

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 703 542**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02 (2006.01)

F03D 7/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **03.09.2014** **PCT/DK2014/050269**

87 Fecha y número de publicación internacional: **12.03.2015** **WO15032409**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.09.2014** **E 14766898 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **21.11.2018** **EP 3042075**

54 Título: **Gestión de velocidad de una turbina eólica cuando se conmutan configuraciones eléctricas**

30 Prioridad:

05.09.2013 IN 2633DE2013
03.12.2013 DK 201370740

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
11.03.2019

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

KJÆR, MARTIN ANSBJERG;
KOLDKJÆR, PETER;
MØLGAARD HVIID KNUDSEN, RASMUS;
SOLEIMANZADEH, MARYAM;
SØRENSEN, MARTIN MØLLER;
ZAIB, ALI;
KUMAR SINGH, ARVISHWA;
CHRISTENSEN, POUL BRANDT y
HOULIND JENSEN, MICHAEL

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 703 542 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

Gestión de velocidad de una turbina eólica cuando se conmutan configuraciones eléctricas

5 Antecedentes**Campo de la invención**

10 Las realizaciones presentadas en esta divulgación se refieren de manera general a conmutar configuraciones de generador, y, más específicamente, a mantener una velocidad de rotor sustancialmente constante cuando se conmuta entre las configuraciones de generador.

Descripción de la técnica relacionada

15 A diferencia de algunas formas de sistemas de generación de potencia, los sistemas de energía eólica dependen de condiciones medioambientales variables para generar potencia. Específicamente, la potencia generada por una turbina puede variar dependiendo de la velocidad del viento en el parque eólico. Una turbina eólica puede producir potencia a diferentes eficiencias dependiendo de la velocidad del viento. Tal y como se usa en el presente documento, la eficiencia de la turbina es una medida de la capacidad de la turbina para convertir energía eólica en energía eléctrica.

20 Por ejemplo, si la turbina está configurada para funcionar de manera óptima a velocidades del viento de aproximadamente 10 metros/segundo pero la velocidad del viento actual es de aproximadamente 5 metros/segundo, la turbina puede producir potencia a una eficiencia reducida. Por consiguiente, gran parte del esfuerzo en el diseño de turbinas eólicas se centra en diseñar turbinas eólicas que puedan generar potencia de manera eficiente en condiciones medioambientales variables.

25 El documento US 2011/140421 A1 da a conocer un método para hacer funcionar una turbina eólica que tiene un generador. El generador tiene un primer estado y un segundo estado que pueden conmutarse eléctricamente.

30 El documento AU 90735/82 A da a conocer un sistema de generación eléctrico eólico que comprende un generador que genera tensión alterna a una tensión sustancialmente superior a la requerida para su uso final.

El documento US 2003/151259 A1 da a conocer una turbina eólica de velocidad variable que tiene un rectificador de lado de red eléctrica pasivo que usa un control de potencia escalar y un control de paso dependiente. La turbina eólica de velocidad variable puede usar el control de paso dependiente para mejorar la capacidad de respuesta de la turbina eólica.

35

Sumario

40 Una realización de la presente divulgación incluye un controlador para una turbina eólica y un método para controlar la turbina eólica. El controlador y el método incluyen, tras determinar conmutar entre configuraciones eléctricas cuando funciona a una velocidad de rotor previa a la conmutación, reducir una potencia de salida producida por un generador en la turbina eólica. Mientras se reduce la potencia de salida, el controlador y el método ajustan un parámetro asociado con un rotor de la turbina eólica para mantener la velocidad del rotor a o por encima de al menos una de la velocidad de rotor previa a la conmutación y una velocidad de rotor posterior a la conmutación deseada. Tras determinar que la

45 potencia de salida alcanza un valor de potencia predefinido el controlador y el método conmutan entre una primera configuración eléctrica asociada con el generador y una segunda configuración eléctrica. Tras conmutar a la segunda configuración eléctrica, el controlador y el método aumentan la potencia de salida producida por el generador en la turbina eólica. Además, mientras se aumenta la potencia de salida, el método y el controlador ajustan el parámetro asociado con el rotor para mantener la velocidad del rotor a o por encima de al menos una de la velocidad de rotor previa a la conmutación y una velocidad de rotor posterior a la conmutación deseada.

50

Otra realización presentada en el presente documento es una turbina eólica que incluye un generador, un rotor acoplado al generador, y un controlador. El controlador está configurado para, tras determinar conmutar entre configuraciones eléctricas cuando funciona a una velocidad de rotor previa a la conmutación, reducir una potencia de salida producida por el generador y, mientras se reduce la potencia de salida, ajustar un parámetro asociado con el rotor para mantener la velocidad del rotor a o por encima de al menos una de la velocidad de rotor previa a la conmutación y una velocidad de rotor posterior a la conmutación deseada. Tras determinar que la potencia de salida alcanza un valor de potencia predefinido, el controlador está configurado para conmutar entre una primera configuración eléctrica asociada con el generador y una segunda configuración eléctrica. Tras conmutar a la segunda configuración eléctrica, el controlador también está configurado para aumentar la potencia de salida producida por el generador y, mientras se aumenta la potencia de salida, ajustar el parámetro asociado con el rotor para mantener la velocidad del rotor a o por encima de al menos una de la velocidad de rotor previa a la conmutación y una velocidad de rotor posterior a la conmutación deseada.

55

60

65

Breve descripción de los dibujos

Para que pueda entenderse en detalle la manera en la que se alcanzan los aspectos mencionados anteriormente, una descripción más particular de realizaciones de la invención, brevemente resumida con anterioridad, puede obtenerse mediante referencia a los dibujos adjuntos.

Debe observarse, sin embargo, que los dibujos adjuntos solo ilustran realizaciones típicas de esta invención y por tanto no deben considerarse como limitativos de su alcance, ya que la invención puede admitir otras realizaciones igualmente eficaces.

La figura 1 ilustra una vista esquemática de una turbina eólica, según una realización descrita en el presente documento.

Las figuras 2A-2C son configuraciones de generador para generar potencia, según realizaciones presentadas en el presente documento.

La figura 3 es un sistema de turbina para conmutar entre configuraciones de generador, según una realización presentada en el presente documento.

Las figuras 4A-4B son gráficos que ilustran la potencia y velocidad de rotor cuando se conmuta entre configuraciones de generador, según realizaciones presentadas en el presente documento.

La figura 5 ilustra un diagrama para la conmutación entre configuraciones de estrella y en delta, según una realización presentada en el presente documento.

La figura 6 ilustra un diagrama con una pluralidad de umbrales para la conmutación entre configuraciones de estrella y en delta, según una realización presentada en el presente documento.

La figura 7 es un diagrama de flujo para ajustar la tasa a la que una turbina conmuta entre configuraciones de generador, según una realización presentada en el presente documento.

Para facilitar la comprensión, se han usado números de referencia idénticos, cuando es posible, para designar elementos idénticos que son comunes a las figuras. Se contempla que elementos dados a conocer en una realización pueden usarse de manera beneficiosa en otras realizaciones sin volver a mencionarlos de manera específica.

Descripción detallada

Para hacer funcionar de manera eficiente una turbina eólica en velocidades del viento variables, la turbina eólica puede conmutar entre dos o más configuraciones eléctricas diferentes. En una realización, la turbina puede incluir relés que reconfiguran el generador o bien en una configuración de estrella o bien en una configuración en delta. Las dos configuraciones eléctricas pueden ofrecer eficiencias diferentes dependiendo de la velocidad del viento. La configuración de estrella puede ser más eficiente que la configuración en delta a velocidades bajas, pero una vez que la velocidad del viento aumenta de tal manera que la potencia de salida del generador supera un umbral de restricción de potencia en estrella, la turbina eólica puede tener que degradarse. La configuración en delta, en contraposición, puede permitir que el generador produzca potencia superior al umbral de restricción de potencia en estrella pero puede experimentar ineficiencias cuando se produce una potencia inferior, es decir, cuando la velocidad del viento disminuye.

