accionador, tolerancias de la válvula hidráulica, cambio en la viscosidad del fluido hidráulico, variaciones en la fricción del cojinete de pala que se originan por ejemplo por diferencias de montaje, por variaciones de temperatura o por variaciones en la desviación de la pala, variaciones en la densidad del aire, error en la guiñada según la condición del viento, cortante del viento, etc.

En otro aspecto de la invención, dicho al menos un controlador adaptativo comprende además medios para ajustar dichos parámetros.

20 En un aspecto adicional de la invención, dicho controlador de compensación comprende un regulador de autosintonización (STR). Usando un STR se garantiza que se usa un regulador que puede resolver problemas de control de optimización en línea y que los parámetros del controlador se sintonizan automáticamente para obtener las propiedades deseadas del sistema. Además, un STR requiere pocas sintonizaciones específicas del sistema ya que usa un modelo estimado de manera dinámica del sistema y la ley de control se adapta automáticamente al sistema y a las dinámicas de carga de trabajo.

En un aspecto de la invención, dicho STR comprende medios para procesar un algoritmo no recursivo para estimación de parámetros de modelo de proceso tal como un algoritmo de mínimos cuadrados (LS) o un algoritmo de mínimos cuadrados extendido (ELS)

30 En otro aspecto de la invención, dicho STR comprende medios para procesar un algoritmo recursivo para estimación de parámetros de modelo de proceso tal como un algoritmo de mínimos cuadrados recursivo (RLS), un algoritmo de mínimos cuadrados recursivo extendido (RELS), un algoritmo de máxima verisimilitud recursivo (RML), un algoritmo de aproximaciones estocásticas (STA), etc.

En un aspecto adicional de la invención, dicho STR comprende medios para procesar un modelo de diseño de control tal como un método de control óptimo de seguimiento LQ, un método de diseño de colocación de polos de entrada/salida, etc.

35 En un aspecto adicional más de la invención, dicho controlador de compensación es un sistema adaptativo de modelo de referencia (MRAS). Usando un MRAS se garantiza que se pone en práctica una ley de control por realimentación que cambia la estructura y la dinámica del sistema de paso de modo que sus propiedades sean sustancialmente las mismas que las de un modelo de referencia deseado, con lo cual pueden minimizarse dichas discrepancias del sistema de paso.

En otro aspecto de la invención, dicho MRAS comprende medios para procesar una actualización de parámetros en tiempo real usando un método MIT, un método de Lyapunov, etc. Se garantiza de este modo que puede ponerse en práctica un método fiable para la actualización de parámetros en tiempo real, dando como resultado un rendimiento optimizado del sistema de paso.

45 En un aspecto adicional de la invención, dicho accionador de paso es un accionador de paso hidráulico. Se garantiza de este modo que el sistema de paso se compensa en cuanto a no linealidad dinámica y al intervalo de banda inactiva no lineal de un accionador de paso hidráulico que comprende por ejemplo si los valores de los cambios de intervalo de banda inactiva, tales como límites superiores e inferiores, pendiente de frecuencia de paso/tensión, etc.

50 En un aspecto de la invención, el controlador de compensación está dispuesto para ajustar continuamente dichos parámetros del algoritmo de control. Se garantiza de este modo que los parámetros de funcionamiento del controlador de compensación se encuentran siempre sustancialmente en valores óptimos para dicho controlador, y que el rendimiento del sistema de paso es siempre óptimo independientemente de cambios en condiciones de trabajo para el sistema de paso.

