

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 762 519**

51 Int. Cl.:

**F03D 7/04** (2006.01)

**F03D 7/02** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **14.08.2015 PCT/DK2015/050238**

87 Fecha y número de publicación internacional: **18.02.2016 WO16023560**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.08.2015 E 15753315 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.11.2019 EP 3180514**

54 Título: **Control de un aerogenerador con una condición de fallo**

30 Prioridad:

**15.08.2014 DK 201470492**

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

**25.05.2020**

73 Titular/es:

**VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)**

**Hedeager 42**

**8200 Aarhus N, DK**

72 Inventor/es:

**HAMMERUM, KELD y**

**HOVGAARD, TOBIAS GYBEL**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

ES 2 762 519 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**

Control de un aerogenerador con una condición de fallo

**Campo de la invención**

5 La presente invención se refiere al control de aerogeneradores en una situación en la que se detecta una condición de fallo.

**Antecedentes de la invención**

10 En general, se opera un aerogenerador o un parque de aerogeneradores con el objetivo de obtener el máximo rendimiento del capital invertido en él y, en consecuencia, los sistemas de control de aerogenerador están configurados para maximizar la potencia de salida, es decir, para operar el aerogenerador para capturar la potencia máxima que está disponible en el viento, con la debida consideración de mantener el aerogenerador dentro de los límites operativos.

15 Si bien el sistema de control del aerogenerador está diseñado para tener en cuenta las condiciones diversas y variables bajo las cuales opera un aerogenerador, puede surgir, sin embargo, una condición de fallo que requiera parar la turbina, o alternativamente modificar la operación a operación en modo seguro. La condición de fallo puede relacionarse con el fallo del componente que requiere reparar o mantenimiento, o puede relacionarse con condiciones que pueden conducir a un fallo del componente si el aerogenerador no se para o se opera en modo seguro.

20 Los sistemas de parada de aerogeneradores existentes se basan en mediciones de un pequeño subconjunto de estados de las turbinas, tales como la medición de la velocidad del rotor, de la aceleración de la parte superior de la torre y de la carga para generar una señal de fallo si el valor medido está fuera de los límites predefinidos. Cuando se para el aerogenerador, se puede tener en cuenta la condición de fallo, por ejemplo, seleccionando una rutina de parada predefinida que depende de la naturaleza del fallo. Tales rutinas de parada se basan en los escenarios de fallo que fueron tenidos en cuenta en el momento del diseño.

25 El artículo "Combined Feedback-Feedforward Control of Wind Turbines Using State-Constrained Model Predictive Control", Koerber et al., Actas del IEEE en Tecnología de Sistemas de Control, vol. 21, nº 4, julio de 2013 y el documento EP 2 746 576 A2 ambos que están mostrando el control de aerogenerador durante situaciones de fallo usando un Controlador Predictivo de Modelo.

Los inventores de la presente invención se han dado cuenta de que hay una necesidad de formas adicionales de operar un aerogenerador si surge una condición de fallo durante la operación del aerogenerador.

30 **Compendio de la invención**

Sería ventajoso controlar un aerogenerador de una manera que tenga en cuenta el estado operativo real del aerogenerador si surge una condición de fallo, y que usa el estado operativo real en conexión con la operación continua del aerogenerador, o bien en operación en modo seguro o bien en parada del aerogenerador.

35 Por consiguiente, en un primer aspecto, se proporciona un método según la reivindicación 1 de control de un aerogenerador, que comprende:

recibir un estado operativo actual del aerogenerador y en base al estado operativo actual calcular una trayectoria de control y una trayectoria en modo seguro, en donde una trayectoria comprende una serie de tiempos de al menos una variable; y

40 si se recibe una señal de fallo que indica una condición de fallo del aerogenerador, controlar el aerogenerador usando la trayectoria en modo seguro;

si no se recibe una señal de fallo, controlar el aerogenerador usando la trayectoria de control;

en donde la trayectoria en modo seguro se calcula usando una rutina de control predictivo de modelo (MPC).

45 En la presente invención, la operación de la turbina se basa en una trayectoria de control calculada. Una trayectoria es una serie de tiempos de una variable para un intervalo de tiempo dado, que incluye el siguiente valor de variable para el parámetro operativo relacionado con la variable, así como un número previsto o uno esperado de futuros valores de variable para el parámetro dado. Por ejemplo, la trayectoria de control puede ser una trayectoria de paso que incluye el siguiente comando de paso, así como un número esperado o previsto de futuros comandos de paso.

50 Un aerogenerador incluye un sistema de control para controlar los diversos componentes del aerogenerador, tales como el ajuste del paso de la pala, los puntos de ajuste del convertidor de potencia, los motores de orientación, etc. Tal sistema de control incluye además un controlador de modo seguro con la responsabilidad de operar el aerogenerador de una manera segura. El controlador de modo seguro se puede integrar en el controlador general, y

en las realizaciones puede referirse a las unidades funcionales del controlador general que maneja el aerogenerador durante la operación en modo seguro.

5 En la presente invención, el sistema de control está dispuesto para recibir una condición de fallo, y tras la recepción de tal condición de fallo, asegurar que el aerogenerador se controle usando una trayectoria en modo seguro. La trayectoria en modo seguro que se calcula usando una rutina de control predictivo de modelo (MPC).

10 Es una ventaja calcular la trayectoria en modo seguro usando un algoritmo de MPC, dado que los algoritmos de MPC son muy adecuados para tener en cuenta el estado actual y, por ello, para calcular una trayectoria operativa en base al estado real del aerogenerador. Los algoritmos de MPC se pueden usar ventajosamente para operación en modo seguro, en la medida que pueden tener en cuenta directamente restricciones en las variables del sistema y, por ello, ser usadas para encontrar trayectorias operativas óptimas dentro de límites operativos seguros.

En una realización, la trayectoria en modo seguro es una trayectoria de parada. Una trayectoria de parada es una trayectoria de control que controla el aerogenerador desde su estado actual y hasta que el aerogenerador se lleve a una parada, es decir, se pare.

15 En general, una trayectoria en modo seguro es una trayectoria de control que controla el aerogenerador de una manera segura. Una manera segura es una manera en la que el aerogenerador está operando dentro de límites operativos seguros. Esto se puede basar en la condición de fallo dada y puede ser un modo de control que, además de una parada, incluye modos de control con una funcionalidad reducida, una salida de potencia reducida, un espacio operativo reducido, etc.

20 La trayectoria en modo seguro no se calcula hasta que se recibe la señal de fallo. De esta manera, la trayectoria calculada puede, además del estado actual específico, también tener en cuenta los fallos operativos en el cálculo de la trayectoria en modo seguro. Esto se puede obtener ventajosamente incluyendo la condición de fallo en la rutina de control predictivo de modelo como una o más restricciones y/o seleccionando una función de coste apropiada en base al tipo de fallo. De esta manera, la rutina de MPC está adaptando dinámicamente las restricciones y funciones objetivas para regir el comportamiento de la turbina bajo condiciones de fallo. En una situación en modo seguro se pueden encontrar, por ello, trayectorias operativas óptimas dentro de límites operativos seguros.

25 En una realización, solamente la trayectoria en modo seguro se calcula usando una rutina de MPC, no obstante, de manera ventajosa también la trayectoria de control se calcula usando una rutina de control predictivo de modelo (MPC). De esta manera, se usa un marco de control unificado para manejar tanto el control en modo seguro como el control de operación normal.

