

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 552 323**

51 Int. Cl.:

F03D 7/04

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.12.2009 E 09801390 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.10.2015 EP 2376774**

54 Título: **Control de paso de una turbina eólica**

30 Prioridad:

15.12.2008 DK 200801779

15.12.2008 US 201863 P

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

27.11.2015

73 Titular/es:

VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)

Hedeager 42

8200 Aarhus N, DK

72 Inventor/es:

BRATH, PER y

ØSTERGAARD, KASPER ZINCK

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 552 323 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 paso de una turbina eólica

Campo de la invención

La invención se refiere al control de turbinas eólicas y, en particular, al control de paso de palas de turbina eólica.

5 Antecedentes de la invención

Se usan actuadores de paso para ajustar el paso o ángulo de palas de rotor con el fin de ajustar la eficiencia aerodinámica y, por ejemplo la velocidad de rotor, del rotor de turbina eólica.

10 Por tanto, ajustando el paso resulta posible reducir la velocidad de rotor y, de ese modo, evitar cargas demasiado altas de componentes de la turbina eólica, por ejemplo, a altas velocidades del viento. Sin embargo, la actuación del actuador de paso, que a menudo es un actuador hidráulico, reduce naturalmente la vida útil del actuador de paso y, de ese modo, aumenta el riesgo de fallos. La fiabilidad operacional de una turbina eólica es de la mayor importancia para aumentar la eficiencia de producción de potencia global de la turbina y, por tanto, es deseable aumentar la vida de servicio o fiabilidad de los actuadores de paso.

15 El documento US4161658 da a conocer una turbina eólica que tiene un rotor impulsado por el viento con una pluralidad de palas de ángulo de paso variable. El ángulo de pala se programa durante la aceleración y desaceleración de la turbina eólica mediante controles de lazo abierto para minimizar los esfuerzos, y se programa durante el funcionamiento en activo mediante controles de lazo cerrado para mantener un par motor o velocidad deseados. Los controles de lazo cerrado contienen un integrador que produce una señal de control de integral de ángulo de pala. El ángulo de pala programado se retroalimenta a los integradores a través de una red de seguimiento de integrador para mantener la señal de control de integral de ángulo de pala en todo momento dentro de un intervalo preseleccionado en relación con el ángulo de pala programado.

20 El documento US 2003/0151259 A1 es otro ejemplo de un control de velocidad de rotor de turbina eólica con programación de ganancia.

25 Mientras que el documento US4161658 da a conocer un control de paso para minimizar esfuerzos, el documento US4161658 no da a conocer ni un aumento de la vida de servicio o fiabilidad de los actuadores de paso ni una actuación del actuador de paso como problema. Por consiguiente, sería deseable un sistema de control mejorado que pueda atenuar el problema de la reducción de la vida útil de los actuadores de paso debido a la actuación del actuador de paso.

Sumario de la invención

30 Por consiguiente, la invención pretende preferiblemente atenuar o eliminar los problemas de la reducción de la vida útil de los actuadores de paso, el riesgo de fallos de actuador de paso de turbina eólica, y la reducción de la fiabilidad operacional de turbinas eólicas debido a la actuación de los actuadores de paso. Por tanto, puede considerarse un objeto de la presente invención proporcionar un sistema de control que pueda reducir el desgaste de los actuadores de paso y el sistema de impulsión para los actuadores de paso.

35 Este objeto y varios otros se obtienen en un primer aspecto de la invención proporcionando un sistema de control para controlar la velocidad de rotor de una turbina eólica, comprendiendo la turbina eólica un rotor y un actuador de paso para ajustar el paso de una pala del rotor, comprendiendo el sistema de control:

40 - una unidad de control para generar una señal de control de paso para el actuador de paso, comprendiendo la unidad de control una ganancia de un error de velocidad, en el que el error de velocidad representa una diferencia entre una velocidad de referencia del rotor y una velocidad de rotor medida,

45 - un programa de ganancia de error para generar una magnitud modificada del error de velocidad o una magnitud modificada de la ganancia dependiendo del error de velocidad de manera que la pendiente del programa de ganancia aumenta gradualmente para magnitudes crecientes del error de velocidad, al menos para un primer intervalo de magnitudes del error de velocidad y, posteriormente la pendiente del programa de ganancia disminuye gradualmente para un segundo intervalo de valores del error de velocidad, en el que la magnitud de los valores del segundo intervalo son mayores que la magnitud de los valores del primer intervalo. Esta invención es un modo ventajoso de implementar una función de programa de ganancia no lineal o lineal por tramos que tiene una ganancia relativamente baja para errores de velocidad relativamente pequeños y una ganancia relativamente grande para errores de velocidad relativamente grandes, de modo que se consigue un sistema de control que, por un lado, reduce el desgaste de los actuadores de paso y, por otro lado, puede reducir errores de velocidad de rotor críticos.

50 La invención es particularmente, pero no exclusivamente, ventajosa para reducir un desgaste de actuadores de paso inducido por el funcionamiento y comprendiendo el sistema de paso soportes, cojinetes y componentes de impulsión de actuador eléctricos e hidráulicos.

5 Puede ser ventajoso proporcionar un programa de ganancia de error para modificar la magnitud del error de velocidad dependiendo del error de velocidad de rotor dado que tal modificación puede habilitar una programación de ganancia de error con ganancia cero o pequeña ganancia para errores de velocidad pequeños o insignificantes y una ganancia mayor para errores de velocidad mayores o significativos. Por tanto, un programa de ganancia de error que tiene una ganancia que aumenta para valores crecientes del error de velocidad, al menos localmente para algunos valores del error de velocidad, puede tener la ventaja de reducir la acción de control, es decir las amplitudes y la frecuencia del movimiento del actuador de paso, dado que reducir la ganancia para algunos valores de error de velocidad también puede reducir las magnitudes de la señal de control de paso suministradas al actuador de paso. Una reducción de la actuación del actuador de paso puede implicar una reducción del desgaste y un aumento de la vida de servicio del actuador de paso.

15 Los errores de velocidad pequeños e insignificantes pueden entenderse como errores de velocidad que no requieren una acción de control o sólo requieren una acción de control reducida para reducir el error de velocidad llevando la velocidad de rotor real más próxima a la velocidad de rotor de referencia deseada. Por consiguiente, los errores de velocidad mayores o significativos de rotor pueden entenderse como errores de velocidad que requieren una acción de control de mayor intensidad con el fin de llevar la velocidad de rotor real más próxima a la velocidad de referencia deseada, por ejemplo con el fin de reducir la carga sobre palas de turbina eólica o para reducir la cantidad de potencia eléctrica producida. Otro ejemplo podría ser durante un fallo de la red eléctrica, durante el cual se requiere una gran reducción de la potencia.

20 Una magnitud o, de manera equivalente, un valor o tamaño, del error de velocidad debe entenderse en términos generales como que comprende una magnitud o un valor de una muestra instantánea del error de velocidad, una magnitud o un valor de un promedio en el tiempo de muestras del error de velocidad, una magnitud o un valor de un error de velocidad filtrado.

25 Otra ventaja puede ser usar un programa de ganancia, dado que la acción de control reducida facilita otras acciones de control. Por ejemplo, cuando el controlador de velocidad de rotor no se centra en minimizar un error de velocidad de rotor, el sistema de control o algún otro controlador pueden usarse para minimizar oscilaciones estructurales, por ejemplo oscilaciones de la torre de la turbina eólica, controlando el paso con la finalidad de reducir las oscilaciones de la torre.

30 En una realización, el programa de ganancia de error es una función de error de velocidad que se multiplica por el error de velocidad para generar una magnitud modificada del error de velocidad. Multiplicar el error de velocidad de rotor por el programa de ganancia de error puede mejorar el sistema de control con respecto a reducir el desgaste de los actuadores de paso.

35 En una realización, el programa de ganancia de error ajusta la magnitud de la ganancia en función del error de velocidad para generar una magnitud modificada del error de velocidad. Ajustar la ganancia existente, por ejemplo una ganancia constante o una ganancia que es una función de otros parámetros tales como la velocidad del viento, en función del error de velocidad puede ser un modo eficiente de mejorar el sistema de control.

En una realización, el programa de ganancia de error se representa mediante una función lineal o no lineal del error de velocidad. El programa de ganancia puede representarse, como ejemplo, como una tabla de valores de ganancia o una ecuación que proporciona valores de ganancia en función de errores de velocidad.

40 En una realización, el funcionamiento de la unidad de control puede seleccionarse dependiendo de la velocidad del viento medida de modo que la función del programa de ganancia de error se selecciona dependiendo de la velocidad del viento medida. Puede ser una ventaja que el programa de ganancia de error pueda usarse para mejorar sistemas de control con respecto a la actuación sobre el paso cuando puede seleccionarse la unidad de control.

45 En una realización, la unidad de control comprende una ley de control para realizar el seguimiento de la velocidad de referencia del rotor, pudiendo comprender la ley de control un controlador de acción proporcional e integral, un controlador de acción proporcional, integral y diferencial u otro esquema de control adecuado. El sistema de control por programa de ganancia de error puede combinarse ventajosamente con leyes de control para mejorar los problemas de actuación sobre el paso, tal como el desgaste inducido por actuación.

50 En una realización, la ganancia G comprende un programa de ganancia de paso para linealizar una respuesta de la turbina eólica a la señal de control de paso. Puede ser ventajoso linealizar la respuesta de la turbina eólica, es decir la relación entre velocidad de rotor y ángulo de paso, con el fin de conseguir una respuesta más lineal del sistema de control y, de ese modo, una mejora del seguimiento de una referencia de velocidad.

