

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 989 737**

51 Int. Cl.:

F03D 17/00

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.12.2020** **E 20216937 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.09.2024** **EP 3842635**

54 Título: **Operación de un aerogenerador con sensores implementados mediante un modelo de aprendizaje automático entrenado.**

30 Prioridad:

23.12.2019 DK PA201901549

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
27.11.2024

73 Titular/es:

**VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)
Hedeager 42
8200 Aarhus N, DK**

72 Inventor/es:

**DUARTE PEREIRA, GONCALO ARTUR;
PINTO FRUTUOSO, INES;
NIELSEN, JOHNNY y
VAN SCHELVE, JENS**

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 989 737 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

Operación de un aerogenerador con sensores implementados mediante un modelo de aprendizaje automático entrenado

Campo de la invención

- 5 La presente invención se refiere a un método de operación de un aerogenerador con un parámetro operativo donde los valores del parámetro operativo se obtienen mediante diferentes sensores y se comparan para determinar la validez del valor. Un sensor para determinar un valor se puede implementar por un modelo de aprendizaje automático entrenado.

Antecedentes de la invención

- 10 Hay muchos sensores en una turbina que se requieren para que la turbina opere de una manera correcta. Si fallan ciertos sensores, la turbina parará la producción y no arrancará de nuevo antes de que el sensor se haya reparado o sustituido. Esto significa que la turbina perderá producción hasta que un equipo de servicio pueda llegar a la turbina.

- Una forma de reducir el tiempo de inactividad es añadir un sensor redundante que se pueda usar si falla el sensor principal. No obstante, tal sensor redundante puede ser costoso y requerir espacio que no está disponible. También, añadir nuevos sensores requiere nuevas entradas/salidas (I/O), lo que puede requerir una actualización del sistema de control.

- Otra forma de hacer frente al problema de un sensor que falla es proporcionar un modelo informatizado del sistema físico y usar otros sensores, junto con el modelo, para estimar o predecir el parámetro que está midiendo el sensor principal. Este método normalmente está bien para sistemas simples donde se puede hacer un modelo preciso. Uno de los inconvenientes es que normalmente requiere parámetros específicos del tipo de turbina que necesitan ser actualizados cada vez que se fabrica un nuevo tipo de turbina. Otro inconveniente es que algunas veces el modelo es tan complejo que es muy difícil hacerlo encajar con todas las condiciones sin que sea inexacto.

- El documento DE102010054631 A1 describe el uso de modelos de aprendizaje automático en la detección de fallos en un sistema de aerogenerador. Feng Xiaoran et al. describe en "A model-based predictive control for FTC for wind turbine wind speed sensor fault" en la Conferencia sobre Control y Sistemas Tolerantes a Fallos 2013, páginas 504 a 509, el uso de una máquina de vectores de soporte de mínimos cuadrados en el control tolerante a fallos de un aerogenerador. El documento EP3260700 A1 describe el entrenamiento de un llamado sensor de función durante una fase de entrenamiento para predecir datos operativos en base a una entrada.

Compendio de la invención

- 30 Un primer aspecto de la invención proporciona un método de operación de un aerogenerador de acuerdo con la reivindicación 1.

- La presente invención proporciona un método donde el parámetro operativo se determina por dos sensores diferentes, donde uno de los sensores se puede implementar como modelo, por ejemplo, un modelo de aprendizaje automático previamente entrenado. El método tiene en cuenta la posible inexactitud o imprevisibilidad en la salida de un sensor para ciertas situaciones e incluye una validación de un valor de sensor con un segundo valor de sensor antes de confiar en el valor para operar el aerogenerador.

- En conexión con esta invención, el término sensor se usa en un sentido amplio, e incluye un modelo informático implementado en una unidad informática, interconectada con una o más entradas y una salida, la salida que es el valor de sensor. En las realizaciones de la invención, se pueden introducir diversos valores de sensores desde sensores dedicados a un sensor que implementa un modelo, que en base a las entradas, proporciona una salida en forma de un valor (o señal) de sensor. Un sensor es, en un sentido, un dispositivo que, en base a un principio físico, convierte un valor medido en un valor de sensor que representa una cantidad física; a este se puede hacer referencia como sensor físico. En otro sentido, un sensor se implementa en una entidad informática que, en base a cálculos, proporciona el valor de sensor.

- 45 Un primer sensor se implementa como un modelo de aprendizaje automático entrenado, tomando un conjunto de parámetros operativos como entrada y emitiendo el primer valor como el valor de sensor. Por ejemplo, una salida del modelo de aprendizaje automático se puede usar como valor de sensor, tal como una dirección de guiñada, un ajuste de potencia o un ángulo de paso de pala.

- En las realizaciones, se pueden usar sensores de referencia y/o sensores que implementen modelos físicos informatizados. El sensor de referencia puede ser un sensor del aerogenerador, un sensor de otro aerogenerador, o un sensor no asociado con un aerogenerador particular. Del mismo modo, el modelo informatizado puede ser, como alternativa a un modelo de aprendizaje automático, un modelo físico: incluyendo un modelo físico del aerogenerador, un modelo físico de otro aerogenerador, o un modelo físico no asociado con un aerogenerador particular.

El parámetro operativo puede ser un valor que representa una cantidad física, tal como la velocidad del viento, la dirección del viento, el ángulo de paso de pala, la carga de pala, la temperatura, el ángulo de acimut de rotor, la velocidad de rotor, la aceleración de la torre, la potencia, la posición de góndola, la intensidad de la luz u hora del día.

5 Comparar el primer valor con el segundo valor de acuerdo con el criterio de comparación se puede basar en comparar un valor estadístico del primer valor y un valor estadístico del segundo valor que se obtienen analizando estadísticamente una serie temporal del primer y segundo valores. Por ejemplo, el valor estadístico puede ser un valor esperado, un promedio, una desviación estándar, una varianza o una salida de un análisis secuencial acumulativo.

10 Comparar el primer valor con el segundo valor de acuerdo con el criterio de comparación puede ser comparar el primer valor y el segundo valor para generar un indicador (por ejemplo, una diferencia o una relación); y comparar el indicador con un umbral de validación.

15 El primer sensor y/o segundo sensor pueden ser uno o más de: un sensor de temperatura, un sensor de velocidad del viento, un sensor de dirección del viento, un sensor de carga de pala, un sensor de ángulo de paso de pala, un sensor de ángulo de acimut de rotor, un sensor de velocidad de rotor, un sensor de aceleración de la parte superior de la torre, un sensor de potencia, un sensor de posición de góndola, un sensor de intensidad de luz y un sensor de hora del día.

20 El modelo de aprendizaje automático se puede entrenar previamente en un paso anterior alimentando un conjunto de datos de entrenamiento al modelo de aprendizaje automático. El conjunto de datos de entrenamiento puede ser de uno o más de: un sensor de temperatura, un sensor de velocidad del viento, un sensor de dirección del viento, un sensor de carga de pala, un sensor de ángulo de paso de pala, un sensor de ángulo de acimut de rotor, un sensor de velocidad de rotor, un sensor de aceleración de la parte superior de la torre, un sensor de potencia, un sensor de posición de góndola, un sensor de intensidad de luz y un sensor de hora del día. Los sensores usados para producir el conjunto de datos de entrenamiento pueden ser sensores del aerogenerador, un sensor de otro aerogenerador o un sensor no asociado con un aerogenerador particular.

25 En una realización, el primer sensor se basa en un modelo de aprendizaje automático entrenado y el segundo sensor es un sensor de referencia. El sensor del modelo de aprendizaje automático se puede validar comparando la primera salida con la segunda salida del sensor de referencia. En este caso el sensor de referencia puede ser un sensor de dirección del viento, un sensor de dirección del viento, un sensor de ángulo de paso de pala, un sensor de carga de pala o un sensor de temperatura ambiente, por ejemplo.

30 El sensor de referencia puede proporcionar una de las entradas del sensor que se alimentan al sensor del modelo de aprendizaje automático. De esta forma, el sensor del modelo de aprendizaje automático entrenado puede ser una versión mejorada del sensor de referencia.

35 Si el primer valor falla en la validación, entonces se pueden usar el sensor de referencia, el modelo informatizado, y un sensor adicional para operar el aerogenerador. En una realización, en el caso de no validación del primer valor, el aerogenerador se puede apagar, reducir la potencia o se puede cambiar la estrategia de control del aerogenerador.

En una realización, el primer sensor se basa en un modelo de aprendizaje automático entrenado y el segundo sensor se basa en un modelo informatizado, tal como un modelo físico del aerogenerador.

40 En una realización, el primer sensor se basa en un primer modelo de aprendizaje automático entrenado y el segundo sensor se basa en un segundo modelo de aprendizaje automático entrenado.