En una realización, la turbina está configurada para hacer conmutar el generador entre dos configuraciones eléctricas diferentes, por ejemplo, de estrella a delta o de delta a estrella, basándose en las condiciones del viento actuales o la cantidad de potencia que está produciendo el generador. Antes de la conmutación, la potencia emitida por el generador puede llevarse a cero. Hacer esto, sin embargo, elimina carga del tren de accionamiento, que, si no se tiene en cuenta, provoca que la velocidad de rotor aumente. En una realización, la velocidad de rotor puede controlarse de tal manera que la velocidad disminuye hasta una velocidad de conexión predefinida a medida que la potencia de generador varía gradualmente hasta cero. Sin embargo, cambiar la velocidad del rotor cambia la fuerza ejercida por el rotor sobre la turbina. Por consiguiente, la turbina puede controlar la velocidad de rotor usando, por ejemplo, el paso de pala o frenos de modo que la velocidad de rotor permanece aproximadamente constante a lo largo de todo el procedimiento de conmutación. En una realización, la velocidad de rotor puede mantenerse a o por encima de la velocidad del rotor inmediatamente antes de reducir gradualmente la potencia de generador (es decir, una velocidad de rotor previa a la conmutación) o la velocidad de rotor deseada tras haberse producido la conmutación y haberse aumentado gradualmente la potencia de salida de generador (es decir, una velocidad de rotor tras la conmutación). Mantener la velocidad de rotor a o por encima de la velocidad de rotor previa a, o tras, la conmutación mientras se conmuta entre configuraciones eléctricas puede mitigar el cambio de par experimentado por la torre de turbina y puede reducir la probabilidad de fallo estructural.

Dado que la conmutación entre configuraciones eléctricas puede producir fatiga en la turbina, la turbina eólica también puede establecer una pluralidad de umbrales con diversos criterios para determinar cuándo conmutar entre las

configuraciones eléctricas. Por ejemplo, cuando se conmuta de delta a estrella, la turbina puede esperar hasta que la potencia de salida de generador disminuye por debajo de 200 kW durante sesenta segundos. Sin embargo, el parque eólico puede experimentar un viento estable, constante que provoca que el generador emita 300 kW durante un periodo prolongado. Permanecer en la configuración en delta durante este periodo de tiempo provocará que la turbina sea menos eficiente que si la turbina estuviera en la configuración de estrella. En vez de eso, la turbina puede usar una pluralidad de umbrales en los que los criterios de tiempo y potencia aumentan. Por ejemplo, la turbina eólica puede conmutar configuraciones si la potencia emitida está por debajo de 200 kW durante cinco minutos o la potencia de salida está por debajo de 300 kW durante una hora. De esta manera, la pluralidad de umbrales pueden plasmar la situación mencionada anteriormente en la que la turbina puede beneficiarse de conmutar configuraciones eléctricas. Sin embargo, al aumentar la limitación de tiempo, la turbina puede limitar la conmutación inadvertida si el cambio de la salida de generador es breve y la turbina tiene que conmutar de vuelta a la configuración eléctrica anterior.

En una realización, la turbina eólica puede rastrear el número de conmutaciones de configuración eléctrica realizadas por la turbina. Dado que las conmutaciones producen fatiga en la turbina, un controlador puede actualizar los criterios usados para determinar cuándo conmutar entre las configuraciones eléctricas para reducir la tasa de conmutación, y por tanto, reducir la fatiga en la turbina. Por ejemplo, si la turbina supera su presupuesto de conmutación, el controlador puede aumentar el tiempo asociado con un umbral o mantener la turbina en una única configuración eléctrica hasta que el número total de conmutaciones está dentro del presupuesto de conmutación. Reducir la tasa de conmutación de la turbina puede prevenir que la torre de turbina envejezca de manera prematura lo cual puede reducir la probabilidad de costes de mantenimiento inesperados.

Ahora se explicará la presente invención con más detalles. Si bien la invención es susceptible de diversas modificaciones y formas alternativas, se han dado a conocer realizaciones específicas a modo de ejemplos. Debería entenderse, sin embargo, que no se pretende que la invención se limite a las formas particulares dadas a conocer. En vez de eso, la invención debe cubrir todas las modificaciones, equivalentes y alternativas que se encuentren dentro del alcance de la invención tal como se define por las reivindicaciones adjuntas.

La figura 1 ilustra una vista esquemática de un generador 100 de turbina eólica de eje horizontal. El generador 100 de turbina eólica incluye normalmente una torre 102 y una góndola 104 de turbina eólica ubicada en la parte superior de la torre 102. Un rotor 106 de turbina eólica puede estar conectado con la góndola 104 a través de un árbol de baja velocidad que se extiende fuera de la góndola 104. El rotor 106 de turbina eólica incluye tres palas 108 de rotor montadas en un buje 110 común, pero puede incluir cualquier número adecuado de palas, tal como una, dos, cuatro, cinco o más palas. La pala 108 (o superficie aerodinámica) tiene normalmente una forma aerodinámica con un borde 112 de ataque para orientarse hacia el viento, un borde 114 de salida en el extremo opuesto de una cuerda para la pala 108, una punta 116 y una raíz 118 para unirse al buje 110 de cualquier manera adecuada.

Para algunas realizaciones, las palas 108 pueden estar conectadas al buje 110 usando cojinetes 120 de paso de tal manera que cada pala 108 puede hacerse rotar alrededor de su eje longitudinal para ajustar el paso de la pala. El ángulo de paso de una pala 108 puede controlarse mediante accionadores lineales o motores graduales, por ejemplo, conectados entre el buje 110 y la pala 108. El control de paso de pala es común en las turbinas eólicas modernas y se usa entre otros sistemas para maximizar la potencia generada por debajo de velocidades del viento nominales y para reducir la potencia generada por encima de la velocidad del viento nominal para prevenir una carga excesiva sobre componentes de turbina, por ejemplo, el generador y caja de engranajes.

Las figuras 2A-2C son configuraciones de generador para generar potencia, según realizaciones presentadas en el presente documento. Específicamente, la figura 2A ilustra bobinados 215 de un generador que están configurados en una configuración en delta en los que cada extremo del bobinado 215 está acoplado al extremo de otro bobinado 215. Los tres nodos A, B y C pueden ser fases separadas de una señal de potencia trifásica. Aunque las realizaciones en el presente documento se comentan en el contexto de una configuración en delta trifásica (es decir, un ejemplo de una configuración eléctrica de malla), las realizaciones en el presente documento pueden usarse con sistemas eléctricos con cualquier número de fases.

La figura 2B ilustra los bobinados 215 de un generador configurado en una configuración de estrella (o "Y"). Tal y como se muestra, los tres bobinados 215 se encuentran en un nodo neutro N que establece la tensión de referencia para los tres bobinados 215. Como en la figura 2A, los nodos A, B y C pueden emitir una señal de potencia trifásica; sin embargo, las realizaciones en el presente documento no se limitan a eso. De hecho, la configuración de estrella puede usarse para generar una señal de potencia con cualquier número de fases.

En una realización, una turbina eólica puede incluir conmutadores o relés para reordenar las conexiones de los bobinados 215 para conmutar entre la configuración en delta (por ejemplo, una primera configuración eléctrica) mostrada en la figura 2A y la configuración de estrella (por ejemplo, una segunda configuración eléctrica) mostrada en la figura 2B, y viceversa. Por ejemplo, el generador puede tener una capacidad nominal para producir 3 MW de potencia. Sin embargo, el generador puede ser capaz de producir esta cantidad máxima de potencia únicamente a determinadas velocidades del viento. A velocidades del viento inferiores, el generador puede emitir potencia de menos de 3 MW. Cuando se genera menos potencia (por ejemplo, menos de 500 kW) el generador puede ser capaz de producir potencia eléctrica de manera más eficiente en la configuración de estrella que en la configuración en delta.

Esto es porque, mientras está en la configuración en delta, el rotor puede funcionar a una velocidad por encima de la velocidad óptima más aerodinámica y, por tanto, generar menos potencia de lo que sería posible si se usara una configuración de estrella. Además, el propio generador puede experimentar una eficiencia mejorada cuando está en la configuración de estrella en vez de la configuración en delta. Por otro lado, la configuración de estrella puede tener un umbral de restricción de potencia en estrella que evita que el generador emita potencia por encima de este umbral. Si la velocidad del viento permite que el generador produzca potencia por encima del umbral de restricción de potencia en estrella (por ejemplo, 900 kW) la turbina puede tener que degradarse para no producir potencia por encima de este máximo. Por tanto, a medida que aumenta la velocidad del viento, la turbina puede conmutar a la configuración en delta para evitar las limitaciones de la configuración de estrella.

