

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 622 528**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02 (2006.01)

F03D 9/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **14.08.2012 PCT/DK2012/050294**

87 Fecha y número de publicación internacional: **20.02.2014 WO14026688**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.08.2012 E 12748156 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.03.2017 EP 2885534**

54 Título: **Reducción a carga parcial para control de turbina eólica**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
06.07.2017

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

72 Inventor/es:
**KJÆR, MARTIN, ANSBJERG y
HERBSLEB, EIK**

74 Agente/Representante:
ARIAS SANZ, Juan

ES 2 622 528 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

Reducción a carga parcial para control de turbina eólica

5 **Campo técnico**

La presente solicitud se refiere en general a métodos y sistemas para el control de turbinas eólicas y, más específicamente, a métodos y sistemas para el control de la salida de potencia de los generadores de turbina eólica en condiciones de operación reducidas.

10

Antecedentes

Generalmente, una turbina eólica es una máquina giratoria que convierte la energía cinética del viento en energía mecánica y, cuando se usa para generación de potencia, convierte esta energía mecánica en energía eléctrica. Debido a su capacidad para generar potencia eléctrica sin consumir combustibles fósiles, las turbinas eólicas están siendo crecientemente usadas como una fuente de energía alternativa para proporcionar potencia a la red eléctrica. Una turbina eólica usada para la generación de potencia eléctrica incluye típicamente un rotor que tiene una pluralidad de palas configuradas para capturar la potencia del viento. El rotor se acopla a un generador que convierte la energía de giro del rotor en energía eléctrica. Cuando se incrementa la velocidad del viento por encima de la velocidad mínima o de "arranque" (W_{MIN}) para la turbina, el rotor comienza a girar de modo que la turbina eólica puede comenzar a producir potencia eléctrica. La salida de potencia de la turbina eólica se incrementa generalmente con la velocidad del viento hasta que la velocidad del viento alcanza una velocidad de viento nominal o de diseño (W_R) para la turbina eólica. Por encima de la velocidad del viento de diseño W_R , la salida de potencia de la turbina eólica está limitada por la potencia de salida de diseño (P_R) del generador. Cuando la velocidad del viento se implementa adicionalmente, la velocidad del viento puede alcanzar una velocidad de corte (W_C) o de plegado, punto en el que la turbina eólica puede pararse para impedir daños al rotor y/o al generador.

Debido a que la salida del generador varía con las condiciones del viento, el generador se acopla normalmente a la red mediante un convertidor de potencia que acondiciona la salida de potencia del generador para satisfacer las demandas de tensión, corriente, fase y frecuencia de red. Para proporcionar potencia a escala de compañía a la red eléctrica, un sistema de generación eólica puede incluir una o más turbinas eólicas, comprendiendo un sistema de generación eólica típico una granja eólica que tiene múltiples turbinas eólicas aliadas juntas para proporcionar potencia a la red en un punto de conexión común. La salida colectiva de la granja eólica en el punto de conexión común puede controlarse mediante un controlador centralizado de la planta de generación (que puede ser parte de un sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA)) que interactúa con los controladores de turbina eólica individuales para satisfacer las demandas de la red eléctrica.

Cada turbina eólica puede controlarse, tanto remota como localmente, mediante un controlador que controla la velocidad del rotor y la salida de potencia de la turbina eólica. El controlador de turbina mantiene de ese modo la operación de la turbina eólica dentro de sus parámetros de diseño así como de acuerdo con las demandas de potencia de la red. Con este fin, el controlador de turbina puede incluir un controlador de paso que ajusta la cantidad de potencia eólica capturada por el rotor mediante el ajuste del paso de las palas del rotor. El controlador de turbina puede incluir también un controlador del convertidor de potencia que ajusta la potencia eléctrica proporcionada a la red por el convertidor de potencia. La cantidad de potencia eólica capturada por el rotor y la cantidad de potencia eléctrica proporcionada a la red pueden ajustarse de ese modo selectivamente por el controlador de turbina para controlar tanto la velocidad del rotor como la salida de potencia eléctrica del generador.

La cantidad de potencia asociada con el viento es proporcional al cubo de la velocidad del viento. Por ello, un rotor puede producir más potencia mecánica del viento que tenga una velocidad relativamente alta que de un viento que tenga una velocidad relativamente baja. La eficiencia con la que el rotor convierte la energía contenida en el viento en energía mecánica es conocida como el coeficiente de potencia (C_P) del rotor, y está limitada teóricamente a un máximo del 59 % por la ley de Betz. El coeficiente de potencia real para un rotor será típicamente menor que el límite de Betz, y depende del diseño y parámetros de operación del rotor. La cantidad de potencia eólica que se captura y convierte en potencia mecánica por el rotor, o la "potencia aerodinámica" es así un producto del coeficiente de potencia del rotor y de la potencia disponible del viento. Para una velocidad de viento dada, el rotor tendrá un coeficiente de potencia C_P máximo, u óptimo, que se consigue con un ajuste de paso de pala y velocidad de giro particulares. Este coeficiente de potencia óptimo fija así un límite superior sobre cuánta potencia puede generar la turbina a esa velocidad del viento. A velocidades del viento por debajo de W_R , las turbinas eólicas convencionales están así operadas con ajustes de pasos de pala y velocidades de giro que optimizan el C_P para maximizar la captura de potencia. Sin embargo, cuando la velocidad del viento se incrementa por encima de W_R , la potencia aerodinámica está limitada por el ajuste del paso de palas para reducir el C_P . En sistemas de generación eólica convencionales con velocidades del viento por encima de W_R , el rotor se controla mediante el ajuste del paso de palas en respuesta a cambios en la velocidad del viento de modo que la potencia aerodinámica capturada no exceda la potencia de diseño del generador. Es decir, cuando la potencia aerodinámica disponible es mayor que o igual a la salida de diseño de la turbina eólica, el paso de pala se convierte en el medio de control primario usado para mantener la salida de la turbina a un nivel constante.

Las turbinas eólicas se operan normalmente para producir la máxima cantidad de potencia eléctrica posible en las condiciones del viento existentes de modo que otras fuentes de potencia eléctrica en la red puedan reducir su regulación para conservar fuentes de energía no renovables. Con referencia ahora a la FIG. 1, un diagrama gráfico 10 ilustra una curva de potencia 12 de ejemplo que muestra esta “potencia disponible” o máxima en función de la velocidad del viento. En una zona de viento débil 14 de la curva de salida de potencia disponible 12 entre la velocidad del viento de arranque W_{MIN} y la velocidad del viento de diseño W_R , la potencia aerodinámica disponible es menor que la salida de potencia nominal P_R del generador de turbina eólica. Por ello, la potencia disponible 12 en la zona de viento débil 14 está limitada por la potencia del viento que el rotor puede capturar mientras opera con el paso de palas y velocidad de giro óptimos. En una zona de viento fuerte 16 entre la velocidad del viento nominal W_R y la velocidad del viento de corte W_C , la potencia aerodinámica disponible es mayor que la potencia de salida nominal P_R del generador de turbina eólica. La potencia disponible 12 en la zona de viento fuerte 16 está limitada así a P_R .

Para maximizar la salida de potencia de la turbina eólica, los controladores de turbina convencionales se configuran para producir la potencia disponible 12 mediante la operación en uno de dos modos de control dependiendo de la velocidad del viento: (1) un modo de control a carga parcial que opera en la zona de velocidad del viento débil 14, o (2) un modo de control a plena carga que opera en la zona de velocidad del viento fuerte 16. El controlador de la turbina conmuta así desde el modo de control a carga parcial a plena carga en una zona de transición 17 de la curva de potencia disponible 12. El controlador de turbina controla de ese modo la salida de potencia de la turbina eólica de modo que la turbina esté produciendo una potencia con el nivel de potencia de salida disponible 12 para la velocidad del viento actual. Cuando opera en la zona a carga parcial, el controlador ajusta el paso y velocidad del rotor para optimizar C_P de modo que la turbina eólica capture tanta energía del viento como sea posible. Es decir, el paso de palas y velocidad del rotor se ajustan para optimizar C_P para la velocidad de viento actual. En la zona a carga parcial, el paso de palas se mantiene en un ángulo de captura del viento óptimo que típicamente no cambia rápidamente o frecuentemente con la velocidad del viento. La velocidad del rotor puede entonces fijarse para optimizar la captura de energía del viento para la velocidad del viento actual mediante el ajuste de la cantidad de potencia que se está proporcionando a la red por el convertidor de potencia hasta que se consigue la relación de velocidad de punta óptima. Por el contrario, cuando opera en la zona a plena carga, el controlador de turbina ajusta el paso de las palas del rotor de modo que el rotor solo capture suficiente de entre la energía del viento disponible para operar el generador a su potencia nominal. Por ello, en la zona a plena carga, la salida de potencia eléctrica se mantiene en un valor relativamente constante por el controlador del convertidor de potencia, y el paso de las palas se ajusta por el controlador de la turbina eólica en respuesta a cambios en la velocidad del viento para mantener el rotor a una velocidad y nivel de salida de potencia generalmente constante.

Un controlador de turbina eólica convencional que opere en un modo de control de potencia óptima típicamente opera como controlador a plena carga cuando la velocidad del viento excede W_R , y como controlador a carga parcial cuando la velocidad del viento está por debajo de W_R . En el modo de operación del control a plena carga, el sistema de control del convertidor de potencia está provisto de una señal de referencia de potencia fija por parte del controlador de la planta de generación, y la velocidad del rotor se controla mediante el controlador de paso para mantener constante la salida de potencia. Con este fin, el controlador de paso cambia el paso de las palas según el viento para reducir el coeficiente de potencia del rotor en respuesta a incrementos en la velocidad del viento, y también el paso de las palas en el viento para incrementar el coeficiente de potencia en respuesta a una velocidad de viento reducida. En la zona de control a carga parcial que opera a velocidades del viento por debajo de W_R , el controlador de paso ajusta la posición de paso de las palas a una o más posiciones óptimas predefinidas (por ejemplo, 0°) que proporcionan una captura de energía del viento óptima para la velocidad del viento actual. El controlador del convertidor de potencia está provisto entonces de un punto de consigna de potencia que une suficiente potencia eléctrica a la red para mantener la velocidad de giro del rotor en un nivel óptimo para la captura de energía del viento con la velocidad del viento actual. El control de paso proporciona así el medio primario para el control de la potencia de salida cuando el controlador está operando en la zona a plena carga de la curva de salida de potencia 12, y el convertidor de potencia proporciona el medio primario de control de la potencia de salida cuando el controlador de la turbina eólica está operando en la zona a carga parcial de la curva de salida de potencia 12. Debido a que el sistema de control de paso, más que el sistema de control del convertidor de potencia, es primariamente responsable de la compensación del comportamiento estocástico del viento cuando el controlador está operando en la zona de control a plena carga, la actividad de cambio de paso es típicamente significativamente más alta cuando el controlador está operando en el modo de control a plena carga que en el modo de control a carga parcial.