El segundo modelo de aprendizaje automático es diferente al primer modelo de aprendizaje automático. El segundo modelo de aprendizaje automático se entrena con un conjunto de datos de entrenamiento diferente al primer modelo de aprendizaje automático y/o se entrena usando un método de aprendizaje automático diferente al primer modelo de aprendizaje automático.

45 El método puede comprender además entrenar el primer modelo de aprendizaje automático alimentando un primer conjunto de datos de entrenamiento al primer modelo de aprendizaje automático; y entrenar el segundo modelo de aprendizaje automático alimentando un segundo conjunto de datos de entrenamiento al segundo modelo de aprendizaje automático, en donde el segundo conjunto de datos de entrenamiento es diferente al primer conjunto de datos de entrenamiento.

50 Alternativamente, el primer y segundo modelos de aprendizaje automático se pueden entrenar en el mismo conjunto de datos de entrenamiento pero usando diferentes métodos de aprendizaje automático. Por ejemplo, uno se puede entrenar mediante Regresión Lineal y el otro se puede entrenar mediante Regresión de Máquina de Vectores de Soporte.

55 Opcionalmente, las entradas de sensores son un primer conjunto de entradas de sensores de un primer conjunto de sensores, y el método comprende alimentar un segundo conjunto de entradas de sensores desde un segundo

conjunto de sensores al segundo modelo para obtener la segunda salida, en donde el segundo conjunto de sensores es diferente al primer conjunto de sensores. El primer conjunto de sensores puede ser un único sensor o múltiples sensores. El segundo conjunto de sensores puede ser un único sensor o múltiples sensores.

5 Un aspecto adicional de la invención proporciona un sistema de aerogenerador que comprende un aerogenerador y un sistema de control configurado para operar el aerogenerador mediante el método del primer aspecto de la invención. El sistema de control puede ser parte de una configuración inicial del sistema de aerogenerador o se puede reacondicionar.

10 Un aspecto adicional de la invención proporciona un producto de programa informático que comprende un código de software adaptado para operar un aerogenerador cuando se ejecuta en un sistema de procesamiento de datos, el producto de programa informático que está adaptado para realizar el método del primer aspecto de la invención.

Breve descripción de los dibujos

Ahora se describirán realizaciones de la invención con referencia a los dibujos que se acompañan, en los que:

la Figura 1 muestra un aerogenerador;

la Figura 2 muestra un sistema de control para controlar el aerogenerador de la Figura 1;

15 la Figura 3 muestra un primer método de operación del aerogenerador;

la Figura 4 muestra un segundo método de operación del aerogenerador;

la Figura 5 muestra un tercer método de operación del aerogenerador; y

la Figura 6 muestra un cuarto método de operación del aerogenerador.

Descripción de la realización o realizaciones

20 La Figura 1 muestra un aerogenerador 1. El aerogenerador 1 tiene una torre 2 y una góndola 3 en la parte superior de la torre 2. Un rotor de aerogenerador 4 está conectado a la góndola 3 y dispuesto para girar con relación a la góndola 3. El rotor de aerogenerador 4 comprende un buje de aerogenerador 5, y múltiples palas de aerogenerador 6 que se extienden desde el buje 5. Aunque se muestra un rotor de aerogenerador 4 que tiene tres palas 6, se puede usar un número diferente de palas, tal como dos o cuatro.

25 La Figura 2 ilustra esquemáticamente una realización de un sistema de control 20 para controlar el aerogenerador 1. El rotor 4 está conectado mecánicamente a un generador eléctrico 22 a través de una caja de engranajes 23. En sistemas de accionamiento directo y otros sistemas, la caja de engranajes 23 puede no estar presente. La energía eléctrica generada por el generador 22 se inyecta en una red eléctrica 24 a través de un convertidor eléctrico 25. El generador eléctrico 22 y el convertidor 25 se pueden basar en una arquitectura de convertidor a gran escala (FSC) o en una arquitectura de generador inducción doblemente alimentado (DFIG), pero se pueden usar otros tipos. El sistema de control 20 comprende una serie de elementos, incluyendo al menos un controlador principal 200 con un procesador y una memoria, de modo que el procesador sea capaz de ejecutar tareas informáticas basadas en instrucciones almacenadas en la memoria.

35 En general, el sistema de control 20 asegura que, en operación, el aerogenerador genera un nivel de salida de potencia solicitado. Esto se obtiene ajustando el ángulo de paso de las palas 6 y/o la extracción de potencia del convertidor 25. Con este fin, el sistema de control comprende un sistema de paso que incluye un controlador de paso 27 que usa una referencia de paso 28, y un sistema de potencia que incluye un controlador de potencia 29 que usa una referencia de potencia 26. Las palas de rotor 6 se pueden inclinar mediante un mecanismo de paso. El rotor puede comprender un sistema de paso común que ajusta todos los ángulos de paso en todas las palas del rotor al mismo tiempo, así como además del mismo un sistema de paso individual que es capaz de un paso individual de las palas del rotor.

40 El aerogenerador 1 y el sistema de control 20 juntos constituyen un sistema de aerogenerador. El sistema de control 20 se puede integrar con el aerogenerador 1 - por ejemplo alojar en la góndola o torre. Alternativamente, el sistema de control 20, o elementos del sistema de control 20, se pueden colocar de manera remota en un controlador de central de energía (no mostrado) de modo que el aerogenerador 1 se pueda operar en base a instrucciones proporcionadas externamente.

45 El sistema de control 20 puede recibir señales de sensor desde diversos sensores, tales como los sensores 30-41 mostrados en la Figura 2. Estos sensores comprenden un sensor de carga de pala 30, un sensor de ángulo de acimut de rotor 31, un sensor de velocidad de rotor 32, un sensor de velocidad del viento 33, un sensor de temperatura de buje 34, un sensor de dirección del viento 35, un sensor de aceleración de la parte superior de la torre 36, un sensor de potencia 37, un sensor de posición de góndola 38, un sensor de intensidad de luz 39, un sensor de temperatura de góndola 40 y un sensor de temperatura ambiente 41. Este conjunto de sensores no es exhaustivo, y se pueden usar menos sensores o sensores adicionales si se requiere.

El sistema de control 20 se puede configurar para operar el aerogenerador mediante uno o más de los diversos métodos descritos a continuación con referencia a las Figuras 3 a 6. Más específicamente, el sistema de control 20 puede almacenar un producto de programa informático que comprende un código de software adaptado para operar el aerogenerador 1 cuando se ejecuta en un sistema de procesamiento de datos del sistema de control 20. El producto de programa informático está adaptado para realizar uno o más de los diversos métodos descritos a continuación con referencia a las Figuras 3 a 6.

Se puede usar un primer método mostrado en la Figura 3 para salvaguardar el aerogenerador contra fallos o inexactitudes del sensor de dirección del viento 35, o cualquier otro sensor. La dirección del viento 35 es en esta realización el primer sensor dispuesto para obtener un primer valor del parámetro operativo dirección del viento.

El sensor de dirección del viento 35 emite una dirección del viento con relación al rumbo de la góndola. Por ejemplo, el sensor 35 puede ser una veleta o un sensor de viento ultrasónico.

En un paso anterior, se entrena un modelo de aprendizaje automático alimentando un conjunto de datos de entrenamiento al modelo de aprendizaje automático. El modelo de aprendizaje automático entrenado se implementa como el segundo sensor dispuesto para obtener un segundo valor del parámetro operativo dirección del viento. Esto produce un sensor de modelo de aprendizaje automático entrenado (TMM) 11 mostrado en la Figura 3. El TMM 11 se puede almacenar en la memoria del controlador principal 200, o en cualquier otra ubicación adecuada.

Debido a que es complejo predecir la dirección del viento sin un sensor dedicado, el TMM 11 se puede entrenar usando muchas entradas diferentes. El conjunto de datos de entrenamiento puede comprender señales que indican diversos valores de parámetros tales como la carga de pala, el ángulo de acimut de rotor, la velocidad de rotor, la velocidad del viento, la aceleración de la parte superior de la torre, la potencia y/o la posición de góndola, por ejemplo, junto con la dirección del viento. El conjunto de datos de entrenamiento puede ser de algunos de los sensores 30-41 del aerogenerador 1, u otros sensores (por ejemplo, sensores de otro aerogenerador).

El sensor de TMM 11 entrenado es capaz entonces recibir entradas de sensor 11a (por ejemplo, entradas de algunos o todos los sensores 30-41 del aerogenerador 1) durante la operación del aerogenerador, y producir una salida que predice la dirección del viento en base a estas entradas de sensor 11a.