55 En una realización, la ganancia depende de al menos un parámetro seleccionado de la lista que comprende: velocidad del viento medida, potencia medida generada por la turbina eólica y ángulo de paso medido. La utilización de una ganancia que no es una ganancia escalar sino que depende de diversos parámetros puede ser ventajoso para conseguir un controlador mejorado.

En un segundo aspecto, la invención se refiere a un sistema de actuador de paso para una turbina eólica, comprendiendo la turbina eólica un rotor con al menos una pala y comprendiendo el sistema de actuador de paso un

sistema de control según la reivindicación 1 y un actuador de paso que puede conectarse al sistema de control para ajustar el paso de la pala.

5 En un tercer aspecto, la invención se refiere a una turbina eólica que comprende un rotor con al menos una pala, un actuador de paso para ajustar el paso de la pala y el sistema de control según la reivindicación 1 que puede conectarse con el actuador de paso para controlar la velocidad de rotor del rotor.

En un cuarto aspecto, la invención se refiere a un método para controlar la velocidad de rotor de una turbina eólica que comprende un rotor y un actuador de paso para ajustar el paso de una pala del rotor, comprendiendo el método:

10 - generar una señal de control de paso para el actuador de paso aplicando una ganancia a un error de velocidad, en el que el error de velocidad representa una diferencia entre una velocidad de referencia del rotor y una velocidad de rotor medida,

15 - generar una magnitud modificada del error de velocidad o una magnitud modificada de la ganancia usando un programa de ganancia de error que aumenta la magnitud del error de velocidad o la ganancia dependiendo del error de velocidad, de manera que la pendiente del programa de ganancia aumenta para magnitudes crecientes del error de velocidad, al menos para un primer intervalo de magnitudes del error de velocidad, y en el que posteriormente la pendiente del programa de ganancia disminuye para un segundo intervalo de magnitudes del error de velocidad, en el que las magnitudes del segundo intervalo son mayores que las magnitudes del primer intervalo.

El cuarto aspecto puede combinarse con métodos:

20 - en los que el programa de ganancia de error, que es una función del error de velocidad, se multiplica por el error de velocidad para generar una magnitud modificada del error de velocidad;

- en los que el programa de ganancia de error ajusta la magnitud de la ganancia en función del error de velocidad para generar una magnitud modificada del error de velocidad;

- en los que el programa de ganancia de error se representa mediante una función lineal o no lineal del error de velocidad;

25 - en los que el funcionamiento de la unidad de control se selecciona dependiendo de la velocidad del viento medida;

- en los que se usa una ley de control para realizar el seguimiento de la velocidad de referencia del rotor;

- en los que se usa un programa de ganancia de paso para linealizar una respuesta de la turbina eólica a la señal de control de paso.

En una realización, el método para controlar la velocidad de rotor de una turbina eólica según el cuarto aspecto, es un método para disminuir el desgaste del actuador de paso.

30 En un quinto aspecto, la invención se refiere al uso de un sistema de control según el primer aspecto para disminuir el desgaste del actuador de paso de la turbina eólica.

Los aspectos primero, segundo, tercero, cuarto y quinto de la presente invención pueden combinarse cada uno con cualquier de los otros aspectos. Estos y otros aspectos de la invención resultarán evidentes a partir de y se deducirán con referencia a la realización descrita a continuación en el presente documento.

35 Por tanto, en resumen, la invención se refiere a un sistema de control de turbina eólica adecuado para minimizar la actuación de actuadores de paso. El sistema de control usa un programa de ganancia de error en control de plena carga para reducir la actuación sobre el paso cuando la diferencia entre la velocidad de rotor y la velocidad de rotor de referencia no es crítica para la carga de componentes de una turbina eólica. El programa de ganancia de error puede ser una función no lineal que reduce la ganancia para errores de velocidad de rotor bajos. El uso del programa de ganancia de error puede reducir el desgaste de los actuadores de paso y puede mejorar la reducción de oscilaciones estructurales dado que se elimina el enfoque puesto en realizar el seguimiento de la referencia de velocidad de rotor cuando el error de velocidad es bajo.

Breve descripción de las figuras

45 A continuación se explicará la presente invención, únicamente a modo de ejemplo, con referencia a las figuras adjuntas, en las que

la figura 1 muestra un sistema de control conocido para controlar la velocidad de rotor de una turbina eólica,

la figura 2 muestra una turbina eólica con un sistema de control,

la figura 3 muestra un sistema de control conocido que comprende tanto un controlador de plena carga como un controlador de carga parcial,

la figura 4A ilustra una referencia de velocidad de rotor para el sistema de control,

la figura 4B muestra variaciones de velocidad de rotor en relación con la referencia de velocidad y variaciones de señal de control correspondientes,

la figura 5A muestra ejemplos de diferentes programas de ganancia de error,

5 la figura 5B muestra errores de velocidad modificados debido a los programas de ganancia de error,

las figuras 6A-B muestran cómo puede implementarse el programa de ganancia de error,

la figura 7A muestra la respuesta de velocidad de rotor no lineal a variaciones de paso,

la figura 7B muestra programas de ganancia de paso para compensar la respuesta de velocidad de rotor no lineal a variaciones de paso,

10 la figura 8 es un diagrama de flujo de un método según la invención.

Descripción de una realización

15 La figura 1 muestra un sistema de control 100 conocido para controlar la velocidad de rotor de una turbina eólica. La turbina eólica 180 comprende un rotor con al menos una pala de rotor 192. La pala de rotor 192 también es ajustable en paso. Es decir, la pala, o una parte de la pala que se extiende en una dirección longitudinal de la pala, por ejemplo la punta de la pala, puede ajustarse de manera angular alrededor del eje longitudinal de la pala. Se usa un actuador de paso 191 para realizar el ajuste angular o ajuste de paso de la pala o parte de la pala.

20 La figura 2 muestra una turbina eólica 200 que comprende un rotor 210 para impulsar un árbol acoplado a un generador eléctrico para la generación de potencia eléctrica a partir del rotor impulsado por el viento 210. El sistema de control 100 puede estar alojado fuera de la turbina eólica, dentro de la góndola 211, dentro de la torre 212 o en otro lugar. El sistema de control 100 suministra una señal de control de paso PC, 220, por ejemplo una señal eléctrica, al actuador de paso 191 o a un sistema de impulsión hidráulico que comprende un actuador de paso hidráulico 191.

25 El sistema de control 100 en la figura 1 genera un error de velocidad o una diferencia de velocidad w_e a partir de la diferencia entre una velocidad de referencia w_{ref} deseada del rotor 210 y una velocidad de rotor medida w_{rot} . El error de velocidad w_e puede generarse mediante una unidad de error 111 que determina la diferencia entre la referencia w_{ref} y la velocidad medida w_{rot} . La diferencia entre la referencia w_{ref} y la velocidad medida debe entenderse en términos generales como que incluye diferencias filtradas en las que cualquiera del error de velocidad, la velocidad de rotor medida y la velocidad de referencia se filtran, promedian o procesan de otro modo. Por tanto, el error de velocidad de rotor w_e que representa la diferencia entre la velocidad de referencia w_{ref} y la velocidad de rotor medida w_{rot} debe entenderse en términos generales como que comprende una suma de la velocidad de referencia y la velocidad medida, una suma o diferencia media o promediada, una suma o diferencia filtrada por paso bajo. Se entiende que una suma puede generar una diferencia cuando una de la velocidad de rotor o la velocidad medida tiene un valor negativo y la otra un valor positivo. La unidad de error 111 puede estar compuesta por un ordenador o procesador para determinar o derivar la diferencia de velocidad o un circuito electrónico digital o analógico para obtener la diferencia de velocidad.

30

35

La velocidad de rotor w_{rot} y, de manera correspondiente, la velocidad de referencia w_{ref} , puede ser la velocidad de rotación del rotor 210 o la velocidad de rotación del eje de rotación rápida generada por la caja de engranajes (no mostrada).

40 El sistema de control 100 comprende una unidad de control 113 que comprende una ganancia G y posiblemente una ley de control 114. La ley de control 114 puede ser cualquier controlador adecuado, por ejemplo, un controlador de acción proporcional (P) o un controlador de acción proporcional e integral (PI). Por tanto, la ley de control puede ser una ecuación matemática o un algoritmo procesado por un ordenador o procesador. La ley de control puede implementarse como un circuito electrónico analógico o digital. Se entiende que la ley de control actúa para minimizar el error de velocidad w_e de un modo adecuado, por ejemplo mediante la inclusión de un término de integral para minimizar un error de velocidad de otro modo constante mediante la integración con respecto al tiempo del error de velocidad. De manera equivalente, la ley de control actúa para realizar el seguimiento de la velocidad de rotor de referencia w_{ref} .

45

Ha de entenderse que incluso aunque la unidad de error 111 se ilustra como una unidad independiente, la unidad de error puede estar compuesta, por ejemplo, por un algoritmo de la ley de control 114.

50 La ganancia G modifica el error de velocidad w_e con el fin de aumentar o disminuir el error de velocidad w_e de modo que se consiga un control más rápido o más lento, respectivamente, del error de velocidad w_e , es decir una minimización más rápida o más lenta del error de velocidad w_e . La ganancia G del error de velocidad w_e puede ser un factor de ganancia o una función de ganancia que se multiplica por el error de velocidad w_e para obtener un error de velocidad modificado w_e .