30 Se describen realizaciones adicionales en relación con la sección Descripción de las realizaciones.

En aspectos adicionales, la invención también se refiere a un controlador para un aerogenerador, a un controlador de parque de aerogeneradores que se implementa para controlar al menos las turbinas seleccionadas del parque de aerogeneradores. Además, la invención se refiere a un aerogenerador que se controla según cualquiera de los diversos aspectos de la presente invención.

35 En general, las diversas realizaciones y aspectos de la invención se pueden combinar y acoplar de cualquier forma posible dentro del alcance de la invención. Estos y otros aspectos, características y/o ventajas de la invención serán evidentes a partir de y se dilucidarán con referencia a las realizaciones descritas en lo sucesivo.

#### Breve descripción de los dibujos

40 Las realizaciones de la invención se describirán, a modo de ejemplo solamente, con referencia a los dibujos, en los que:

la Fig. 1 ilustra esquemáticamente una realización de un sistema de control junto con elementos de un aerogenerador;

la Fig. 2 ilustra aspectos de una realización general de la presente invención en un diagrama funcional esquemático;

45 la Fig. 3 ilustra un ejemplo de una trayectoria de control determinada por el uso de un algoritmo de MPC;

las Fig. 4 a 7 ilustran ejemplos de trayectorias en modo seguro en diferentes escenarios de condición de fallo; y

la Fig. 8 ilustra un diagrama de flujo de elementos de realizaciones de la presente invención.

#### Descripción de las realizaciones

50 La Figura 1 ilustra esquemáticamente una realización de un sistema de control junto con elementos de un aerogenerador. El aerogenerador comprende palas del rotor 1 que están conectadas mecánicamente a un generador eléctrico 2 a través de una caja de cambios 3. La energía eléctrica generada por el generador 2 se

inyecta en una red eléctrica 4 a través de un convertidor eléctrico 5. El generador eléctrico 2 puede ser un generador de inducción doblemente alimentado, pero se pueden usar otros tipos de generadores.

5 El sistema de control comprende un número de elementos, que incluyen al menos un controlador 6 con un procesador y una memoria, de modo que el procesador es capaz de ejecutar tareas informáticas en base a las instrucciones almacenadas en la memoria. En general, el controlador de aerogenerador 6 asegura que, en operación, el aerogenerador genere un nivel de salida de potencia requerido. Esto se obtiene ajustando el ángulo de paso y/o la extracción de potencia del convertidor. Con este fin, el sistema de control 6 comprende un sistema de paso que incluye un controlador de paso 7 que usa una referencia de paso 8, y un sistema de potencia que incluye un controlador de potencia 9 que usa una referencia de potencia 10. El rotor del aerogenerador comprende las palas del rotor que 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 inclinar individualmente las palas del rotor. En la figura se muestran dos palas del rotor, no obstante, se pueden usar cualquier número de palas de rotor, en particular tres palas de rotor.

15 La Figura 2 ilustra además los elementos de los sistemas de control 6 en relación con un módulo de cálculo de trayectoria 20 que recibe un estado operativo actual del aerogenerador 23, y en base al estado operativo calcula una trayectoria de control para una operación normal continua y una trayectoria en modo seguro. El sistema de control 6 está dispuesto para controlar el aerogenerador en base o bien a la trayectoria de control o bien a la trayectoria en modo seguro dependiendo del estado del aerogenerador. Es decir, si una señal de fallo indica una condición de fallo del aerogenerador, el aerogenerador se controla 22 usando la trayectoria en modo seguro, de otro modo, la operación normal 21 del aerogenerador se continúa donde el aerogenerador se controla usando la trayectoria de control.

En una realización, la señal de fallo se deduce en base al estado operativo, o se puede proporcionar como una señal dedicada 24, por ejemplo, de sensores u otras unidades que envían señales de fallo.

25 En la presente invención, la trayectoria en modo seguro se calcula usando una rutina de control predictivo de modelo (MPC).

La Figura 3 muestra aspectos generales de una rutina de MPC en relación con una variable operativa medida y una variable de control calculada de MPC  $u$ . La parte superior 30 de la figura muestra una trayectoria de estado para la variable  $y$  y la parte inferior 31 de la figura muestra una trayectoria de control para la variable de control  $u$ .

30 Las trayectorias operativas y las trayectorias de control pueden incluir, pero no se limitan a, uno o más de los siguientes parámetros: valor de paso, incluyendo los valores de paso colectivos y valores de paso individuales, velocidad del rotor, aceleración del rotor, movimiento de la torre, parámetros relacionados con la potencia, parámetros relacionados con el par y derivados de estos parámetros.

35 En una realización, la trayectoria operativa es una trayectoria de estado operativa predicha. Un estado es una colección, a menudo expresada como vector, de parámetros operativos. Un ejemplo de estado de aerogenerador es:

$$x^* = \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \dot{\theta}(t) \\ \omega(t) \\ \dot{\omega}(t) \\ s(t) \\ \dot{s}(t) \\ \ddot{s}(t) \end{bmatrix}$$

que comprende el valor de paso,  $\theta$ , la velocidad angular del rotor,  $\omega$ , y la posición superior de la torre,  $s$ , así como las derivadas en el tiempo de esos parámetros. Se pueden usar otros y más parámetros para definir el estado del aerogenerador,  $x^*$ .

40 Los valores de estado del estado operativo actual del aerogenerador se pueden basar en lecturas de sensores medidas a partir de sensores dispuestos para medir datos de sensores de medición en relación con los valores de estado físico del aerogenerador. Además, también se pueden usar valores estimados o valores calculados. En una realización, el estado se puede determinar mediante un calculador de estado, por ejemplo, en forma de una unidad de cálculo dedicada a cargo de determinar el estado operativo actual, tal como un observador o un filtro de Kalman.

45 La trayectoria también se puede expresar como una trayectoria de control. Un ejemplo de trayectoria de control puede ser:

$$u_1^* = \begin{bmatrix} \theta_{ref} \\ P_{ref} \end{bmatrix}$$

que comprende la señal de referencia de paso y la señal de referencia de potencia. Se pueden usar otros y más parámetros para definir la señal de control del aerogenerador,  $u_1^*$ .

5 La Figura 3 muestra una trayectoria 34 de una variable y medida para un número de pasos de tiempo discretos. La figura muestra el tiempo actual,  $k$ , así como un número de pasos de tiempo pasado 32 y un número de pasos de tiempo futuros 33 (a los que se hace referencia también algunas veces como el horizonte de predicción y el horizonte de control para la variable de estado  $y$  y la variable de control  $u$ , respectivamente). Los valores de variables conocidos, es decir, basados en valores ya medidos, se marcan con un círculo continuo, mientras que los valores de las variables previstas se marcan con un círculo abierto. Una trayectoria puede comprender una serie de tiempos de valores previstos, es decir, solamente los círculos abiertos. La trayectoria no necesita incluir los valores pasados y conocidos, pero puede hacerlo en ciertas realizaciones. En particular, el valor actual 35 se puede incluir para trayectorias de variables medidas. La trayectoria puede abarcar una serie de tiempos de unos pocos segundos, tal como 5-10 segundos. No obstante, la trayectoria puede ser más larga o más corta dependiendo de la implementación dada.