La figura 2C ilustra un sistema de generador para conmutar entre las configuraciones en delta y de estrella mostradas en las figuras 2A y 2B. En el presente documento, los extremos de los bobinados pueden acoplarse a los elementos 250 y 260 de conmutación. Para formar la configuración en delta, los elementos 260 de conmutación se cierran mientras que los elementos 250 de conmutación se abren para acoplar cada extremo de los bobinados 215 a un nodo compartido, es decir, el nodo A, B o C. En cambio, para formar la configuración de estrella, los elementos 260 de conmutación se abren y los elementos 250 de conmutación se cierran para acoplar un extremo de cada bobinado 215 al neutro. De esta manera, los bobinados 215 de generador pueden reconfigurarse basándose en condiciones medioambientales actuales y potencia de salida de generador.

La figura 3 es una turbina 100 para conmutar entre configuraciones de generador, según una realización presentada en el presente documento. Específicamente, la turbina 100 incluye el rotor 106 conectado a un generador 310 (por ejemplo, un generador de inducción de alimentación doble o generador de imán permanente) a través de un árbol 305. Aunque no se muestra, la turbina 100 eólica puede incluir una caja de engranajes para cambiar la velocidad rotacional relativamente lenta del rotor 106 a una velocidad rotacional superior para hacer rotar los bobinados del generador 310. La salida del generador 310 está acoplada a relés 315 (por ejemplo, conmutadores físicos) que pueden reconfigurar las salidas del generador 310 para dar las configuraciones eléctricas diferentes mostradas en las figuras 2A y 2B, por ejemplo, configuraciones de estrella o en delta. Específicamente, el extremo de los bobinados (es decir, seis hilos en un generador trifásico) se alimentan a los relés 315 que pueden estar dispuestos tal como se muestra en la figura 2C para conmutar entre configuraciones eléctricas. En otra realización, los relés 315 pueden incorporarse en el generador 310 para conmutar de manera interna entre configuraciones eléctricas. Además, las salidas del generador 310 pueden alimentarse a uno o más convertidores de potencia que realizan una conversión CA-CC y CC-CA para proporcionar potencia a la red eléctrica a la frecuencia de red eléctrica deseada, pero esto no es un requisito.

La turbina 100 incluye un controlador 325 (por ejemplo, uno o más dispositivos informáticos) que está acoplado a los diversos componentes en la turbina, por ejemplo, el generador 310 y los relés 315. El controlador 325 puede enviar instrucciones a estos componentes para cambiar la potencia producida por la turbina 100 eólica tal como se comenta en el presente documento usando lógica de control implementada, por ejemplo, dentro de firmware o una aplicación de software. El controlador 325 puede estar ubicado en la propia turbina 100 eólica o puede estar ubicado de manera remota (por ejemplo, parte de un SCADA) y está acoplado en comunicación con la turbina 100 a través de una red cableada o inalámbrica.

Tal y como se analizará con mayor detalle más adelante, el controlador 325 puede enviar instrucciones a los diversos componentes para cambiar la configuración eléctrica del generador 310 basándose en condiciones del viento. Es decir, el controlador 325 puede conmutar la configuración eléctrica del generador 310 con el fin de generar potencia eléctrica de manera más eficiente. En una realización, el controlador 325 puede comparar criterios medidos tales como producción de potencia o velocidad del viento con uno o más umbrales predefinidos para determinar cuándo conmutar entre las configuraciones eléctricas.

Las figuras 4A-4B son gráficos que ilustran la potencia y velocidad de rotor cuando se conmuta entre configuraciones de generador, según realizaciones presentadas en el presente documento. El gráfico 400 en la figura 4A ilustra la potencia de salida de un generador que conmuta de una configuración en delta a una configuración de estrella. Antes de conmutar las configuraciones eléctricas, en el momento A, el controlador puede enviar una instrucción de control al generador que le indica al generador que reduzca gradualmente de manera que no se produce nada de potencia, o sustancialmente nada de potencia, por el generador. Hacer esto retira eficazmente el generador de la red de energía y permite conmutar la turbina de manera segura a una configuración eléctrica diferente. En el momento B, el controlador puede indicar a los relés que reconfiguren los extremos de bobinado del generador de la configuración en delta a la configuración de estrella. En el momento C, el controlador puede aumentar gradualmente la potencia producida por el generador hasta que alcanza el ajuste de potencia deseado basándose en las condiciones del viento actuales. Es decir, para condiciones del viento dadas, el controlador puede establecer la potencia de salida del generador a un valor de potencia óptimo (o dentro de un intervalo de valores de potencia óptimos). Dado que la turbina eólica está ahora en la configuración de estrella, la turbina puede emitir potencia de manera más eficiente a velocidades del viento inferiores.

El ejemplo mostrado en el gráfico 400 también se aplica cuando se conmuta de la configuración de estrella a la configuración en delta. Es decir, tras determinar conmutar, el controlador puede reducir gradualmente la potencia antes de indicar a los relés que reconfiguren el generador para dar la configuración en delta. Una vez completado, la potencia

de generador puede aumentarse gradualmente hasta la salida de potencia deseada u óptica para la velocidad del viento actual.

El gráfico 405 ilustra la velocidad rotacional del rotor cuando se conmuta de la configuración de estrella a la configuración en delta. En una realización, la velocidad rotacional del rotor en la configuración de estrella puede ser de aproximadamente 12 RPM. Entre los momentos A y B, el controlador ralentiza la velocidad de rotor al tiempo que reduce gradualmente la salida de potencia de generador tal como se muestra por el gráfico 400. Por ejemplo, el controlador puede acoplarse al sistema de ajuste de paso de pala que permite al controlador ajustar el paso de las palas orientándolas hacia el viento (es decir, hace rotar la pala de tal manera que el borde de ataque de la pala gira en una dirección paralela a la dirección del viento) reduciendo así la cantidad de energía que capta la turbina eólica del viento. Adicional o alternativamente, el controlador puede usar un sistema de frenado para reducir la velocidad de rotor tal como se muestra. Si el controlador no usara el sistema de ajuste de paso de pala o un freno de rotor para ralentizar la velocidad de rotor, la velocidad de rotor aumentaría a medida que disminuye la salida de potencia de generador. Dado que el generador sirve como carga sobre el tren de accionamiento, producir menos potencia en el generador reduce la carga sobre el tren de accionamiento aumentando así la velocidad rotacional de rotor. Por tanto, tal como se muestra en el gráfico 405, el controlador puede usar el sistema de ajuste de paso de pala o sistema de frenado para reducir la velocidad de rotor a medida que se reduce la carga del generador.

Entre los momentos B y C, la velocidad de rotor inferior (denominada velocidad de conexión y que puede ser de aproximadamente 11,5 RPM) puede mantenerse mientras el generador conmuta las configuraciones eléctricas. En el momento C, el controlador puede comenzar a aumentar la velocidad de rotor, por ejemplo, ajustando el paso de las palas fuera del viento (es decir, hace rotar la pala de tal manera que el borde de ataque de la pala gira en una dirección perpendicular a la dirección del viento). Al mismo tiempo, el controlador puede aumentar la salida de potencia del generador lo que aumenta la carga sobre la pala. Sin embargo, dado que el controlador permite que el rotor aumente la energía que está extrayéndose del viento, la velocidad de rotor no se ralentiza, pero en su lugar, aumenta. En el momento D, el rotor alcanza la velocidad óptima para la configuración en delta que puede ser de aproximadamente 13 RPM.

Tal como se muestra en los gráficos 400 y 405, cambiar las configuraciones eléctricas puede cambiar el empuje o par experimentado por la turbina eólica. Específicamente, tal como se muestra en el momento A, el controlador reduce la velocidad de rotor a medida que disminuye la carga de generador. La carga y velocidad de rotor disminuidas reducen la fuerza (por ejemplo, un empuje o par) que ejerce el rotor sobre la turbina eólica. Este cambio de fuerza puede producir fatiga en la turbina eólica. Además, dado que la velocidad de rotor se reduce hasta la velocidad de conexión baja durante los momentos B y C cuando se conmuta la configuración eléctrica, el controlador tiene que aumentar gradualmente la velocidad de rotor hasta la velocidad óptima en el momento D. Este cambio en la velocidad de la punta de la pala puede provocar un cambio adicional en la fuerza ejercida por el rotor sobre la turbina, lo que puede producir fatiga adicional en la turbina. Los datos experimentales han mostrado que el 2-3% de la fatiga de la torre se produce cuando se conmuta entre configuraciones eléctricas debido al cambio de fuerza mencionado anteriormente. Por consiguiente, reducir el cambio en la fuerza cuando se conmuta entre configuraciones eléctricas puede reducir costes de diseño así como costes de mantenimiento para reparar daño estructural en la turbina.