En el caso en el que la ley de control 114 incluye una parte proporcional, por ejemplo un controlador PI, entonces la ganancia G y la parte proporcional (P) de la ley de control pueden combinarse para dar un único factor de ganancia G o una única parte proporcional (P).

5 La unidad de control 113 genera una señal de control de paso PC que se suministra al actuador de paso 191. La señal de control de paso o bien actúa directamente sobre el actuador de paso para generar una rotación del actuador y la pala, o bien la señal de control de paso puede actuar indirectamente a través de un impulsor de paso (no mostrado) que puede amplificar la señal de control PC para dar una señal de impulsión que actúa sobre el actuador de paso. La señal de control PC puede procesarse adicionalmente mediante un dispositivo de procesamiento de paso 115, por ejemplo un servomecanismo de paso, antes de suministrarse la señal de control de paso procesada al actuador de paso o un impulsor de paso. Puede suministrarse al servomecanismo de paso 115 una señal de retroalimentación de paso procedente del actuador de paso. La única unidad de control 113 o, por ejemplo, tres unidades de control 113 pueden generar, por ejemplo, tres señales de control PC , una para cada uno de los tres actuadores de paso 191 acoplados a las tres palas 192.

15 La velocidad de rotor medida w_{rot} usada para calcular el error de velocidad w_e , se obtiene de un sensor de velocidad (no mostrado), por ejemplo un tacómetro acoplado al árbol del rotor. La velocidad de rotor medida puede transmitirse a la unidad de error 111 o de manera equivalente a un ordenador o procesador para determinar el error de velocidad w_e .

La velocidad de referencia del rotor w_{ref} puede generarse mediante un generador de referencia 116, por ejemplo dependiendo de la velocidad del viento medida o estimada 132 suministrada al generador de referencia 116.

20 El sistema global que comprende el sistema de control 100, los sensores y actuadores 191 de la turbina eólica 180 y el generador de referencia 116 pueden configurarse de diversos modos y, por tanto, el esquema de control representado en la figura 1 es sólo una configuración particular entre otros esquemas de control funcionalmente equivalentes. Por ejemplo, pueden suministrarse otras entradas distintas al error de velocidad w_e a la unidad de control 113. Por tanto, pueden suministrarse un parámetro medido 131 de la potencia generada por la turbina eólica y un parámetro de referencia de una generación de potencia deseada de la turbina eólica a la unidad de control 113 con el fin de determinar un error de potencia (no mostrado) de la diferencia entre la referencia de potencia deseada y el parámetro medido 131. El error de potencia puede utilizarse otra ley de control para el control de la potencia generada de la turbina eólica mediante la generación de una señal de control de convertidor suministrada al convertidor de potencia eléctrica de la turbina.

30 La turbina eólica 180 puede hacerse funcionar dependiendo de la energía eólica disponible, es decir dependiendo de la velocidad del viento. Por tanto, con el fin de hacer funcionar la turbina eólica de la manera más eficiente y generar una cantidad de potencia eléctrica máxima a partir de la energía eólica cuando la velocidad del viento es relativamente baja, el paso de las palas 192 puede controlarse para maximizar la generación de potencia eléctrica mientras que la velocidad de rotor w_{rot} y la generación de potencia puede controlarse, no controlando el paso, sino controlando el convertidor de potencia eléctrica de modo que el generador acoplado al rotor a través del árbol garantice que la velocidad de rotor medida w_{rot} y/o la potencia generada es igual a o se aproxima a la velocidad de rotor deseada y/o potencia generada. A velocidades del viento relativamente altas, la turbina eólica puede hacerse funcionar controlando el paso de las palas para evitar que la velocidad de rotor w_{rot} se vuelva demasiado alta, lo que de otro modo provocaría cargas mecánicas demasiado altas. Por tanto, a velocidades del viento relativamente bajas se fija el paso normalmente a ángulos relativamente bajos, mientras que se fija el paso a ángulos relativamente altos a velocidades del viento relativamente altas para reducir la eficiencia aerodinámica de las palas y, de ese modo, la velocidad de rotor w_{rot} . Con el fin de controlar la turbina eólica dependiendo de las velocidades del viento relativamente bajas y relativamente altas, el sistema de control puede tener tanto un controlador de plena carga 113, 313 como un controlador de carga parcial 312 tal como se muestra en la figura 3.

45 La figura 3 muestra un sistema de control 100 conocido que comprende tanto un controlador de plena carga 313 como un controlador de carga parcial 312. El controlador de plena carga 313 representado tiene una función similar a la del controlador 113 de la figura 1. El controlador de carga parcial 312 puede recibir el error de velocidad de rotor w_e y posiblemente un parámetro de demanda de potencia (no mostrado). El controlador de carga parcial genera una señal de control de potencia en forma de una señal de par motor de reacción del generador que se transmite al convertidor de potencia eléctrica. El sistema de control 100 puede estar configurado para cambiar de un control de carga parcial a un control de plena carga cuando el contenido energético del viento pasa de un umbral dado. Por consiguiente, el funcionamiento de la unidad de control 113, 312, 313 puede seleccionarse dependiendo de un contenido energético medido o estimado del viento, que como ejemplo puede determinarse en términos de velocidad del viento y potencia generada.

55 La figura 4A ilustra la referencia de velocidad de rotor w_{ref} (en rotaciones por minuto, rpm) en función de la velocidad del viento 132. La región de control de carga parcial 401 comprende una región 411 en la que el valor de la referencia de velocidad w_{ref} es bajo, una región 412 en la que la referencia de velocidad w_{ref} aumenta, y una región 413 en la que la referencia de velocidad w_{ref} es igual a la velocidad de rotor nominal de la turbina eólica. El cambio de la región de carga parcial 401 a la región de plena carga 402 puede determinarse a partir del contenido energético del viento, o alternativamente a partir de medidas de la velocidad del viento 132, la potencia generada

60

131 o una combinación de los mismos. Por ejemplo, el cambio puede realizarse cuando el contenido energético estimado del viento se aproxima o pasa de un umbral de energía eólica, ilustrado principalmente mediante la referencia 490.

5 La figura 4B muestra variaciones de la velocidad de rotor medida w_{rot} en forma de la curva 421 con variaciones relativamente pequeñas y la curva 422 con variaciones relativamente grandes. Las variaciones 421 y 422 se muestran en relación con la referencia de velocidad de rotor 422, pero con una amplitud exagerada de las variaciones en comparación con la velocidad de referencia w_{ref} .

10 La variación de velocidad de rotor 421 y 422 viene provocada por la unidad de control 113, 313 en su intento por realizar el seguimiento de la velocidad de referencia de rotor w_{ref} mediante la generación de una señal de control de paso PC. Las curvas 423 y 424 ilustran variaciones en la señal de control de paso PC generadas por la unidad de control 113, 313 en respuesta al error de velocidad de rotor w_e , es decir la diferencia entre las variaciones de velocidad de rotor 421 y 422 respectivas y la referencia w_{ref} .

15 Las variaciones de señal de control de paso 423, 424 provocan una actuación correspondiente del actuador de paso 191. La actuación del actuador de paso hidráulico o eléctrico 191 provoca el desgaste y el acortamiento de la vida útil del propio actuador así como de otros componentes de la turbina eólica, incluyendo cojinetes de palas y el sistema hidráulico de los actuadores de paso 191.

Por consiguiente, es deseable reducir la amplitud de las variaciones de señal de control de paso 423, 424.

20 Por otro lado, si no se realiza un seguimiento de manera eficiente de la referencia de velocidad de rotor w_{ref} , de modo que se permita una gran diferencia de velocidad w_e , los componentes de la turbina eólica también se exponen a un desgaste y acortamiento de la vida útil adicionales si la velocidad de rotor w_{rot} se vuelve demasiado grande. Valores demasiado altos de la velocidad de rotor w_{rot} provocan un acortamiento de la vida útil y el desgaste de las palas de turbina 192, la torre 212, el convertidor de potencia eléctrica y otros componentes.

25 Adaptando de manera apropiada la acción de la unidad de control 113, 313 dependiendo del error de velocidad de rotor w_e es posible limitar la amplitud de la variación de señal de control de paso 423 cuando la amplitud 431 de las variaciones de velocidad de rotor 421 y, de ese modo, la amplitud 431 del error de velocidad de rotor w_e está por debajo de un umbral de error 432 dado o, de manera equivalente, es posible limitar la amplitud de la variación de señal de control de paso 423, por ejemplo cuando un valor de pico o un valor promedio de la velocidad de rotor w_{rot} está por debajo de una velocidad nominal w_{rat} dada tal como se ilustra en la figura 4B.

30 Dado que las palas de la turbina 192, la torre 212, el convertidor de potencia eléctrica y otros componentes de la turbina eólica están diseñados para funcionar a velocidades hasta la velocidad nominal w_{rat} , la vida útil de estos componentes no se reduce sustancialmente más que a otras velocidades de rotor por debajo de la velocidad nominal. Por tanto, cuando la velocidad de rotor w_{rot} está por debajo de un umbral de velocidad de rotor w_{rat} dado o cuando el error de velocidad w_e , 431 está por debajo de un umbral de error 432 dado, la amplitud 425 de la señal de control de paso PC y, de ese modo, la amplitud de la actuación del actuador de paso 191, pueden reducirse sin exponer los componentes de la turbina eólica a un desgaste o un acortamiento de la vida útil adicionales. Claramente, cuando se reduce la amplitud 425 de la señal de control de paso PC, se reduce el desgaste del actuador de paso 191, los cojinetes de paso y los sistemas de impulsión de paso hidráulicos o eléctricos y, de manera correspondiente, aumenta la vida útil.