El sensor de TMM 11 se puede implementar usando una red neuronal o un modelo de regresión de máquina de vectores de soporte, por ejemplo. El sensor de TMM 11 se puede haber entrenado mediante aprendizaje supervisado (desarrollando un modelo predictivo basado en datos tanto de entrada como de salida) o aprendizaje no supervisado (agrupando e interpretando datos basados solamente en datos de entrada).

Como sensor adicional, también se proporciona un modelo informatizado en forma de un sensor de modelo físico simple (SPM) 12. El sensor de SPM 12 se puede almacenar en la misma memoria que el sensor de TMM 11, o en cualquier otro lugar adecuado. A diferencia del TMM 11, el SPM 12 no se entrena mediante aprendizaje automático, sino que más bien se genera de alguna otra forma. El SPM 12 en este ejemplo puede producir una salida predictiva de la dirección del viento en base a las señales de entrada 12a de un sensor de velocidad del viento y un sensor de potencia.

El SPM 12 se puede almacenar en la memoria del controlador principal 200 y recibir señales de entrada desde el sensor de velocidad del viento 33 y el sensor de potencia 37 del aerogenerador 1. Alternativamente, el SPM 12 se puede almacenar en otro aerogenerador y/o recibir señales de sensores equivalentes de sensores de otro aerogenerador.

Si el sensor de dirección del viento 35 está bien, entonces la señal de dirección del viento del sensor 35 y/o la estimación de dirección del viento del TMM 11 se usa por el sistema de control 20 para operar el aerogenerador en el paso 50. De este modo, por ejemplo, si la dirección del viento cambia, entonces la dirección de guiñada de la góndola y/u otros parámetros operativos del aerogenerador se pueden cambiar en el paso 50 en respuesta al cambio de dirección del viento.

Si el sensor de dirección del viento 35 no está bien (por ejemplo, si ha fallado o está produciendo datos inexactos), entonces el sensor de TMM 11 se valida en el paso 15 y solamente se usa por el sistema de control 10 como sustituto del sensor 35 en el paso 51 si pasa el proceso de validación.

Más específicamente, el sistema de control 20 puede alimentar entradas de sensor 11a al sensor de TMM 11 para obtener un primer valor 11b. A modo de ejemplo, estas entradas de sensor 11a se pueden recibir desde el sensor de carga de pala 30, el sensor de ángulo de acimut de rotor 31, el sensor de velocidad de rotor 32, el sensor de velocidad del viento 33, el sensor de aceleración de la parte superior de la torre 36, el sensor de potencia 37 y el sensor de posición de góndola 38. El TMM 11 se valida luego en el paso 15 comparando el primer valor 11b con un segundo valor 12b del sensor de SPM 12.

En respuesta a obtener un valor válido del sensor de TMM 11 (es decir, si el TMM 11 se valida en el paso 15), entonces el valor de sensor de TMM 11 se puede usar para operar el aerogenerador en el paso 51. De este modo, por ejemplo, si la dirección del viento predicha por el sensor de TMM 11 cambia, entonces la dirección de guiñada

de la góndola y/u otros parámetros operativos del aerogenerador se pueden cambiar en el paso 51 en respuesta al cambio.

El valor de sensor de TMM 11 se puede validar determinando una diferencia o relación entre el primer valor 11b y el segundo valor 12b; y comparar la diferencia o relación con un umbral. Por ejemplo, el valor de sensor de TMM 11 se puede validar si $\text{abs}(\text{TMM-SPM})$ es menor que un umbral, donde (TMM-SPM) es una diferencia entre el primer y segundo valores 11b y 12b de los sensores.

En este caso, el TMM 11 se valida en el paso 15 comparando directamente los valores de parámetros instantáneos únicos (es decir, valores de dirección del viento) emitidos por el TMM 11 y el SPM 12. En otros ejemplos, los valores estadísticos (es decir, valores obtenidos analizando estadísticamente una serie temporal de valores de parámetros) se pueden comparar en lugar de (o además de) los valores de parámetros, para validar el TMM 11.

Por ejemplo, el sistema de control 20 puede calcular una diferencia entre WD1 (Promedio) y WD2 (Promedio), donde WD1 (Promedio) es un promedio medio de una serie temporal de las direcciones del viento generada por el TMM 11, y WD2 (Promedio) es un promedio de una serie temporal de las direcciones del viento generada por el SPM 12.

En otro ejemplo, el sistema de control 20 puede calcular una relación entre SD1 y SD2, donde SD1 es una desviación estándar de una serie temporal de direcciones del viento generada por el TMM 11, y SD2 es una desviación estándar de una serie temporal de direcciones del viento generada por el SPM 12. Si la relación SD1/SD2 está fuera de un rango (por ejemplo, 0,8 a 1,2), entonces el TMM 11 no se valida y no se usa para operar el aerogenerador en el paso 51. Si la relación SD1/SD2 está dentro del rango, el TMM 11 se puede validar y usar para operar el aerogenerador en el paso 51.

En otros ejemplos, el sistema de control 20 puede realizar la validación comparando otras medidas estadísticas, por ejemplo, un valor máximo, un valor mediano, un valor mínimo, una varianza o una salida de un análisis secuencial acumulativo tal como CUSUM.

Si el TMM 11 no se valida, entonces el proceso puede alcanzar un estado 52 de "función que no funciona". Cuando este estado 52 de "función que no funciona" se alcanza en respuesta a una no validación del TMM 11, entonces se pueden tomar una serie de acciones. Por ejemplo, el sistema de control 20 puede usar otro sistema sustituto para operar el aerogenerador. El sistema sustituto puede ser un sensor de referencia redundante, el sensor de SPM 12, un sensor adicional o un modelo adicional (no mostrado), por ejemplo. Alternativamente, el sistema de control 20 puede apagarse, aumentar o reducir la potencia del aerogenerador cuando alcance el estado 52.

En resumen, tras el fallo del sensor de dirección del viento 35, el proceso de la Figura 3 opera de la siguiente manera. Las entradas del sensor 11a se introducen en el sensor de TMM 11 para obtener un primer valor 11b. El sensor de TMM 11 se valida comparando el primer valor 11b con un segundo valor 12b del sensor de SPM 12. En respuesta a una validación del valor de sensor de TMM 11b, el sensor de TMM 11 se usa para operar el aerogenerador. El sensor de TMM 11 continúa siendo usado, y se valida continuamente alimentando entradas de sensor adicionales al sensor de TMM 11 para obtener unos primeros valores posteriores, y validar el sensor de TMM 11 comparando los primeros valores posteriores con los segundos valores posteriores del sensor de SPM 12. Esto continúa hasta que el TMM 11 falla en la validación del proceso. En respuesta a una no validación del TMM 11, el proceso alcanza el estado 52 de "función que no funciona".

El método de la Figura 3 usa el sensor de TMM 11 como solución de respaldo si el sensor 35 está fallando. No obstante, un problema con algunos modelos de aprendizaje automático entrenados es que no siempre son tan buenos si encuentran situaciones diferentes de las situaciones en las que se han entrenado. Esto significa que algunas veces el TMM 11 puede dar salidas que están equivocadas. El sensor de SPM 12 puede no ser muy exacto, pero seguirá algunas reglas físicas simples que evitarán que esté totalmente equivocado. Comparando las señales del sensor de SPM 12 y el sensor de TMM 11 es posible comprobar si el TMM 11 se equivoca repentinamente y por ello informar al sistema de control 20 que la salida del TMM 11 ya no es válida.

El método de la Figura 3 salvaguarda el aerogenerador contra fallos o inexactitudes del sensor de dirección del viento 35, pero se puede usar un método equivalente para salvaguardar el aerogenerador contra fallos o inexactitudes de cualquiera de sus otros sensores 30-41.

Un ejemplo de un método equivalente es uno que salvaguarda el aerogenerador contra fallos o inexactitudes de un sensor de temperatura de aceite de caja de engranajes - es decir, un sensor que mide la temperatura del aceite en la caja de engranajes 23. Un sensor de cojinete mide la temperatura del cojinete. El aceite se calienta porque el cojinete se calienta y el aceite está enfriando el cojinete. Así, se sabe que en casi todos los casos la temperatura del cojinete será más alta que la temperatura del aceite, por ejemplo 1°C más alta, 10-12°C más alta y en algunos casos hasta 20°C más alta. Así, un modelo físico simple en este caso podría ser simplemente que la temperatura del aceite se supone que es 10° más baja que la temperatura del cojinete.