La figura 4B ilustra un ejemplo de conmutación entre configuraciones en delta y de estrella para reducir la cantidad que cambia la fuerza ejercida por el rotor sobre la torre de turbina. Como el gráfico 400, el gráfico 410 en la figura 4B ilustra la salida de potencia de un generador que está cambiado desde una configuración en delta a una configuración de estrella. El gráfico 415, sin embargo, se diferencia del gráfico 405 ilustrando realizaciones en las que la velocidad de rotor se conmuta entre la velocidad antes de conmutación (es decir, antes del momento A) a la velocidad después de conmutación deseada (es decir, después del momento D) sin disminuir en primer lugar a la velocidad de conexión. Específicamente, el gráfico 415 ilustra que el controlador puede reducir la fuerza cambiada ejercida por el rotor sobre la turbina manteniendo una velocidad de rotor que es sustancialmente constante (o ligeramente aumentada) durante el proceso de conmutación. Para ello, el gráfico 415 ilustra tres realizaciones diferentes (línea continua 420, línea de puntos 425, y línea discontinua 430) en las que se evita el cambio en la fuerza provocado disminuyendo la velocidad de rotor a la velocidad de conexión y entonces llevar la velocidad de rotor desde la velocidad de conexión hasta la velocidad óptima. Aunque el cambio de la fuerza resultante de la disminución de la carga de generador aún puede cambiar la fuerza que el rotor ejerce sobre la torre, los ejemplos mostrados en el gráfico 415 evitan el cambio en la fuerza resultante de la reducción de la velocidad de rotor a la velocidad de conexión y entonces aumentar la velocidad de rotor de vuelta a la velocidad original antes del momento A.

La línea continua 420 ilustra el mantenimiento de la velocidad de rotor a la velocidad de rotor previa a la conmutación a través de todo el proceso de conmutación. En el momento A, el controlador puede comenzar a ajustar el paso en sentido del viento o frenar el rotor con el fin de mantener la misma velocidad. Es decir, debido a que la carga de generador está disminuyendo, el controlador puede ajustar el paso de pala para permitir que pase más viento a través del plano de rotor, y por tanto, mantener la misma velocidad. En el momento C, cuando la carga de generador comienza a aumentar a medida que la salida de potencia aumenta, el controlador puede comenzar a ajustar el paso de las palas fuera del viento para compensar la carga de generador en aumento. Sin embargo, el controlador puede garantizar que la velocidad de rotor se mantiene sustancialmente constante durante el descenso (es decir, del momento A a través del momento B) y el ascenso (es decir, del momento C a través del momento D) del generador. En el momento D, el

controlador puede permitir que la velocidad de rotor cambie a la velocidad de rotor óptima deseada tras la conmutación asociada con la configuración de estrella para las condiciones del viento actuales.

La línea de puntos 425 ilustra que el controlador puede disminuir la velocidad de rotor hasta la velocidad óptima para la configuración de estrella (es decir, la velocidad después de conmutación) antes de la conmutación del generador. Es decir, el controlador puede llevar de manera proactiva la velocidad de rotor a la velocidad deseada para la nueva configuración eléctrica a medida que la generación de potencia se reduce. Por ejemplo, el controlador puede ajustar el paso de las palas después del momento A. Debido a que la carga de generador disminuye, el controlador ajusta el paso de las palas de modo que la velocidad de rotor disminuye a pesar de la disminución de carga de generador. Comenzando en el momento B, el controlador ajusta el paso de pala para mantener la velocidad de rotor en un valor constante durante el momento B a través del momento C cuando el generador conmuta a la configuración de estrella. En el momento D, cuando la generación de potencia se reanuda, el controlador puede ajustar el paso de las palas fuera del viento para compensar la carga de generador aumentada. De esta manera, el controlador puede garantizar que la velocidad de rotor óptima se mantiene mientras que la salida de potencia de generador se aumenta a su valor óptimo.

La línea discontinua 430, como la línea de puntos 425, ilustra que el controlador puede disminuir la velocidad de rotor hasta la velocidad óptima de la configuración de estrella antes de la conmutación del generador a esta configuración. Sin embargo, a diferencia de la línea de puntos 425, la línea discontinua 430 ilustra que la velocidad de rotor puede cambiarse al valor óptimo antes del descenso de la potencia de generador en el momento A. En una realización, en el momento A', el controlador puede ajustar el paso las palas en sentido del viento para disminuir la velocidad de rotor incluso cuando la potencia de salida del generador permanece constante. Esta velocidad de rotor puede ser no óptima para la configuración en delta, pero este estado de funcionamiento ineficiente es solo temporal. En el momento A, el controlador puede ajustar además el paso de pala a medida que la carga de generador disminuye para mantener una velocidad de rotor constante entre el momento A y B. De manera similar, en el momento C, el controlador puede ajustar el paso de las palas en la dirección opuesta con el fin de compensar la carga de generador en aumento. En el momento D, el paso de pala se establece en el establecimiento que resulta en la velocidad óptima del rotor y la salida de potencia del generador.

Las líneas 420, 425, y 430 ilustran técnicas de gestión de velocidad de rotor en las que el cambio de fuerza de hacer descender la velocidad de rotor a la velocidad de conexión y de vuelta a la velocidad original se mitiga reduciendo de ese modo la fatiga de la turbina. En una realización, la velocidad de conexión aún puede usarse en circunstancias especiales, por ejemplo, cuando la pala de rotor se acelera desde una parada, pero no se usa cuando se conmuta entre la configuración eléctrica durante funcionamiento normal. Todos de los tres ejemplos ilustran que durante la conmutación de la configuración eléctrica (por ejemplo, entre el momento B y C) la velocidad de rotor se mantiene a o por encima de las velocidades antes o después de conmutación del rotor.

Aunque no se muestra en las figuras 4A-4B, a medida que las condiciones del viento cambian, es decir, la velocidad del viento aumenta, puede ajustarse el paso de las palas además para aumentar la energía obtenida del viento. En una realización, la salida de potencia del generador también puede aumentarse de modo que la velocidad de rotor permanece en la velocidad óptima. Como tal, los gráficos 405 y 415 pueden ilustrar las dos velocidades óptimas para configuraciones en delta y de estrella en las que la configuración de estrella tiene una velocidad óptima ligeramente más alta que la configuración en delta.

La figura 5 ilustra un diagrama para la conmutación entre configuraciones de estrella y en delta, según una realización presentada en el presente documento. Específicamente, el gráfico 500 ilustra la conmutación entre configuraciones de estrella y en delta basándose en la salida de potencia por el generador. En una realización, la salida de potencia por el generador puede correlacionarse directamente con la velocidad actual del viento en el rotor. El gráfico 500 incluye dos umbrales para determinar cuándo conmutar entre las configuraciones. La trayectoria 505 ilustra la conmutación de la configuración en delta a la configuración de estrella usando el umbral 515 mientras que la trayectoria 510 ilustra la conmutación de la configuración de estrella a la configuración en delta usando el umbral 520. En una realización, el controlador puede monitorizar de manera constante la salida del generador y comparar la salida con los umbrales 515 y 520 mostrados en el gráfico 500. Tal como se muestra por la trayectoria 505, si la salida de generador cae por debajo del umbral 515 de delta a estrella (y asumiendo que el generador está configurado actualmente en la configuración en delta), el controlador ordena a la turbina que conmute a la configuración de estrella. Por el contrario, si la salida de generador supera el umbral 520 de estrella a delta, la trayectoria 510 ilustra la conmutación de la configuración de estrella a la configuración en delta. En el gráfico 500, el umbral 520 de estrella a delta es menor que el umbral 525 de restricción de potencia en estrella. El generador no puede producir más de 900 kW cuando está en la configuración de estrella.

Los umbrales 515 y 520 de estrella a delta y de delta a estrella mostrados en el gráfico 500 son ejemplos de límites de umbral posibles usados para controlar la turbina para producir de manera más eficiente potencia en condiciones de entorno cambiantes. Los criterios de potencia asociados con los umbrales 515 y 520 pueden cambiar dependiendo de la implantación particular. Además, el umbral 525 de restricción de potencia en estrella también puede ser diferente dependiendo del tipo de generador usado en la turbina eólica (es decir, puede ser más alto o más bajo que 900 kW). En una realización, el controlador puede considerar también el momento además de la salida de potencia actual del

generador cuando se conmuta entre configuraciones eléctricas. Por ejemplo, el controlador puede conmutar de delta a estrella después de que la potencia de salida de generador caiga por debajo de 200 kW durante más de sesenta segundos.