55 En otro aspecto de la invención, dichos uno o más parámetros de funcionamiento de dicho controlador de

- 5 compensación pueden cambiarse durante un periodo de tiempo fijo o cambiarse hasta que un parámetro de error definido esté por debajo de un nivel predefinido. Se garantiza de este modo que los parámetros de funcionamiento del controlador de compensación se cambian sólo cuando es necesario para optimizar el rendimiento del sistema de paso y/o se cambian sólo durante un periodo de tiempo fijo por ejemplo durante la puesta en marcha, en servicio, al cambiar las condiciones meteorológicas, etc.
- 10 En otro aspecto de la invención, el cambio de dichos uno o más parámetros de funcionamiento de dicho controlador de compensación puede iniciarse manualmente, tal como en la instalación, en servicio, al cambiar las condiciones ambientales, etc. o de manera automática según se programe a intervalos de tiempo predefinidos. Se garantiza de este modo que en diversas situaciones en las que puede ser deseable alterar dichos parámetros de funcionamiento de un conjunto a otro, puede hacerse directamente o iniciarse manualmente por ejemplo por medio de una conexión SCADA conectada.
- 15 En un aspecto adicional de la invención, dicho controlador de compensación se hace funcionar dentro de un intervalo de banda inactiva de un accionador de paso. Se garantiza de este modo que el sistema de paso se compensa en cuanto al intervalo de banda inactiva no lineal de por ejemplo un accionador de paso hidráulico que comprende si se alternan los valores de los cambios de intervalo de banda inactiva, tales como límites superiores e inferiores, pendiente de frecuencia de paso/tensión, etc.
- 20 En aún otro aspecto de la invención, dicho controlador de compensación se hace funcionar dentro de un intervalo variable de un accionador de paso.
- 25 En un aspecto de la invención, dicho controlador de compensación compensa las discrepancias de un sistema de paso hidráulico. Se garantiza de este modo que los sistemas de paso hidráulicos tal como se usan ampliamente en relación con turbinas eólicas, pueden sacar ventajas de la presente invención. Se garantiza además que las discrepancias entre más de un sistema de paso hidráulico pueden compensarse debido a parámetros estáticos o variables lentamente, tales como diferencias en la producción, montaje alterno, envejecimiento del líquido hidráulico, etc.
- 30 En otro aspecto de la invención, dicho controlador de compensación compensa las discrepancias de un sistema de paso eléctrico. Se garantiza de este modo que se compensan las discrepancias de parámetros de funcionamiento específicos de un sistema de paso eléctrico tales como ganancia de deriva del controlador, no linealidad de un accionador de paso eléctrico, diferencias entre características de sistemas de paso para cada pala de rotor, etc.
- 35 En aún otro aspecto de la invención, dicho controlador de compensación está dispuesto además para ajustar dichos parámetros del algoritmo de control dependiendo de valores ambientales tales como temperatura y velocidad del viento. Se garantiza de este modo que se compensan los parámetros ambientales que pueden afectar al funcionamiento de por ejemplo la parte hidráulica del accionador de paso.
- 40 En un aspecto adicional de la invención, dicho controlador de compensación está dispuesto además para ajustar dichos parámetros del algoritmo de control dependiendo de la frecuencia de paso y la fuerza de paso. Se garantiza de este modo que se obtiene una medida directa del rendimiento del sistema de paso y que una base válida para el controlador de compensación está disponible. Se garantiza además que cualquier desviación entre el parámetro de rendimiento esperado y el real puede monitorizarse dando como resultado una compensación subsiguiente.
- 45 En un aspecto de la invención, dicha turbina eólica es una turbina eólica de velocidad variable.
- 50 La invención también se refiere a un método para compensar las discrepancias en un sistema de paso de pala de rotor de turbina eólica, comprendiendo dicho sistema de paso al menos un accionador de paso, un controlador de paso, elementos sensores y un controlador de compensación, comprendiendo dicho método las etapas de:
- generar señales de control de accionador de paso mediante dicho controlador de paso
 - establecer valores de frecuencia de paso y fuerza de paso de dicho accionador de paso mediante dichos elementos sensores,
 - ajustar parámetros de un algoritmo de control de dicho controlador de compensación dependiendo de discrepancias entre dichas señales de control de accionador de paso generadas y dichos valores establecidos de frecuencia de paso y fuerza de paso.
- Se proporciona de este modo un método ventajoso para controlar uno o más accionadores de paso de una turbina eólica.
- En otro aspecto de la invención, dicho ajuste de parámetros de un algoritmo de control se realiza mediante un controlador adaptativo. Se garantiza de este modo un método ventajoso adicional para controlar uno o más accionadores de paso de una turbina eólica.
- Además la invención se refiere al uso de un método en una turbina eólica, en el que dicha turbina eólica es una turbina eólica de velocidad variable.

Figuras

La invención se describirá a continuación con referencia a las figuras, en las que

- la figura 1 ilustra una turbina eólica moderna grande que incluye tres palas de turbina eólica en el rotor de la turbina eólica,
- 5 la figura 2 ilustra de manera esquemática un diagrama funcional de un sistema de control para diversas realizaciones de una turbina eólica,
- la figura 3 ilustra de manera esquemática un sistema de accionador de paso hidráulico para una pala de rotor,
- la figura 4a ilustra de manera esquemática una característica de respuesta de un sistema de accionador de paso hidráulico,
- 10 la figura 4b ilustra de manera esquemática una curva de compensación de ganancia según diversas realizaciones de la técnica conocida,
- la figura 4c ilustra de manera esquemática una característica de respuesta hidráulica compensada de un sistema de paso según diversas realizaciones de la técnica conocida,
- la figura 5 ilustra de manera esquemática ejemplos de cambios en una característica de respuesta hidráulica,
- 15 la figura 6 ilustra de manera esquemática un diagrama de bloques de un regulador de autosintonización (STR) según una realización de la invención,
- la figura 7 ilustra de manera esquemática un diagrama de bloques de un sistema adaptativo de modelo de referencia (MRAS) según una realización de la invención, y
- 20 la figura 8 ilustra de manera esquemática un controlador de paso según una realización de la invención conectado a un Sistema SCADA.

Descripción detallada

- La figura 1 ilustra una turbina eólica 1 moderna con una torre 2 y una góndola 3 de turbina eólica colocada encima de la torre.
- 25 El rotor de la turbina eólica, que comprende al menos una pala, tal como tres palas 5 de turbina eólica como se ilustra, está conectado al cubo 4 a través de mecanismos de paso 6. Cada mecanismo de paso incluye un cojinete de pala y medios accionadores de paso que permiten a la pala ajustar su paso. El proceso de ajuste de paso se controla mediante un controlador de paso.
- Tal como se ilustra en la figura, el viento por encima de un determinado nivel activará el rotor y permitirá que gire en una dirección perpendicular al viento. El movimiento de giro se convierte en energía eléctrica que normalmente se suministra a la red de distribución tal como conocerán los expertos en el ámbito.
- 30 Una tarea principal para los mecanismos de paso 6 de una turbina eólica es hacer girar las palas de rotor 5 alrededor de su longitud y, para diversas realizaciones de turbinas eólicas, los sistemas de paso son sistemas hidráulicos.
- Para otras realizaciones de turbinas eólicas, los sistemas de paso son sistemas eléctricos.
- 35 La figura 2 ilustra de manera esquemática un diagrama funcional de un sistema de control para diversas realizaciones de una turbina eólica.
- El control de velocidad es, para diversas realizaciones, un controlador PI en el bucle externo de la estructura de control.
- 40 En un modo de funcionamiento, el objetivo del controlador es mantener la energía generada a un nivel de régimen nominal, por ejemplo manteniendo una velocidad del generador sustancialmente constante, es decir un punto de ajuste de referencia de velocidad del generador RPM_{ref} se mantiene constante. Esto requiere que el bucle de control de paso interno sea una parte de control activa y, para condiciones/situaciones del viento alternantes, la referencia de paso 20 puede cambiar rápidamente. Si el control de paso no es acorde con la señal de referencia de paso 20, el rotor de la turbina eólica puede acelerarse al contrario de lo que se desea.
- 45 Tal como se ilustra de manera esquemática en la figura 3, una realización de un accionador de paso hidráulico conocida en la técnica comprende una válvula 7 y un cilindro 8. El funcionamiento de la válvula 7 se controla mediante una señal de control 21 del accionador de paso recibida desde un controlador de paso. La válvula y el cilindro están conectados mediante mangueras hidráulicas 11, 12.