A veces, el controlador de la planta puede solicitar un nivel de producción de potencia específico de la turbina que sea más bajo que el nivel de potencia disponible. Esto se denomina comúnmente como reducción, y puede usarse durante momentos de demanda de red reducidos o para proporcionar una reserva operativa para mejorar la estabilidad de la red. La reducción se lleva a cabo en sistemas convencionales proporcionando una señal de control de potencia al controlador de turbina que provoca que el controlador reduzca la potencia máxima de salida de turbina por debajo de la potencia de salida nominal P_R . La salida de potencia máxima de la turbina está así limitada a la potencia reducida P_D . Una curva de salida de potencia reducida 18 de ejemplo limita así la potencia a P_D con velocidades del viento por encima de W_D , que es la velocidad del viento a la que el rotor puede producir una potencia aerodinámica igual al nivel de potencia reducida. Como resultado de esta demanda de potencia más baja,

la zona de transición 17 se desplaza tal como se ha indicado por la flecha 19 de modo que el controlador de turbina conmuta entre la operación a carga parcial y a plena carga en W_D , en lugar de en W_R . De ese modo, si la turbina está operando con una velocidad del viento entre W_D y W_R en condiciones de operación reducidas, el controlador de la turbina eólica operará en la zona de control a plena carga. Esto es a diferencia de la operación del controlador de turbina cuando el controlador de la planta de generación está implementando una solución de potencia óptima, que implementaría un control de turbina a carga parcial a velocidades del viento entre W_D y W_R . Por lo tanto, como consecuencia de la reducción, el intervalo de operación a plena carga se extiende a velocidades del viento entre W_D y W_R . La actividad de cambio de paso de palas puede de ese modo incrementarse sobre un intervalo de operación mayor de velocidades del viento en las turbinas eólicas en reducción de potencia en comparación con turbinas eólicas que están operando con plena capacidad. Cuanto mayor sea la reducción (es decir, más baja la señal de referencia de potencia proporcionada al controlador de la turbina eólica), más allá se extenderá la operación a plena carga por debajo de la velocidad del viento de diseño W_R , y más se incrementará la actividad de cambio de paso de las palas. Los sistemas de turbina eólica controlados convencionalmente pueden experimentar por lo tanto un desgaste del sistema de paso mayor en una operación a potencia reducida que durante la operación a plena potencia.

El documento US2010/286835 divulga un método para la restricción de la potencia eléctrica suministrada desde una turbina eólica. El nivel de restricción puede ser un porcentaje del nivel de potencia eléctrica real disponible o un nivel de potencia fijo. El documento divulga curvas de potencia en relación a la restricción.

De ese modo, existe una necesidad de sistemas, métodos y productos de programas informáticos mejorados para el control de sistemas de generación eólica en condiciones reducidas que reduzca el desgaste de los sistemas de control de paso.

Breve resumen

En una realización de la invención, se proporciona un método para el control de una turbina eólica. El método incluye la recepción de una señal de referencia de potencia en un controlador de turbina eólica que define un nivel de salida de potencia solicitado más bajo que un nivel de potencia disponible y el ajuste de un paso de palas del rotor de la turbina eólica basado en la señal de referencia de potencia recibida que provoca que el rotor capture una potencia del viento que sea aproximadamente igual al nivel de salida de potencia solicitado. El método incluye adicionalmente el control del nivel de potencia de salida de la turbina eólica al nivel de salida de potencia solicitado mediante el ajuste de un par de torsión de la carga proporcionada al rotor por un generador acoplado al rotor.

En otra realización de la invención, se proporciona un controlador para una turbina eólica que incluye un procesador y una memoria. La memoria incluye instrucciones que, cuando se ejecutan por el procesador, hacen que el procesador reciba una señal de referencia de potencia que define un nivel de salida de potencia solicitado más bajo que un nivel de potencia disponible. El procesador ajusta entonces el paso de palas del rotor de la turbina eólica basado en la señal de referencia de potencia recibida que provoca que el rotor capture una potencia del viento que sea aproximadamente igual al nivel de salida de potencia solicitado, y controle el nivel de potencia de salida de la turbina eólica al nivel de salida de potencia solicitado mediante el ajuste del par de torsión de la carga proporcionada al rotor por el generador acoplado al rotor.

En otra realización de la invención, se presenta un método para la reducción de una turbina eólica. El método incluye la operación de una turbina eólica con un nivel de salida de potencia reducido por debajo de la salida de potencia disponible de la turbina eólica mediante el ajuste del paso de la turbina para reducir el coeficiente de potencia del rotor por debajo de un coeficiente de potencia óptimo de modo que la salida de potencia aerodinámica del rotor sea aproximadamente igual al nivel de salida de potencia reducido. El método incluye adicionalmente el control de una carga proporcionada al rotor por un generador acoplado al rotor de modo que la salida de potencia de la turbina eólica siga las fluctuaciones en la velocidad del viento.

En otra realización de la invención, se presenta un producto de programa informático que incluye instrucciones de programa almacenadas en un medio de almacenamiento legible por ordenador no transitorio. Las instrucciones del programa, cuando se ejecutan por un procesador, hacen que el procesador reciba la señal de referencia de potencia que define un nivel de salida de potencia solicitado más bajo que un nivel de potencia disponible. El procesador ajusta entonces el paso de palas del rotor de la turbina eólica basado en la señal de referencia de potencia recibida lo que hace que el rotor capture una potencia del viento que sea aproximadamente igual al nivel de salida de potencia solicitado, y controla el nivel de la potencia de salida de la turbina eólica al nivel de salida de potencia solicitado mediante el ajuste del par de torsión de carga proporcionado al rotor por el generador acoplado al rotor.

Breve descripción de las varias vistas de los dibujos

Los dibujos adjuntos, que se incorporan en, y constituyen una parte de, la presente memoria descriptiva, ilustran diversas realizaciones de la invención y, junto con una descripción general de la invención dada anteriormente y la descripción detallada de las realizaciones dada a continuación, sirven para explicar las realizaciones de la invención.

La FIG. 1 es una vista gráfica que muestra una curva de salida de potencia disponible con respecto a la velocidad del viento para una turbina eólica y una curva de salida de potencia reducida para un controlador de turbina eólica convencional.

La FIG. 2 es una vista esquemática de una granja eólica que incluye un controlador de la planta de generación y una pluralidad de turbinas eólicas, cada una controlada por un controlador de turbina eólica.

La FIG. 3 es una vista esquemática de la granja eólica de la FIG. 2 mostrando detalles adicionales de los controladores de la planta de generación y de turbina eólica.

La FIG. 4 es una vista gráfica que muestra la curva de salida de potencia disponible con respecto a la velocidad del viento para una turbina eólica y una curva de salida de potencia reducida implementada de acuerdo con una realización de la invención.

La FIG. 5 es una vista gráfica de un nivel de potencia solicitado respecto a la velocidad del viento mostrando una primera zona en la que se implementa el modo de control a carga parcial y una segunda zona en la que se implementa un modo de control a plena carga.

La FIG. 6 es una vista gráfica del nivel de potencia solicitado respecto al gráfico de la velocidad del viento de la FIG. 5 con la primera zona expandida para incluir una zona del gráfico definida por una velocidad del viento menor que la velocidad del viento de diseño.

La FIG. 7 es una vista gráfica del nivel de potencia solicitado respecto al gráfico de la velocidad del viento de la FIG. 5 con la primera zona expandida para incluir una zona del gráfico que incluye velocidades del viento mayores que la velocidad del viento de diseño.

La FIG. 8 es una vista esquemática de un circuito de control del nivel de potencia.

La FIG. 9 es una vista esquemática de una realización alternativa del circuito de control del nivel de potencia de la FIG. 8.

Descripción detallada

Generalmente, las realizaciones de la invención se dirigen a métodos y sistemas de control para aplicaciones de energía eólica que reducen la cantidad de cambio de paso requerido para mantener los niveles de salida de potencia deseados.

Con referencia ahora a la FIG. 2, una granja eólica 20 de ejemplo incluye una pluralidad de turbinas eólicas 22 y un controlador 24 de la planta de generación en comunicación con una pluralidad de controladores 26 de turbina eólica. Las turbinas eólicas 22 pueden conectarse eléctricamente a la red eléctrica 28 a través de una red interna 30 de la granja eólica que está conectada eléctricamente a la red eléctrica 28 en un punto 32 de conexión común. Cada turbina eólica 22 puede incluir una torre 34, una góndola 36 dispuesta en la cima de la torre 34 y un rotor 38 operativamente acoplado a un generador 40 (FIG. 3) alojado en el interior de la góndola 36. Además del generador 40, la góndola 36 puede alojar diversos componentes necesarios para convertir la energía eólica en energía eléctrica y también diversos componentes necesarios para operar y optimizar el rendimiento de la turbina eólica 22. La torre 34 soporta la carga presentada por la góndola 36, el rotor 38 y otros componentes de la turbina eólica alojados en el interior de la góndola 36. La torre 34 de la turbina eólica 22 funciona para elevar la góndola 36 y el rotor 38 a una altura por encima del nivel del terreno o nivel del mar, según sea el caso, en el que se encuentren típicamente corrientes de aire que tengan una turbulencia más baja y una velocidad más alta.

El rotor 38 incluye un buje central 42 y una pluralidad de palas 44 fijadas al buje central 42 en localizaciones distribuidas alrededor de la circunferencia del buje 42. En la realización representativa, el rotor 38 incluye tres palas 44. Las palas 44, que se proyectan radialmente hacia el exterior desde el buje 42, se configuran para interactuar con las corrientes de aire que pasan para producir empuje que provoca que el buje 42 gire alrededor de su eje longitudinal. El buje 42 puede incluir un mecanismo de cambio de paso de palas (no mostrado) que ajusta el paso de las palas 44 en respuesta a una señal de control de paso desde el controlador de turbina. El mecanismo de cambio de paso de palas puede ajustar el paso de las palas activando uno o más accionadores de giro u otros accionadores adecuados para girar las palas 44 para incrementar o disminuir el ángulo de ataque de las palas basándose en la señal de control de paso.

Con referencia ahora a la FIG. 3, el rotor 38 de la turbina eólica 22 puede acoplarse al generador 40 a través de una transmisión 46 que convierte el lento giro del rotor 38 en un giro que tenga una velocidad angular adecuada para la generación de electricidad con el generador 40. El generador 40 puede conectarse eléctricamente a la red 30 de la granja eólica mediante un convertidor de potencia 48 que convierte la salida eléctrica del generador 40 en potencia eléctrica que tenga una tensión y frecuencia adecuadas para el acoplamiento a la red eléctrica 28. Con este fin, el convertidor de potencia 48 puede incluir circuitos de conversión de potencia tal como uno o más rectificadores y/o inversores que ajusten la conexión entre la red 30 de la granja eólica y el generador 40 en respuesta a señales de control 50 recibidas desde un controlador 52 del convertidor de potencia.