Esta salida del modelo físico simple se puede comparar con la salida de un modelo de aprendizaje automático que toma como sus entradas el flujo de agua de entrada, la temperatura de enfriamiento del agua, la potencia y la temperatura ambiente, por ejemplo. Esto permite que el modelo de aprendizaje automático se valide si su salida está

cerca de la salida del modelo físico simple (por ejemplo, dentro de 5°C). La salida del modelo de aprendizaje automático validado se puede usar entonces para operar el aerogenerador: por ejemplo, si la temperatura del aceite del engranaje excede los 80°C, entonces la turbina se puede parar.

5 Un segundo método mostrado en la Figura 4 usa una predicción de la temperatura ambiente a partir de un modelo de aprendizaje automático 111 para operar el aerogenerador.

10 Un modelo de aprendizaje automático se entrena en un paso anterior alimentando un conjunto de datos de entrenamiento al modelo de aprendizaje automático. Esto produce el sensor del modelo de aprendizaje automático entrenado (TMM1) 111 mostrado en la Figura 4. El sensor de TMM1 111 se puede almacenar en la memoria del controlador principal 200, o en cualquier otra ubicación adecuada. El conjunto de datos de entrenamiento puede comprender señales que indican la temperatura ambiente, la temperatura de góndola, la temperatura del buje, la potencia, la velocidad del viento, la intensidad de luz y la hora del día. El conjunto de datos de entrenamiento puede ser de algunos de los sensores 30-41 del aerogenerador 1, u otros sensores (por ejemplo, sensores de otro aerogenerador).

15 El sensor de TMM1 111 entrenado entonces es capaz durante la operación de recibir entradas de sensor 111a (por ejemplo, entradas de algunos o todos los sensores 30-41 del aerogenerador 1) y producir una salida como primer valor que predice la temperatura ambiente en base a estas entradas de sensor. Obsérvese que las entradas de sensor 111a al TMM 111 pueden incluir una entrada del sensor de temperatura ambiente 41, que en este caso también actúa como sensor de referencia, por lo que se hará referencia a él a continuación como sensor de referencia 41.

20 Al igual que el TMM 11, el sensor de TMM1 111 puede estar implementando una red neuronal o un modelo de regresión de máquina de vectores de soporte, por ejemplo. El sensor de TMM1 111 se puede entrenar mediante aprendizaje supervisado (desarrollando un modelo predictivo basado en datos tanto de entrada como de salida) o aprendizaje no supervisado (agrupando e interpretando datos basados solamente en datos de entrada).

25 El TMM1 111 se valida en el paso 115 y solamente se usa por el sistema de control 20 en el paso 151 si pasa el proceso de validación.

Más específicamente, el sistema de control 20 puede alimentar entradas de sensor 111a al sensor de TMM1 111 para obtener un primer valor 111b. A modo de ejemplo, estas entradas de sensor 111a se pueden recibir desde el sensor de referencia 41, el sensor de temperatura de góndola 40, el sensor de temperatura de buje 34, el sensor de potencia 37, el sensor de velocidad del viento 33, el sensor de intensidad de luz 39 y un sensor de hora del día. El TMM1 111 luego se valida comparando el primer valor 111b con un segundo valor 41b del sensor de referencia 41.

35 En respuesta a una validación del valor de sensor de TMM1 111a (es decir, si el TMM 111 se valida en el paso 115), entonces el TMM1 111 se puede usar para operar el aerogenerador en el paso 151. De este modo, por ejemplo, si la temperatura ambiente predicha por la salida 111b del TMM1 111 cambia, entonces los parámetros operativos del aerogenerador se pueden cambiar en el paso 151. Por ejemplo, si la temperatura ambiente llega a ser muy alta, entonces el aerogenerador puede reducir su potencia.

El TMM1 111 se puede validar determinando una diferencia o relación entre el primer valor 111b del sensor de TMM1 111 y el segundo valor 41b del segundo sensor en forma de sensor de referencia 41; y comparar la diferencia o relación con un umbral. Por ejemplo, el TMM1 111 puede validar si $abs(TMM1-Sensor)$ es menor que un umbral - donde $(TMM1-Sensor)$ es una diferencia entre los valores 111b y 41b.

40 En este caso, el TMM1 111 se valida en el paso 115 comparando directamente valores de parámetros instantáneos únicos (es decir, valores de temperatura ambiente) emitidos por el TMM1 111 y el sensor de referencia 41. En otros ejemplos, los valores estadísticos (es decir, valores obtenidos estadísticamente analizando una serie temporal de valores de parámetros) se pueden comparar en lugar de, o además de los valores de parámetros, para validar el TMM1 111.

45 Por ejemplo, el sistema de control 20 puede calcular una diferencia entre T1 (Promedio) y T2 (Promedio), donde T1 (Promedio) es un promedio medio de una serie temporal de temperaturas generada por el TMM1 111, y T2 (Promedio) es un promedio de una serie temporal de temperaturas generada por el sensor de referencia 41.

50 En otro ejemplo, el sistema de control 20 puede calcular una relación entre SD1 y SD2, donde SD1 es una desviación estándar de una serie temporal de direcciones del viento generada por el TMM1 111, y SD2 es una desviación estándar de una serie temporal de direcciones del viento generada por el sensor de referencia 41.

Si la relación SD1/SD2 está fuera de un rango (por ejemplo, de 0,8 a 1,2), entonces el TMM1 111 no se valida y no se usa para operar el aerogenerador en el paso 151. Si la relación SD1/SD2 está dentro del rango, el TMM1 111 se puede validar y usar para operar el aerogenerador en el paso 151.

En otros ejemplos, el sistema de control 20 puede realizar la validación comparando otras medidas estadísticas, por ejemplo, un valor máximo, un valor mediano, un valor mínimo, una varianza o una salida de un análisis secuencial acumulativo tal como CUSUM.

5 Si el TMM1 111 no se valida en el paso 115 (es decir, la respuesta en el paso 115 es "No"), entonces el proceso comprueba si el sensor de referencia 41 está bien. Si el sensor de referencia 41 está bien, entonces la señal de temperatura ambiente del sensor de referencia 41 se usa por el sistema de control 20 para operar el aerogenerador en el paso 150.

10 Si el sensor de referencia 41 no está bien, entonces el proceso alcanza un estado 152 de "función que no funciona". Cuando se alcanza este estado 152 de "función que no funciona", entonces se pueden tomar una serie de acciones. Por ejemplo, el sistema de control 20 puede usar otro sistema sustituto para operar el aerogenerador. El sistema sustituto puede ser, por ejemplo, un sensor de temperatura ambiente adicional o un modelo adicional (no mostrado). Alternativamente, el sistema de control 20 puede apagar, aumentar o reducir la potencia del aerogenerador.

15 En resumen, el proceso de la Figura 4 opera de la siguiente manera. Las entradas de sensor 111a se alimentan al sensor de TMM1 111 para obtener un primer valor 111b. El TMM1 111 se valida comparando el primer valor 111b con un segundo valor 41b de un sensor de referencia 41. En respuesta a una validación del sensor de TMM1 111, el TMM1 111 se usa para operar el aerogenerador. El TMM1 111 continúa siendo usado y validado continuamente alimentando entradas de sensor posteriores al TMM1 111 para obtener unos primeros valores posteriores, y validar el TMM1 111 comparando los primeros valores posteriores con los segundos valores posteriores del sensor de referencia 41. Esto continúa hasta que el TMM1 111 falla en el proceso de validación. En respuesta a una no validación del TMM1 111, el proceso o bien usa el sensor de referencia 41 o bien alcanza el estado 152 de "función que no funciona".

El método de la Figura 4 usa una predicción de temperatura ambiente del TMM 111 para operar el aerogenerador, y usa el sensor de temperatura ambiente 41 como sensor de referencia. Se puede usar un método equivalente para otros parámetros, usando uno de los otros sensores 30-41 como sensor de referencia.

25 En lugar de usar un sensor de TMM 11 como respaldo para un sensor 35 (como en la Figura 3), se puede usar el método de la Figura 4 si el sensor de TMM1 111 es mucho más preciso que el sensor 41. El sensor 41 solamente se usa como respaldo y para validar el TMM 111. El sensor 41 también se puede usar por el TMM 111 para dar una salida más exacta.

30 Un tercer método mostrado en la Figura 5 usa un sensor que implementa un modelo de aprendizaje automático entrenado para proporcionar, por ejemplo, una estimación de la dirección del viento para la operación del aerogenerador 1.

35 El método de la Figura 5 usa el sensor de dirección del viento 35 y un primer sensor que implementa un primer modelo de aprendizaje automático entrenado (TMM1) 211. El TMM1 211 puede ser idéntico al TMM 11 de la Figura 3 excepto que está entrenado en un conjunto de datos de entrenamiento ligeramente diferente: en este ejemplo, el TMM1 211 se puede entrenar en un conjunto de señales que indican la carga de pala, el ángulo de acimut de rotor, la velocidad de rotor, la velocidad del viento y la aceleración de la parte superior de la torre.