Cambiando la presión a cada lado de un pistón 10 en una cámara hidráulica del cilindro 8, el pistón se mueve de un lado a otro en dicha cámara.

El extremo distal del vástago de pistón 13 está unido a la base de la pala de rotor 9 y puede por tanto hacer girar la pala 5 alrededor de su propio eje longitudinal.

5 Para una realización de un accionador de paso hidráulico tal como se describe, la figura 4a ilustra de manera esquemática la relación entre la tensión de entrada y la velocidad de paso de salida. La curva de respuesta hidráulica 14 muestra una banda inactiva 15 considerable para niveles de tensión de control relativamente pequeños alrededor de 0 V, es decir dichos niveles de tensión pequeños no moverán de manera sustancial el pistón y por tanto no cambiará el ángulo de paso de la pala de rotor conectada.

10 Además la figura 4a ilustra que la pendiente de la curva de respuesta 14 fuera de la zona de banda inactiva 15 no es lineal.

Una técnica conocida para al menos compensar parcialmente dichas no linealidades es añadir una compensación de ganancia relacionada que tiene una ganancia aumentada alrededor de la banda inactiva, tal como se ilustra en la figura 4b. La compensación de ganancia es fija en el tiempo y puede o bien fijarse o bien calibrarse, por ejemplo, en el momento de la instalación y/o en el momento de un mantenimiento.

15

Un ejemplo de una curva de respuesta hidráulica compensada 19 del sistema de paso se ilustra en la figura 4c.

20 Sin embargo, las condiciones de funcionamiento y las perturbaciones de los sistemas de paso varían de manera desconocida. Por ejemplo, para un sistema de paso hidráulico, los parámetros de válvula 7, aceite hidráulico y carga pueden variar de manera significativa por ejemplo debido a cambios lentos o perturbaciones estáticas tales como el envejecimiento, variaciones de temperatura, variaciones en el montaje de los cojinetes de pala que provocan variaciones en la fricción del cojinete, variaciones de producción de la válvula hidráulica, etc.

Además las perturbaciones dinámicas o relativamente rápidas tales como cargas de viento, densidad del aire, etc. también tienen una influencia importante en la respuesta global del sistema de paso.

25 La figura 5 ilustra de manera esquemática ejemplos de cómo las características de la curva de respuesta hidráulica pueden cambiar por ejemplo debido a las perturbaciones mencionadas.

30 Para diversas situaciones, los límites de la banda inactiva 17 pueden variar tal como se indica mediante las flechas en la figura, o bien individualmente o bien de manera relacionada, dando como resultado el estrechamiento o ensanchamiento de la zona de banda inactiva. Además una variación en el desfase de la curva de respuesta hidráulica puede producirse tal como se ilustra mediante 18 en la figura. Es más, la pendiente 16 de la curva de respuesta hidráulica 14 puede variar así como la forma de la curva.

Estos cambios demandan que dicha compensación de ganancia se cambie de manera correspondiente para mantener una curva de respuesta hidráulica compensada 19 sustancialmente inalterada.

Por tanto cualquier enfoque convencional para el control de paso sin considerar la variación de dichas condiciones de funcionamiento y perturbaciones de carga no puede obtener un rendimiento óptimo.

35 Se requiere por tanto que la turbina eólica pueda controlarse de manera que compense las condiciones de funcionamiento y perturbaciones variables mencionadas.

Según la presente invención el sistema de paso de una turbina eólica comprende un controlador de compensación para compensar discrepancias en el sistema de paso. Además los parámetros de funcionamiento del controlador de compensación pueden cambiarse durante el funcionamiento.

40 Introduciendo un controlador de compensación para compensar discrepancias en el sistema de paso, las desventajas mencionadas anteriormente del enfoque convencional para el control de paso pueden minimizarse, lo que a su vez da como resultado un funcionamiento optimizado del sistema de paso y un desgaste minimizado de diversos componentes de la turbina eólica.

45 Al poder cambiar los parámetros de funcionamiento del controlador de compensación durante el funcionamiento, puede garantizarse que las características del controlador de compensación pueden alterarse a modos de funcionamiento y/o respuestas a parámetros de entrada deseados.

Como ejemplo de un modo de funcionamiento alterado para el controlador de compensación puede alterarse la ganancia dentro de una banda inactiva hidráulica, es decir alternando la pendiente de la curva representada de manera esquemática en la figura 4b.

50 Según una realización preferida de la invención dicho controlador de compensación comprende un controlador adaptativo. En el contexto de la presente invención, dicho controlador adaptativo se considera como un controlador con parámetros ajustables y un mecanismo para ajustar dichos parámetros.

Un controlador adaptativo puede proporcionar adaptación continua a cambios dinámicos del sistema controlado, es decir los parámetros del controlador cambian dependiendo de cambios de parámetros del sistema por ejemplo debido a la no linealidad del sistema en más puntos de trabajo. En otras palabras, el controlador adaptativo cambia la configuración de control del sistema de modo que su comportamiento responda a los requisitos.

- 5 Para diversas realizaciones de un controlador adaptativo, el algoritmo de control no requiere información a priori relativa al sistema controlado y puede elegir la estructura y los parámetros óptimos de los algoritmos adaptativos, por ejemplo basándose en mediciones continuas de valores del sistema.

Según una realización preferida de la presente invención, dicho controlador de compensación comprende un regulador de autosintonización (STR). La figura 6 ilustra tal STR.