15 Como ejemplo, la trayectoria muestra la velocidad del rotor  $\omega$  en una situación en la que se da un punto de ajuste para aumentar la velocidad del rotor. La trayectoria muestra la velocidad actual del rotor 35 junto con las velocidades futuras del rotor previstas. Los valores máximo y mínimo permitidos también se muestran para la variable ilustrada.

20 La Figura 3 ilustra además un ejemplo de una trayectoria de control general 36 determinada por el uso de un algoritmo de MPC. La Figura 3 ilustra la relación entre una trayectoria de estado operativo 34 y una trayectoria de control general 36. En las realizaciones, la trayectoria de control general puede ser una trayectoria en modo seguro que se calcula usando la trayectoria de estado operativo prevista.

Si bien se conoce el valor de orden  $k$  actual para las variables medidas, el valor actual 37 de la trayectoria de control se calcula mediante el uso de la rutina de MPC.

La figura también muestra los valores máximo y mínimo permitidos para los valores de la trayectoria de control de  $u$ .

25 Como ejemplo, la trayectoria muestra la trayectoria para el ángulo de paso, es decir,  $u = \theta$ . De este modo, se da un punto de ajuste para aumentar la velocidad del rotor y, como consecuencia, el ángulo de paso se reduce.

La trayectoria muestra el siguiente ajuste de paso 37 junto con los ajustes de paso futuros previstos para cumplir con el nuevo ajuste del punto de ajuste.

30 El Control Predictivo de Modelo (MPC) es un algoritmo de control de múltiples variables que usa una función de coste de optimización  $J$  sobre el horizonte de predicción de retroceso, para calcular los movimientos de control óptimos.

La función de coste de optimización se puede dar por:

$$J = \sum_{i=1}^N w_{y_i} (r_i - y_i)^2 + w_{u_i} \Delta u_i^2$$

35 Con referencia a la Fig. 3,  $r_i$  es el punto de ajuste para la variable de orden  $i$ , siendo  $y_i$  y  $u_i$  variables de trayectoria de orden  $i$ , y siendo  $w_{y_i}$  la matriz de ponderación que define la importancia relativa de esta variable, y siendo  $w_{u_i}$  la matriz de ponderación que define la penalización relacionada con los cambios en esta variable.

40 Implementando en el controlador una rutina de MPC para calcular la trayectoria en modo seguro, se resuelve un problema de optimización en  $N$  pasos de tiempo (el horizonte de control y de predicción). El resultado es una secuencia de entrada óptima para todo el horizonte que se puede usar para controlar la turbina durante el modo seguro.

45 En una realización, las trayectorias de parada se calculan resolviendo problemas de optimización dinámica en línea en forma de cálculo en línea de trayectorias en modo seguro usando el control predictivo de modelo (MPC). Normalmente, el problema de optimización resuelto en tales aplicaciones se formula en términos de una función objetivo (una función de coste) y un número de restricciones (por ejemplo, límites máximo/mínimo, límites de tasa de cambio, etc.). Cuando se aplica tal esquema de control para una operación normal, la función objetivo se formula típicamente para proporcionar un compromiso entre las cargas y la producción de energía, y con ciertos parámetros de operación tales como la velocidad del rotor, la posición y velocidad de paso, y el par del generador que se rige por las restricciones.

En las realizaciones de la presente invención, los fallos se tratan aplicando una función de coste y restricciones que reflejan la capacidad actual del sistema defectuoso, tales como la pérdida repentina del par del generador, la pérdida de la conexión con la red o la pérdida total o parcial de la capacidad de paso.

5 Tras la recepción de la señal de fallo, se calcula la trayectoria en modo seguro usando la rutina de MPC. De esta manera, la naturaleza del fallo se tiene en cuenta cuando se determina la trayectoria en modo seguro. La condición de fallo puede estar incluida en la rutina de control predictivo de modelo como una restricción, y la función de coste de la rutina de control predictivo de modelo se basa en un tipo de fallo.

En un ejemplo de realización, el problema de optimización usado para la producción normal tiene la forma:

$$u^*(t) = \operatorname{argmin} J_0(S(t), P(t), u(t)),$$

10 sujeto a las restricciones:

$$\begin{aligned} \omega_R &\leq \Gamma_{\omega_R} \\ -5 &\leq \theta_i \leq 90, i \in \{1,2,3\} \\ -20 &\leq \dot{\theta}_i \leq 20, i \in \{1,2,3\} \\ P_E &\leq 3 \text{ MW} \end{aligned}$$

15 La función *argmin* es el operador matemático estándar que representa el argumento del mínimo, y encuentra puntos en el espacio de parámetros abarcado por *S*, *P*, *u* y *t* donde la función de coste *J<sub>0</sub>* alcanza su valor más pequeño. El parámetro  $\Gamma_{\omega_R}$  denota la velocidad nominal del rotor,  $\theta_i$  el ángulo de paso (con derivada) y *P<sub>E</sub>* se refiere a la potencia nominal de la turbina.

En este caso, la función de coste nominal *J<sub>0</sub>* proporciona un compromiso entre potencia (*P*) y cargas (*S*) usando la señal de control *u(t)*, mientras que las restricciones limitan la velocidad del rotor, el ángulo de paso de las palas, la velocidad de paso de las palas y la potencia eléctrica. La señal de control típicamente consistiría en ángulos de paso de las palas y referencia de potencia para el convertidor:

$$u(t) = \begin{bmatrix} \theta_1(t) \\ \theta_2(t) \\ \theta_3(t) \\ P_{ref}(t) \end{bmatrix}$$

20 La Figura 4 ilustra ejemplos de trayectorias en una situación en la que ocurre un fallo del convertidor 40, impidiendo efectivamente cualquier producción de energía después del tiempo  $t = t_f$ . En tal caso, un posible cambio en la función de coste y las restricciones podría ser:

$$u^*(t) = \operatorname{argmin} J_1(S(t), u(t)),$$

25 sujeto a las restricciones:

$$\begin{aligned} \omega_R &\leq \Gamma_{\omega_R} \\ -5 &\leq \theta_i \leq 90, i \in \{1,2,3\} \\ -20 &\leq \dot{\theta}_i \leq 20, i \in \{1,2,3\} \\ P_E &= 0 \end{aligned}$$

30 De esta manera, la producción de energía ya no es parte de la función de coste, y se restringe a cero, en la medida que la generación de energía ya no es posible. Cuando se pierde capacidad de producción de energía, la velocidad del rotor presenta un pequeño rebasamiento, pero se lleva a la parada por la acción del paso que continúa su acción de paso individual mientras se inclina hacia la detención.

En la práctica, esto invalidaría de manera efectiva que el par del generador gobernado por convertidor sea usado como medio para controlar la turbina, dejando que la turbina sea controlada inclinando las palas. Otros diseños

pueden incluir la capacidad de aplicar frenos eléctricos o mecánicos. En tal caso, la señal de control puede incluir una señal de activación booleana para el freno.

5 La Figura 5 ilustra ejemplos de trayectorias en una situación en la que un fallo 50 en relación con una capacidad reducida para inclinar las palas ocurre en  $t = t_f$ , por ejemplo, con una pala atascada mecánicamente, digamos, a 10 grados. En tal caso, puede ser posible continuar operando la turbina en un modo reducido. Cuando una pala está atascada, la actividad de paso individual de las otras dos palas aumenta para compensar la pala atascada. Al mismo tiempo, se inclinan para detener el movimiento de rotación. La energía eléctrica se retiene para ayudar a frenar el rotor.