40 También se proporciona un segundo sensor que implementa un segundo modelo de aprendizaje automático entrenado (TMM2) 121. En contraste con el SPM 12 de la Figura 3, el sensor de TMM2 121 de la Figura 5 implementa un modelo de aprendizaje automático entrenado similar al TMM 11. El TMM2 121 genera una salida 121b basada en las entradas de sensor 121a.

Al igual que el sensor de TMM 11, el segundo sensor de TMM2 121 se entrena alimentando un conjunto de datos de entrenamiento en el modelo de aprendizaje automático en un paso anterior. No obstante, el conjunto de datos de entrenamiento para el segundo TMM2 121 es ligeramente diferente al conjunto de datos de entrenamiento para el primer TMM1 211.

45 A modo de ejemplo, el TMM1 211 se puede haber entrenado alimentando un primer conjunto de datos de entrenamiento en el TMM1 211 (por ejemplo, carga de pala, ángulo de acimut de rotor, velocidad de rotor, velocidad del viento y aceleración de la parte superior de la torre); y el TMM2 121 se puede haber entrenado alimentando un segundo conjunto de datos de entrenamiento en el TMM2 121 (por ejemplo, carga de pala, ángulo de acimut de rotor, velocidad de rotor, velocidad del viento, potencia y posición de góndola). En este ejemplo, el segundo conjunto de datos de entrenamiento es ligeramente diferente al primer conjunto de datos de entrenamiento. Los conjuntos de datos de entrenamiento pueden ser de algunos de los sensores 30-41 del aerogenerador 1 u otros sensores (por ejemplo, sensores de otro aerogenerador).

55 Cada sensor que implementa un modelo de aprendizaje automático entrenado entonces es capaz de recibir un conjunto respectivo de entradas de sensor 211a, 121a (por ejemplo, entradas de algunos de los sensores 30-41 del aerogenerador 1) durante la operación del aerogenerador 1 y producir un salida 211b, 121b en forma de valores de sensor que predicen la dirección del viento en base a estas entradas de sensores.

Al igual que el TMM 11 de la Figura 3, cada sensor 211, 121 puede comprender una red neuronal o un modelo de regresión de máquina de vectores de soporte, por ejemplo. Los sensores 211, 121 se pueden haber entrenado mediante aprendizaje supervisado (desarrollando un modelo predictivo basado en datos tanto de entrada como de salida) o aprendizaje no supervisado (agrupando e interpretando datos basados solamente en datos de entrada).

- 5 Para reducir el riesgo de que los sensores fallen de la misma forma, los sensores 211 y 121 se pueden entrenar usando diferentes métodos de aprendizaje automático tales como, pero no limitado a: Regresiones Lineales y no Lineales; Redes Neuronales (y derivadas); Regresión de Máquina de Vectores de Soporte; Árboles de Decisión; Regresión de Proceso Gaussiano; y Conjuntos de Árboles.

- 10 Alternativamente, los sensores 211 y 121 se pueden haber entrenado usando los mismos métodos de aprendizaje automático, pero con diferentes conjuntos de datos de entrenamiento. Por ejemplo, los conjuntos de datos de entrenamiento pueden ser de diferentes conjuntos de sensores, diferentes tipos de turbinas o diferentes ubicaciones geográficas. También se puede usar cualquier combinación de los métodos mencionados anteriormente.

En la realización ilustrada, el sensor de TMM1 es el primer sensor que obtiene el primer valor 211b y el sensor de TMM2 es el segundo sensor que obtiene el segundo valor 121b.

- 15 Los valores de los sensores 211, 121 se validan en el paso 215 y solamente se usan por el sistema de control 20 para operar el aerogenerador si pasan el proceso de validación.

- 20 Más específicamente, el sistema de control 20 puede alimentar entradas de sensor 211a al sensor 211 para obtener un primer valor 211b. A modo de ejemplo, estas entradas de sensor 211a se pueden recibir desde el sensor de carga de pala 30, el sensor de ángulo de acimut de rotor 31, el sensor de velocidad de rotor 32, el sensor de velocidad del viento 33 y el sensor de aceleración de la parte superior de la torre 36.

De manera similar, el sistema de control 20 puede alimentar entradas de sensor 121a al sensor 121 para obtener un segundo valor 121b. A modo de ejemplo, estas entradas de sensor 121a se pueden recibir desde el sensor de carga de pala 30, el sensor de ángulo de acimut de rotor 31, el sensor de velocidad de rotor 32, el sensor de velocidad del viento 33, el sensor de potencia 37 y el sensor de posición de góndola 38.

- 25 Como con los conjuntos de datos de entrenamiento, las entradas de sensor 121a alimentadas al sensor 121 pueden ser de un conjunto diferente de sensores que las entradas de sensor 211a alimentadas al sensor 211. Por ejemplo, las entradas de sensor 211a pueden ser de un primer conjunto de sensores 30-33 y 36; y las entradas de sensor 121a pueden ser de un segundo conjunto de sensores 30-33, 37 y 38.

- 30 Los sensores 211, 121 luego se validan en el paso 215 comparando el primer valor 211b con el segundo valor 121b. Si ambos sensores implementados mediante el modelo de aprendizaje automático se comportan como se espera, entonces las salidas deberían ser similares o idénticas.

- 35 En respuesta a una validación del sensor 211, 121 (es decir, si los valores de sensor se validan en el paso 215), entonces uno o ambos de los TMM 211, 121 se pueden usar para operar el aerogenerador en el paso 251. Por ejemplo, se puede usar un promedio de los dos modelos, o solamente uno de los modelos. De este modo, si la dirección del viento predicha por el modelo o modelos cambia, entonces la dirección de guiñada de la góndola y/u otros parámetros operativos del aerogenerador se pueden cambiar en respuesta.

- 40 Los valores de sensor se pueden validar en el paso 215 determinando una diferencia o relación entre el primer valor 211b y el segundo valor 121b; y comparar la diferencia o relación con un umbral. Por ejemplo, los sensores se pueden validar si $\text{abs}(\text{TMM1}-\text{TMM2})$ es menor que un umbral - donde $(\text{TMM1}-\text{TMM2})$ es una diferencia entre los valores 211b y 121b.

En este caso, los sensores se validan comparando directamente valores de parámetros instantáneos únicos (es decir, valores de dirección del viento) emitidos por los sensores. En otros ejemplos, se pueden comparar valores estadísticos (es decir, valores obtenidos analizando estadísticamente una serie temporal de valores de parámetros) en lugar de, o además de los valores de parámetros, para validar los TMM.

- 45 Por ejemplo, el sistema de control 20 puede calcular una diferencia entre WD1 (Promedio) y WD2 (Promedio), donde WD1 (Promedio) es un promedio medio de una serie temporal de direcciones del viento generada por el primer sensor de TMM1 211, y WD2 (Promedio) es un promedio medio de una serie temporal de direcciones del viento generada por el segundo sensor de TMM2 121.

- 50 En otro ejemplo, el sistema de control 20 puede calcular una relación entre SD1 y SD2, donde SD1 es una desviación estándar de una serie temporal de direcciones del viento generada por el primer sensor de TMM1 211, y SD2 es una desviación estándar de una serie temporal de direcciones del viento generada por el segundo sensor de TMM2 121. Si la relación SD1/SD2 está fuera de un rango (por ejemplo, 0,8 a 1,2), entonces los valores de sensor no se validan y no se usan para operar el aerogenerador en el paso 251. Si la relación SD1/SD2 está dentro del rango, los valores de sensor se pueden validar y uno o ambos se pueden usar para operar el aerogenerador en el paso 251.

En otros ejemplos, el sistema de control 20 puede realizar la validación comparando otras medidas estadísticas, por ejemplo, un valor máximo, un valor mediano, un valor mínimo, una varianza o una salida de un análisis secuencial acumulativo tal como CUSUM.

5 Si los sensores no se validan en el paso 215, entonces se puede comprobar el sensor de dirección del viento 35. Si el sensor de dirección del viento 35 está bien, entonces la señal de dirección del viento del sensor 35 se puede usar por el sistema de control 20 para operar el aerogenerador en el paso 250.

Si el sensor de dirección del viento 35 no está bien (por ejemplo, si ha fallado o está produciendo datos inexactos), entonces el proceso alcanza el estado 52 de "función que no funciona".