El controlador 52 del convertidor de potencia puede acoplarse a los sensores de tensión y/o corriente 54 que proporcionan señales de realimentación 56 que caracterizan la potencia que se está acoplando entre la red 30 de la granja eólica y el generador 40. Estas señales 56 pueden ser indicativas de tensiones y/o corrientes en la salida del convertidor de potencia 48 así como de tensiones y/o corrientes dentro del convertidor de potencia 48. Por ejemplo, las señales de realimentación 56 pueden incluir señales indicativas de una tensión y/o corriente asociadas con un

bus de CC que conecta un convertidor del lado de generador a un convertidor del lado de red dentro del convertidor de potencia 48. En cualquier caso, el controlador del convertidor 52 genera una señal de control 50 del convertidor de potencia basado en una señal de realimentación 56 y una señal 58 de referencia de potencia recibida desde el controlador de turbina 26. El controlador del convertidor 50 ajusta de ese modo la carga eléctrica proporcionada al generador 40 en respuesta a la señal 58 de referencia de potencia mediante el control de la fase, frecuencia y/o amplitud de las tensiones y corrientes suministradas a la red 30 de la granja eólica por el convertidor de potencia 48. Esta carga eléctrica puede hacer que el generador 40 proporcione un par de torsión de carga al rotor 38 a través de la transmisión 46. El par de torsión de carga proporcionado por el generador 40 puede ser proporcional a la carga eléctrica, y puede actuar en oposición a un par aerodinámico generado por la acción del viento contra el rotor 38. El controlador 52 del convertidor de potencia puede controlar de ese modo cuánta potencia se proporciona a la red 28 mediante el ajuste del par de torsión de carga proporcionado al rotor 38 por el generador 40. El par de torsión de carga puede ajustarse también para controlar la velocidad del rotor 38. Por ejemplo, un par de torsión de carga menor que el par de torsión aerodinámico generado por el rotor 38 puede dar como resultado la aceleración del rotor 38 a una velocidad de giro más alta. De modo similar, un par de torsión de carga mayor que el par de torsión aerodinámico puede dar como resultado que el rotor 38 desacelere a una velocidad de giro más baja.

Para controlar el paso de las palas 44, un controlador de paso 60 puede proporcionar una señal 62 de control de paso para el mecanismo de control de paso en el buje 42. El controlador de paso 60 puede acoplarse también a un sensor 64 de la posición del paso en el buje 42. El controlador de paso 60 puede determinar el ángulo de paso de las palas basándose en una señal 66 de posición de paso recibida desde el sensor de posición 64, y recibir una señal 67 de orden de la posición del paso desde el controlador de turbina 26. Para controlar el paso de las palas 44, el controlador de paso 60 puede generar una señal de error de paso basándose en una diferencia entre el ángulo de paso de palas determinado y el ángulo de paso deseado. Esta señal de error puede usarse para generar una señal 62 de control del paso, que activa un mecanismo de control del paso para ajustar el paso de las palas para reducir el error de paso. Con este fin, el controlador de paso 60 puede incluir un circuito de control proporcional-integral-derivativo (PID) para proporcionar un sistema de control en bucle cerrado sensible a la señal de posición del paso. En una realización alternativa de la invención, el controlador de paso 52 puede incluir un controlador en bucle abierto que ajuste el paso de las palas basándose en la señal de posición del paso y una tabla de búsqueda u otro medio de control adecuado que no se base en señales de realimentación desde el sensor de posición 64.

El controlador 24 de la planta de generación puede incluir un procesador 68, memoria 70, una interfaz 72 de entrada/salida (E/S) y una interfaz de usuario 74. El controlador de turbina 26 puede incluir de modo similar un procesador 76, memoria 78, una interfaz 80 de entrada/salida (E/S) y una interfaz de usuario 82. Cada uno de los procesadores 68, 76 puede incluir uno o más circuitos de procesamiento seleccionados de entre microprocesadores, microcontroladores, procesadores de señal digital, microordenadores, unidades de procesamiento central, matrices de puertas programables en campo, dispositivos lógicos programables, máquinas de estado, circuitos lógicos, circuitos analógicos, circuitos digitales y/o cualesquiera otros dispositivos que manipulen señales (analógicas y/o digitales) basándose en instrucciones operacionales que se almacenan en la memoria 70, 78 del controlador asociado. Cada una de las memorias 70, 78 puede comprender un único dispositivo de memoria o una pluralidad de dispositivos de memoria que incluyen, pero sin limitarse a, memoria solo de lectura (ROM), memoria de acceso aleatorio (RAM), memoria volátil, memoria no volátil, memoria de acceso aleatorio estática (SRAM), memoria de acceso aleatorio dinámica (DRAM), memoria flash, memoria caché y/o cualquier otro dispositivo capaz de almacenar información digital. Cada una de las memorias 70, 78 puede incluir también uno o más dispositivos de almacenamiento masivo (no mostrados) que puede comprender un único dispositivo de almacenamiento masivo o una pluralidad de dispositivos de almacenamiento masivo que incluyen, pero sin limitarse a, discos duros, unidades ópticas, unidades de cinta, dispositivos de estado sólido no volátil y/o cualquier otro dispositivo capaz de almacenar datos.

Cada interfaz de E/S 72, 80 conecta operativamente su procesador 68, 76 respectivo a otros componentes de la granja eólica 20. Las interfaces de E/S 72, 80 pueden incluir circuitos de procesamiento de señal que acondicionan las señales entrantes y salientes de modo que las señales sean compatibles tanto con el procesador 72, 80 respectivo como con los componentes a los que se conecta el procesador 72, 80. Con este fin, cada interfaz de E/S 72, 80 puede incluir convertidores de analógico a digital (A/D) y/o de digital a analógico (D/A), circuitos de desplazamiento del nivel de tensión y/o frecuencia, circuitos de aislamiento óptico y/o controladores, y/o cualquier otro circuito analógico o digital adecuado para la conexión del procesador 72, 80 a los otros componentes de la granja eólica 20. Cada interfaz de E/S 72, 80 puede emplear también uno o más protocolos de comunicación adecuados para la comunicación con otros componentes del sistema, tales como el Protocolo de Datagramas de Usuario / Protocolo de Internet (UDP/IP) y/o el Protocolo de Control de Transmisión / Protocolo de Internet (TCP/IP). Las interfaces de E/S 72, 80 pueden conectarse comunicativamente a través de un enlace por cable tal como un enlace IEEE 802.3 (Ethernet), un enlace inalámbrico usando un protocolo de red inalámbrico, tal como un enlace 802.11 (Wi-Fi), o cualquier otro enlace adecuado que permita al controlador 24, 26 interactuar con otros componentes del sistema. Las interfaces de E/S 72, 80 pueden estar conectadas también comunicativamente a través de una red (no mostrada), lo que puede incluir una pluralidad de redes interconectadas, tal como una o más Redes de Acceso Local (LAN), Redes de Acceso Amplio (WAN), y/o redes públicas, tal como Internet.

Cada uno de los procesadores 68, 76 puede operar bajo el control de un sistema operativo 84, 86 respectivo, que puede residir en la memoria 70, 78 correspondiente del controlador 24, 26 respectivo. El sistema operativo 84, 86 puede gestionar los recursos informáticos del controlador 24, 26 respectivo de modo que el código de programa informático realizado como una o más aplicaciones 88, 90 de software de ordenador que residen en la memoria 70, 78 puede tener instrucciones ejecutadas por el procesador 68, 76. La interfaz de usuario 74, 82 puede acoplarse operativamente al procesador 68, 76 del controlador 24, 26 respectivo de una forma conocida. Cada interfaz de usuario 74, 82 puede incluir dispositivos de salida, tales como pantallas alfanuméricas, una pantalla táctil y otras indicaciones visuales, y dispositivos de entrada y controles, tales como un teclado alfanumérico, un dispositivo de puntero, teclados, pulsadores, botones de control, etc., capaces de aceptar órdenes o entrada desde un operador y transmitir la entrada introducida al procesador 68, 76.

En operación, el controlador 24 de la planta de generación puede recibir una señal 92 de solicitud de potencia desde la red 28 que indique una cantidad y tipo (activa o reactiva) de la potencia que el operador de la red desea que proporcione la granja eólica 20 a la red 28. En respuesta a la señal 92 de solicitud de potencia (P_{REQ}), el controlador de la planta de generación puede enviar una señal 94 de referencia de potencia (P_{REF}) al controlador 26 de la turbina eólica que indique la cantidad de salida de potencia deseada desde la turbina 22. En la operación normal, P_{REF} será típicamente mayor que o igual a P_R , de modo que el controlador de turbina 26 opere en el modo de control de potencia óptima, lo que produce la salida de potencia P_A disponible en las condiciones de viento actuales. Es decir, la salida de potencia de la turbina se controlará para seguir en general la curva 12 de potencia disponible. Si la señal 92 de solicitud de potencia indica al controlador 24 de la planta de generación que la granja eólica 20 ha de ser operada en condiciones de operación reducidas, la señal 94 de referencia de potencia puede indicar que el controlador de turbina 26 ha de limitar la salida de potencia de la turbina eólica 22 a menos de la salida de potencia de diseño P_R de la turbina eólica.

Con referencia ahora a la FIG. 4, un diagrama gráfico 100 ilustra la curva 12 de potencia disponible y una curva 102 de potencia reducida a carga parcial para la turbina eólica 22 de acuerdo con una realización de la invención. En respuesta a que el operador de la red de potencia solicita que la granja eólica 20 opere con un nivel de potencia reducido, el controlador 24 de la planta de generación puede generar una señal 94 de referencia de potencia que indique que la turbina eólica 22 ha de operar con un nivel de salida de potencia reducido P_D . En respuesta a la recepción de esta señal 94, el controlador 26 de la turbina eólica genera la curva 102 de potencia reducida a carga parcial mediante el desplazamiento de la curva 12 de salida de potencia disponible a la derecha de modo que la salida de potencia de la turbina eólica sea aproximadamente P_D para la velocidad del viento W_A actual o real. Esto es a diferencia del controlador de turbina convencional, que genera la curva 18 de salida de potencia disminuida mediante el desplazamiento de la curva 12 de salida de potencia disponible hacia abajo. Debido a que la curva 102 de salida de potencia reducida se genera mediante el desplazamiento de la curva 12 de potencia disponible a la derecha, el controlador 26 de la turbina eólica opera en un segmento de control 104 a carga parcial de la curva 102 de salida de potencia reducida a velocidades del viento por encima de la velocidad del viento W_D reducida en lugar de en la zona de control a plena carga.

Este desplazamiento a la derecha puede llevarse a cabo mediante la desviación del ángulo de paso respecto al ajuste óptimo usado normalmente cuando se opera en la zona de control a carga parcial. El paso de pala no óptimo desplaza la curva de salida de potencia de la turbina 22 reduciendo el coeficiente de potencia C_P del rotor 38. La turbina eólica 22 genera de ese modo la salida de potencia reducida solicitada a velocidades del viento por encima de W_D sin entrar en la zona de control a plena carga. La curva de potencia 102 disminuida a carga parcial puede de ese modo reducir la actividad de cambio de paso de las palas de la turbina eólica 22 cuando opera en condiciones de operación reducidas con velocidades del viento por encima de W_D en comparación con turbinas eólicas convencionales que carecen de esta característica de reducción a carga parcial.