10 Para un esquema basado en optimización, este modo de operación se puede acomodar mediante una modificación del problema, con la velocidad de paso de la pala para una pala que está restringida a 0 grados:

$$u^*(t) = \operatorname{argmin} J_0(S(t), P(t), u(t)),$$

sujeto a las restricciones:

$$\omega_R \leq \Gamma \omega_R$$

$$-5 \leq \theta_i \leq 90, i \in \{1,2\}$$

$$-20 \leq \dot{\theta}_i \leq 20, i \in \{1,2\}$$

$$\dot{\theta}_3 = 0$$

$$P_E \leq 3 \text{ MW}$$

15 La Figura 6 ilustra ejemplos de trayectorias en otra situación en la que ocurre un fallo 60 en relación con la capacidad reducida para inclinar las palas en  $t = t_f$ . En este ejemplo, el sistema hidráulico de paso de la pala para la pala 3 solamente es capaz de proporcionar una tasa de paso constante para esta pala. La actividad de paso individual de las otras dos palas aumenta para compensar que la tercera pala no contribuya al control de paso individual. El rotor se lleva a una parada ligeramente más rápido que para el ejemplo 2, en la medida que la pala defectuosa no se atasca sino que se inclina:

20 
$$u^*(t) = \operatorname{argmin} J_0(S(t), P(t), u(t)),$$

sujeto a las restricciones:

$$\omega_R \leq \Gamma \omega_R$$

$$-5 \leq \theta_i \leq 90, i \in \{1,2\}$$

$$-20 \leq \dot{\theta}_i \leq 20, i \in \{1,2\}$$

$$\dot{\theta}_3 = 5$$

$$P_E \leq 3 \text{ MW}$$

La Fig. 7 ilustra ejemplos de trayectorias en una situación en la que un fallo da como resultado una operación continua en un modo seguro en el que la turbina sigue en operación, pero con una producción de energía inferior.

25 En este ejemplo, la turbina está equipada con la capacidad de inclinar las palas individualmente, pero en  $t = t_f$ , ocurre un error 70 que da como resultado una pala que cae de vuelta en un estado seguro con una tasa de paso constante. La actividad de paso individual de las otras dos palas aumenta para compensar que la tercera pala no contribuya al control de paso individual. Las dos palas no defectuosas se llevan a ángulos de paso que no llevarán el rotor a una parada, sino que dejan el rotor girando a una velocidad baja, permitiendo de este modo una producción de energía modesta a pesar de la pala defectuosa.

30

En las realizaciones en las que tanto la trayectoria de control como la trayectoria en modo seguro se calculan usando una rutina de control predictivo de modelo (MPC), la función de coste y las restricciones se pueden cambiar tras la detección de un escenario de fallo dado (es decir, tras la recepción de la señal de fallo), pero de otro modo

usan la misma rutina de MPC. En tal realización, solamente se ha de calcular una señal de control óptima en cada instante de muestra.

En una realización, las trayectorias en modo seguro se calculan continuamente durante la operación del aerogenerador. En tal realización, se evalúan posibles escenarios de fallo en cada paso de tiempo. Es decir, se usa un tipo de esquema “¿qué pasaría si?”, en el que se preparan continuamente trayectorias de señales de control para posibles escenarios de fallo futuros. Se pueden calcular dos o más trayectorias completas en modo seguro en base al estado operativo del aerogenerador, y se puede seleccionar una trayectoria completa en modo seguro dada en base a la señal de fallo. La selección se puede basar en una rutina de selección implementada por el sistema de control. Tal rutina de selección puede implementar criterios de selección que le permitan seleccionar la trayectoria en modo seguro más apropiada entre las trayectorias disponibles.

En una realización en la que la trayectoria en modo seguro es una trayectoria de parada, la serie de tiempos de la trayectoria de parada puede abarcar o no todo el proceso de parada. Si la serie de tiempos de la trayectoria de parada abarca todo el proceso de parada, es decir, si se calcula una trayectoria de parada completa antes del inicio de la parada, el aerogenerador se puede controlar usando la trayectoria de parada completa. Esto tiene la ventaja de que se puede ejecutar la trayectoria de control predeterminada, incluso si falla el mecanismo para resolver el problema de optimización.

En otra realización, se puede tomar una ventaja de la rutina de MPC que es una rutina de horizonte de retroceso, de modo que durante la parada, la trayectoria de parada se calcule repetidamente como una trayectoria de horizonte de retroceso, y en donde el aerogenerador se controla usando la última trayectoria de parada calculada. En tal realización, en el tiempo  $t$  se muestrea el estado actual y se calcula una estrategia de control de minimización de coste para un horizonte de tiempo en el futuro:  $[t, t + T]$ . Solamente el primer valor previsto para la muestra  $k$  actual se usa en la señal de control de parada, entonces el estado de la turbina se muestrea de nuevo y los cálculos se repiten comenzando desde el nuevo estado actual, produciendo una nueva trayectoria de parada y una nueva trayectoria de estado previsto. De esta manera, se asegura que se use una trayectoria óptima durante todo el proceso de parada.

En otra realización, el proceso de parada es un proceso de dos pasos. En el primer paso, la trayectoria en modo seguro se calcula para llevar la turbina a una región segura desde donde se conoce una trayectoria de parada segura. En un segundo paso, se usa una trayectoria de parada segura para llevar la turbina a una detención completa. La segunda parte de la trayectoria de parada segura se puede calcular previamente, o la región segura puede ser un estado operativo desde el cual la parada es trivial.

En una realización, la trayectoria de parada se puede calcular usando un modelo de sistema reducido en el que la rutina de MPC usa un subconjunto del estado operativo del aerogenerador para calcular la trayectoria en modo seguro. El cálculo de las trayectorias usando un modelo reducido puede ser de muchas formas similar a un cálculo a escala completa, no obstante, los recursos de cálculo necesarios para implementarlo en el controlador de aerogenerador son menores que para un controlador de MPC a escala completa.

En una realización, el controlador de aerogenerador está dispuesto para implementar al menos una rutina de validación capaz de validar la trayectoria de control para un intervalo de tiempo futuro para determinar si la trayectoria de control es o no válida o inválida, y generar una señal de fallo si la trayectoria de control no es válida. Validando la trayectoria operativa, el sistema de control puede establecer si el sistema puede operar o no de una manera segura, no solo durante el tiempo actual, sino durante al menos una parte del intervalo de tiempo futuro incluido en la trayectoria operativa. De esta manera, el sistema de control puede prepararse para una situación problemática antes de que realmente suceda. Es decir, el controlador puede entrar de una manera oportuna en operación en modo seguro, en lugar de solamente reaccionar a una situación problemática una vez que se haya detectado.

Ser capaz de reaccionar a estados operativos problemáticos antes de que hayan ocurrido realmente, o hayan desarrollado a un estado problemático, conduce a mejorar la protección de la turbina. Además, puede provocar las ventajas adicionales de que el tiempo de inactividad debido a la operación en modo seguro, incluyendo la parada, se puede reducir dado que los errores se encuentran o bien antes de que ocurran o bien al menos en una etapa temprana. Esto puede conducir además a costes de reparación reducidos. Además, el coste se puede reducir para los elementos de soporte de carga, en la medida que se pueden reducir los requisitos de carga mecánica. En las realizaciones de la presente invención, tales equipos se pueden especificar para muchos escenarios de error para la operación de parada controlada en lugar de para una parada de emergencia.