35 La amplitud 425 de la señal de control de paso PC puede reducirse dependiendo del error de velocidad w_e o la velocidad de rotor w_{rot} , es decir dependiendo de la velocidad de rotor w_{rot} o el error de velocidad w_e en relación con el umbral de velocidad de rotor w_{rat} o el umbral de error 432 respectivo, modificando funcionalmente el sistema de control 100 o mejorando el sistema de control 100 con un programa de ganancia de error para generar una magnitud modificada del error de velocidad w_e o una magnitud modificada de la ganancia G. La función de la modificación del sistema de control 100 o el programa de ganancia de error es aumentar la magnitud del error de velocidad w_e o la ganancia G para valores crecientes del error de velocidad w_e , al menos para algunas magnitudes del error de velocidad w_e . El efecto de la modificación del error de velocidad o la ganancia G es que el error de velocidad se amplifica relativamente más para grandes valores de errores de velocidad w_e suministrados en comparación con menores valores de errores de velocidad w_e suministrados.

40 La figura 5A muestra ejemplos de diferentes programas de ganancia que aumentan la magnitud del error de velocidad w_e o la ganancia G en función de un error de velocidad creciente w_e . El programa de ganancia 511 aumenta linealmente para un error de velocidad creciente w_e . El programa de ganancia 512, que es lineal por tramos, tiene una pendiente positiva dentro del intervalo $e_1 - e_3$, y tiene pendientes crecientes para errores de velocidad w_e dentro del intervalo $e_1 - e_2$. El programa de ganancia 513 aumenta no linealmente con un error de velocidad creciente, al menos para algunas magnitudes del error de velocidad, es decir el programa de ganancia puede tener una parte con pendiente nula para errores de velocidad mayores que e_3 .

45 En general, los programas de ganancia 512-513 pueden tener una pendiente positiva que aumenta para valores crecientes del error de velocidad, al menos para un primer intervalo de valores del error de velocidad entre e_1 y e_2 , y en el que posteriormente la pendiente del programa de ganancia disminuye para un segundo intervalo de

valores del error de velocidad entre e_2 y e_3 , en el que las magnitudes de los valores de error del segundo intervalo son mayores que las magnitudes de los valores del primer intervalo.

La figura 5B muestra ejemplos de errores de velocidad modificados $w_{e'}$ (véanse las figuras 6A-B) en función de un error de velocidad w_e . La curva 521 muestra el error de velocidad modificado $w_{e'} = G \times w_e$ de la unidad de control 113 de la figura 1 o la unidad de control 313 de la figura 3, donde el error de velocidad w_e simplemente se multiplica por la ganancia escalar G . Por tanto, la curva de error 521 es lineal con una pendiente de G . La curva de error 522 muestra el error de velocidad modificado $w_{e'} = G \times w_e \times f_{lin}$, donde f_{lin} representa la curva de programa de ganancia lineal 511 de la figura 5A. La curva de error 523 muestra el error de velocidad modificado $w_{e'} = G \times w_e \times f_{nlin}$, donde f_{nlin} representa la curva de programa de ganancia no lineal 513 de la figura 5B.

5 Comparar las curvas de error 522 y 523 con la curva de error 521 tradicional muestra que, para errores de velocidad por debajo de un valor w_0 dado, los errores de velocidad modificados del programa de ganancia $w_{e'}$ tienen magnitudes más pequeñas que los errores de velocidad del sistema de control 100 tradicional de la figura 1 y la figura 3 y, por tanto, las amplitudes 431 de las variaciones de error de velocidad 421 y, por consiguiente, las amplitudes 425 de la señal de control de paso PC, 423 y la actuación sobre las amplitudes de paso disminuyen cuando se utiliza el programa de ganancia de error 511-513 en comparación con el controlador 113 tradicional sin programación de ganancia de error. El efecto positivo de reducir las amplitudes 425 de la señal de control de paso PC es el aumento de la vida útil del sistema de actuación sobre el paso que comprende actuadores de paso, cojinetes y sistemas de impulsión hidráulicos o eléctricos.

20 Por encima del error de velocidad de rotor w_0 , los errores de velocidad modificados del programa de ganancia $w_{e'}$ pueden tener magnitudes más grandes que los errores de velocidad w_e del sistema de control 100 tradicional. Por consiguiente, por encima del error de velocidad w_0 , las amplitudes de las variaciones de señal de control de paso 424 pueden ser mayores cuando se utiliza el programa de ganancia de error en comparación con las variaciones de señal de control 424 cuando no se utiliza programa de ganancia alguno. Dado que la velocidad de error de rotor w_e sólo aumenta raramente más allá del error de velocidad de diferenciación w_0 , por ejemplo en condiciones de viento muy turbulentas, el aumento del desgaste del sistema de actuación sobre el paso debido al programa de ganancia de error para errores de velocidad de rotor w_e grandes es muy bajo en comparación con la disminución del desgaste en condiciones de viento predominantes y típicas en las que los errores de velocidad de rotor están en su mayor parte por debajo de w_0 .

30 De hecho, la ganancia adicional del error de velocidad de rotor w_e para errores de velocidad por encima de w_0 puede dar como resultado una reducción más rápida del error de velocidad w_e , de modo que la carga adicional de, por ejemplo, las palas de turbina eólica debido a una racha de viento puede reducirse más rápido dado que el sistema de control 100 actúa más rápido.

35 Claramente, también es posible diseñar el programa de ganancia de error 513 de modo que los valores de la curva de error programado de ganancia 523 no superen los valores de la curva de error de velocidad 521 tradicional para el sistema de control tradicional de la figura 1 para errores de velocidad por encima de w_0 . Por consiguiente, la forma de los programas de ganancia 511-513 y la ubicación del error de velocidad de diferenciación w_0 son variables y pueden diseñarse dependiendo de la dinámica de la turbina eólica.

40 Además de reducir las amplitudes 425 de la señal de control de paso PC, 423, los programas de ganancia 511-513 también pueden reducir la frecuencia de las variaciones de señal de control de paso 423. Claramente, una reducción de la frecuencia de las actuaciones del controlador de paso 191 es un efecto deseable de usar los programas de ganancia de error 511-513, dado que una reducción de la frecuencia también reduce el desgaste del actuador de paso 191 y el sistema de paso.

El programa de ganancia de error 511-513 puede implementarse mediante diversos medios que tienen las mismas funciones equivalentes.

45 La figura 6A muestra cómo puede implementarse el programa de ganancia de error 511-513 como un programa de ganancia GS en serie con la ganancia G de la unidad de control 113, 313. En esta realización, el programa de ganancia puede implementarse como una función lineal o no lineal GS (w_e) del error de velocidad w_e que genera un error de velocidad modificado $w_{e'}$ que se suministra a la ganancia G .

50 La figura 6B muestra cómo puede implementarse el programa de ganancia de error 511-513 como un programa de ganancia GS que modifica la amplificación de la ganancia G existente ajustando la magnitud de la ganancia (G) en función del error de velocidad (w_e) (ilustrado mediante la flecha de ajuste discontinua GS). En esta realización, el programa de ganancia 511-513 puede implementarse como una función de ganancia lineal o no lineal $G(w_e)$ del error de velocidad w_e que genera un error de velocidad modificado $w_{e'}$ que se modifica tanto según la ganancia G como según el programa de ganancia GS.

55 Los programas de ganancia de error 511-513, GS pueden implementarse de diversos modos, por ejemplo multiplicando el error de velocidad w_e por el programa de ganancia GS o modificando la ganancia G según el programa de ganancia GS de modo que se multiplique de manera efectiva el error de velocidad w_e por el programa de ganancia GS. Independientemente de cómo se implemente el programa de ganancia GS, el programa de

ganancia GS sirve para modificar el error de velocidad w_e aumentando la magnitud del error de velocidad w_e , la ganancia G, o aumentando de manera general la magnitud del programa de ganancia GS en función del error de velocidad w_e al menos para algunas magnitudes del error de velocidad w_e .

5 La aplicación de un programa de ganancia se aplica tanto a la realización de la figura 1 con una única unidad de control 113 como a la realización de la figura 313 con una unidad de control 312 independiente.

10 Dado que la aplicación del programa de ganancia GS reduce las amplitudes de la señal de control de paso PC y, de ese modo, las amplitudes de ajustes de paso del actuador de paso 191 y, como resultado, reduce el desgaste del actuador de paso 191, el programa de ganancia GS puede aplicarse como un método para reducir las amplitudes de ajustes de paso del actuador de paso 191 o como un método para disminuir el desgaste del actuador de paso 191 y el sistema de paso.

15 El efecto del ajuste de paso de una pala sobre un cambio de velocidad de rotor w_{rot} , es decir el efecto de hacer rotar la pala cierto ángulo, es no lineal en el sentido de que el efecto de una rotación dada, por ejemplo de 1° , a un ángulo de paso θ pequeño es menor que el efecto de la misma rotación a un ángulo de paso grande. La turbina eólica se hace funcionar normalmente a un ángulo de paso pequeño, por ejemplo un paso relativo de 0° , durante carga parcial 401, mientras que el paso para la velocidad del viento creciente en la región de plena carga 402 aumenta hasta, por ejemplo, un paso relativo de 20° . Por tanto, el sistema de paso es más sensible a un ángulo de paso grande que a un ángulo de paso pequeño.