En un controlador de turbina convencional que opera en la zona de control a carga parcial, el ángulo de paso óptimo θ^* puede determinarse en función de la velocidad del viento W_A real usando, por ejemplo, una tabla de búsqueda. Es decir, el ángulo de paso deseado puede determinarse mediante $\theta^* = F(w)$, en la que θ^* es el ángulo de paso de potencia óptima, w es la velocidad del viento real y $F(\cdot)$ es una tabla de búsqueda mono-dimensional generada basándose en las propiedades aerodinámicas conocidas de las palas 44 del rotor 38. Una tabla de búsqueda mono-dimensional puede determinar también el ángulo de paso deseado basándose en una relación de la velocidad de punta λ que representa la relación entre la velocidad de la punta de la pala 44 del rotor y la velocidad del viento. La relación de velocidad de punta de pala puede determinarse a partir de la ecuación $\lambda = r \times \omega/w$, en la que r es el radio del rotor 38, ω es la velocidad angular del rotor 38 y w es la velocidad del viento real. En este controlador de turbina alternativo, el ángulo de paso deseado puede determinarse mediante $\theta^* = F(\lambda)$.

Con referencia ahora a la FIG. 5, un diagrama gráfico 110 incluye una primera zona de operación 112 que incluye un segmento de viento débil 114 de la curva 12 de salida de potencia disponible que está a la izquierda de la velocidad del viento de diseño W_R . La primera zona de operación 112 incluye también una zona del diagrama gráfico 110 a la izquierda de la sección de viento débil 114, que es típicamente un área en la que la turbina eólica 22 no puede operar debido al límite superior sobre el coeficiente de potencia C_P del rotor 38. Una segunda zona de operación 116 incluye un segmento de viento fuerte 118 de la curva 12 de salida de potencia disponible que está a la derecha de la velocidad de viento de diseño W_R . La segunda zona de operación 116 incluye también la zona del diagrama gráfico

110 a la derecha del segmento de viento débil 114. El controlador de turbina convencional opera en el modo de control a carga parcial en respuesta a una velocidad del viento y P_{REF} que mapea una localización en la primera zona de operación 112 (por ejemplo, puntos en el segmento de viento débil 114), y opera en el modo de control a plena carga en respuesta a una velocidad del viento y P_{REF} que mapea a una localización en la segunda zona de operación 116. La potencia de salida de la turbina eólica 22 sigue así la curva 12 de salida de potencia disponible para el nivel de potencia solicitado P_{REF} igual a o por encima de la curva 12 de salida de potencia disponible para una velocidad del viento dada.

En una realización de la invención, el control reducido a carga parcial puede permitir que el modo de control a carga parcial se implemente en la segunda zona 116 mediante la utilización de una tabla de búsqueda bidimensional que incluye el nivel de potencia solicitado P_{REF} como un parámetro de selección del paso. De ese modo, el ajuste del paso de palas en esta realización de ejemplo del controlador reducido a carga parcial puede representarse por la ecuación $\theta^{Pref} = G(w, P_{REF})$, en la que θ^{Pref} representa un ángulo de paso que proporciona la salida de potencia solicitada P_{REF} a la velocidad del viento w real. El paso de palas θ^{Pref} depende en consecuencia tanto de la velocidad del viento w real como de la señal de referencia de potencia P_{REF} . De modo similar a la tabla de búsqueda mono-dimensional $F(\cdot)$, la tabla de búsqueda bidimensional $G(\cdot, \cdot)$ puede generarse basándose en las propiedades aerodinámicas conocidas de las palas 44 y del rotor 38. En una realización alternativa de la invención, la tabla de búsqueda bidimensional puede utilizar la relación λ de la velocidad de punta en lugar de la velocidad del viento w de modo similar a lo explicado anteriormente con respecto a la tabla de búsqueda mono-dimensional. En esta realización alternativa, el ajuste del paso de palas puede representarse por la ecuación $\theta^{Pref} = G(\lambda, P_{REF})$.

El controlador 26 de la turbina eólica puede incluir también algoritmos de control a carga parcial y plena carga convencional. Por ejemplo, mediante el ajuste de P_{REF} igual a la potencia disponible P_A , el ángulo de paso proporcionado por la tabla de búsqueda bidimensional para una velocidad del viento dada puede ser igual al ángulo de paso proporcionado por la solución de potencia óptima mono-dimensional. Es decir, $\theta^* = G(w, P \geq P_A) = F(w)$ o $\theta^* = G(\lambda, P \geq P_A) = F(\lambda)$. Añadir el nivel de potencia solicitado P_{REF} a la tabla de búsqueda del controlador de turbina permite que un modo de control a carga parcial se implemente selectivamente en la segunda zona 116.

En respuesta a una velocidad del viento y P_{REF} que mapea a una localización en una zona 112 del diagrama gráfico 110 a la izquierda de la curva 12 de salida de potencia disponible, el controlador de turbina 16 selecciona un ángulo de paso θ^* que optimiza C_P para el rotor 38. Es decir, si el nivel de potencia solicitado P_{REF} se fija por encima de la potencia de salida disponible y/o por debajo de la velocidad de viento de diseño W_R , los ángulos de paso de potencia optimizada se usan para asegurar la captura de energía óptima. En respuesta a una velocidad de viento y P_{REF} que mapea a una localización sobre el gráfico 110 en una zona 116 a la derecha de la curva 12 de salida de potencia disponible, el controlador de turbina 16 puede seleccionar un ángulo de paso θ^{Pref} que reduce C_P para el rotor 38 de modo que la salida de potencia del rotor 38 sea aproximadamente igual al nivel de potencia solicitado P_{REF} . La tabla de búsqueda bidimensional permite así que la turbina eólica 22 sea operada o bien en un modo de control a carga parcial o bien a plena carga en la zona 116. Si se desea una energía de captura óptima, el nivel de potencia solicitado P_{REF} puede fijarse igual a o mayor que el nivel de potencia de diseño P_R . En este ajuste P_{REF} , el controlador de turbina 26 funcionará como un controlador convencional siguiendo la curva 12 de salida de potencia disponible. Si un ajuste de P_{REF} para un nivel de salida de potencia de turbina deseado que está por debajo de la salida de potencia disponible se envía al controlador 24 de la planta de generación, puede hacerse que el controlador de turbina 26 opere en el modo de control a carga parcial. El modo de operación de control a carga parcial puede extenderse de ese modo arbitrariamente al interior de la segunda zona 116. Las realizaciones de la invención permiten de ese modo al controlador de turbina 26 implementar un modo de control a carga parcial para cualquier combinación de nivel de potencia solicitado P_{REF} y velocidad del viento W_A dentro de los límites disponibles de la operación de la turbina eólica y por debajo de la salida de potencia de diseño P_R .

Con referencia ahora a la FIG. 6, un diagrama gráfico 120 ilustra una realización del controlador de turbina 26 en el que una zona de control 122 a carga parcial incluye toda la zona que está por debajo de la salida de potencia de diseño P_R de la turbina eólica y a la izquierda de la velocidad de viento de diseño W_R . Una zona 124 de control a plena carga se define por niveles de potencia entre la salida de potencia de diseño P_R y la salida de potencia mínima P_{MIN} para velocidades del viento entre la velocidad del viento de diseño W_R y la velocidad del viento de corte W_C . Es decir, la zona de operación 124 a plena carga incluye las condiciones de operación disponibles restantes de la turbina eólica 22 que caen fuera de la zona de operación 122 a carga parcial. El modo de operación a carga parcial para esta realización de ejemplo se implementa así por el controlador de turbina 26 para cualquier operación de la turbina eólica 22 en condiciones de viento por debajo de la velocidad del viento de diseño W_R . Como es fácilmente evidente a partir del examen de la FIG. 6, la zona de control 124 a plena carga tiene significativamente un área menor que la segunda zona 116. Al reducir el área en la que el controlador de turbina 26 opera en el modo de control a plena carga, el mapeado del modo de control operacional representado por el trazado gráfico 120 puede reducir la actividad de cambio de paso en comparación con controladores de turbina convencionales.

Con referencia ahora a la FIG. 7, un diagrama gráfico 130 ilustra otra realización del controlador de turbina 26 en el que la zona de operación 122 a carga parcial se ha expandido adicionalmente al interior de la zona por debajo de un modo límite 132 definido por un segmento de línea que se extiende generalmente desde un primer punto 134 localizado en las coordenadas (W_R, P_R) a un segundo punto 136 localizado en las coordenadas (W_C, P_{MIN}) . El modo

de operación a carga parcial se extiende de ese modo a una zona que incluye condiciones del viento por encima de la velocidad del viento de diseño W_R . El mapa de control ilustrado por el diagrama 130 puede implementarse para reducir adicionalmente la actividad de cambio de paso de las turbinas eólicas 22 que están operando en un modo reducido durante condiciones de viento fuerte. El modo de control a plena carga puede implementarse para mantener la producción de potencia de la turbina eólica bajo un estrecho control cuando genera electricidad a la potencia de diseño de modo que se eviten daños de la turbina. Esto es debido a que cualquier pequeño incremento por encima de la potencia de diseño puede dañar los componentes mecánicos y eléctricos de la turbina eólica 22. Sin embargo, si P_{REF} se fija por debajo de P_R de modo que la salida de potencia de la turbina eólica 22 se reduce para estar por debajo de la salida de potencia de diseño P_R , la turbina eólica 22 no se dañará por superar temporalmente el nivel de potencia solicitado P_{REF} . El gráfico 130 del modo de control de producción de potencia aprovecha este comportamiento expandiendo la operación en el modo de control a carga parcial para cubrir la operación de la turbina a velocidades del viento por encima de W_R .

Si la potencia solicitada P_{REF} está próxima a la potencia de diseño P_R , unos altos niveles de turbulencia en el viento podrían dar como resultado que los niveles de salida de potencia de la turbina eólica excedan temporalmente la potencia de diseño de la turbina 22. Para proporcionar un margen de seguridad, el modo límite 132 debería definirse de modo que haya una zona del control de la carga entre el modo límite 132 y el nivel de salida de potencia de diseño suficiente para impedir que los niveles de salida de potencia excedan P_R . Los expertos en la materia reconocerán así que el modo límite 132 podría definirse de muchas maneras. Por ello, aunque el modo límite 132 se ilustra como una línea recta en esta realización de ejemplo, el modo límite 132 podría tener también otra forma y podría alterarse basándose en condiciones específicas del viento para la turbina eólica que se está controlando. El modo límite 132 podría optimizarse también basándose en datos empíricos recogidos en la turbina eólica en condiciones de operación reales. Basándose en estos datos, el controlador 26 de la turbina eólica podría alterar el compromiso entre la capacidad de permanecer con grandes fluctuaciones de viento (es decir, implementando un modo límite 132 que produzca una zona de control 124 a plena carga más grande) y minimizando la actividad de cambio de paso (por ejemplo, implementando un modo límite 132 que produzca una zona de control 122 a carga parcial más grande).