Además de validar la trayectoria de control, o como alternativa a la validación de la trayectoria de control, también se puede validar la trayectoria en modo seguro para un intervalo de tiempo futuro, para determinar si la trayectoria en modo seguro es o no válida o inválida, y controlar el aerogenerador para la parada usando una trayectoria de parada predeterminada si la trayectoria en modo seguro no es válida.

La trayectoria de parada predeterminada se puede almacenar en una memoria del controlador. La memoria puede almacenar una o más trayectorias de control de parada programadas previamente, tales como trayectorias de

control apropiadas que se sabe que operan el aerogenerador dentro de los límites de carga. Alternativa o adicionalmente, el controlador también puede almacenar la última válida, o un número de trayectorias de control de parada validadas previamente de las que elegir. Las trayectorias reales que se almacenan en la memoria se pueden actualizar constantemente con las últimas calculadas.

- 5 En una realización, la optimización de MPC también se puede realizar con la restricción adicional de que una trayectoria de control en el intervalo de tiempo futuro no puede comprender un estado operativo a partir del cual no se puede encontrar una solución al cálculo de MPC de la trayectoria en modo seguro. Es decir, para cualquier punto futuro en la trayectoria de control, para una condición de fallo seleccionada o predefinida, se puede encontrar una solución a tales escenarios de fallo. La operación de la turbina se restringe, de este modo, a una región de condiciones de operación a partir de la cual existen trayectorias de parada en caso de fallos potenciales. De esta manera, se puede hacer una viabilidad recursiva de la trayectoria de control en la que se asegura que el aerogenerador nunca se lleve a un estado a partir del cual no pueda encontrar una trayectoria de parada segura, sujeto a cualquiera de los fallos dados. De este modo, se asegura que existen soluciones de parada factibles desde cualquier estado a lo largo de la trayectoria de control prevista.
- 10
- 15 La validación puede incluir además una validación de la trayectoria de estado operativo previsto para un intervalo de tiempo futuro. Si la trayectoria operativa es inválida, se genera una señal de fallo.

En una realización, la rutina de validación compara uno o más valores de parámetros de una o más trayectorias operativas con valores de restricción predefinidos de tales parámetros, y en donde la rutina de validación es válida si el uno o más parámetros comparados no exceden los valores de restricción. De este modo, la rutina de validación simplemente comprueba una o más trayectorias previstas para asegurarse de que los valores de trayectoria previstos permanezcan dentro de los límites apropiados para el período de tiempo previsto. Los ejemplos incluyen comprobar que las trayectorias de paso previstas permanezcan dentro de los valores de paso permitidos y que el movimiento superior de la torre previsto permanezca dentro de los valores permitidos. En general, las trayectorias para los parámetros críticos de seguridad se pueden seleccionar y validar para que estén dentro de los límites de restricción permitidos. Se pueden usar rutinas adicionales de validación y otras.

20

25

En las realizaciones, el sistema de control se puede dividir en dos subsistemas, un subsistema de controlador principal y un subsistema de controlador de seguridad. Esta división puede ser de manera física o lógica de cualquier forma apropiada.

El sistema de control se puede basar en equipos informáticos industriales genéricos o estándar, mientras que el sistema de seguridad se puede basar en equipos informáticos certificados de seguridad, así como en software rigurosamente probado. Típicamente, la parte relacionada con la seguridad del sistema de control se puede construir siguiendo los principios dados en los estándares reconocidos para seguridad funcional. Tales estándares abarcan, por ejemplo, ISO 13849, IEC 61508 e IEC 62061. Además de cumplir los requisitos cuantitativos y específicos de fiabilidad y cobertura de diagnóstico, los sistemas contruidos según estos estándares se garantiza que están libres de fallos sistemáticos, tales como defectos de software. De este modo, el sistema de control se puede dividir en un dominio de control normal que realiza las tareas de cálculo usando equipos informáticos estándar, y un dominio de control de seguridad que realiza las tareas de cálculo usando equipos informáticos relacionados con la seguridad.

30

35

En una realización, la rutina de control predictivo de modelo (MPC) se implementa en un dominio de control normal del controlador del aerogenerador de modo que la trayectoria en modo seguro se calcule en el dominio de control normal. Esto se puede hacer para reducir el coste del sistema de control dado que el cálculo en tiempo real de las trayectorias previstas para un aerogenerador en operación es bastante exigente informáticamente.

40

Para aumentar el nivel de seguridad, se puede implementar una rutina de validación en el dominio de seguridad del controlador del aerogenerador. El propósito de la rutina de validación es validar la trayectoria en modo seguro.

De esta forma, las tareas de cálculo pesado informáticamente se pueden colocar en el dominio de operativa normal del sistema de control, mientras que la tarea del controlador de seguridad es validar el resultado del controlador principal. Validar el resultado de un cálculo complejo, que implica, por ejemplo, optimización numérica, se puede hacer de una manera mucho menos exigente en cálculo que realizar el cálculo complejo en sí mismo. En consecuencia, la validación se puede colocar en el dominio relacionado con la seguridad del sistema de control. El nivel de seguridad resultante puede ser tan alto como si el cálculo real se hubiera realizado en el dominio de seguridad.

45

50

Sin embargo, si los recursos de cálculo del sistema de seguridad lo permiten, la rutina de control predictivo de modelo (MPC) se puede implementar en el dominio de seguridad del controlador del aerogenerador, con el fin de calcular la trayectoria en modo seguro en el dominio de seguridad. Puede ser un requisito que haya un alto nivel de seguridad asignado a la trayectoria en modo seguro, una trayectoria calculada en el controlador de seguridad se puede usar sin validación adicional.

55

En realizaciones adicionales, los aspectos generales de las realizaciones de la presente invención se pueden implementar en un controlador de parque de aerogeneradores dispuesto para controlar uno o más aerogeneradores de un parque de aerogeneradores. En tal realización, el controlador del parque eólico puede controlar uno o más

aerogeneradores seleccionados. En tal realización, el controlador de aerogenerador se puede implementar de una manera distribuida, donde partes del controlador se implementan en el aerogenerador, mientras que otras partes del controlador se implementan en el controlador de parque eólico.

La Figura 8 ilustra un diagrama de flujo de elementos de realizaciones de la presente invención.

- 5 En un primer paso 81, el estado operativo actual del aerogenerador se determina o recibe, y en base al estado operativo actual, una trayectoria de control y una trayectoria en modo seguro se calculan en el paso 82, 83. Ambas trayectorias se pueden calcular usando una rutina de control predictivo de modelo (MPC), no obstante, al menos la trayectoria en modo seguro se calcula mediante una rutina de MPC.
- 10 Se recibe o se accede a una señal de fallo 84 que indica si está presente o no una condición de fallo. Si la señal de fallo indica una condición de fallo del aerogenerador, el aerogenerador se controla usando la trayectoria en modo seguro 85, mientras que si la señal de fallo o bien no se recibe o bien no indica una condición de fallo, el aerogenerador se controla para la operación en modo normal usando la trayectoria de control 86. La trayectoria en modo seguro se puede calcular en base a la condición de fallo real 87.
- 15 Aunque la presente invención se ha descrito en conexión con las realizaciones especificadas, no se debería interpretar como que se limita en modo alguno a los ejemplos presentados. La invención se puede implementar por cualquier medio adecuado; y el alcance de la presente invención se ha de interpretar a la luz del conjunto de reivindicaciones que se acompañan. Cualquier signo de referencia en las reivindicaciones no se debería interpretar como limitante del alcance.