La secuencia del programa de ganancia de error GS, la ganancia G y la ley de control 114 en el sistema de control 100 es arbitraria; por ejemplo, el programa de ganancia GS puede situarse tras la ley de control 114.

20 La figura 7A muestra un esbozo de principio de una variación de velocidad de rotor 702 como función no lineal 703 del ángulo de paso 701. Dado que el paso puede ser equivalente a la velocidad del viento, el eje de coordenadas 701 también puede representar la velocidad del viento 132.

25 Con el fin de compensar la función de paso no lineal 703, la ganancia G puede hacerse dependiente del paso o la velocidad del viento 701 de modo que la ganancia G es relativamente más grande para valores de paso o velocidad del viento 701 pequeños en comparación con valores de paso o velocidad del viento 701 grandes.

30 La figura 7B muestra un esbozo de principio de un programa de ganancia de paso 712 para linealizar la respuesta 703 de la turbina eólica a la señal de control de paso PC. La respuesta de la turbina eólica puede ser la velocidad de rotor 702, o por consiguiente la potencia generada o el par motor del rotor. Por tanto, el programa de ganancia de paso 712 presenta una ganancia relativamente grande G para valores de paso o velocidad del viento 701 pequeños y una ganancia relativamente pequeña G para valores de paso o velocidad del viento 7 grandes de modo que se compensa o linealiza la función de paso no lineal 703. El uso de una ganancia G que comprende un programa de ganancia de paso 712 implica que la relación funcional entre error de velocidad w_e y el cambio de velocidad de rotor w_{rot} es lineal, o al menos más lineal en comparación con el uso de una ganancia escalar G.

35 Cuando la ganancia G comprende un programa de ganancia de paso 712 que depende del ángulo de paso medido 701, la velocidad del viento medida 132 y/o la potencia generada 131, la ganancia G depende igualmente de esos parámetros. Por consiguiente, pueden proporcionársele entradas a la ganancia G para el ángulo de paso medido 701, la velocidad del viento medida 132 y/o la potencia generada 131.

40 El programa de ganancia GS puede modificar la ganancia G que comprende el programa de ganancia de paso 712, de manera similar a la modificación de la ganancia escalar G tal como se representa en la figura 6B. Por tanto, el programa de ganancia de error 511-513 puede implementarse como un programa de ganancia GS que modifica (ilustrado por la flecha de ajuste discontinua GS en la figura 6B) la amplificación de la ganancia que comprende el programa de ganancia de paso 712. La modificación del programa de ganancia de paso 712 puede conseguirse cambiando la ganancia de paso 712 a la ganancia de paso modificado en ganancia 713 que tiene una menor ganancia global cuando el error de velocidad w_e está por debajo de un error e_x dado tal como se muestra en la figura 5A o de manera general cambiando la ganancia de paso 712 según el programa de ganancia GS de modo que la ganancia de paso 712 se cambia una cantidad dada por la magnitud del programa de ganancia GS. Puede ser beneficioso usar el programa de ganancia de error GS en combinación con el programa de ganancia de paso 712, dado que el uso del programa de ganancia de paso 712 implica que el sistema de control funciona de manera eficiente para un gran intervalo de velocidades del viento en comparación con el uso de una ganancia escalar G.

50 El sistema de control 100 que comprende la unidad de control 313, el programa de ganancia GS y la unidad de error 111 puede implementarse como un programa informático adaptado para procesarse en un ordenador o un procesador digital. El procesamiento del programa informático puede llevarlo a cabo un único ordenador o distribuirse por varios ordenadores. El programa de función de ganancia GS puede implementarse en el sistema de control 100 como una ecuación matemática que ha de resolver el ordenador o puede almacenarse el programa de ganancia en el ordenador como una tabla de valores de programa de ganancia para diferentes valores de error de velocidad.

La figura 8 ilustra las etapas del método. La etapa 801 comprende generar una magnitud modificada del error de

velocidad w_e o una magnitud modificada de la ganancia G usando un programa de ganancia de error GS . La etapa 802 comprende generar una señal de control de paso PC para el actuador de paso aplicando una ganancia G a un error de velocidad w_e . La etapa 803 comprende suministrar la señal de control de paso PC al actuador de paso 191.

5

REIVINDICACIONES

1. Sistema de control para controlar la velocidad de rotor de una turbina eólica, comprendiendo la turbina eólica un rotor y un actuador de paso para ajustar el paso de una pala del rotor, comprendiendo el sistema de control:
 - 5 una unidad de control para generar una señal de control de paso para el actuador de paso, comprendiendo la unidad de control una ganancia de un error de velocidad, en el que el error de velocidad representa una diferencia entre una velocidad de referencia del rotor y una velocidad de rotor medida,
 - un programa de ganancia de error para generar una magnitud modificada del error de velocidad o una magnitud modificada de la ganancia dependiendo del error de velocidad,
 - 10 caracterizado por que la pendiente del programa de ganancia aumenta para magnitudes crecientes del error de velocidad, al menos para un primer intervalo de magnitudes del error de velocidad, y en el que posteriormente la pendiente del programa de ganancia disminuye para un segundo intervalo de magnitudes del error de velocidad, en el que las magnitudes del segundo intervalo son mayores que las magnitudes del primer intervalo.
- 15 2. Sistema de control según la reivindicación 1, siendo el programa de ganancia de error una función de error de velocidad que se multiplica por el error de velocidad para generar una magnitud modificada del error de velocidad.
3. Sistema de control según la reivindicación 1, en el que el programa de ganancia de error ajusta la magnitud de la ganancia como una función del error de velocidad para generar una magnitud modificada del error de velocidad.
- 20 4. Sistema de control según la reivindicación 1, en el que el programa de ganancia de error se representa mediante una función lineal o no lineal del error de velocidad.
5. Sistema de control según la reivindicación 1, en el que el funcionamiento de la unidad de control puede seleccionarse dependiendo de la velocidad del viento medida.
- 25 6. Sistema de control según la reivindicación 1, en el que la unidad de control comprende una ley de control para realizar el seguimiento de la velocidad de referencia del rotor.
7. Sistema de control según la reivindicación 1, en el que la ganancia comprende un programa de ganancia de paso para linealizar una respuesta de la turbina eólica a la señal de control de paso.
8. Sistema de control según la reivindicación 1, en el que la ganancia también depende de al menos un parámetro seleccionado de la lista que comprende: velocidad del viento medida, potencia medida generada por la turbina eólica y ángulo de paso medido.
- 30 9. Sistema de actuador de paso para una turbina eólica, comprendiendo la turbina eólica un rotor con al menos una pala y comprendiendo el sistema de actuador de paso un sistema de control según la reivindicación 1 y un actuador de paso que puede conectarse al sistema de control para ajustar el paso de la pala.
- 35 10. Turbina eólica que comprende un rotor con al menos una pala, un actuador de paso para ajustar el paso de la pala y el sistema de control según la reivindicación 1 que puede conectarse con el actuador de paso para controlar la velocidad de rotor del rotor.
- 40 11. Método para controlar la velocidad de rotor de una turbina eólica que comprende un rotor y un actuador de paso para ajustar un paso de una pala del rotor, comprendiendo el método:
 - generar una señal de control de paso para el actuador de paso aplicando una ganancia (G) a un error de velocidad, en el que el error de velocidad representa una diferencia entre una velocidad de referencia del rotor y una velocidad de rotor medida,
 - 45 generar una magnitud modificada del error de velocidad o una magnitud modificada de la ganancia usando un programa de ganancia de error que aumenta la magnitud del error de velocidad o la ganancia dependiendo del error de velocidad, caracterizado por que la pendiente del programa de ganancia aumenta para magnitudes crecientes del error de velocidad, al menos para un primer intervalo de magnitudes del error de velocidad, y en el que posteriormente la pendiente del programa de ganancia disminuye para un segundo intervalo de magnitudes del error de velocidad, en el que las magnitudes del segundo intervalo son mayores que las magnitudes del primer intervalo.
 - 50
12. Método para controlar la velocidad de rotor de una turbina eólica según la reivindicación 11, en el que el método sirve para disminuir el desgaste del actuador de paso.

13. Uso de un sistema de control según la reivindicación 1, para disminuir el desgaste del actuador de paso de la turbina eólica.