- 10 El STR comprende dos bucles:

- un bucle inferior que contiene el proceso y un controlador por realimentación ordinario
- un bucle superior que está compuesto por un estimador de parámetros y cálculos de diseño. Este bucle ajusta los parámetros del controlador.

Además el proceso adaptativo comprende dos etapas:

- 15 1 - Estimar los parámetros de modelo de proceso.
2 - Actualizar los parámetros del controlador si las estimaciones fuesen correctas.

Para diversas realizaciones de dicho STR, la estimación de parámetros de modelo de proceso usa un algoritmo de estimación de parámetros no recursivo.

- 20 Para una realización de dicho STR, dicha estimación no recursiva de los parámetros de modelo de proceso es un algoritmo de mínimos cuadrados (LS).

Para otra realización de dicho STR, dicha estimación no recursiva de los parámetros de modelo de proceso es un algoritmo de mínimos cuadrados extendido (ELS).

Para otras realizaciones de dicho STR, la estimación de parámetros de modelo de proceso usa un algoritmo de estimación de parámetros recursivo.

- 25 Para una realización de dicho STR, dicha estimación recursiva de los parámetros de modelo de proceso usa un algoritmo de mínimos cuadrados recursivo (RLS).

Para otra realización de dicho STR, dicha estimación recursiva de los parámetros de modelo de proceso usa un algoritmo de mínimos cuadrados recursivo extendido (RELS).

- 30 Para aún otra realización de dicho STR, dicha estimación recursiva de los parámetros de modelo de proceso usa un algoritmo de máxima verisimilitud recursivo (RML).

Para una realización adicional más de dicho STR, dicha estimación recursiva de los parámetros de modelo de proceso usa un algoritmo de aproximaciones estocásticas (STA).

Para una realización de dicho STR, el modelo de diseño de control usa un método de control óptimo de seguimiento LQ.

- 35 Para otra realización de dicho STR, el modelo de diseño de control usa un método de diseño de colocación de polos de entrada/salida.

Según otra realización preferida de la presente invención, dicho controlador de compensación comprende un sistema adaptativo de modelo de referencia (MRAS). La figura 7 ilustra tal MRAS.

- 40 Aplicando un control de MRAS, un proceso hereda el comportamiento de un modelo de referencia deseado. El modelo de referencia está diseñado para cumplir los objetivos del sistema. La idea del MRAS es realizar una actualización en tiempo real de los parámetros del controlador y eliminar así el error entre el modelo de referencia y el proceso. La actualización de parámetros en tiempo real puede conseguirse por ejemplo usando métodos de MIT o de Lyapunov.

- 45 La figura 7 ilustra cómo se actualizan los parámetros del controlador mediante los mecanismos de ajuste basándose en la salida y y en la entrada u de la planta y la entrada del modelo de referencia.

El MRAS puede soportar sistemas lineales y no lineales.

Como ejemplo, la regla MIT es un método para actualizar los parámetros de controlador θ del controlador,

basándose en minimizar la función de pérdida:

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2$$

donde $e = y - y_m$ es decir el error entre la salida del modelo y del proceso.

- 5 La regla MIT se define como $\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta}$, donde γ es una ganancia de adaptación definida por el usuario que expresa cómo de rápido converge el error a cero.

Para diversas realizaciones de la presente invención, los parámetros del controlador adaptativo pueden cambiarse continuamente

Para otra realización dichos parámetros pueden cambiarse durante un periodo de tiempo fijo o cambiarse hasta que un parámetro de error definido esté por debajo de un nivel predefinido.

- 10 Para diversas realizaciones dicho controlador adaptativo puede iniciarse para cambiar sus parámetros ya sea manualmente, tal como en la instalación, en servicio, al cambiar las condiciones ambientales, etc., o de manera automática, según se programe a intervalos de tiempo predefinidos.

- 15 En aún diversas realizaciones de la invención tal como se ilustran de manera esquemática en la figura 8, dicho controlador adaptativo puede iniciarse para cambiar sus parámetros manualmente por ejemplo por medio de una conexión SCADA conectada.

La invención también se refiere a turbinas eólicas que comprenden sistemas de paso eléctricos.

Lista

1. Turbina eólica
2. Torre
- 20 3. Góndola
4. Cubo
5. Pala
6. Mecanismo de paso
7. Válvula
- 25 8. Cilindro
9. Base de la pala de rotor
10. Pistón
11. Manguera hidráulica para la primera parte de la cámara
12. Manguera hidráulica para la segunda parte de la cámara
- 30 13. Extremo distal del vástago de pistón
14. Curva de respuesta hidráulica
15. Banda inactiva
16. Pendiente de la curva de respuesta hidráulica
17. Límites de banda inactiva
- 35 18. Desfase de la curva de respuesta hidráulica
19. Curva de respuesta hidráulica compensada
20. Señal de referencia de paso