**REIVINDICACIONES**

1. Un método de control de un aerogenerador, que comprende:
  - 5 recibir (23) un estado operativo actual del aerogenerador y, en base al estado operativo actual, calcular (20) una trayectoria de control (21, 83) y una trayectoria en modo seguro (22, 82), en donde una trayectoria comprende una serie de tiempos de al menos una variable; y
  - si se recibe una señal de fallo (24, 84) que indica una condición de fallo del aerogenerador, controlar el aerogenerador usando la trayectoria en modo seguro;
  - si no se recibe una señal de fallo, controlar el aerogenerador usando la trayectoria de control (21, 83);
  - en donde la trayectoria en modo seguro se calcula usando una rutina de control predictivo de modelo (MPC) (85),
  - 10 en donde la trayectoria en modo seguro se calcula tras la recepción de la señal de fallo, y
  - caracterizado porque una función de coste de la rutina de control predictivo de modelo se basa en un tipo de fallo.
2. El método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde la trayectoria en modo seguro (82) es una trayectoria de parada.
- 15 3. El método según la reivindicación 2, en donde la serie de tiempos de la trayectoria de parada abarcan todo el proceso de parada, y en donde se calcula una trayectoria de parada completa antes del inicio de la parada, y en donde el aerogenerador se controla usando la trayectoria de parada completa.
4. El método según cualquiera de las reivindicaciones 2 o 3, en donde dos o más trayectorias de parada completas se calculan en base al estado operativo del aerogenerador, y en donde una trayectoria de parada completa dada se selecciona en base a la señal de fallo.
- 20 5. El método según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde la condición de fallo (24) se incluye en la rutina de control predictivo de modelo como una o más restricciones.
6. El método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende además calcular una trayectoria de estado operativo prevista (81), y en donde la trayectoria en modo seguro (82) se calcula usando la trayectoria de estado operativo prevista.
- 25 7. El método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde la rutina de control predictivo de modelo se basa en un modelo reducido en base a un subconjunto del estado operativo del aerogenerador, y en donde la trayectoria en modo seguro (82) se calcula usando la rutina de control predictivo de modelo (MPC) con el modelo reducido.
- 30 8. El método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende además al menos una rutina de validación, y en donde la trayectoria de control (83) se valida para un intervalo de tiempo futuro, para determinar si la trayectoria de control es o no válida o inválida, y generar una señal de fallo (84) si la trayectoria de control no es válida.
- 35 9. El método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende además al menos una rutina de validación, y en donde la trayectoria en modo seguro (82) se valida para un intervalo de tiempo futuro, para determinar si la trayectoria en modo seguro es o no válida o inválida, y controlar el aerogenerador para la parada usando una trayectoria de parada predeterminada si la trayectoria en modo seguro no es válida.
- 40 10. El método según la reivindicación 6, que comprende además al menos una rutina de validación, y en donde la trayectoria de estado operativo prevista se valida para un intervalo de tiempo futuro, para determinar si la trayectoria operativa es o no válida o inválida, y generar una señal de fallo si la trayectoria operativa no es válida.
11. El método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde la rutina de control predictivo de modelo (MPC) se implementa en un dominio de control normal del controlador del aerogenerador, y en donde la trayectoria en modo seguro (82) se calcula en el dominio de control normal.
- 45 12. El método según la reivindicación 11, que comprende además una rutina de validación implementada en un dominio de seguridad del controlador del aerogenerador, y en donde la trayectoria en modo seguro (82) se valida por la rutina de validación en el dominio de seguridad.
13. El método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde la rutina de control predictivo de modelo (MPC) se implementa en un dominio de seguridad del controlador del aerogenerador, y en donde la trayectoria en modo seguro se calcula en el dominio de seguridad.
- 50 14. Un sistema de control (6) para un aerogenerador, que comprende:

un controlador (20) dispuesto para recibir un estado operativo actual (23) del aerogenerador y en base al estado operativo actual calcula una trayectoria de control (83) y una trayectoria en modo seguro (82), en donde una trayectoria comprende una serie de tiempos de al menos una variable;

5 en donde el controlador (20) está dispuesto además para recibir una señal de fallo (24, 84), y controlar el aerogenerador usando la trayectoria en modo seguro (82) si la señal de fallo indica una condición de fallo del aerogenerador, y controlar el aerogenerador usando la trayectoria de control (83) si no se recibe la señal de fallo;

en donde la trayectoria en modo seguro se calcula usando una rutina de control predictivo de modelo (MPC),

en donde la trayectoria en modo seguro se calcula tras la recepción de la señal de fallo, y

10 caracterizado porque una función de coste de la rutina de control predictivo de modelo se basa en un tipo de fallo.

15. Un controlador de parque de aerogeneradores dispuesto para controlar uno o más aerogeneradores de un parque de aerogeneradores, el controlador de parque de aerogeneradores que comprende:

15 un controlador (20) dispuesto para recibir un estado operativo actual (23) de un aerogenerador seleccionado del uno o más aerogeneradores y en base al estado operativo actual calcular una trayectoria de control (83) y una trayectoria en modo seguro (82), en donde una trayectoria comprende una serie de tiempos de al menos una variable;

20 en donde el controlador (20) está dispuesto además para recibir una señal de fallo (24, 84), y controlar el aerogenerador seleccionado usando la trayectoria en modo seguro (82) si la señal de fallo indica una condición de fallo del aerogenerador, y controlar el aerogenerador seleccionado usando la trayectoria de control (82) si no se recibe la señal de fallo;

en donde la trayectoria en modo seguro se calcula usando una rutina de control predictivo de modelo (MPC),

en donde la trayectoria en modo seguro se calcula tras la recepción de la señal de fallo, y

25 caracterizado porque una función de coste de la rutina de control predictivo de modelo se basa en un tipo de fallo.