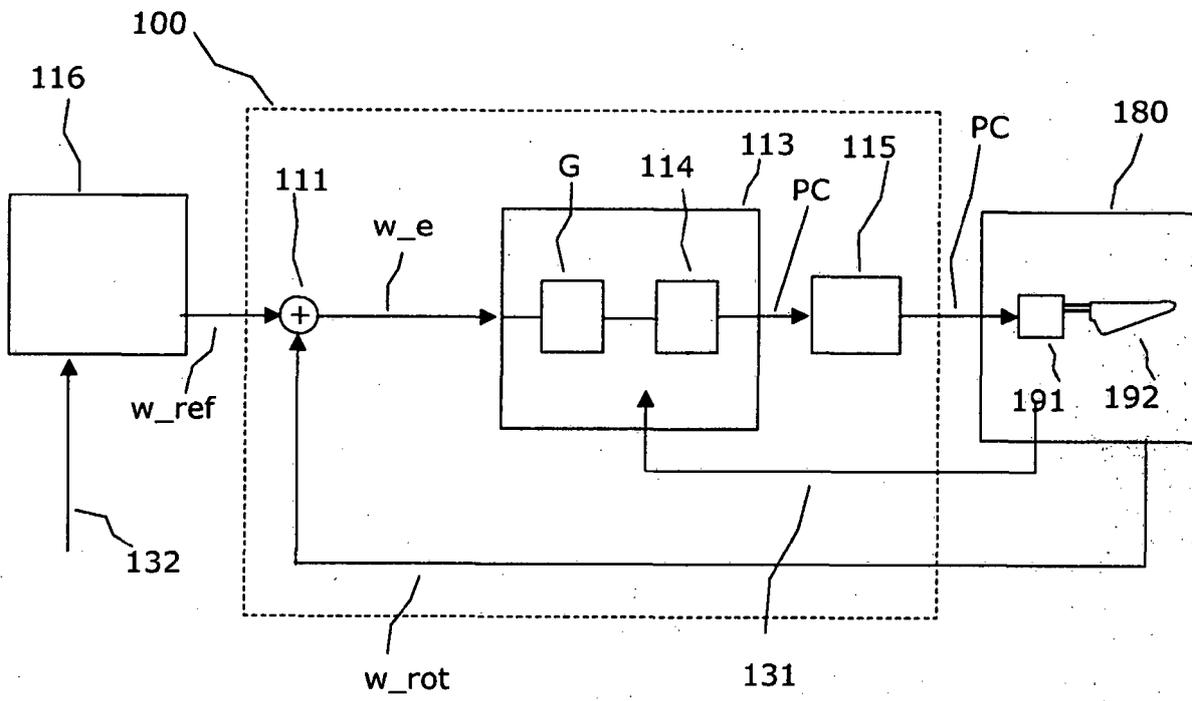


Fig. 1

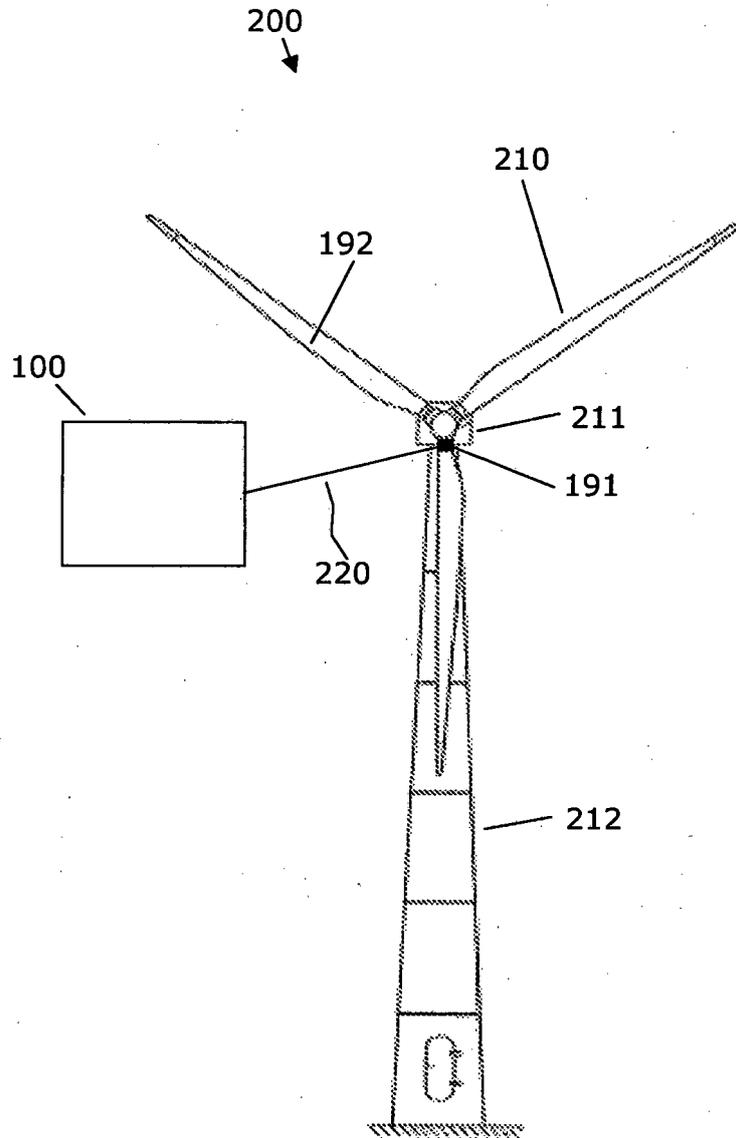


Fig. 2

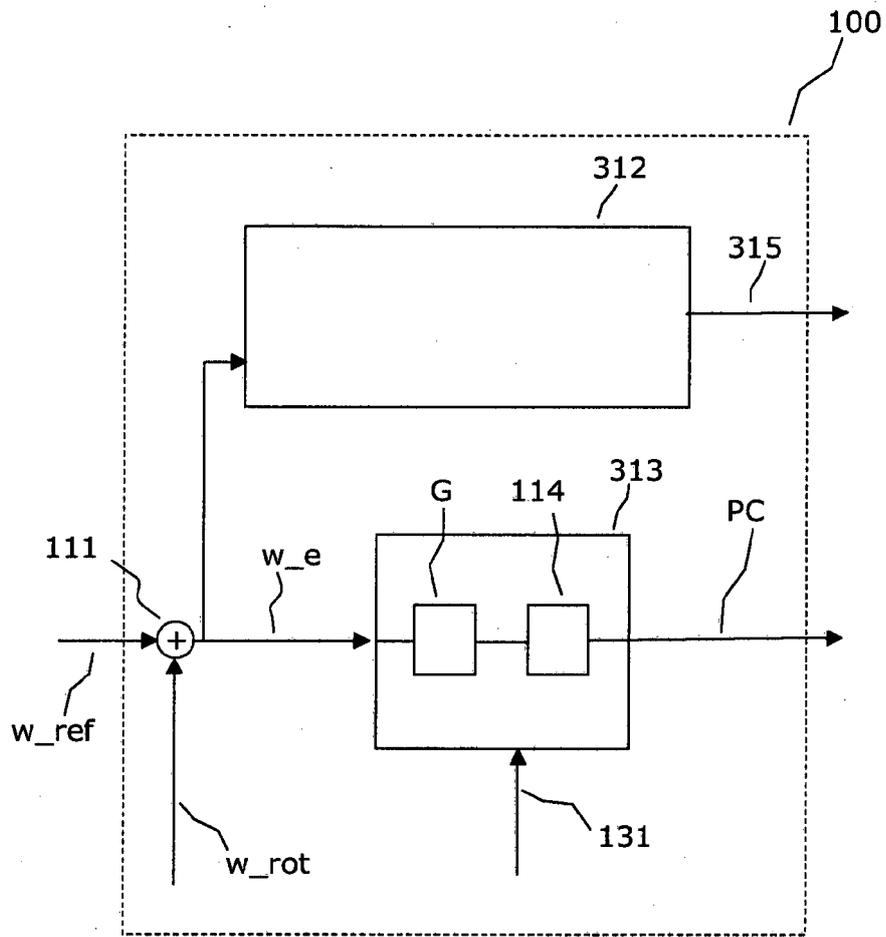


Fig. 3

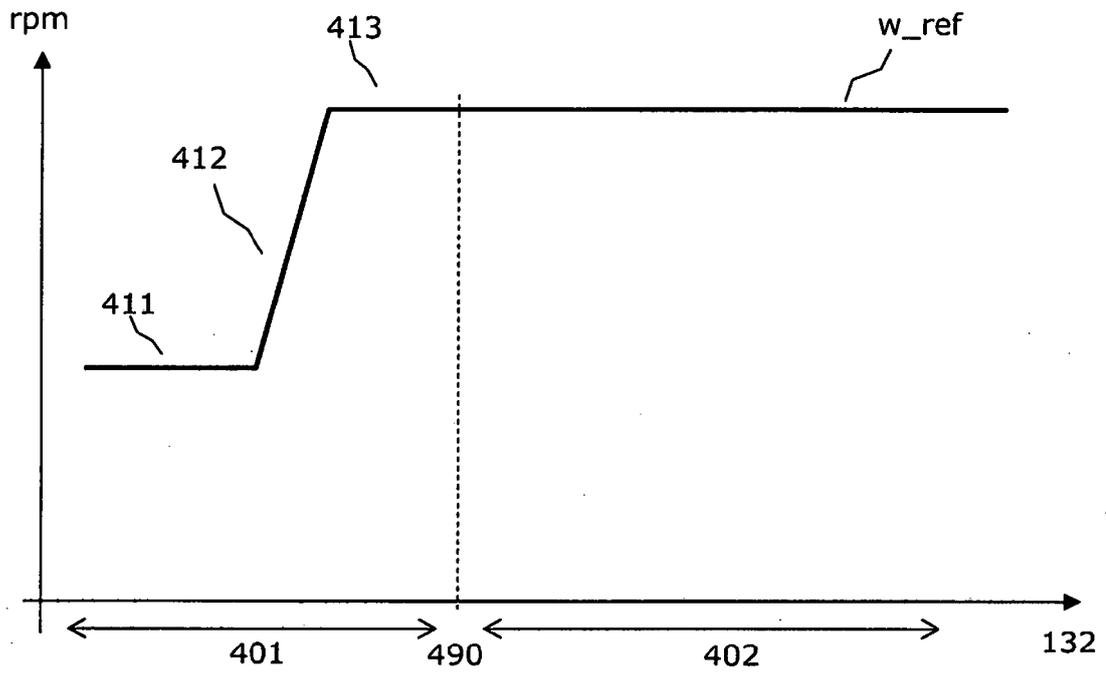


Fig. 4A