10 El proceso de la Figura 5 usa el sensor de dirección del viento 35 como respaldo. Opcionalmente, el sensor de dirección del viento 35 se puede ajustar o corregir en el paso 260 en base a las predicciones de la dirección del viento a partir de los valores de sensor 211, 121 validados - por ejemplo modificando una ganancia o desplazamiento aplicado a la salida del sensor 35. Esto mejora la exactitud y fiabilidad del sensor 35. En escenarios donde fallan los sensores implementados mediante el modelo de aprendizaje automático, la función puede conmutar al sensor 35 recién calibrado con una exactitud más alta hasta que los sensores implementados mediante el modelo de aprendizaje automático produzcan señales válidas.

15 En resumen, el proceso de la Figura 5 opera de la siguiente manera. Un primer sensor está implementando un primer modelo de aprendizaje automático (TMM1 211) que se ha entrenado alimentando un primer conjunto de datos de entrenamiento al primer modelo de aprendizaje automático. Un segundo sensor está implementando un segundo modelo de aprendizaje automático (TMM2 121) que se ha entrenado alimentando un segundo conjunto de datos de entrenamiento al segundo modelo de aprendizaje automático. El segundo conjunto de datos de entrenamiento es diferente del primer conjunto de datos de entrenamiento. El primer y segundo conjuntos 211a, 121a de entradas de sensor se alimentan a los sensores para obtener las salidas 211b, 121b. Los conjuntos 211a, 121a de entradas de sensores son diferentes uno de otro. Los valores de sensor de los sensores 211 y 121 se validan comparando sus salidas 211b, 121b. En respuesta a una validación de los sensores 211, 121, uno o ambos de los valores de sensor se usan para operar el aerogenerador. El sensor 211, 121 continúa siendo usado y validado continuamente alimentando entradas de sensor posteriores a los sensores 211, 121 para obtener un primer y segundo valores posteriores, y validar los sensores 211, 121 comparando estos valores posteriores. Esto continúa hasta que los valores de sensor fallan en el proceso de validación. En respuesta a una no validación de los sensores 211, 121, se usa el sensor 35. Si el sensor 35 no está bien, entonces el proceso alcanza el estado 52 de "función que no funciona".

20 El método de la Figura 5 se usa para controlar el aerogenerador sobre la base de estimaciones de la dirección del viento a partir de un par de sensores implementados mediante el modelo de aprendizaje automático, usando el sensor de dirección del viento 35 como respaldo. Se puede usar un método equivalente para controlar el aerogenerador sobre la base de la predicción de otros valores de parámetros (tales como la temperatura ambiente, la velocidad del viento, etc.) de otros modelos de aprendizaje automático, usando otro de los otros sensores 30-41 como respaldo.

Un cuarto método mostrado en la Figura 6 usa sensores basados en modelos 300-302 para proporcionar una predicción de valores de parámetros para la operación del aerogenerador 1.

40 El método de la Figura 6 es similar a la Figura 5 en el sentido de que usa un primer y segundo sensores que implementan modelos de aprendizaje automático entrenados (sensor de TMM1 300 y sensor de TMM2 301) que se han entrenado usando conjuntos de datos de entrenamiento ligeramente diferentes y/o métodos de aprendizaje automático diferentes. El parámetro operativo para la Figura 5 es la dirección del viento, mientras que la Figura 6 es más genérica, no haciendo referencia a ningún parámetro operativo específico. El parámetro operativo para la Figura 6 puede ser la dirección del viento, la temperatura ambiente o cualquier otro parámetro. La realización de la Figura 6 permite que el aerogenerador se opere sin que ningún sensor mida directamente el parámetro.

También se proporciona un tercer sensor que implementa un tercer modelo 302. El tercer modelo puede ser un tercer modelo de aprendizaje automático entrenado, entrenado usando un conjunto de datos de entrenamiento diferente y/o un método de aprendizaje automático diferente al TMM 300 y al TMM 301. Alternativamente, el tercer modelo 302 puede ser un modelo físico simple similar al SPM 12 mostrado en la Figura 3.

50 Diferentes conjuntos 300a, 301a, 302a de entradas de sensor se introducen en los tres modelos 300-302, que generan tres salidas 300b, 301b, 302b respectivas. Estas salidas se comparan en el paso de validación 315. Si al menos dos de entre tres de las salidas están de acuerdo, entonces se validan los dos o tres modelos asociados con estas salidas. La salida de uno o más de los modelos validados entonces se usa como el parámetro operativo del aerogenerador en el paso 351. Cuando se usan las salidas de múltiples sensores en el paso 351, entonces se puede usar un promedio, por ejemplo.

Si ninguna de las salidas 300b, 301b, 302b están de acuerdo unas con otras, entonces el proceso alcanza un estado 352 de "función que no funciona" similar a los estados 52, 152 descritos anteriormente.

5 En la descripción anterior, un sistema de control 20 está configurado para operar el aerogenerador mediante uno o más de los diversos métodos descritos con referencia a las Figuras 3 a 6. Este sistema de control 20 puede ser parte de una configuración inicial del aerogenerador. En realizaciones alternativas de la invención, los métodos descritos con referencia a las Figuras 3 a 6 se pueden realizar mediante un sistema de control reacondicionado que no es parte de la configuración inicial del aerogenerador, y (al igual que el sistema de control 20) puede estar remoto del aerogenerador. En este caso, el sistema de control reacondicionado almacena el producto de programa informático que comprende un código de software adaptado para operar el aerogenerador 1 cuando se ejecuta en un sistema de procesamiento de datos del sistema de control reacondicionado. El producto de programa informático almacenado por el sistema de control reacondicionado está adaptado para realizar uno o más de los diversos métodos descritos a continuación con referencia a las Figuras 3 a 6.

10

Aunque la invención se ha descrito anteriormente con referencia a una o más realizaciones preferidas, se apreciará que se pueden hacer diversos cambios o modificaciones sin apartarse del alcance de la invención como se define en las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un método de operación de un aerogenerador (1) de acuerdo con un parámetro operativo, el método que comprende:

5 obtener un primer valor del parámetro operativo mediante un primer sensor, el primer sensor que se implementa como un modelo de aprendizaje automático entrenado (11, 111, 211) tomando un conjunto de parámetros operativos como entrada y emitiendo el primer valor (11b, 111b, 211b);

obtener un segundo valor (41b, 121b) del parámetro operativo mediante un segundo sensor diferente al primer sensor;

10 comparar (15, 115, 215) el primer valor con el segundo valor de acuerdo con un criterio de comparación, si la comparación cumple el criterio de comparación, se determina que el primer valor es válido;

si el primer valor del parámetro operativo es un primer valor válido, operar (51, 151, 250) el aerogenerador usando el primer valor como el parámetro operativo;

en respuesta (52, 152) a una no validación del primer valor: apagar el aerogenerador, o cambiar la estrategia de control del aerogenerador;

15 en donde el segundo sensor se selecciona del grupo de:

un modelo de aprendizaje automático entrenado (121), que toma un conjunto de parámetros operativos como entrada y que emite el segundo valor, en donde el primer modelo de aprendizaje automático entrenado se entrena mediante un primer conjunto de datos de entrenamiento; y el segundo modelo de aprendizaje automático entrenado se entrena alimentando un segundo conjunto de datos de entrenamiento, en donde el segundo conjunto de datos de
20 entrenamiento es diferente al primer conjunto de datos de entrenamiento y/o en donde el primer modelo de aprendizaje automático se entrena mediante un primer método de aprendizaje automático, y el segundo modelo de aprendizaje automático se entrena mediante un segundo método de aprendizaje automático, en donde el segundo método de aprendizaje automático es diferente del primer método de aprendizaje automático;

un sensor de referencia (35, 41) dispuesto para medir el segundo valor; y

25 un modelo físico informatizado (12) que toma un conjunto de parámetros operativos como entrada y que emite el segundo valor.

2. El método de la reivindicación 1, en donde el parámetro operativo es una velocidad del viento (33), una dirección del viento (35), un ángulo de paso de pala, una carga de pala (30), una temperatura (40, 41), un ángulo de acimut de rotor (31), una velocidad de rotor (32), una aceleración de la torre (36), una potencia eléctrica (37), una posición de
30 góndola (38), una intensidad de la luz (39), o un valor de parámetro derivado de una combinación de los mismos.

3. El método de la reivindicación 1 o 2, en donde la comparación del primer valor con el segundo valor de acuerdo con el criterio de comparación se basa en comparar un valor estadístico del primer valor y un valor estadístico del segundo valor que se obtienen estadísticamente analizando una serie de tiempo del primer y segundo valores.

4. El método de cualquier reivindicación anterior, en donde la comparación del primer valor con el segundo valor de acuerdo con el criterio de comparación se basa en comparar el primer valor y el segundo valor para generar un
35 indicador; y comparar el indicador con un umbral de validación.