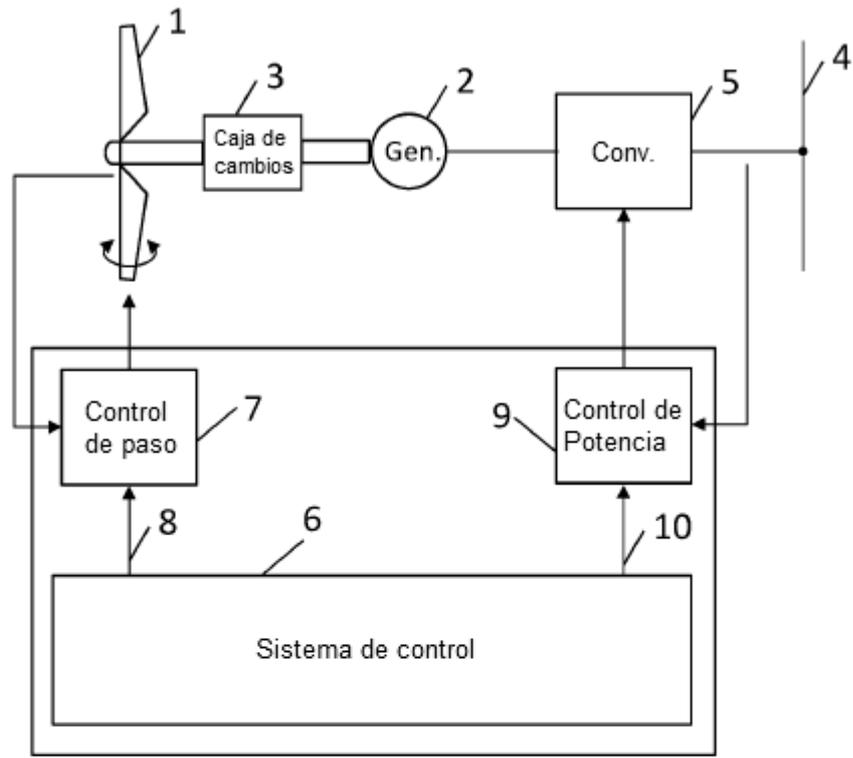


Fig. 1

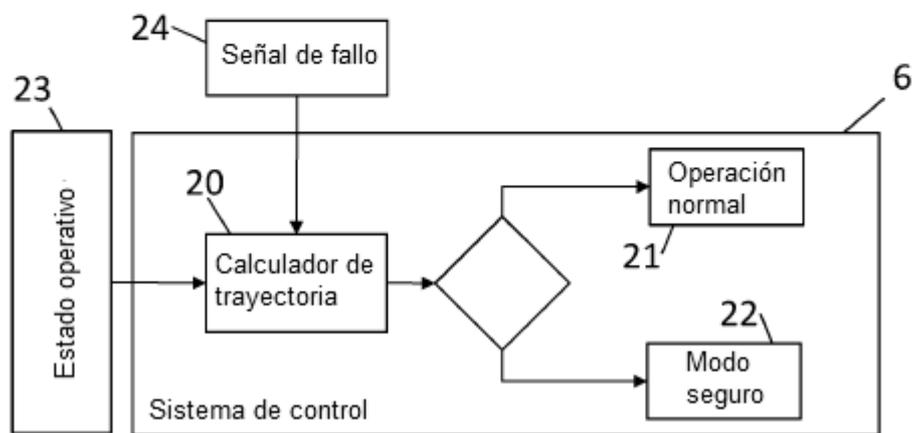


Fig. 2

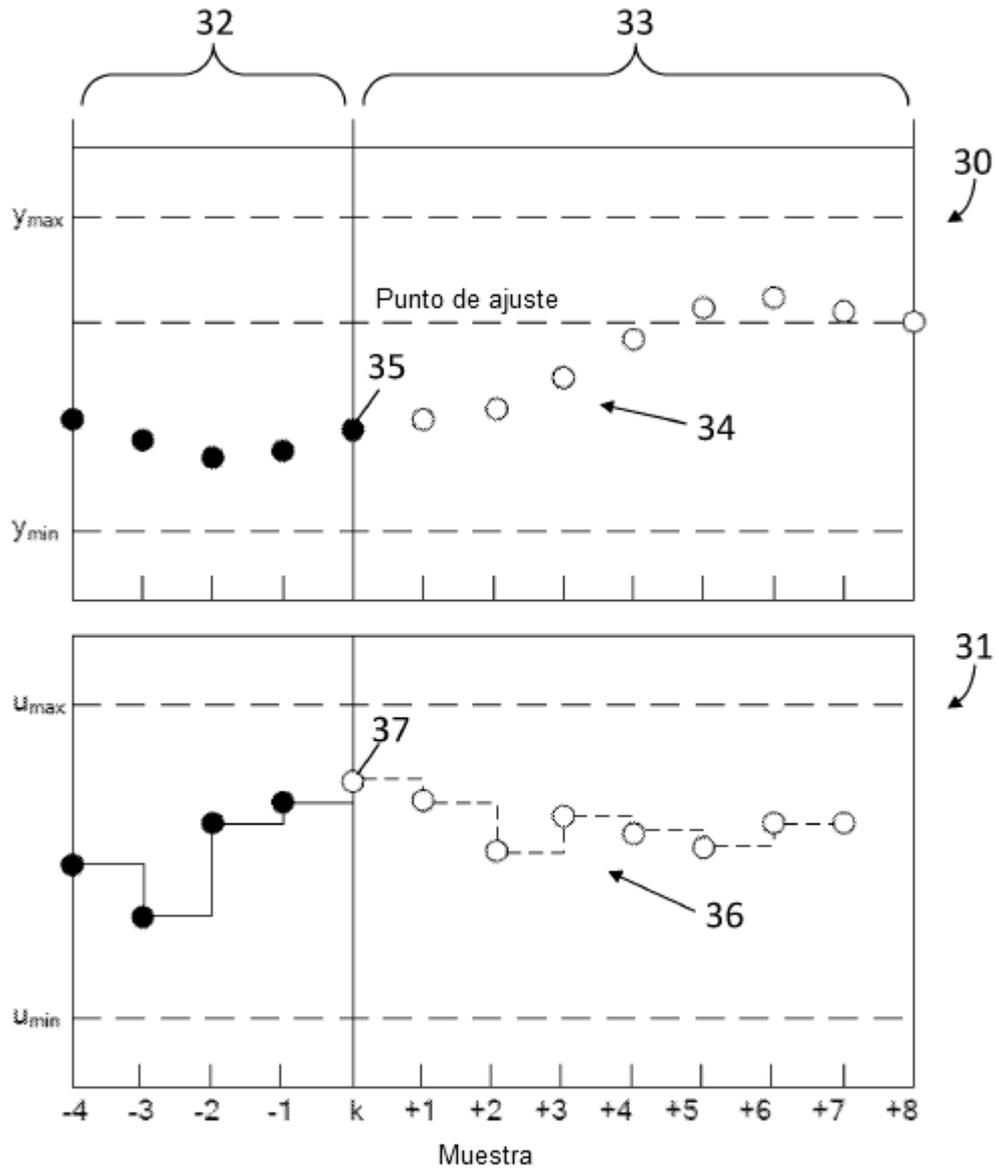


Fig. 3

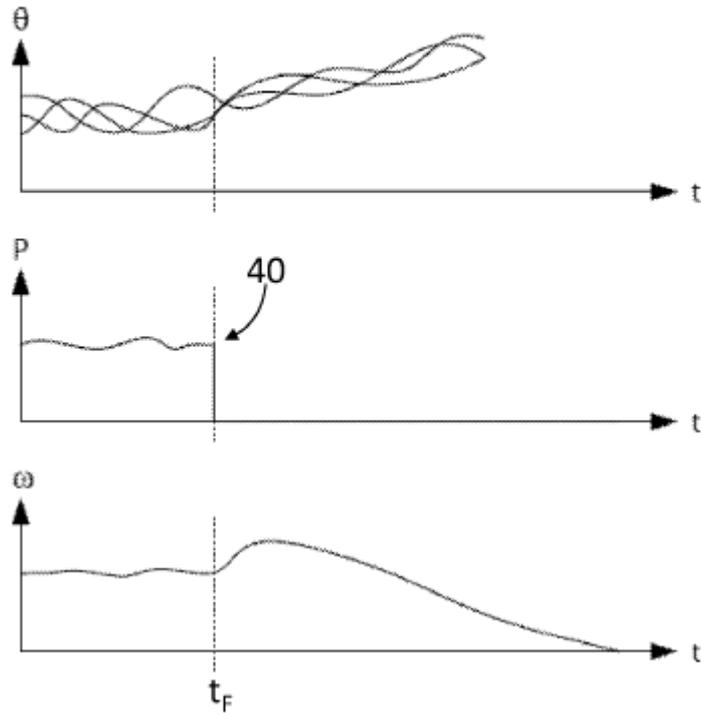


Fig. 4