Cuando opera en el modo de control a carga parcial, el controlador de turbina 26 puede basarse en ajustes de paso de palas predeterminados que producen el nivel de potencia solicitado P_R para la velocidad de viento actual. Para compensar a corto plazo fluctuaciones o ráfagas de viento, el controlador de turbina 26 ajusta la señal 58 de referencia de potencia proporcionada al controlador 52 del convertidor de potencia. En consecuencia, la potencia de salida de la turbina eólica 22 también tenderá a fluctuar mientras el controlador 26 de la turbina eólica está operando en un modo de control a carga parcial. Sin embargo, estas fluctuaciones de potencia pueden ser similares al comportamiento de controladores de turbina eólica convencionales que operan bajo un modo de control de "máxima producción" o potencia óptima. Más aún, debido a que las fluctuaciones a corto plazo en la salida de potencia de las turbinas eólicas 22 individuales pueden tender a no estar correlacionadas con otras turbinas 22 que operan en la granja eólica 20, estas fluctuaciones pueden promediarse en las granjas eólicas que tiene un gran número de turbinas 22.

Los cambios en la producción de potencia de la granja eólica 20 que no son solicitados por la red eléctrica 28 no son generalmente bienvenidos por el operador de la red. Dichos cambios pueden ocurrir, por ejemplo, debido a cambios en la velocidad promedio del viento. El operador de la red puede solicitar también cambios en la salida de potencia de la granja eólica 20, tal como en respuesta a un fallo en la red o a un cambio en la demanda de electricidad desde la red. Cuando el operador de la red solicita un cambio en la salida de potencia de la granja eólica 20, la normativa de la red puede requerir que el cambio se implemente rápidamente. La gestión de cambios solicitados y no solicitados en la salida de potencia representa así retos para el controlador 24 de la planta de generación, que se requiere que gestione algunos cambios tan rápidamente como sea posible, mientras suprime otros cambios para satisfacer los requisitos de la normativa de la red. En general, es deseable que los cambios de salida de potencia solicitados por la red sean ejecutados con transitorios rápidos, mientras que los cambios de salida de potencia no solicitados se controlen de modo que el cambio tenga lugar con una tasa manejable. Un requisito de la normativa de la red típico puede requerir que la salida de potencia de la granja eólica sea capaz de responder a un cambio en la señal 92 de solicitud de potencia a una tasa mayor que o igual a X megavatios/segundo, donde X representa la tasa de respuesta requerida. De modo similar, la normativa de la red puede requerir que la granja eólica 20 no incremente la producción de potencia de salida no solicitada (tal como en respuesta a una velocidad de viento incrementada) a una tasa que sea igual a o mayor que Y megavatios/segundo. La normativa de la red típicamente fija la tasa de respuesta no solicitada Y a un valor significativamente más bajo que la tasa de respuesta solicitada X .

La reacción rápida de la señal 92 de solicitud de potencia puede manejarse por un limitador en rampa interno tanto en el controlador 24 de la planta de generación como en el controlador 26 de la turbina eólica. El límite de la tasa de respuesta no solicitada más lenta es típicamente más exigente para la granja eólica 20. Las granjas eólicas 20 convencionales se basan típicamente en que el controlador 24 de la planta de generación controle las tasas de respuesta no solicitadas. Sin embargo, basarse solamente en el controlador 24 de la planta de generación puede provocar una carga incrementada de la turbina eólica y producción de potencia reducida en condiciones de situación estable. Otro problema a considerar es que la disminución en la potencia no puede limitarse en su tasa en rampa en el grado en el que puede el incremento de potencia. Es decir, si cae la velocidad del viento, las turbinas eólicas 22

tendrán que reducir finalmente su potencia de salida debido a que habrá insuficiente energía eólica para mantener el nivel de producción de potencia previo durante una duración de tiempo significativa.

Con referencia ahora a la FIG. 8, un circuito de control 140 de la señal de referencia de potencia incluye un sumador 142, un limitador 144 de tasa en rampa y un selector de señal 146 configurado para producir selectivamente una señal de entrada 148, 150 que tenga el nivel más bajo o mínimo como una señal de referencia de potencia interna P_{REF_INT} . P_{REF_INT} se usa entonces por el controlador de turbina 26 en lugar de P_{REF} para ajustar el paso de palas y la potencia de salida como se ha descrito anteriormente. El circuito de control 140 del nivel de potencia solicitado puede implementarse como parte del modo de control a carga parcial expandido para mejorar la respuesta de la granja eólica 20 a cambios no solicitados en la salida de potencia. La señal 152 de potencia disponible que representa la salida de potencia disponible P_A de la turbina eólica 22 que está controlándose y un parámetro de ajuste α se suman para producir la señal 154 de potencia disponible ajustada. El parámetro de ajuste α puede proporcionar una desviación respecto a la señal de potencia 154 disponible ajustable de modo que durante períodos de producción de potencia estable, se solicite ligeramente mayor producción desde la turbina 22 de la que está disponible. El parámetro de ajuste α puede evitar de ese modo pérdidas de producción durante períodos de producción estable manteniendo P_{REF_INT} por encima de P_A .

El limitador 144 de tasa en rampa puede configurarse para proporcionar diferentes tasas en rampa para disminuciones en la potencia en comparación con incrementos de potencia. Por ejemplo, el limitador 144 de tasa en rampa puede configurarse para imponer una limitación de la tasa en rampa relativamente baja (o no limitación) para una caída en la salida de potencia disponible P_A y una limitación de la tasa en rampa relativamente alta para un incremento de la potencia disponible P_A para facilitar el cumplimiento con la normativa de la red. El selector de señal 146 compara la señal de potencia disponible ajustada limitada (P_{A_LIM}) a la tasa en rampa con P_{REF} , y produce la salida de la más baja de las dos señales como P_{REF_INT} .

La FIG. 9 ilustra una realización alternativa del circuito de control 140 del nivel de potencia solicitado que opera de forma similar al circuito ilustrado en la FIG. 8, excepto en que el parámetro de ajuste α se añade a la señal 152 de potencia disponible después de que la señal 152 se halla procesado por el limitador 144 de tasa en rampa. Debido a que el limitador 144 de tasa en rampa responde a la tasa de cambio de la señal en lugar de al nivel de la señal, y debido a que el parámetro de ajuste α típicamente no cambiará durante la operación normal del controlador de turbina 26, la realización ilustrada en la FIG. 9 puede operar para generar esencialmente la misma P_{REF_INT} resultante que en la realización ilustrada en la FIG. 8.

En la operación en estado estable, la potencia disponible P_A no cambiará rápidamente de modo que el limitador 144 de tasa en rampa no limitará la señal 154 de potencia disponible ajustada. Por lo tanto, P_{REF_INT} será igual a la más baja de entre la potencia solicitada P_{REF} o a la señal de potencia disponible ajustada P_{A_LIM} . Típicamente, la potencia solicitada P_{REF} se fijará a un valor que es mayor que o igual a la potencia disponible para maximizar la producción de potencia. Con esta condición de operación, P_{REF_INT} será típicamente igual a P_{A_LIM} , y la turbina 22 generará potencia igual a la salida de potencia disponible P_A . En respuesta a un incremento en la potencia solicitada P_{REF} , el selector de señal continuará produciendo P_{A_LIM} , y la salida de la turbina 22 permanecerá sin afectar. Sin embargo, en respuesta a una caída en el nivel de potencia solicitado P_{REF} que caiga por debajo de P_{A_LIM} , el circuito de control 140 del nivel de potencia puede empezar a producir la salida de P_{REF_INT} igual a P_{REF} . Esto puede dar como resultado que el controlador de turbina 26 disminuya la potencia de salida de la turbina 22 a una tasa que siga P_{REF} siempre que la tasa de cambio en P_{REF} esté dentro de la velocidad de respuesta de la turbina 22. De ese modo, para niveles de potencia solicitados P_{REF} por debajo de P_{A_LIM} , el controlador de turbina 26 puede ajustar la salida de la turbina eólica 22 tan rápidamente como sea posible para satisfacer las demandas de la red.

En condiciones de velocidad de viento crecientes, la tasa de cambio en la salida de potencia disponible P_A puede provocar que la señal 154 de potencia disponible ajustada exceda el límite de la tasa en rampa del limitador 144 de tasa en rampa. En respuesta, el limitador 144 de tasa en rampa puede hacer que el incremento en P_{A_LIM} retrase el incremento en la salida de potencia disponible P_A . El circuito de control 140 del nivel de potencia puede limitar de ese modo la tasa a la que la salida de potencia de la turbina se incrementa durante períodos de incremento de viento a niveles que cumplan con la normativa de la red. Si P_{A_LIM} excede la potencia solicitada, P_{REF} , el circuito de control 140 del nivel de potencia puede recortar P_{REF_INT} a P_{REF} tal como se ha explicado anteriormente, de modo que la salida de la turbina eólica 22 no exceda el nivel de potencia solicitado.

Por el contrario, en condiciones decrecientes en la velocidad del viento, la tasa de cambio en la salida de potencia disponible P_A puede no ser suficiente para hacer que la señal 154 de potencia disponible ajustada exceda el límite de la tasa en rampa del limitador 144 de tasa en rampa. En este caso, P_{A_LIM} puede seguir la salida de potencia disponible P_A . El circuito de control 140 del nivel de potencia puede permitir de ese modo que la tasa a la que la salida de potencia de la turbina disminuye durante períodos de disminución del viento siga la potencia disponible P_A mientras la señal 154 de potencia disponible ajustada sea menor que P_{REF} . Como es el caso en condiciones de viento estable y crecientes, si P_{A_LIM} excede la potencia solicitada P_{REF} , el circuito de control 140 del nivel de potencia mantiene P_{REF_INT} en P_{REF} , en cuyo caso los cambios en P_A no se reflejarán en P_{REF_INT} .

La terminología usada en el presente documento tiene la finalidad de describir realizaciones particulares solamente y no se pretende que sea limitativa de la invención. Tal como se usan en el presente documento, se pretende que las formas singulares “un”, “una”, “el”, y “la” incluyan asimismo las formas plurales, a menos que el contexto indique claramente lo contrario. Se entenderá adicionalmente que los términos “comprende” y/o “comprendiendo”, cuando se usan en la presente memoria descriptiva, especifican la presencia de características, números enteros, etapas, operaciones, elementos y/o componentes establecidos, pero no excluyen la presencia o adición de una o más de otras características, números enteros, etapas, operaciones, elementos, componentes y/o grupos de los mismos. Adicionalmente, en el grado en que los términos “incluye”, “teniendo”, “tiene”, “con”, “compuesto de”, o variantes de los mismos se usan tanto en la descripción detallada como en las reivindicaciones, se pretende que dichos términos sean inclusivos de una manera similar al término “comprendiendo”.