- 5 La figura 6 ilustra un diagrama con una pluralidad de umbrales para la conmutación entre configuraciones de estrella y en delta, según una realización presentada en el presente documento. El gráfico 600 ilustra la división del eje x en una pluralidad de diferentes regiones, Regiones A-E - que están separadas por umbrales 605, 610, 615, 620, y 625. Específicamente, el gráfico 500 ilustra el uso de cuatro umbrales 605, 610, 615, 620 diferentes de delta a estrella ($\Delta \rightarrow *$) en los que cada umbral está asociado con un diferente valor de salida. Además, los umbrales de delta a estrella
- 10 pueden asociarse con un criterio de tiempo en aumento. La tabla 1 ilustra diferentes criterios de tiempo que pueden asociarse con las regiones definidas por los umbrales.

TABLA 1		
Umbral	Intervalo de potencia	Criterios de tiempo
605	200 kW	60 segundos
610	400 kW	15 minutos
615	600 kW	1 hora
620	850 kW	2 horas

- 15 Tal como se muestra en la tabla 1, la conmutación de delta a estrella cuando la salida de generador actual es menor que el umbral 605, la potencia debe permanecer en o por debajo de 200 kW durante al menos 60 segundos. Sin embargo, la conmutación de delta a estrella cuando la potencia de salida de generador actual está por debajo del umbral 620, la potencia de salida debe permanecer por debajo de 850 kW durante 2 horas. La división de la salida de potencia en la pluralidad de regiones basándose en una pluralidad de umbrales y personalización del límite de temporización para cada región permite que el controlador identifique una situación en la que la turbina está
- 20 experimentando velocidades del viento menores pero constantes. Debido a que la configuración de estrella de manera más eficiente genera potencia eléctrica (hasta que la salida de potencia supera el umbral de restricción de potencia en estrella), los diversos umbrales proporcionan granularidad adicional para identificar situaciones en las que la configuración de estrella puede preferirse. Además, el aumento de los criterios de tiempo a medida que aumentan los valores de potencia asociados con los umbrales ayuda a garantizar que la velocidad del viento es suficientemente
- 25 constante de modo que el controlador no tendrá que cambiar la turbina de vuelta a la configuración en delta, es decir, si la potencia de salida supera el umbral 625 de estrella a delta ($* \rightarrow \Delta$), para evitar desaceleración de la turbina.

- En una realización, el controlador puede restablecer el temporizador si la salida de generador supera un umbral. Por ejemplo, si la salida de generador actual está por debajo del umbral 615 (que tiene criterios de tiempo de 1 hora)
- 30 durante treinta minutos pero entonces supera el umbral 615, el controlador puede restablecer el temporizador de manera que si la salida de generador cae de nuevo por debajo del umbral 615, el temporizador comienza en cero. Sin embargo, si la salida de generador cae por debajo del umbral 610, el controlador puede permitir que el temporizador continúe. Por ejemplo, si la salida de generador está por debajo del umbral 615 durante treinta minutos pero entonces cae por debajo del umbral 610 durante solo cinco minutos antes, el controlador puede permitir el temporizador asociado
- 35 con el umbral 615 funcione de manera continua durante este momento. Por supuesto, si la salida de generador está por debajo del umbral 610 lo suficiente para satisfacer su limitación de tiempo, es decir, 15 minutos, el controlador puede continuar y conmutar desde las configuraciones de delta a estrella aunque la limitación de tiempo para el umbral 615 no se satisface, por ejemplo, el valor de temporizador es solo 45 minutos. Indicado de manera diferente, el controlador puede asociar temporizadores respectivos a cada uno de los umbrales de modo que las regiones A-E
- 40 definidas por los umbrales pueden considerarse independientemente.

- Aunque no se muestra en la figura 6, la lógica usada por el controlador para determinar cuándo conmutar de estrella a delta también puede dividirse para dar una pluralidad de regiones. Por ejemplo, la región E puede dividirse por diferentes umbrales en los que cada umbral tiene una limitación de tiempo que disminuye a medida que los valores
- 45 de potencia aumentan. Por ejemplo, la salida de generador puede necesitar estar solo dentro de 850-900 kW durante 5 minutos antes de la conmutación de estrella a delta pero la salida puede necesitar estar dentro de 900-950 kW durante 1 minuto antes de la conmutación. Personalizar la limitación de tiempo puede permitir que el controlador conmute de manera preventiva de estrella a delta para reducir la oportunidad de que el generador se desacelere si las condiciones del viento permiten que el generador produzca potencia por encima del umbral de restricción de potencia
- 50 en estrella.

- En una realización, el controlador puede ajustar las limitaciones de tiempo basándose en la turbulencia experimentada por la turbina eólica. Tal y como se usa en el presente documento, la turbulencia es la variación de la velocidad del viento a lo largo de un periodo de tiempo establecido. Por tanto, una mayor turbulencia puede indicar que la velocidad
- 55 del viento tiene una variación mayor, es decir, es menos predecible. Cuando se experimenta mayor turbulencia, el controlador puede aumentar las limitaciones de tiempo para los umbrales respectivos para reducir la probabilidad de que la turbina conmute entre configuraciones eléctricas rápidamente, lo que puede fatigar la turbina de manera innecesaria. Adicional o alternativamente, el controlador puede cambiar los valores de potencia asociados con el

umbral basándose en la turbulencia. Por ejemplo, el controlador puede reducir los valores de potencia de los umbrales mostrados en la tabla 1 de manera que las condiciones del viento turbulento no desencadenan la conmutación de, por ejemplo, delta a estrella. Además de cambiar los criterios para que sean más estrictos, el controlador puede disminuir la limitación de tiempo (o aumentar los intervalos de potencia) a medida que disminuye la turbulencia. De esta manera, el controlador puede ajustar los umbrales de conmutación basándose en las condiciones de entorno.

La figura 7 es un diagrama de flujo para ajustar la tasa a la que una turbina conmuta entre configuraciones de generador, según una realización presentada en el presente documento. Además de cambiar los criterios usados cuando se conmutan configuraciones eléctricas, el controlador puede considerar también datos históricos para cambiar la frecuencia o tasa a la que una turbina conmuta entre configuraciones. Por ejemplo, en el bloque 705, el controlador puede rastrear el número de conmutaciones de configuración de generador, es decir, cada vez que la turbina conmuta de estrella a delta o de delta a estrella, para identificar un número total de conmutaciones para la turbina. El número de conmutaciones total también puede incluir la conmutación usada al detener o reiniciar la turbina. Por ejemplo, cuando se desconecta la turbina para el mantenimiento o debido a velocidades del viento inseguras, el controlador puede activar los relés y desconectar la red eléctrica del generador. Como tal, en una realización, el controlador también puede contar estas conmutaciones (y desconexiones) en el recuento total.

En el bloque 710, el controlador compara las conmutaciones totales de la turbina con un presupuesto de conmutación basándose en la antigüedad actual de la turbina. El presupuesto de conmutación puede basarse en el número de conmutaciones total de otras turbinas que son de la misma o similar antigüedad que la turbina. El presupuesto también puede predefinirse basándose en la vida útil esperada de la turbina. Si la turbina está diseñada para durar treinta años y experimentar treinta mil conmutaciones durante este tiempo, el controlador puede usar la antigüedad actual de la turbina para determinar el presupuesto. Por ejemplo, si la turbina eólica es de cinco años de antigüedad, la turbina puede tener un presupuesto de cinco mil conmutaciones.

En el bloque 715, el controlador determina si el número de conmutaciones supera el presupuesto. En una realización, el presupuesto de conmutación se establece para reducir la probabilidad de que la turbina se desgaste o necesidad de reparaciones mayores antes de la vida útil de treinta años. Como se ha tratado anteriormente, las configuraciones eléctricas de conmutación pueden fatigar la turbina aunque la velocidad de rotor se mantiene en una velocidad sustancialmente constante durante la conmutación, tal como se muestra en las figuras 4A y 4B. Por consiguiente, si los componentes estructurales están diseñados para soportar treinta mil conmutaciones, una turbina que conmuta más de este número aumenta la probabilidad de fallo estructural antes de la vida útil de treinta años. Como tal, en el bloque 720, el controlador actualiza los criterios de conmutación para reducir la tasa de conmutación si se supera el presupuesto de conmutación. Específicamente, el controlador puede aumentar las limitaciones de tiempo asociadas con los umbrales (o regiones) usados para determinar cuándo conmutar entre las configuraciones eléctricas. Adicional o alternativamente, el controlador puede reducir los valores de potencia asociados con los umbrales. Indicado de manera diferente, el controlador puede realizar las mismas acciones restrictivas para reducir la probabilidad de conmutación de configuraciones tal como se hace durante periodos de alta turbulencia. Al hacer esto, puede disminuirse la tasa de conmutación asociada con la turbina que puede, con el tiempo, llevar a la turbina dentro del presupuesto de conmutación.