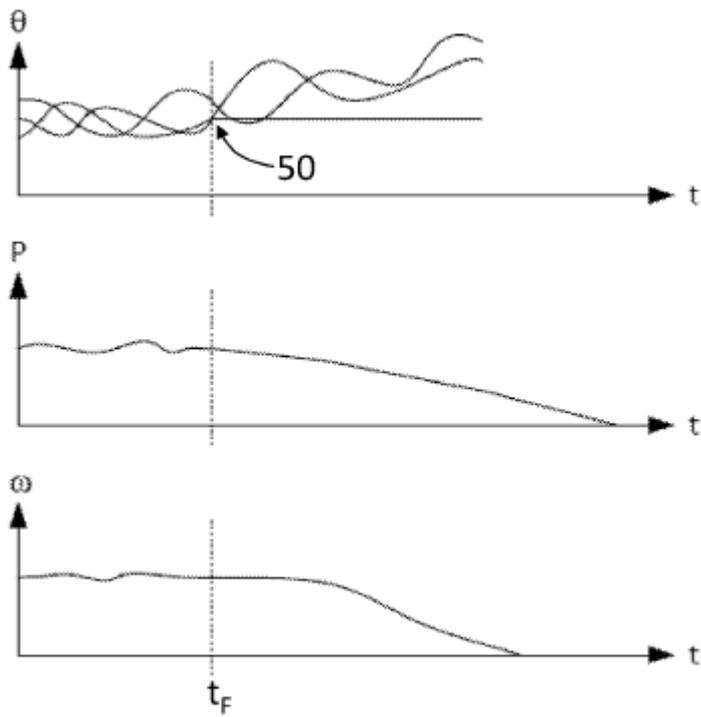


Fig. 5

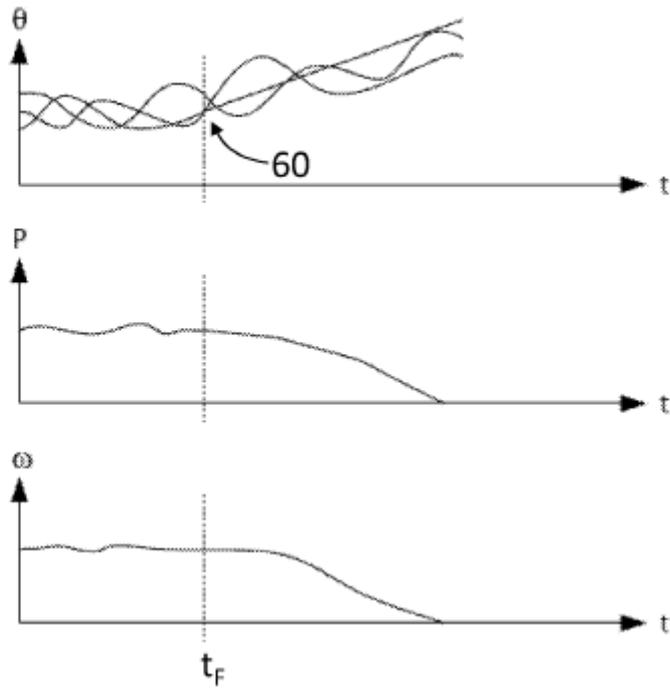


Fig. 6

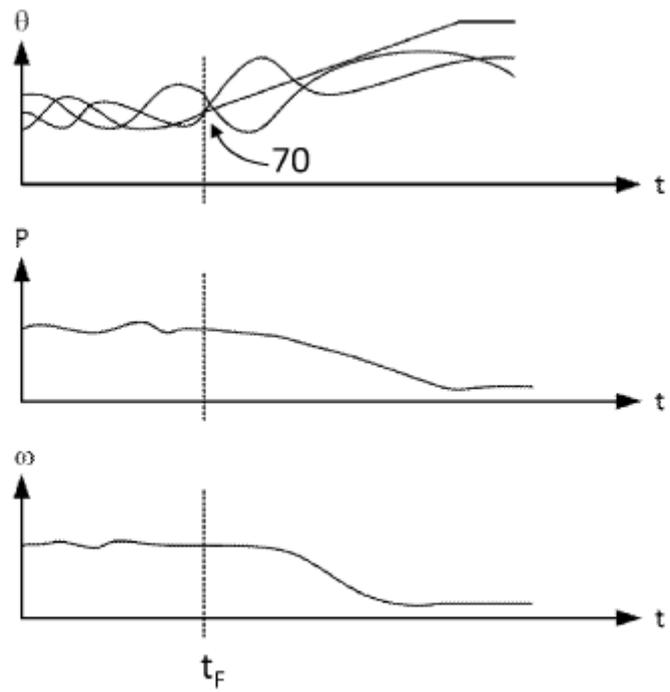


Fig. 7

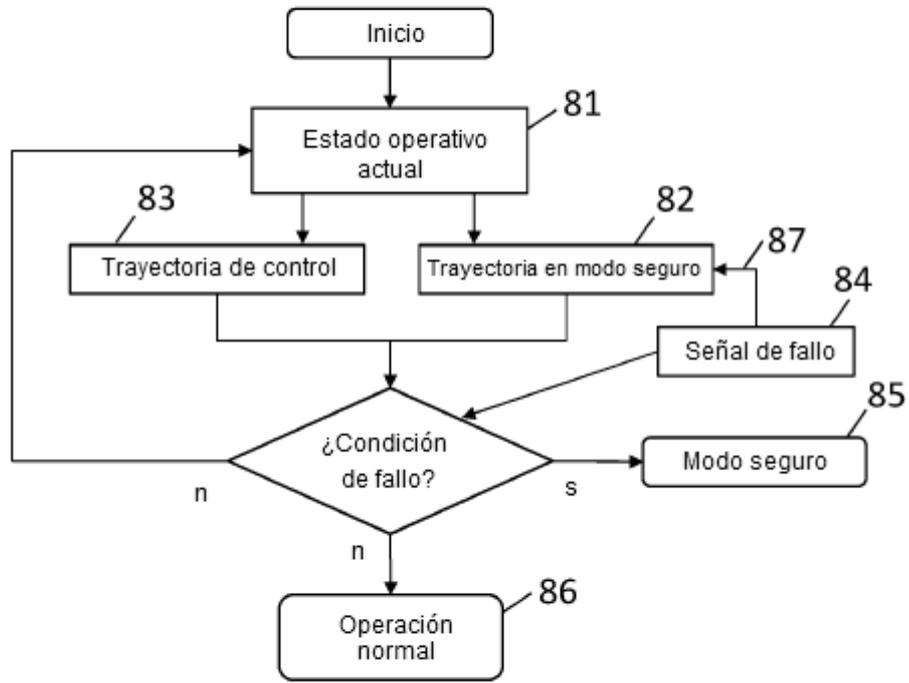


Fig.8