Tal como se usa en el presente documento, la expresión “en respuesta a” significa “en reacción a” y/o “después de” un primer evento. Por ello, un segundo evento que ocurra “en respuesta a” un primer evento puede ocurrir inmediatamente después del primer evento, o puede incluir un retardo de tiempo que tenga lugar entre el primer evento y el segundo evento. Además, el segundo evento puede ser provocado por el primer evento, o puede meramente ocurrir después del primer evento sin ninguna conexión causal.

Tal como se apreciará por un experto en la materia, las realizaciones de la invención pueden realizarse también en un producto de programa informático realizado en al menos un medio de almacenamiento legible por ordenador que tenga un código de programa legible por ordenador implementado en el mismo. El medio de almacenamiento legible por ordenador puede ser un sistema, aparato o dispositivo electrónico, magnético, óptico, electromagnético, infrarrojo, o de semiconductores, o cualquier combinación adecuada de los mismos, que pueda contener, o almacenar un programa para su uso por, o en conexión con, un sistema, aparato o dispositivo de ejecución de instrucciones. Los medios de almacenamiento legibles por ordenador de ejemplo incluyen, pero sin limitarse a, un disco duro, un disco flexible, una memoria de acceso aleatorio, una memoria solo de lectura, una memoria solo de lectura programable y borrable, una memoria flash, una memoria solo de lectura en disco compacto portátil, un dispositivo de almacenamiento óptico, un dispositivo de almacenamiento magnético, o cualquier combinación adecuada de los mismos. El código de programa informático para llevar a cabo las operaciones para las realizaciones de la presente invención puede escribirse en uno o más lenguajes de programación orientados a objetos y procedimentales.

Los métodos descritos en el presente documento pueden implementarse mediante instrucciones de programa informático suministradas al procesador de cualquier tipo de ordenador para producir una máquina con un procesador que ejecute las instrucciones para implementar las funciones/actos especificados en el presente documento. Estas instrucciones de programa informático pueden almacenarse también en un medio legible por ordenador que pueda dirigir a un ordenador para funcionar de una manera particular. Con este fin, las instrucciones de programa informático pueden cargarse en el ordenador para provocar la ejecución de una serie de etapas operacionales y producir de ese modo un proceso implementado en ordenador de modo que las instrucciones ejecutadas proporcionen procesos para la implementación de las funciones/actos especificados en el presente documento.

Las diversas realizaciones de código de programa y/o funciones del sistema descritas en el presente documento pueden identificarse basándose en la aplicación, función, o componente de software tal como se implementa en una realización específica de la invención. Sin embargo, debería apreciarse que cualquier nomenclatura de programa particular que siga se usa meramente por conveniencia, y por ello la invención no debería limitarse a su uso solamente en cualquier aplicación específica identificada y/o implicada por dicha nomenclatura. Debería apreciarse adicionalmente que las diversas características, aplicaciones y dispositivos divulgados en el presente documento pueden usarse solos o en combinación. Más aún, dado el típicamente inacabable número de maneras en las que los programas de ordenador pueden organizarse en rutinas, procedimientos, métodos, módulos, objetos y similares así como las diversas maneras en las que la funcionalidad del programa puede asignarse entre diversas capas de software que están residentes dentro de un sistema informático típico (por ejemplo, sistemas operativos, bibliotecas, API, aplicaciones, applets, etc.), y/o a través de una o más plataformas de hardware, debería apreciarse que la invención no está limitada a la organización y asignación específica de la funcionalidad del programa descrita en el presente documento.

Aunque la invención se ha ilustrado mediante una descripción de diversas realizaciones y aunque estas realizaciones se han descrito con detalle considerable, no es la intención del presente solicitante restringir o en ninguna forma limitar el alcance de las reivindicaciones adjuntas a dichos detalles. Serán fácilmente evidentes para los expertos en la materia ventajas y modificaciones adicionales. Por ejemplo, las realizaciones de la invención pueden implementarse con funciones proporcionadas en el controlador 24 de la planta de generación, el controlador 26 de turbina, o combinaciones de los controladores 24, 26. Por lo tanto, la invención en sus aspectos más amplios no debería limitarse a los detalles específicos, métodos representativos y ejemplos ilustrativos mostrados y descritos.

En consecuencia, pueden realizarse separaciones respecto a dichos detalles sin apartarse del espíritu o alcance del concepto inventivo general.

REIVINDICACIONES

1. Un método de control de una turbina eólica, comprendiendo el método:

5 recibir una señal de referencia de potencia en un controlador de turbina eólica que define un nivel de salida de potencia solicitado más bajo que un nivel de potencia disponible;
 10 ajustar un paso de palas de rotor de la turbina eólica basándose en la señal de referencia de potencia recibida que hace que el rotor capture una potencia del viento que es aproximadamente igual al nivel de salida de potencia solicitado;
 15 caracterizado por generar una curva de potencia reducida mediante desplazamiento de la curva de salida de potencia disponible de modo que la salida de potencia de la turbina eólica sea aproximadamente el nivel de salida de potencia solicitado para la velocidad del viento real; y controlar el nivel de potencia de salida de la turbina eólica al nivel de salida de potencia solicitado de acuerdo con la curva de potencia reducida mediante el ajuste de un par de torsión de carga proporcionado al rotor por un generador acoplado al rotor.

2. El método de la reivindicación 1 en el que el ajuste del paso de las palas hace que el rotor capture menos potencia eólica que un ajuste de paso de palas óptimo.

3. El método de la reivindicación 1 en el que el ajuste del paso de palas comprende:

25 determinar una velocidad del viento real;
 seleccionar una primera coordenada de una tabla de búsqueda bidimensional basándose en la velocidad del viento real;
 30 seleccionar una segunda coordenada de la tabla de búsqueda bidimensional basándose en el nivel de salida de potencia solicitado;
 identificar una entrada de la tabla de búsqueda bidimensional basándose en las coordenadas seleccionadas; y
 35 ajustar el paso de palas basándose en el valor de la entrada en la tabla de búsqueda bidimensional identificado.

4. El método de la reivindicación 1 en el que el nivel de potencia disponible es menor que una potencia de diseño de la turbina eólica.

5. El método de la reivindicación 1 en el que una potencia eólica disponible es mayor que una potencia de diseño de la turbina eólica.

6. El método de la reivindicación 1 que comprende adicionalmente:

40 generar la señal de referencia de potencia.

7. El método de la reivindicación 1 en el que la generación de la señal de referencia de potencia comprende:

45 recibir una señal de salida de potencia disponible; y procesar la señal de salida de potencia disponible a través de un limitador de la tasa en rampa para producir una señal de salida de potencia disponible limitada en la tasa en rampa.

8. El método de la reivindicación 7 en el que el limitador de la tasa en rampa se configura para limitar la tasa de cambio de la señal de salida de potencia disponible limitada en la tasa en rampa a una primera tasa para un incremento de la señal de salida de potencia disponible, y limitar la tasa de cambio de la señal de salida de potencia disponible limitada en la tasa en rampa a una segunda tasa para una señal de salida de potencia disponible decreciente.

9. El método de la reivindicación 7 en el que la generación de la señal de referencia de potencia comprende adicionalmente:

55 comparar la señal de salida de potencia disponible limitada en la tasa en rampa con una señal de nivel de potencia solicitada; y seleccionar la más baja de entre la señal de salida de potencia disponible limitada en la tasa en rampa y la señal del nivel de potencia solicitada como la señal de referencia de potencia.

10. El método de la reivindicación 7 en el que la generación de la señal de referencia de potencia comprende adicionalmente:

65 añadir un factor de ajuste a una de entre la señal de salida de potencia disponible o la señal de salida de potencia disponible limitada en la tasa en rampa.

11. Un controlador para una turbina eólica que comprende:

un procesador; y

una memoria que incluye instrucciones que, cuando se ejecutan por el procesador, hacen que el procesador:

5 reciba una señal de referencia de potencia que define un nivel de salida de potencia solicitado más bajo que un nivel de potencia disponible;

fije un paso de palas de un rotor de la turbina eólica basándose en la señal de referencia de potencia recibida, lo que hace que el rotor capture una potencia del viento que es aproximadamente igual al nivel de salida de potencia solicitado;

10 caracterizado por que se hace que el procesador genere adicionalmente una curva de potencia reducida mediante el desplazamiento de la curva de salida de potencia disponible de modo que la salida de la potencia de la turbina eólica sea aproximadamente el nivel de salida de potencia solicitado para la velocidad del viento real; y controle el nivel de potencia de salida de la turbina eólica al nivel de salida de potencia solicitado de acuerdo con la curva de potencia reducida mediante el ajuste de un par de torsión de carga proporcionado al rotor por un

15 generador acoplado al rotor.

12. El controlador de la reivindicación 11 en el que el procesador es parte de un controlador de la planta de generación.

20 13. El controlador de la reivindicación 11 en el que el procesador es parte de un controlador de turbina eólica.

14. Un producto de programa informático que comprende:

un medio de almacenamiento legible por ordenador no transitorio; e

25 instrucciones de programa almacenadas en el medio de almacenamiento legible por ordenador,

en el que las instrucciones de programa, cuando se ejecutan por un procesador, hacen que el procesador:

reciba una señal de referencia de potencia que define un nivel de salida de potencia solicitado más bajo que un nivel de potencia disponible;

30 fije un paso de palas de un rotor de la turbina eólica basándose en la señal de referencia de potencia recibida que hace que el rotor capture una potencia del viento que es aproximadamente igual al nivel de salida de potencia solicitado;

35 caracterizado por que se hace que el procesador genere adicionalmente una curva de potencia reducida mediante el desplazamiento de la curva de salida de potencia disponible de modo que la salida de la potencia de la turbina eólica sea aproximadamente el nivel de salida de potencia solicitado para la velocidad del viento real; y controle el nivel de potencia de salida de la turbina eólica al nivel de salida de potencia solicitado de acuerdo con la curva de potencia reducida mediante el ajuste de un par de torsión de carga proporcionado al rotor por un

generador acoplado al rotor.