En una realización, si la turbina supera el presupuesto de conmutación, el controlador puede mantener la turbina en la configuración en delta independientemente de la salida de generador actual o velocidad del viento. Aunque la configuración en delta es menos eficiente que la configuración de estrella en velocidades del viento bajas, la configuración en delta no provoca que la turbina se desacelere. Por ejemplo, si el controlador mantiene un generador de 3 MW en una configuración de estrella, durante periodos de generación de potencia máxima, el generador puede estar limitado a solo 950 kW de potencia (es decir, el generador podría haber producido solo un tercio de la potencia si la turbina estuviera en la configuración en delta) lo que es más ineficiente que hacer funcionar el generador en una configuración en delta a velocidades del viento bajas. Como tal, cuando la turbina supera el presupuesto de conmutación, el controlador puede forzar la turbina a la configuración en delta y detener temporalmente el uso de los umbrales para conmutar entre configuraciones eléctricas. En este ejemplo, el controlador reduce la tasa de conmutación a cero hasta que el número de conmutaciones total está dentro del presupuesto de conmutación.

Después de ajustar los criterios de conmutación, el método 700 vuelve al bloque 705 para contar conmutaciones adicionales y determinar si el nuevo total supera el presupuesto de conmutación. Si el número de conmutaciones total no supera el presupuesto, en el bloque 730 el controlador puede determinar si el número de conmutaciones está por debajo del presupuesto. Por ejemplo, la turbina eólica puede permitir aumentar la tasa de conmutación y aún estar dentro de las treinta mil conmutaciones a lo largo de la vida útil de la turbina. Por consiguiente, en el bloque 725, el controlador puede actualizar los criterios de conmutación para aumentar la tasa de conmutación. Por ejemplo, con referencia a la figura 6, las limitaciones de tiempo o intervalos de potencia asociados con cada región pueden cambiarse de manera que pasa a ser más fácil conmutar de estrella a delta o viceversa. Permitir que la turbina conmute más libremente entre las configuraciones eléctricas puede aumentar la eficiencia de la turbina, y por tanto, aumentar la salida de potencia mientras que está dentro del presupuesto de conmutación.

Tal y como se muestra, el método 700 incluye una técnica para alterar la frecuencia o tasa de conmutación de una turbina con el fin de mantener el número de conmutaciones total dentro de un presupuesto de conmutación. El

presupuesto de conmutación puede ser una tasa de conmutación predefinida (por ejemplo, 3 conmutaciones por día) o un número total de conmutaciones basándose en la antigüedad actual de la turbina. El presupuesto de conmutación puede basarse en datos históricos medidos de otras turbinas o datos experimentales tales como una simulación. Si la tasa de conmutación actual o el número de conmutaciones actual varía del presupuesto, el controlador puede ajustar los criterios de conmutación con el fin de realinear la tasa de conmutación con el presupuesto de conmutación. El método 700 se puede repetir de manera continua o en intervalos predefinidos (por ejemplo, una vez al día) para determinar si la turbina está funcionando dentro del presupuesto de conmutación.

En lo anterior, se hizo referencia a realizaciones presentadas en esta divulgación. Sin embargo, el alcance de la presente divulgación no se limita a realizaciones descritas específicas. En cambio, cualquier combinación de las características y elementos descritos, ya se relacione a realizaciones diferentes o no, contempla implementar y poner en práctica las realizaciones contempladas. Además, aunque realizaciones divulgadas en el presente documento pueden lograr ventajas con respecto a otras soluciones posibles o con respecto a la técnica anterior, si se logra o no una ventaja particular por una realización dada no es limitante del alcance de la presente divulgación. Por tanto, los aspectos anteriores, las características, realizaciones y ventajas son meramente ilustrativos y no deben considerarse elementos o limitaciones de las reivindicaciones adjuntas salvo cuando así se indique explícitamente en una reivindicación o reivindicaciones. Del mismo modo, la referencia a "la invención" no deberá interpretarse como una generalización de ninguna materia objeto inventiva divulgada en el presente documento y no deberá considerarse como un elemento o limitación de las reivindicaciones adjuntas, salvo cuando así se indique explícitamente en una reivindicación o reivindicaciones.

Tal como se apreciará por un experto en la técnica, las realizaciones divulgadas en el presente documento pueden llevarse a cabo como un sistema, método o producto de programa informático. Por consiguiente, los aspectos pueden tomar la forma de una realización de hardware completamente, una realización de software completamente (incluyendo firmware, software residente, microcódigo, etc.) o una realización que combina aspectos de software y hardware que pueden denominarse todos generalmente en el presente documento como "circuito", "módulo" o "sistema". Además, los aspectos pueden tomar la forma de un producto de programa informático llevado a cabo en uno o más medio(s) legible(s) por ordenador que tiene(n) código de programa legible por ordenador llevado a cabo sobre los mismos.

Puede utilizarse cualquier combinación de uno o más medio(s) legible(s) por ordenador. El medio legible por ordenador puede ser un medio de señal legible por ordenador o un medio de almacenamiento legible por ordenador. Un medio de almacenamiento legible por ordenador puede ser, por ejemplo, pero sin limitación, un sistema, aparato o dispositivo, electrónico, magnético, óptico, electromagnético, de infrarrojos, o semiconductor, o cualquier combinación adecuada de lo anterior. Más ejemplos específicos (una lista no exhaustiva) del medio de almacenamiento legible por ordenador incluirían los siguientes: una conexión eléctrica que tiene uno o más cables, un disquete de ordenador portátil, un disco duro, una memoria de acceso aleatorio (RAM), una memoria de solo lectura (ROM), una memoria de solo lectura programable y borrable (EPROM o memoria rápida), una fibra óptica, una memoria de solo lectura de disco compacto portátil (CD-ROM), un dispositivo de almacenamiento óptico, un dispositivo de almacenamiento magnético, o cualquier combinación adecuada de los anteriores. En el contexto de este documento, un medio de almacenamiento legible por ordenador puede ser cualquier medio tangible que puede contener, o almacenar un programa para usar mediante o en conexión con un sistema, aparato o dispositivo de ejecución de instrucción.

Un medio de señal legible por ordenador puede incluir una señal de datos propagada con código de programa legible por ordenador implementado en el mismo, por ejemplo, en la banda de base o como parte de una onda portadora. Una señal propagada de este tipo puede tomar cualquiera de una variedad de formas, incluyendo, pero sin limitación, electromagnética, óptica, o cualquier combinación adecuada de las mismas. Un medio de señal legible por ordenador puede ser cualquier medio legible por ordenador que no es un medio de almacenamiento legible por ordenador y que puede comunicar, propagar o transportar un programa para su uso mediante o en conexión con un sistema, aparato o dispositivo de ejecución de instrucción.

Un código de programa llevado a cabo en un medio legible por ordenador puede transmitirse usando cualquier medio apropiado, incluyendo pero no limitado a inalámbrico, por cable, cable de fibra óptica, RF, etc., o cualquier combinación adecuada de los anteriores.

Un código de programa informático para llevar a cabo operaciones para aspectos de la presente divulgación puede escribirse en cualquier combinación de uno o más lenguajes de programación, incluyendo un lenguaje de programación orientado a objetos tal como Java, Smalltalk, C++ o similares y lenguajes de programación por procedimiento convencional, tal como el lenguaje de programación "C" o lenguajes de programación similares. El código de programa puede ejecutarse completamente en el ordenador del usuario, parcialmente en el ordenador del usuario, como un paquete de software independiente, parcialmente en el ordenador del usuario y parcialmente en un ordenador remoto o completamente en el ordenador remoto o servidor. En el último escenario, el ordenador remoto puede conectarse al ordenador de usuario a través de cualquier tipo de red, incluyendo una red de área local (LAN) o una red de área amplia (WAN), o puede realizarse la conexión a un ordenador externo (por ejemplo, a través de Internet usando un proveedor de servicios de Internet).