21. Señal de control de accionador de paso

REIVINDICACIONES

1. Turbina eólica que comprende
 - un rotor que incluye una o más palas de rotor,
 - un sistema de paso para controlar el ángulo de paso de dichas una o más palas de rotor, comprendiendo dicho sistema de paso al menos un accionador de paso y un controlador de paso para generar señales de control de accionador de paso,
- 5
 caracterizada porque el sistema de paso comprende además
 - elementos sensores de paso dispuestos para establecer valores de frecuencia de paso y fuerza de paso y
 - un controlador de compensación dispuesto para compensar las discrepancias entre dichas señales de control de accionador de paso y dichos valores de frecuencia de paso y fuerza de paso ajustando parámetros de un algoritmo de control de dicho controlador de compensación dependiendo de dichas discrepancias.
- 10
 2. Turbina eólica según la reivindicación 1, en la que dicho controlador de compensación comprende un regulador de autosintonización (STR).
- 15
 3. Turbina eólica según la reivindicación 1, en la que dicho controlador de compensación comprende un sistema adaptativo de modelo de referencia (MRAS).
4. Turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que el controlador de compensación está dispuesto para ajustar continuamente dichos parámetros del algoritmo de control.
- 20
 5. Turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que dicho accionador de paso es un accionador de paso hidráulico.
6. Turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que dicho controlador de compensación está dispuesto además para ajustar dichos parámetros del algoritmo de control dependiendo de valores ambientales tales como la temperatura y la velocidad del viento.
- 25
 7. Turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que dicho controlador de compensación está dispuesto además para ajustar dichos parámetros del algoritmo de control dependiendo de los valores de frecuencia de paso y fuerza de paso.
8. Turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que dicha turbina eólica es una turbina eólica de velocidad variable.
- 30
 9. Método para compensar las discrepancias en un sistema de paso de pala de rotor de turbina eólica, comprendiendo dicho sistema de paso al menos un accionador de paso, un controlador de paso, elementos sensores de paso y un controlador de compensación, comprendiendo dicho método las etapas de:
 - generar señales de control de accionador de paso mediante dicho controlador de paso
 - establecer valores de la frecuencia de paso y la fuerza de paso de dicho accionador de paso mediante dichos elementos sensores,
 - ajustar parámetros de dicho controlador de compensación dependiendo de discrepancias entre dichas señales de control de accionador de paso generadas y dichos valores establecidos de dichas frecuencia de paso y fuerza de paso.
- 35
 10. Método según la reivindicación 9, en el que dichos parámetros de un algoritmo de control se ajustan además dependiendo de valores ambientales.
- 40
 11. Método según cualquiera de las reivindicaciones 9 ó 10, en el que dichos parámetros de un algoritmo de control se ajustan además dependiendo de dichos valores de frecuencia de paso y fuerza de paso.
12. Método según cualquiera de las reivindicaciones de la 9 a la 11, en el que dichos valores establecidos de frecuencia de paso y fuerza de paso se basan en valores medidos.