5. El método de cualquier reivindicación anterior, en donde el primer sensor y/o el segundo sensor se selecciona del grupo de: un sensor de temperatura (40, 41), un sensor de velocidad del viento (33), un sensor de dirección del viento (35), un sensor de carga de pala (30), un sensor de ángulo de paso de pala, un sensor de ángulo de acimut de rotor (31), un sensor de velocidad de rotor (32), un sensor de aceleración de la parte superior de la torre (36), un
40 sensor de potencia (37), un sensor de posición de góndola (38), un sensor de intensidad de luz (39) y un sensor de hora del día.

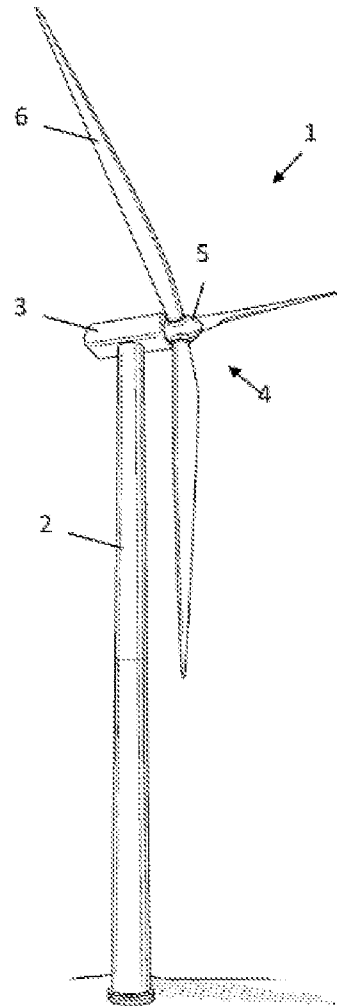
6. El método de cualquier reivindicación anterior, en donde el modelo de aprendizaje automático se entrena usando un conjunto de datos de entrenamiento de uno o más de: un sensor de temperatura (40, 41), un sensor de velocidad del viento (33), un sensor de dirección del viento (35), un sensor de carga de pala (30), un sensor de ángulo de paso de pala, un sensor de ángulo de acimut de rotor (31), un sensor de velocidad de rotor (32), un sensor de aceleración de la parte superior de la torre (36), un sensor de potencia (37), un sensor de posición de góndola (38), un sensor de
45 intensidad de luz (39) y un sensor de hora del día.

7. El método de cualquier reivindicación anterior, en donde el primer sensor es un modelo de aprendizaje automático entrenado y el segundo sensor es un sensor de referencia.

50 8. El método de la reivindicación 7, en donde el sensor de referencia proporciona uno de los parámetros operativos del conjunto de parámetros operativos que se introducen en el modelo de aprendizaje automático.

9. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en donde el primer sensor es un modelo de aprendizaje automático entrenado y el segundo sensor es un modelo físico informatizado.
10. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en donde el primer sensor es un primer modelo de aprendizaje automático entrenado y el segundo sensor es un segundo modelo de aprendizaje automático entrenado.
- 5 11. El método de cualquiera de las reivindicaciones 10, en donde el primer conjunto de datos de entrenamiento es un primer conjunto de entradas de sensor de un primer conjunto de sensores, y el segundo conjunto de datos de entrenamiento es un segundo conjunto de entradas de sensor desde un segundo conjunto de sensores, en donde el segundo conjunto de sensores es diferente al primer conjunto de sensores.
- 10 12. Un sistema de aerogenerador que comprende un aerogenerador (1) y un sistema de control (20) configurado para operar el aerogenerador mediante el método de cualquier reivindicación anterior.
13. Un producto de programa informático que comprende un código de software adaptado para operar un aerogenerador (1) cuando se ejecuta en un sistema de procesamiento de datos, el producto de programa informático que está adaptado para realizar el método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11.