Los aspectos de la presente divulgación se describen a continuación con referencia a ilustraciones de diagramas de flujo y/o diagramas de bloques de métodos, aparato (sistemas) y productos de programa informáticos según realizaciones presentadas en esta divulgación. Se entenderá que cada bloque de las ilustraciones de diagrama de flujo y/o diagramas de bloques, y combinaciones de bloques en las ilustraciones de diagrama de flujo y/o diagramas de bloques, pueden implementarse por instrucciones de programa informático. Estas instrucciones de programa informático pueden proporcionarse a un procesador de un ordenador con fines generales, ordenador con fines especiales u otro aparato de procesamiento de datos programable para producir una máquina, de manera que las instrucciones, que se ejecutan por medio del procesador del ordenador u otro aparato de procesamiento de datos programable, crean medios para implementar las funciones/acciones especificados en el diagrama de flujo y/o bloque o bloques de diagrama de bloques.

Estas instrucciones de programa informático también pueden almacenarse en un medio legible por ordenador que puede dirigir un ordenador, otro aparato de procesamiento de datos programable u otros dispositivos para funcionar de una manera particular, de manera que las instrucciones almacenadas en el medio legible por ordenador producen un artículo de fabricación que incluye instrucciones que implementan la función/acción especificado en el diagrama de flujo y/o bloque o bloques de diagrama de bloques.

Las instrucciones de programa informático también pueden cargarse en un ordenador, otro aparato de procesamiento de datos programable, u otros dispositivos para provocar una serie de etapas de funcionamiento que van a realizarse en el ordenador, otro aparato programable u otros dispositivos para producir un proceso implementado por ordenador de manera que las instrucciones que se ejecutan en el ordenador u otro aparato programable proporcionan procesos para implementar las funciones/acciones especificadas en el diagrama de flujo y/o bloque o bloques de diagrama de bloques.

El diagrama de flujo y diagramas de bloques en las figuras ilustran la arquitectura, funcionalidad y funcionamiento de implementaciones posibles de sistemas, métodos y productos de programa informáticos según diversas realizaciones. En este sentido, cada bloque en el diagrama de flujo o diagramas de bloques pueden representar un módulo, segmento o porción de código, que comprende una o más instrucciones ejecutables para implementar la(s) función/funciones lógica(s) especificada(s). También debe observarse que, en algunas implementaciones alternativas, las funciones indicadas en el bloque pueden producirse fuera del orden indicado en las figuras. Por ejemplo, dos bloques mostrados en sucesión, de hecho, pueden ejecutarse de manera sustancialmente concurrente, o los bloques pueden ejecutarse a veces en el orden inverso, dependiendo de la funcionalidad implicada. También debe observarse que cada bloque de los diagramas de bloques y/o ilustración de diagrama de flujo, y combinaciones de bloques en los diagramas de bloques y/o ilustración de diagrama de flujo, pueden implementarse mediante sistemas basados en hardware de fines especiales que realizan las funciones o acciones especificadas, o combinaciones de instrucciones informáticas y de hardware de fines especiales.

En vista de lo anterior, el alcance de la presente divulgación se determina mediante las reivindicaciones a continuación.

REIVINDICACIONES

1. Un controlador para una turbina eólica, comprendiendo el controlador lógica de control configurada para:

- 5 tras determinar conmutar entre configuraciones eléctricas cuando funciona a una velocidad de rotor previa a la conmutación, reducir una potencia de salida producida por un generador en la turbina eólica;
- mientras se reduce la potencia de salida, ajustar un parámetro asociado con un rotor de la turbina eólica para mantener la velocidad del rotor a o por encima de al menos una de la velocidad de rotor previa a la conmutación y una velocidad de rotor posterior a la conmutación deseada;
- 10 tras determinar que la potencia de salida alcanza un umbral de potencia predeterminado, conmutar entre una primera configuración eléctrica asociada con el generador y una segunda configuración eléctrica;
- 15 tras conmutar a la segunda configuración eléctrica, aumentar la potencia de salida producida por el generador en la turbina eólica; y
- mientras se aumenta la potencia de salida, ajustar el parámetro asociado con el rotor para mantener la velocidad del rotor a o por encima de al menos una de la velocidad de rotor previa a la conmutación y la velocidad de rotor posterior a la conmutación deseada
- 20 caracterizado porque determinar conmutar de la primera configuración eléctrica a la segunda configuración eléctrica comprende determinar que la potencia de salida del generador satisface el umbral de potencia durante un periodo de tiempo predefinido.
- 25

2. El controlador de la reivindicación 1, en el que determinar conmutar de la primera configuración eléctrica a la segunda configuración eléctrica comprende evaluar la potencia de salida del generador a una pluralidad de umbrales de potencia diferentes asociados con valores de potencia respectivos, cada umbral de potencia está asociado con una limitación de tiempo diferente que determina si conmutar de la primera configuración eléctrica a la segunda configuración eléctrica.

30

3. El controlador de la reivindicación 1, en el que la primera configuración eléctrica es una configuración en delta y la segunda configuración eléctrica es una configuración de estrella.

4. El controlador de la reivindicación 1, en el que la lógica de control está configurada para:

 aumentar la potencia de salida del generador hasta un valor de potencia de salida deseado correspondiente a la segunda configuración eléctrica, en el que, cuando el generador emite el valor de potencia de salida deseado, la lógica de control hace funcionar la turbina eólica a la velocidad de rotor posterior a la conmutación deseada.

5. El controlador de la reivindicación 1, en el que ajustar el parámetro asociado con el rotor para mantener la velocidad del rotor a o por encima de la velocidad de rotor actual comprende al menos uno de (i) cambiar un paso de una pala en el rotor para compensar una carga reducida asociada con el generador y (ii) frenar el rotor.

6. El controlador de la reivindicación 1, en el que la lógica de control está configurada para:

 rastrear el número de conmutaciones entre las configuraciones eléctricas primera y segunda;

 comparar el número de conmutaciones con un presupuesto de conmutación; y

 tras determinar que el número de conmutaciones supera el presupuesto de conmutación, ajustar al menos un criterio de conmutación para reducir una tasa de conmutación asociada con la turbina eólica.

7. Una turbina eólica, que comprende:

 un generador;

 un rotor acoplado al generador; y

 un controlador configurado para:

 tras determinar conmutar entre configuraciones eléctricas cuando funciona a una velocidad de rotor previa a la conmutación, reducir una potencia de salida producida por el generador,

 mientras se reduce la potencia de salida, ajustar un parámetro asociado con el rotor para mantener la velocidad del rotor a o por encima de al menos una de la velocidad de rotor previa a la conmutación y una velocidad de

rotor posterior a la conmutación deseada,

tras determinar que la potencia de salida alcanza un umbral de potencia, conmutar entre una primera configuración eléctrica asociada con el generador y una segunda configuración eléctrica,

tras conmutar a la segunda configuración eléctrica, aumentar la potencia de salida producida por el generador, y

mientras se aumenta la potencia de salida, ajustar el parámetro asociado con el rotor para mantener la velocidad del rotor a o por encima de al menos una de la velocidad de rotor previa a la conmutación y la velocidad de rotor posterior a la conmutación deseada

caracterizada porque determinar conmutar de la primera configuración eléctrica a la segunda configuración eléctrica comprende determinar que la potencia de salida del generador satisface el umbral de potencia durante un periodo de tiempo predefinido.

8. La turbina eólica de la reivindicación 7, en la que determinar conmutar de la primera configuración eléctrica a la segunda configuración eléctrica comprende evaluar la potencia de salida del generador a una pluralidad de umbrales de potencia diferentes que definen una pluralidad de intervalos de potencia diferentes, cada intervalo de potencia está asociado con una limitación de tiempo diferente que determina si conmutar de la primera configuración eléctrica a la segunda configuración eléctrica.

9. La turbina eólica de la reivindicación 7, en la que la primera configuración eléctrica es una configuración en delta y la segunda configuración eléctrica es una configuración de estrella.

10. La turbina eólica de la reivindicación 7, en la que la lógica de control está configurada para:

aumentar la potencia de salida del generador hasta un valor de potencia de salida deseado correspondiente a la segunda configuración eléctrica, en la que, cuando el generador emite el valor de potencia de salida deseado, el controlador hace funcionar la turbina eólica a la velocidad de rotor posterior a la conmutación deseada.

11. La turbina eólica de la reivindicación 7, en la que ajustar el parámetro asociado con el rotor para mantener la velocidad del rotor a o por encima de la velocidad de rotor actual comprende al menos uno de (i) cambiar un paso de una pala en el rotor para compensar una carga reducida asociada con el generador y (ii) frenar el rotor.