45

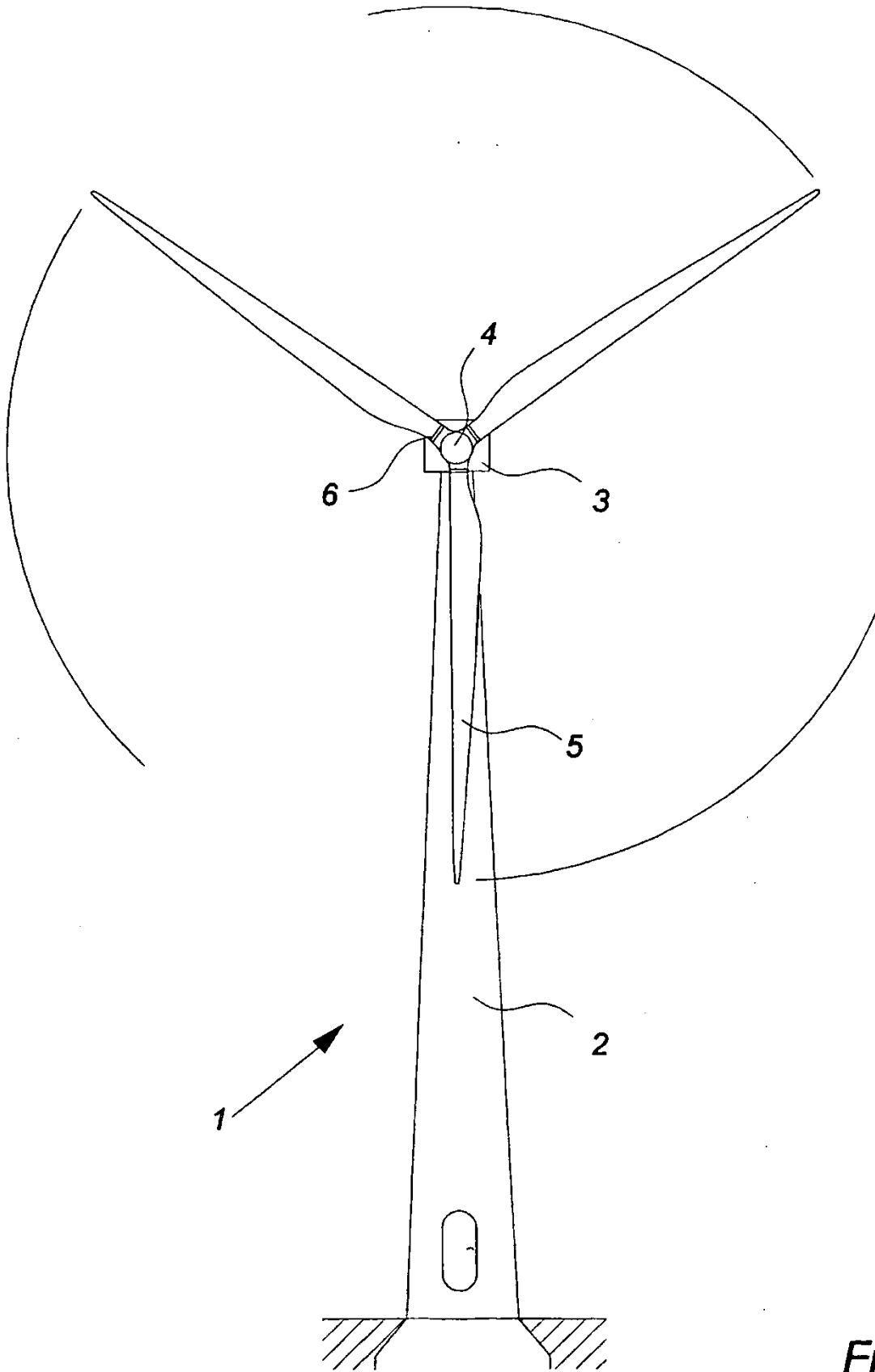


Fig. 1

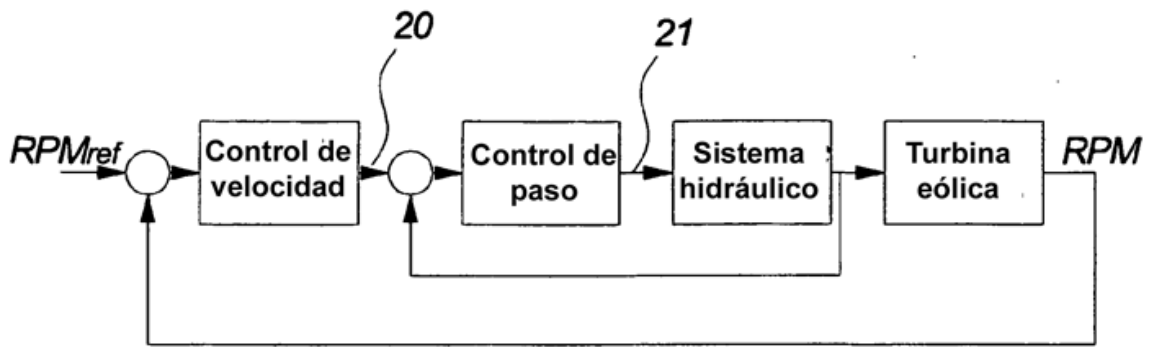


Fig. 2

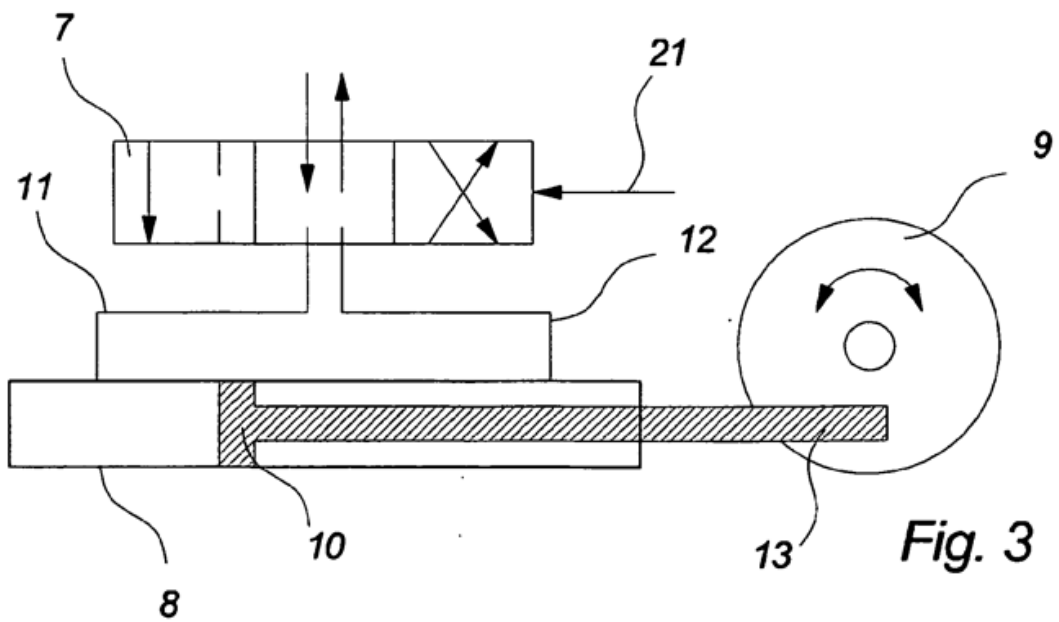


Fig. 3