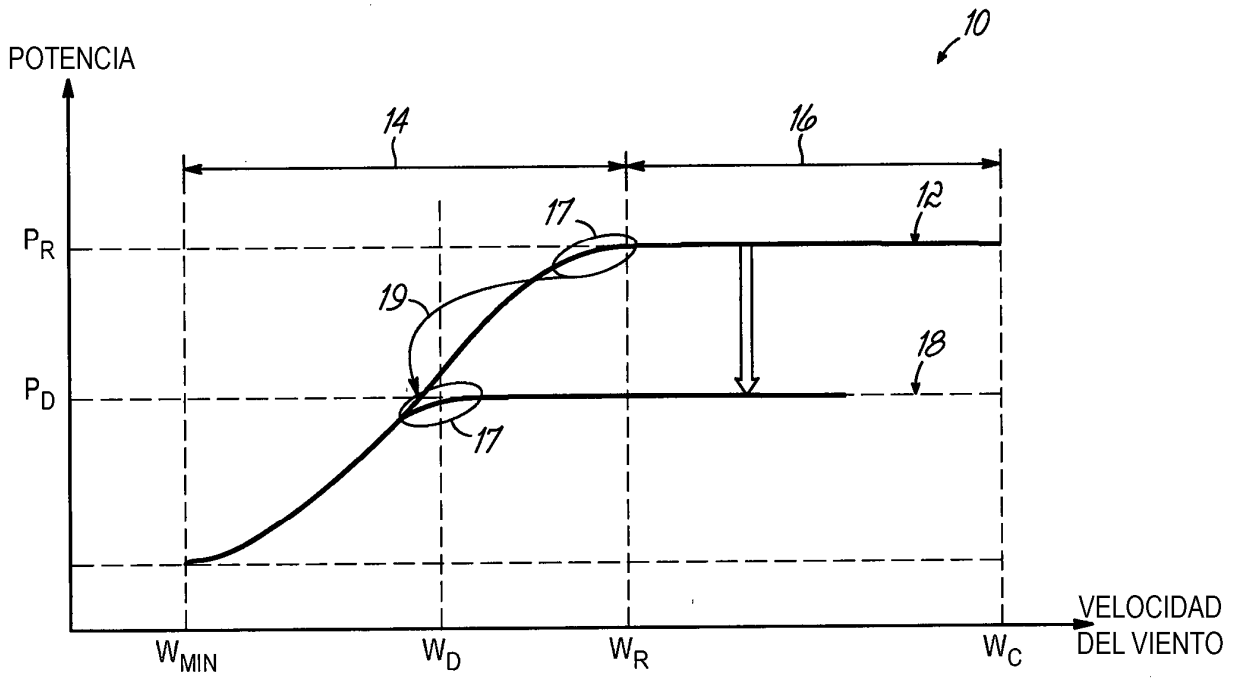


FIG. 1
TÉCNICA ANTERIOR

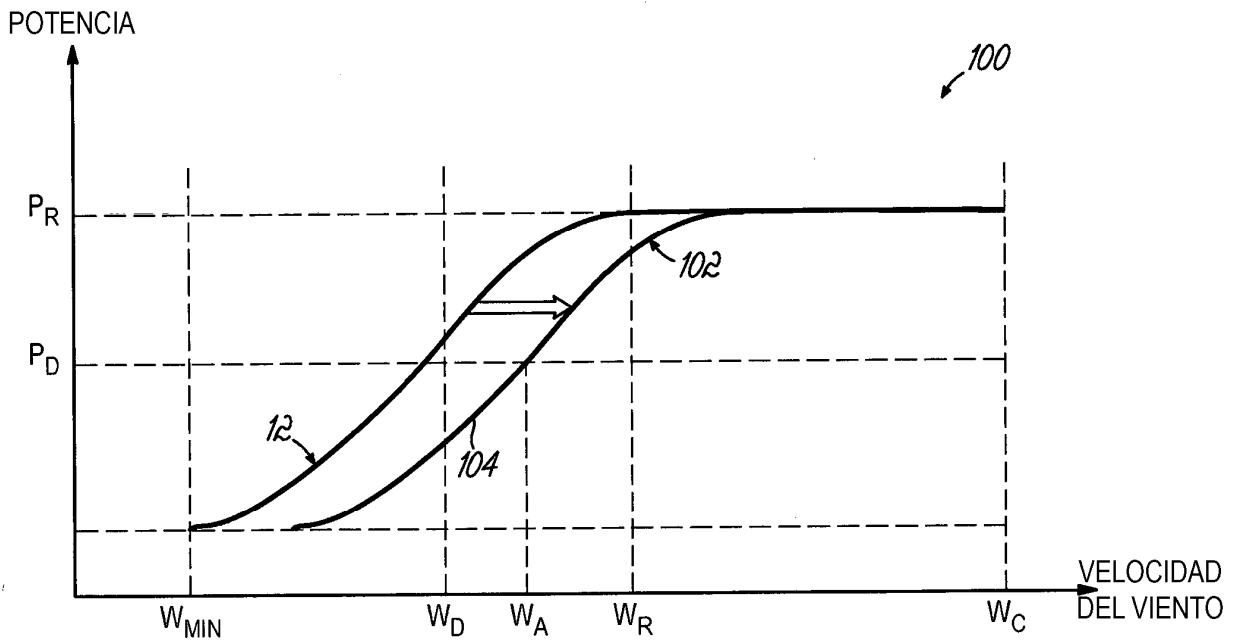


FIG. 4

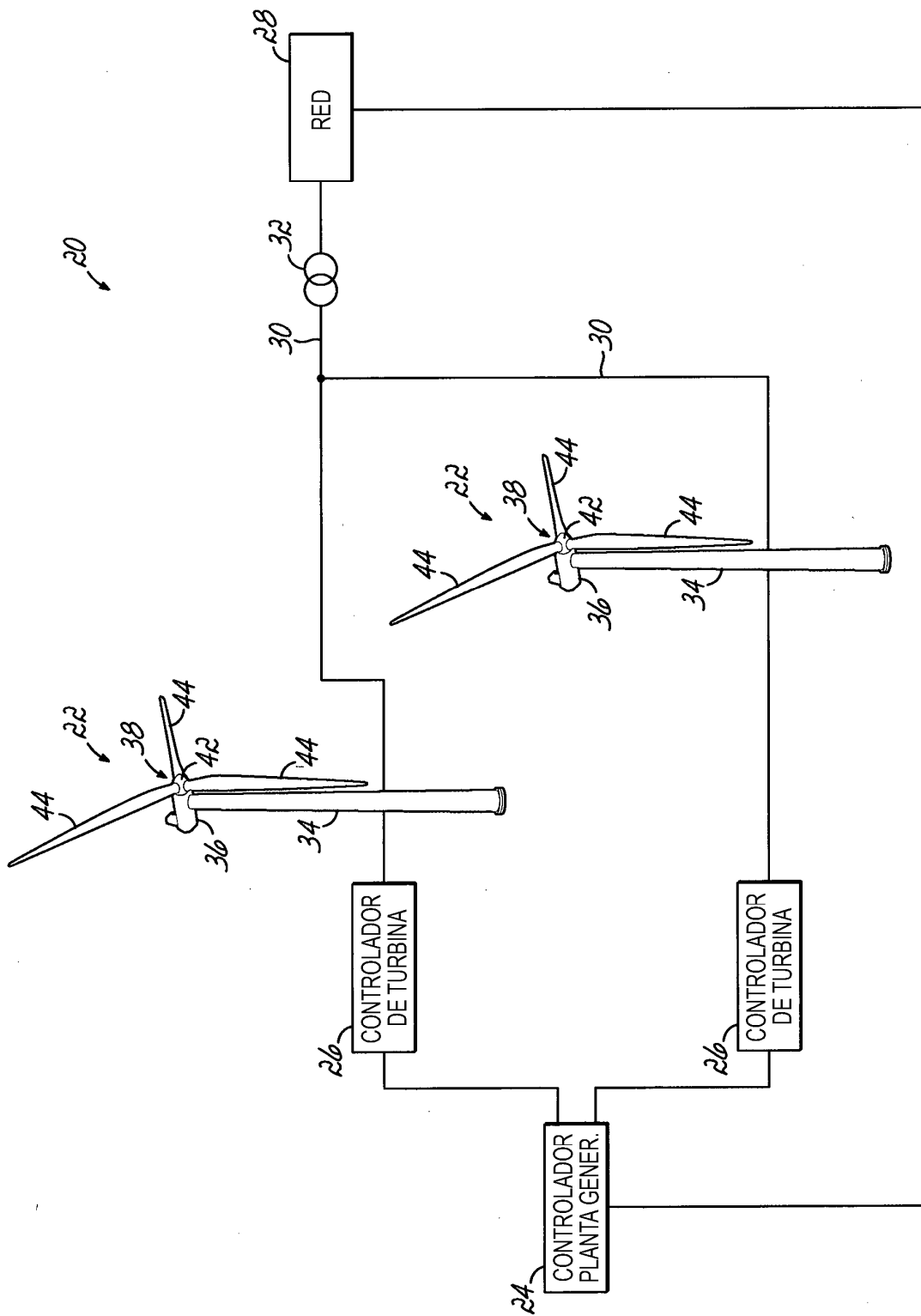


FIG. 2

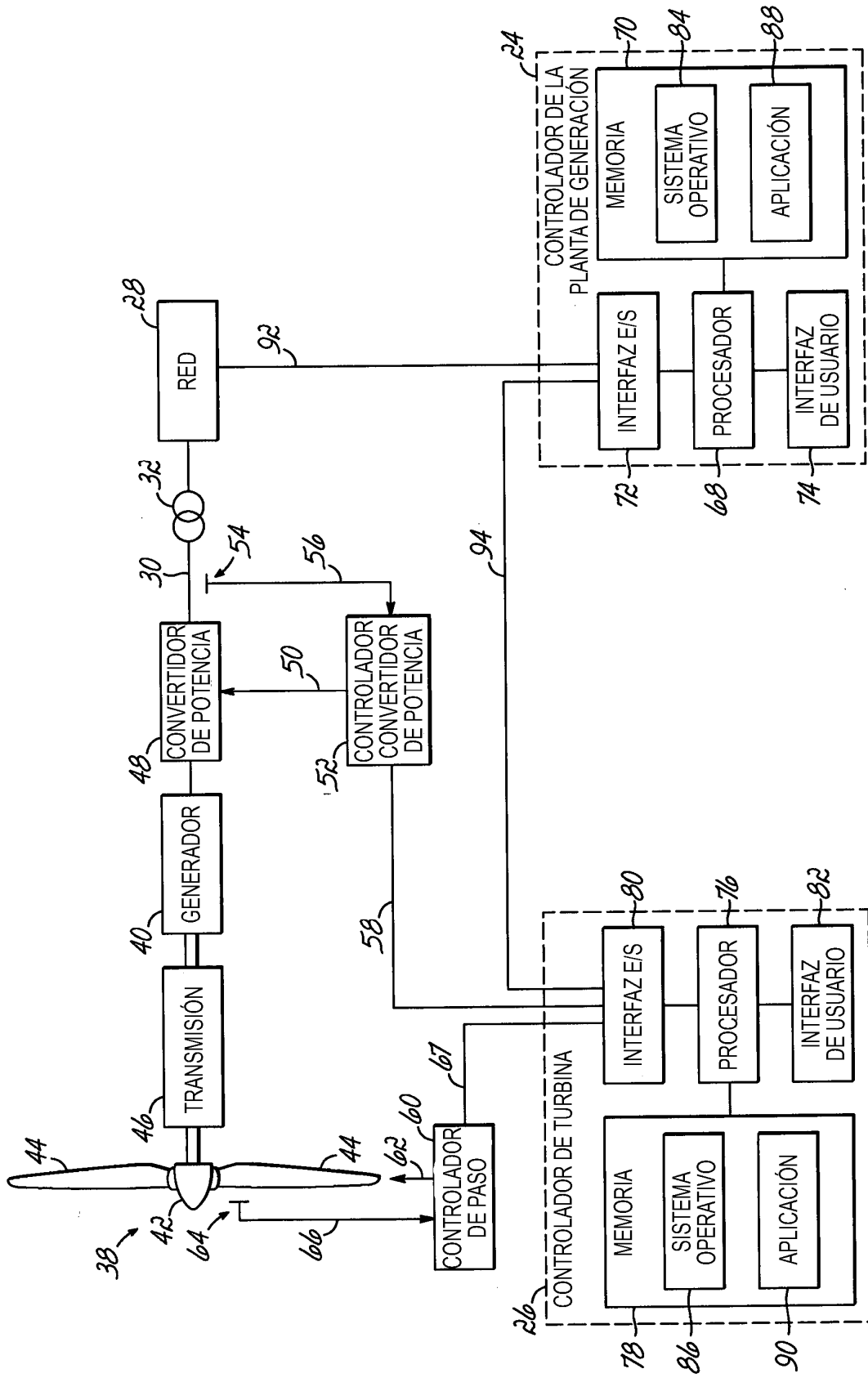


FIG. 3