Fig. 1



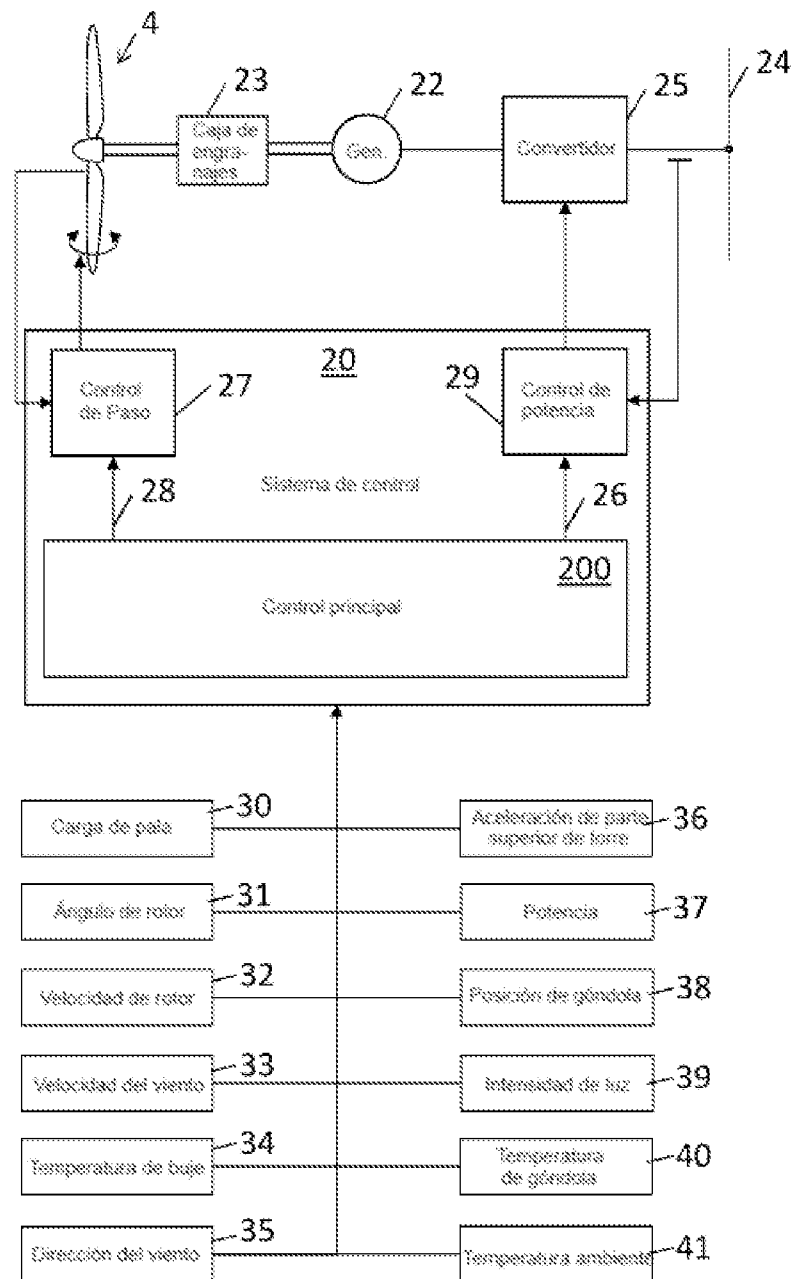


Fig. 2

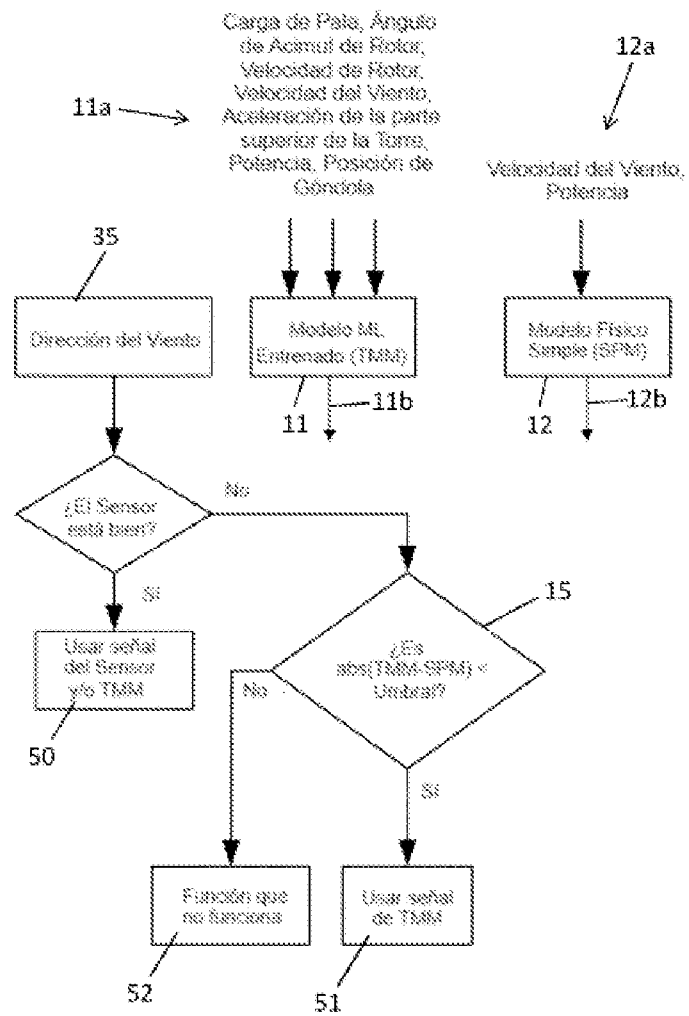


Fig.3

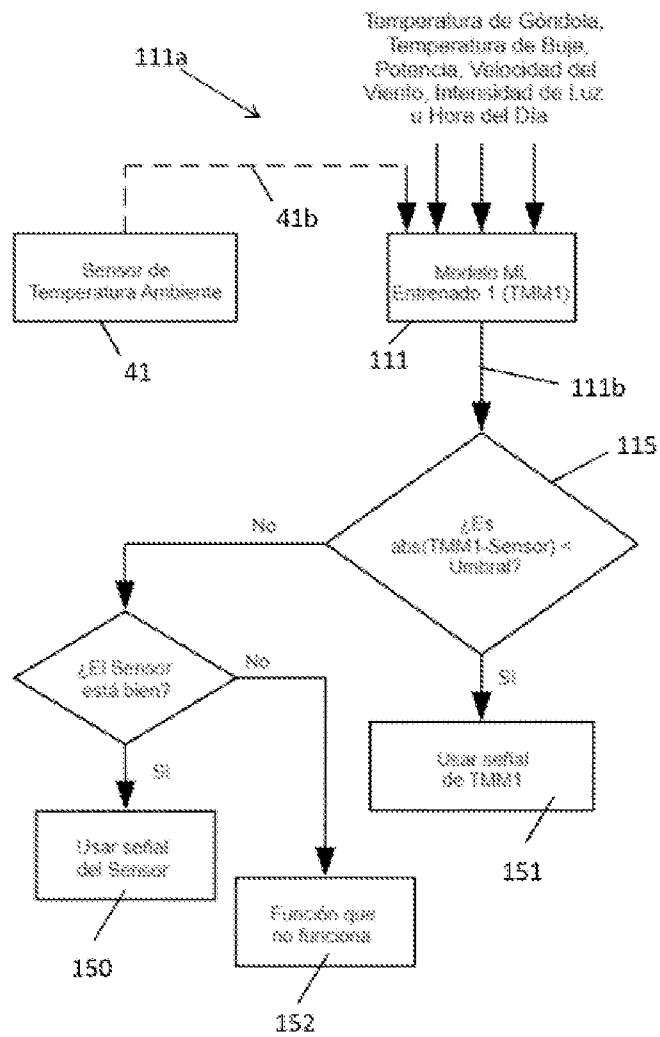


Fig.4

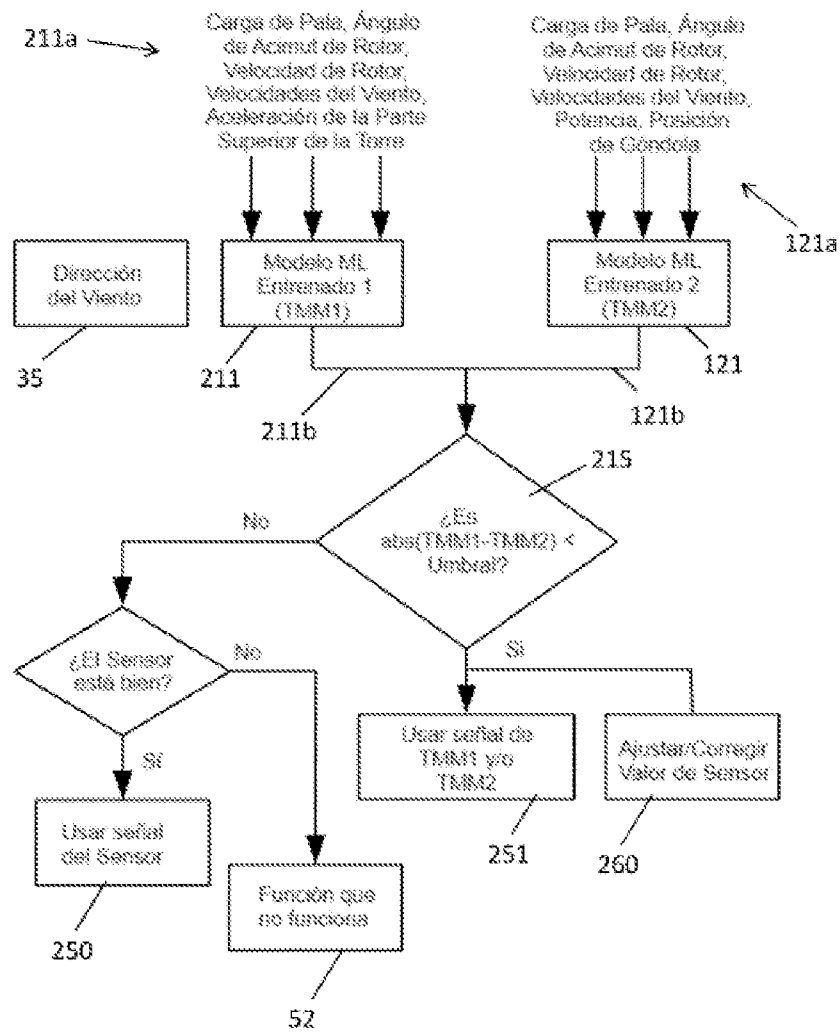


Fig.5

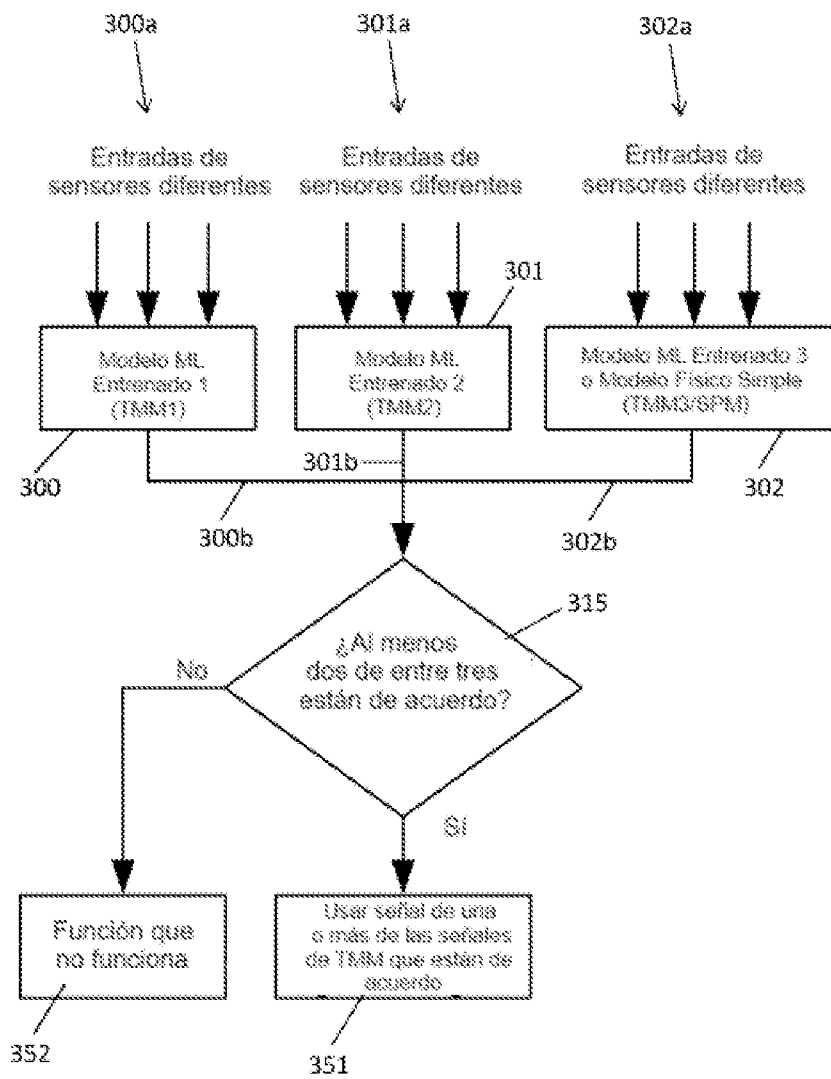


Fig.6