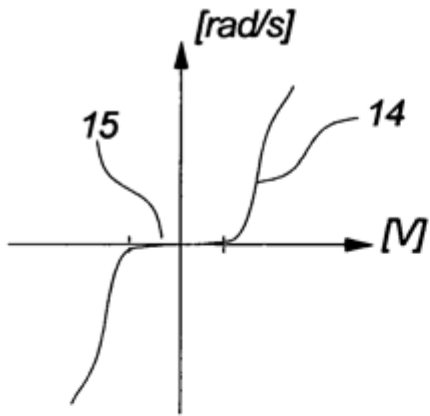


Fig. 4a

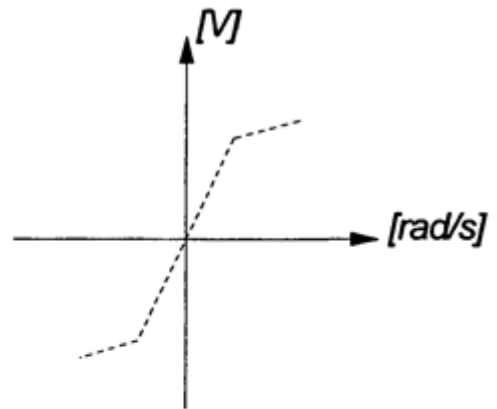


Fig. 4b

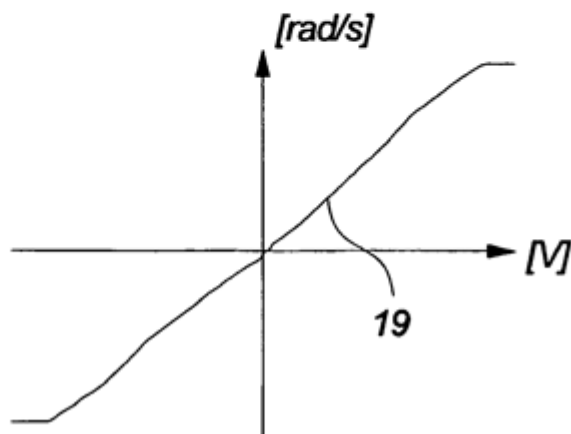
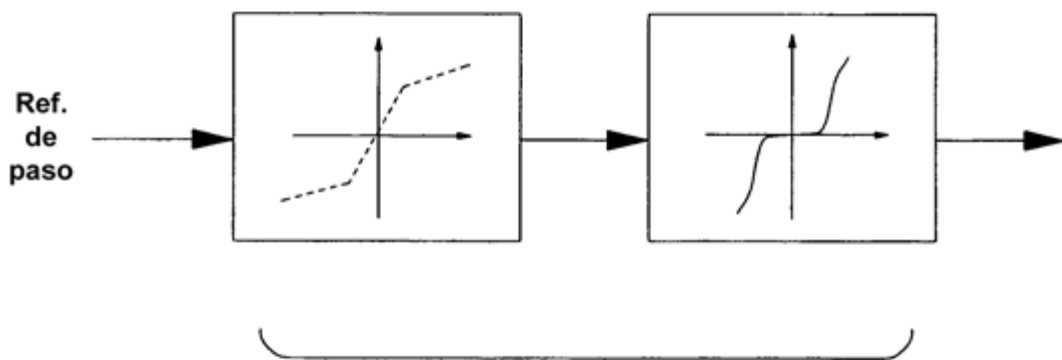