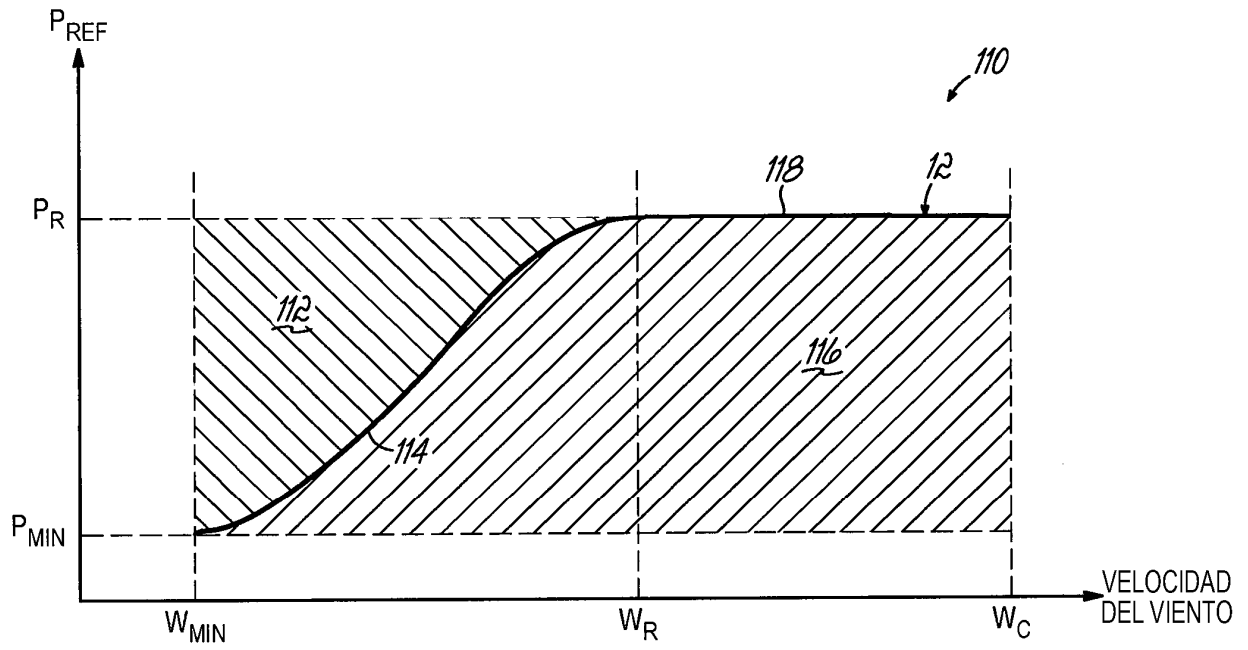


FIG. 5

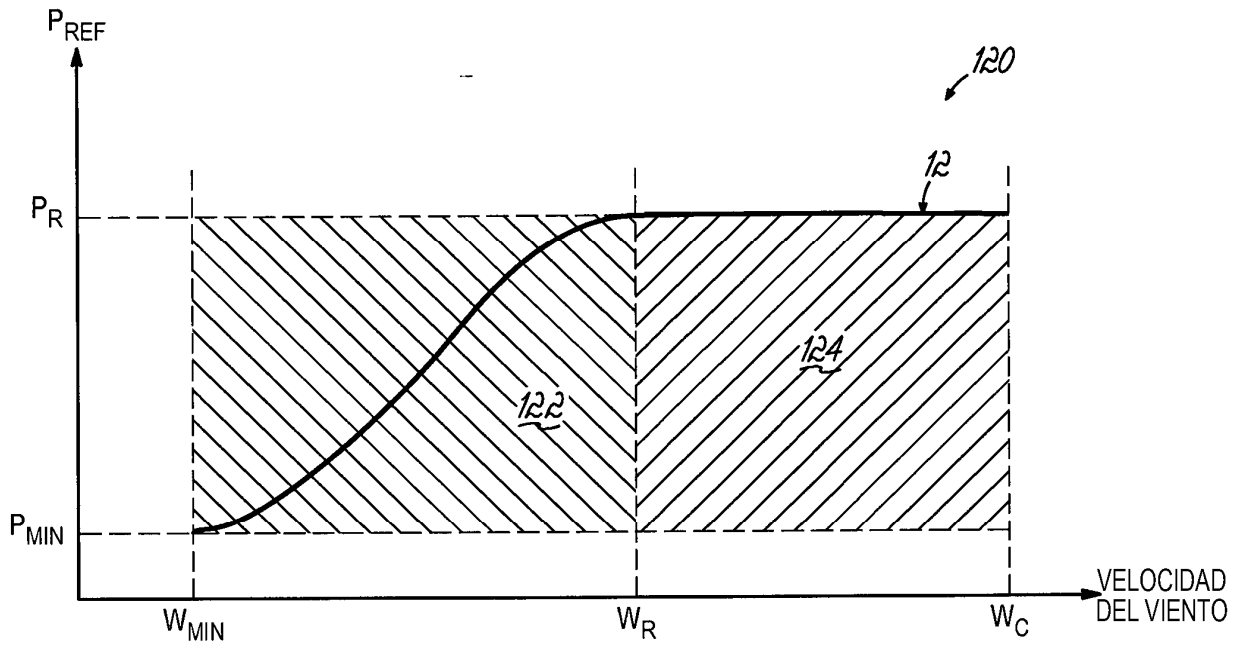


FIG. 6

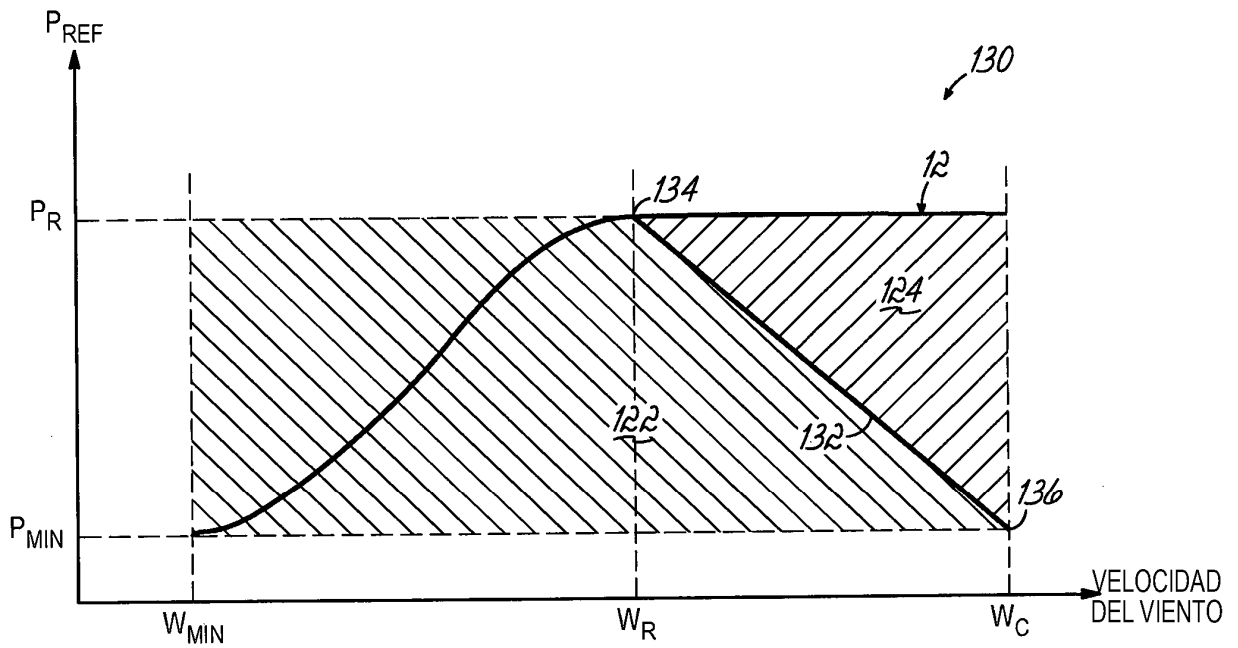


FIG. 7

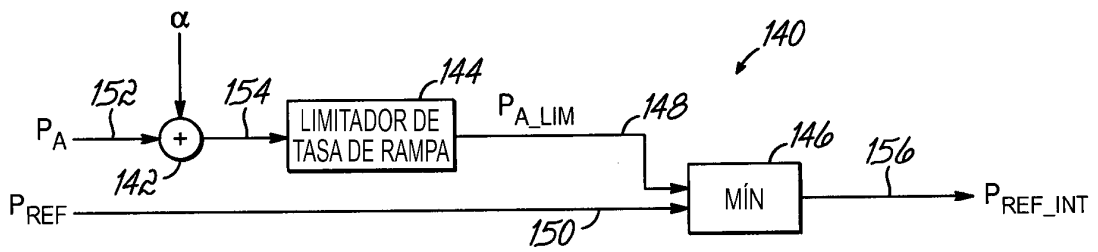


FIG. 8

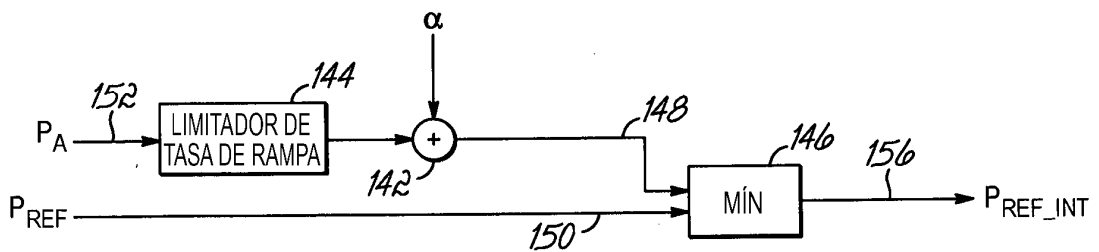


FIG. 9