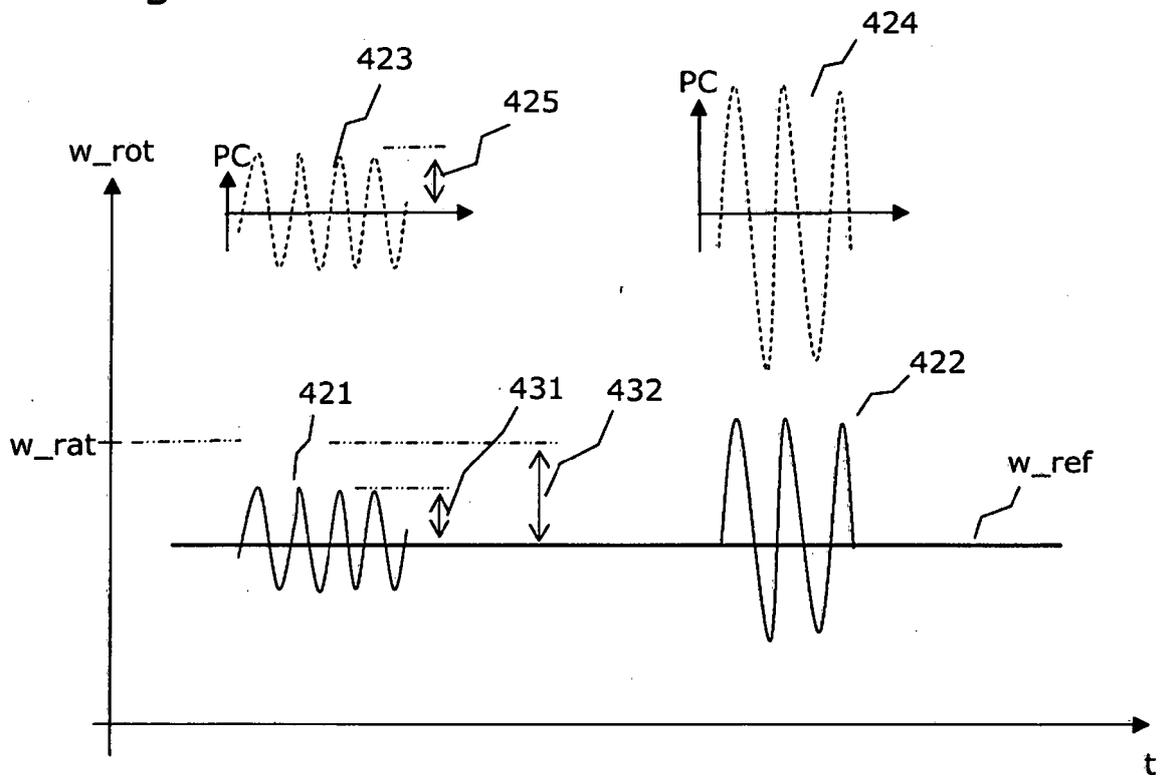


Fig. 4B

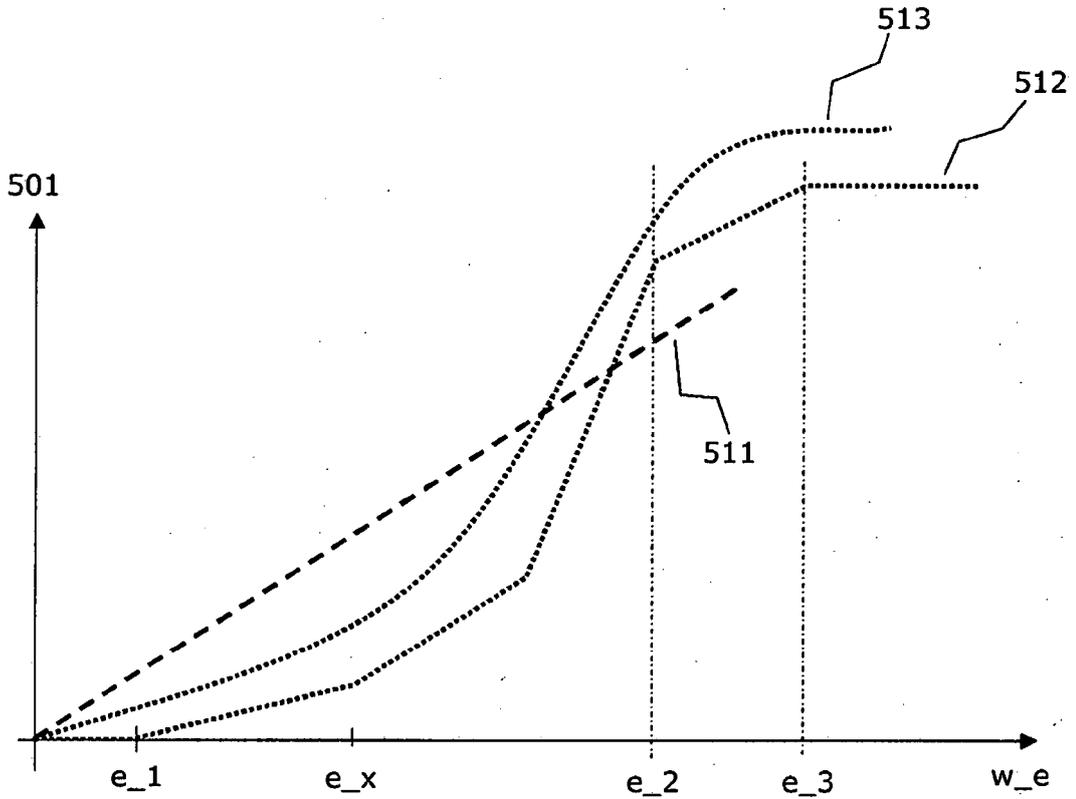


Fig. 5A

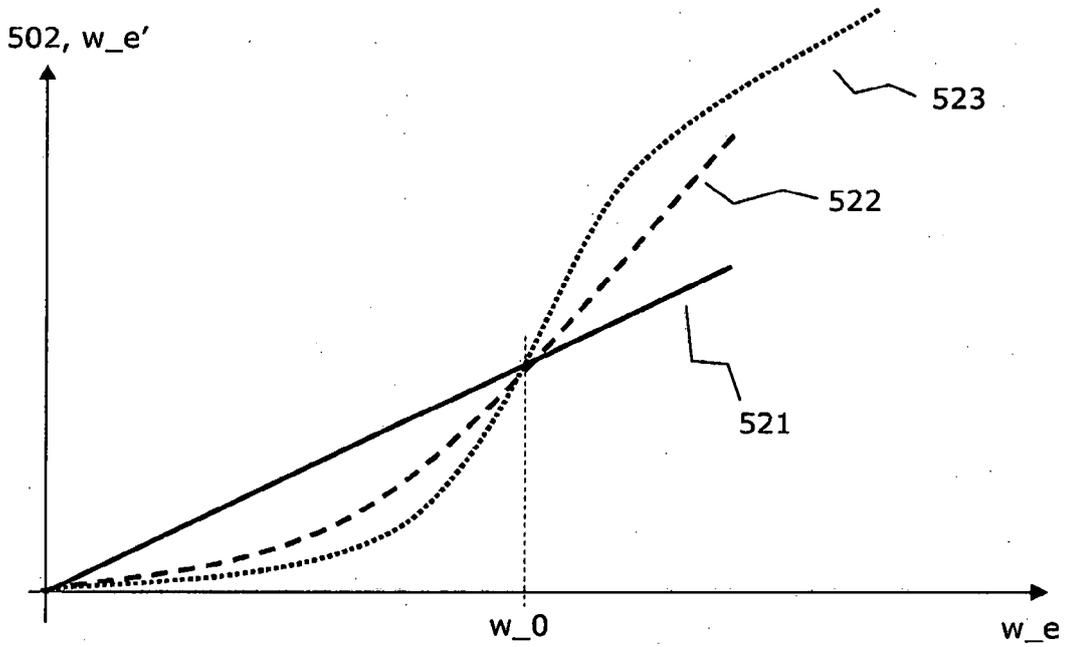


Fig. 5B

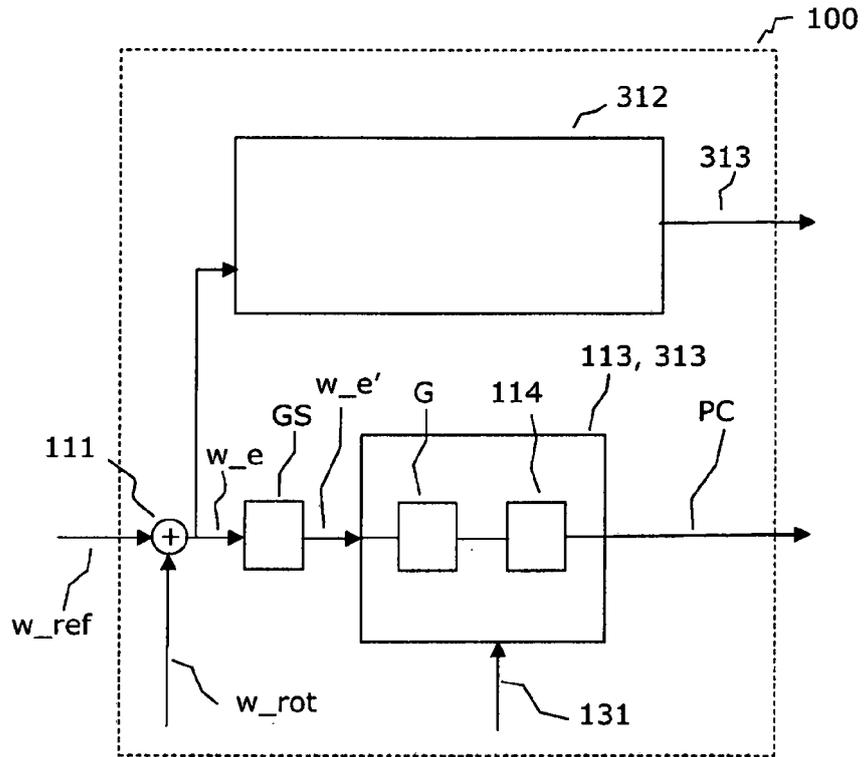


Fig. 6A