Fig. 4c

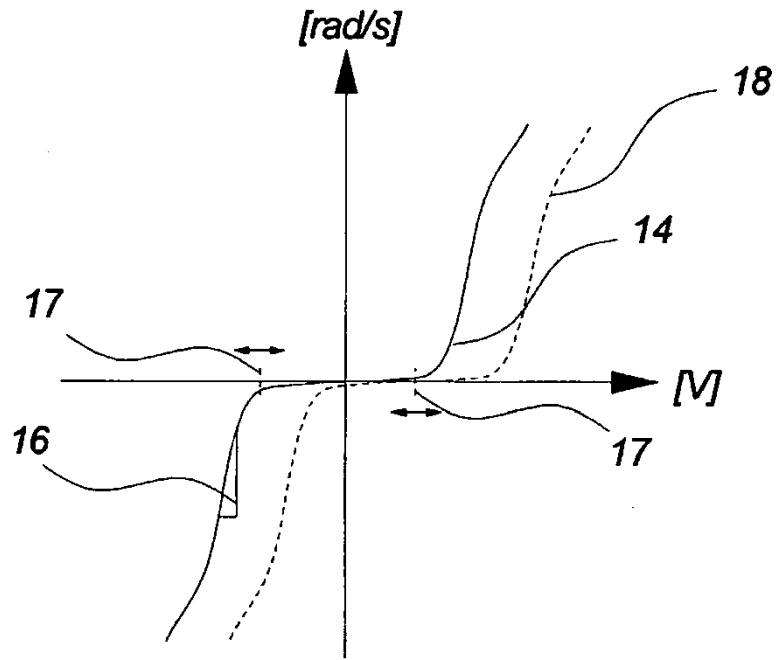


Fig. 5

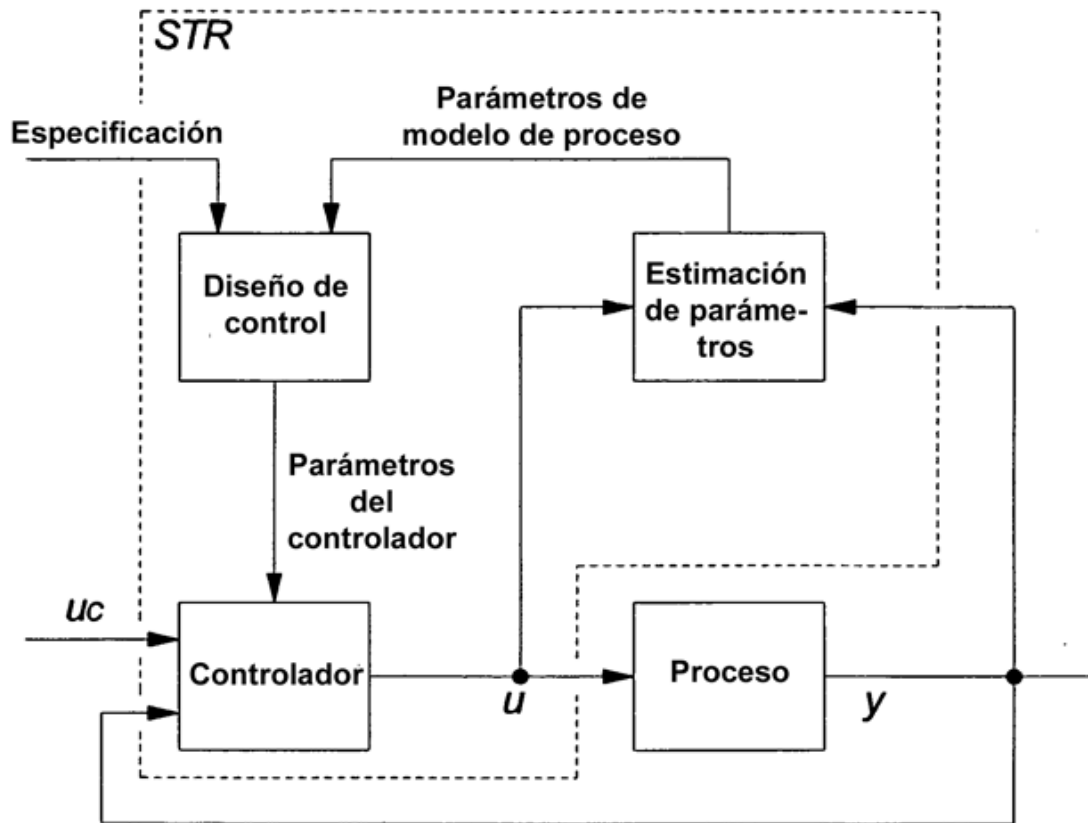


Fig. 6

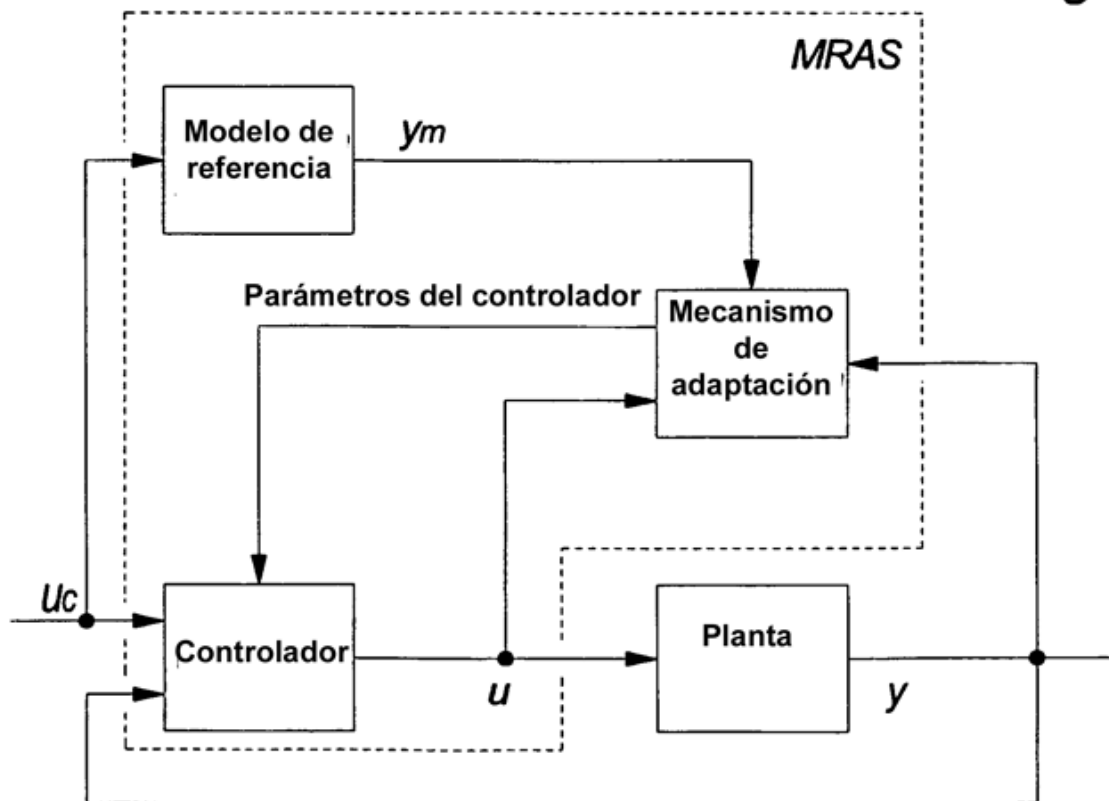


Fig. 7

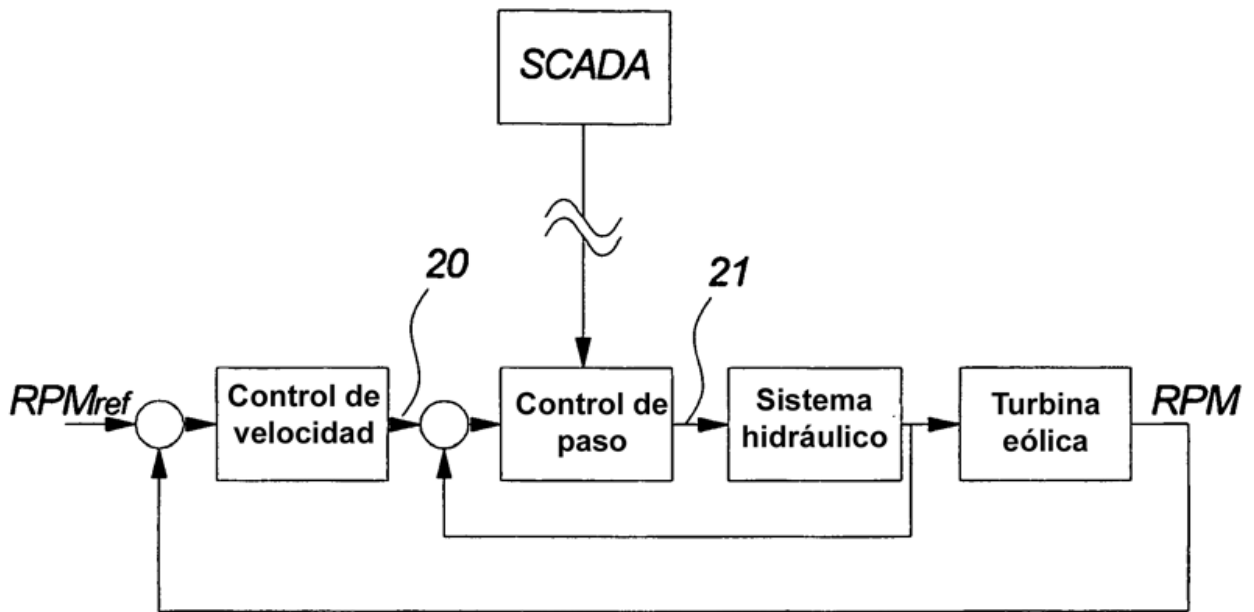


Fig. 8