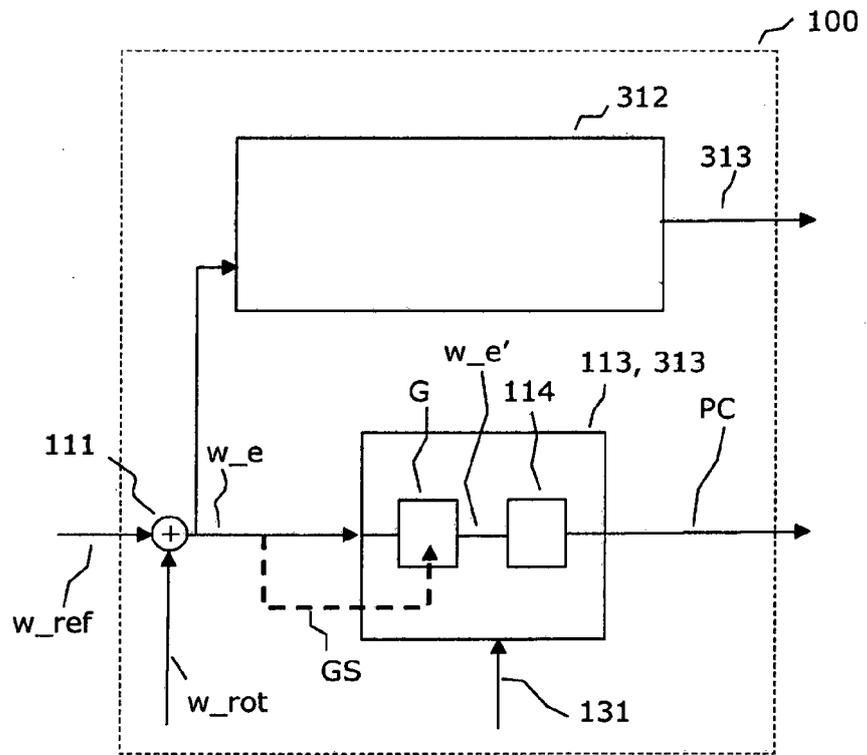


Fig. 6B

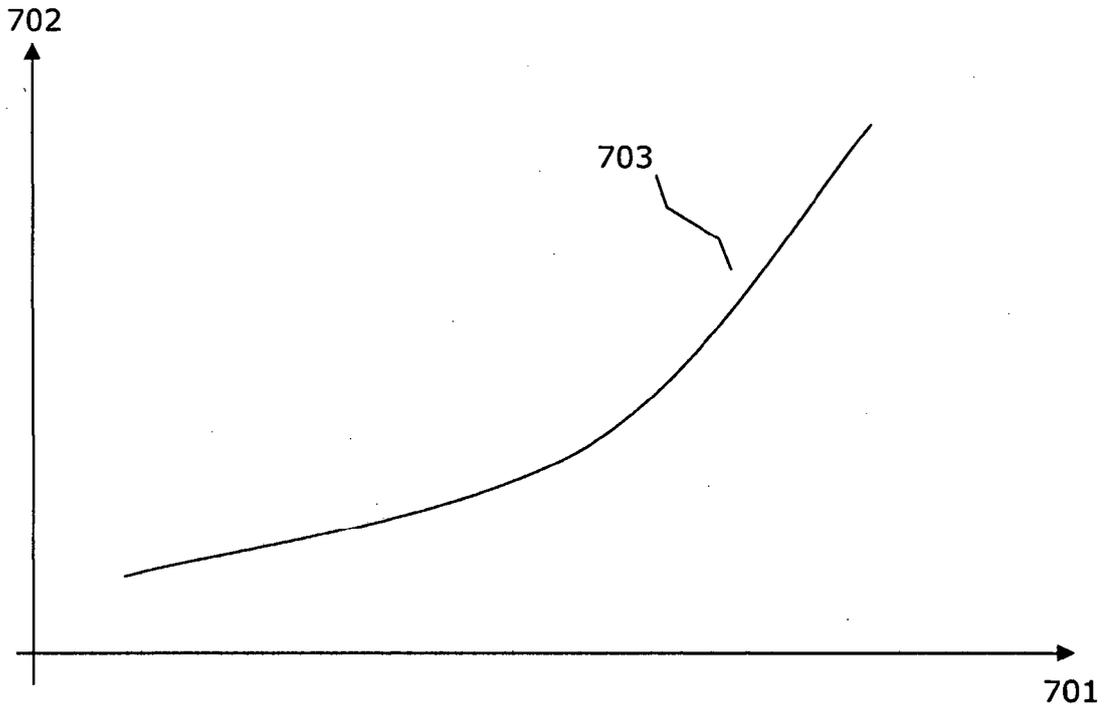


Fig. 7A

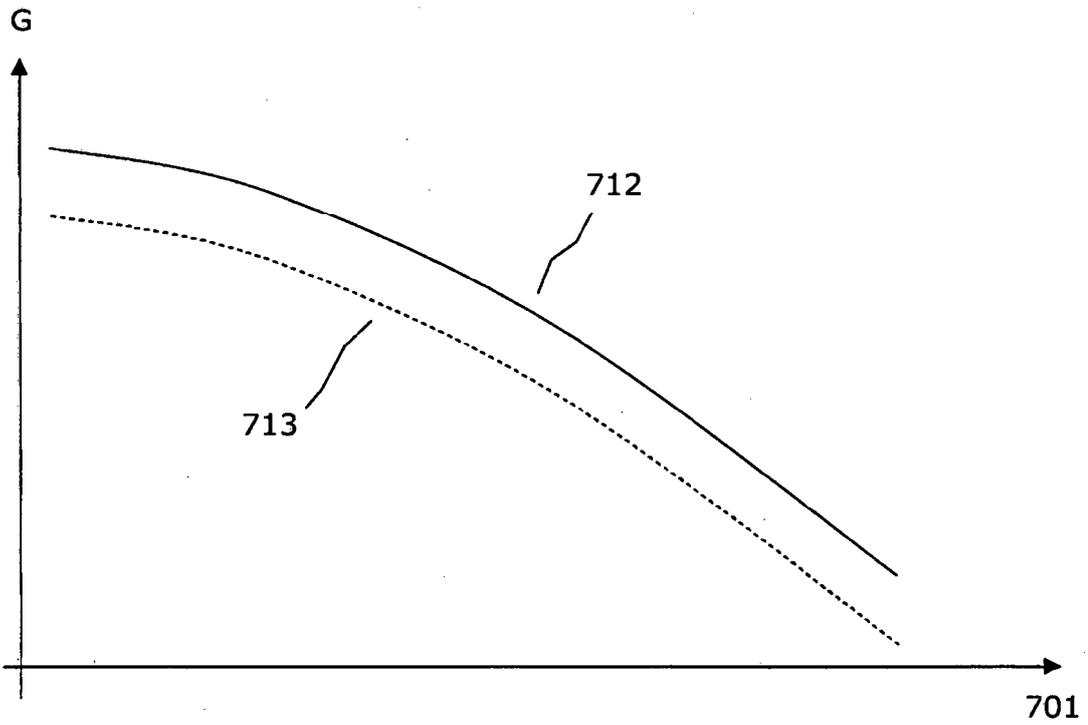


Fig. 7B

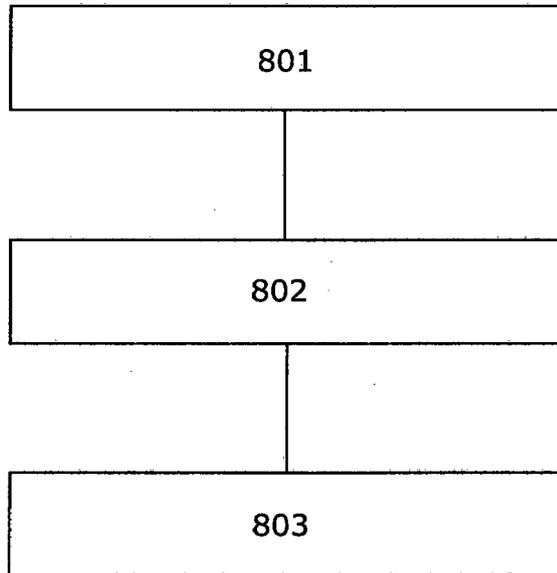


Fig. 8