12. La turbina eólica de la reivindicación 7, en la que el controlador está configurado para:

rastrear el número de conmutaciones entre las configuraciones eléctricas primera y segunda;

comparar el número de conmutaciones con un presupuesto de conmutación; y

tras determinar que el número de conmutaciones supera el presupuesto de conmutación, ajustar al menos un criterio de conmutación para reducir una tasa de conmutación asociada con la turbina eólica.

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

tras determinar conmutar entre configuraciones eléctricas cuando funciona a una velocidad de rotor previa a la conmutación, reducir una potencia de salida producida por un generador en la turbina eólica;

mientras se reduce la potencia de salida, ajustar, mediante el funcionamiento de uno o más procesadores informáticos, un parámetro asociado con un rotor de la turbina eólica para mantener la velocidad del rotor a o por encima de al menos una de la velocidad de rotor previa a la conmutación y una velocidad de rotor posterior a la conmutación deseada;

tras determinar que la potencia de salida alcanza un umbral de potencia, conmutar entre una primera configuración eléctrica asociada con el generador y una segunda configuración eléctrica;

tras conmutar a la segunda configuración eléctrica, aumentar la potencia de salida producida por el generador en la turbina eólica; y

mientras se aumenta la potencia de salida, ajustar el parámetro asociado con el rotor para mantener la velocidad del rotor a o por encima de al menos una de la velocidad de rotor previa a la conmutación y la velocidad de rotor posterior a la conmutación deseada

caracterizado porque determinar conmutar de la primera configuración eléctrica a la segunda configuración eléctrica comprende determinar que la potencia de salida del generador satisface el umbral de potencia durante

un periodo de tiempo predefinido.

- 5 14. El método de la reivindicación 13, en el que determinar la conmutación de la primera configuración eléctrica a la segunda configuración eléctrica comprende evaluar la potencia de salida del generador a una pluralidad de umbrales de potencia diferentes que definen una pluralidad de intervalos de potencia diferentes, cada intervalo de potencia está asociado con una limitación de tiempo diferente que determina si conmutar de la primera configuración eléctrica a la segunda configuración eléctrica.
- 10 15. El método de la reivindicación 13, en el que la primera configuración eléctrica es una configuración en delta y la segunda configuración eléctrica es una configuración de estrella.
- 15 16. El método de la reivindicación 13, en el que ajustar el parámetro asociado con el rotor para mantener la velocidad del rotor a o por encima de la velocidad de rotor actual comprende al menos uno de (i) cambiar un paso de una pala en el rotor para compensar una carga reducida asociada con el generador y (ii) frenar el rotor.
17. El método de la reivindicación 13, que comprende además:
- 20 rastrear el número de conmutaciones entre las configuraciones eléctricas primera y segunda;
- comparar el número de conmutaciones con un presupuesto de conmutación; y
- tras determinar que el número de conmutaciones supera el presupuesto de conmutación, ajustar al menos un criterio de conmutación para reducir una tasa de conmutación asociada con la turbina eólica.
- 25

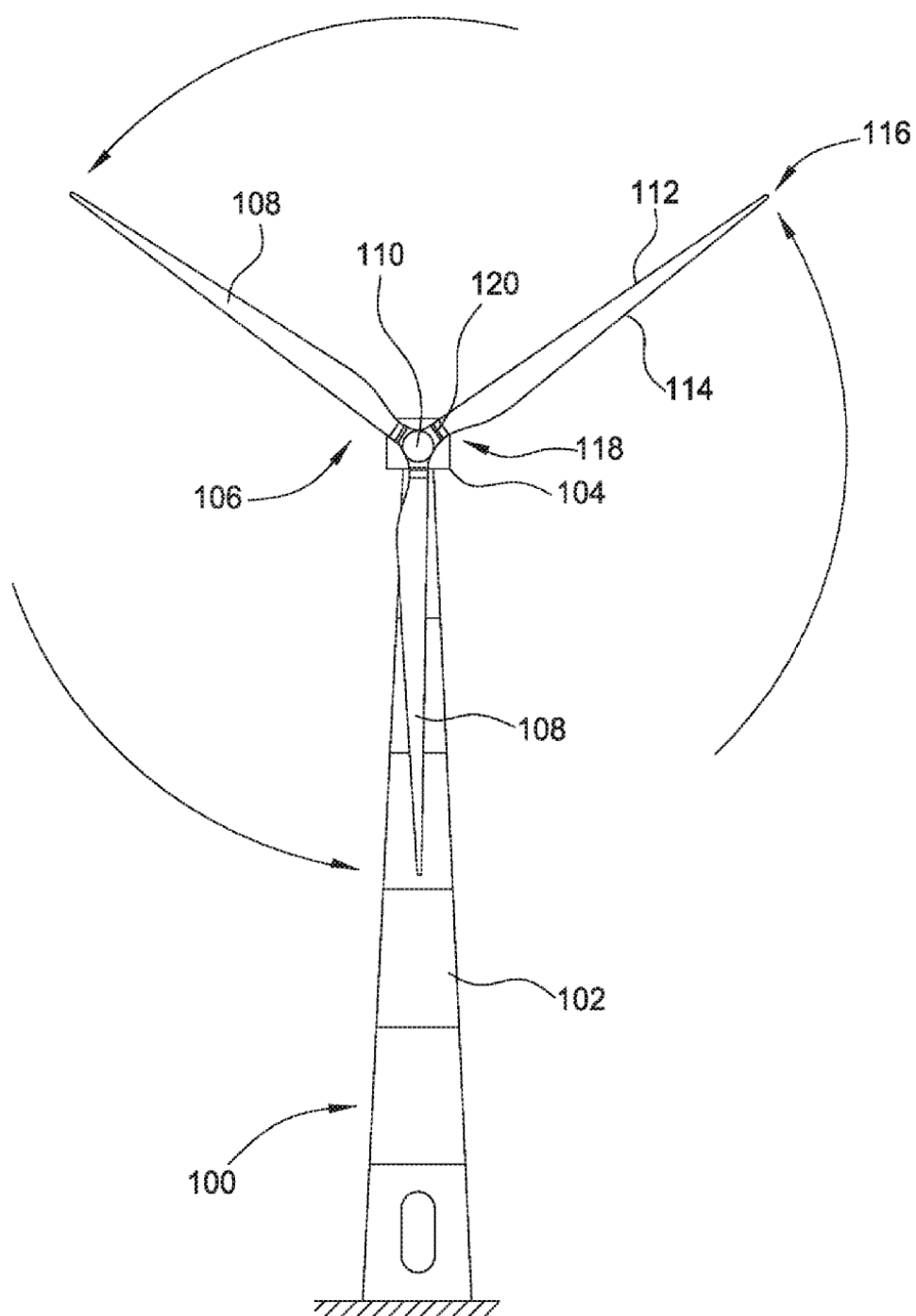


FIG. 1

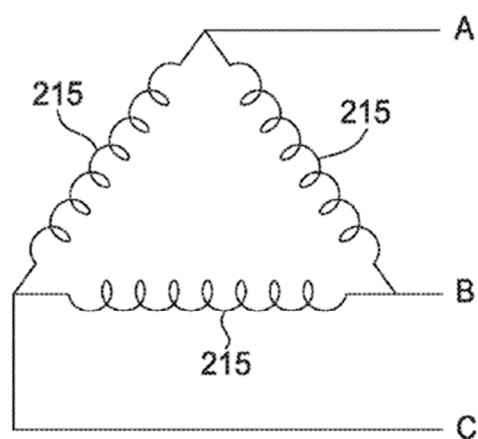


FIG. 2A

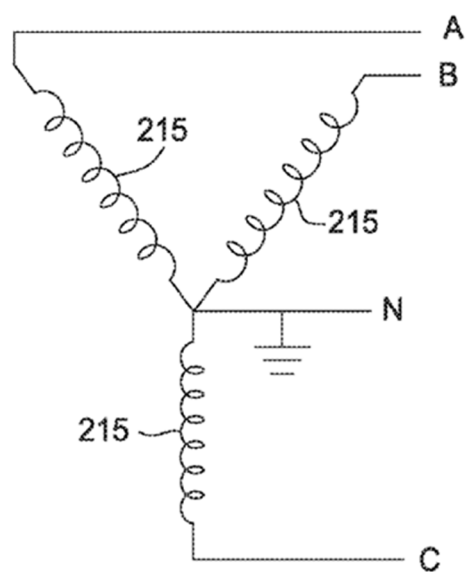


FIG. 2B

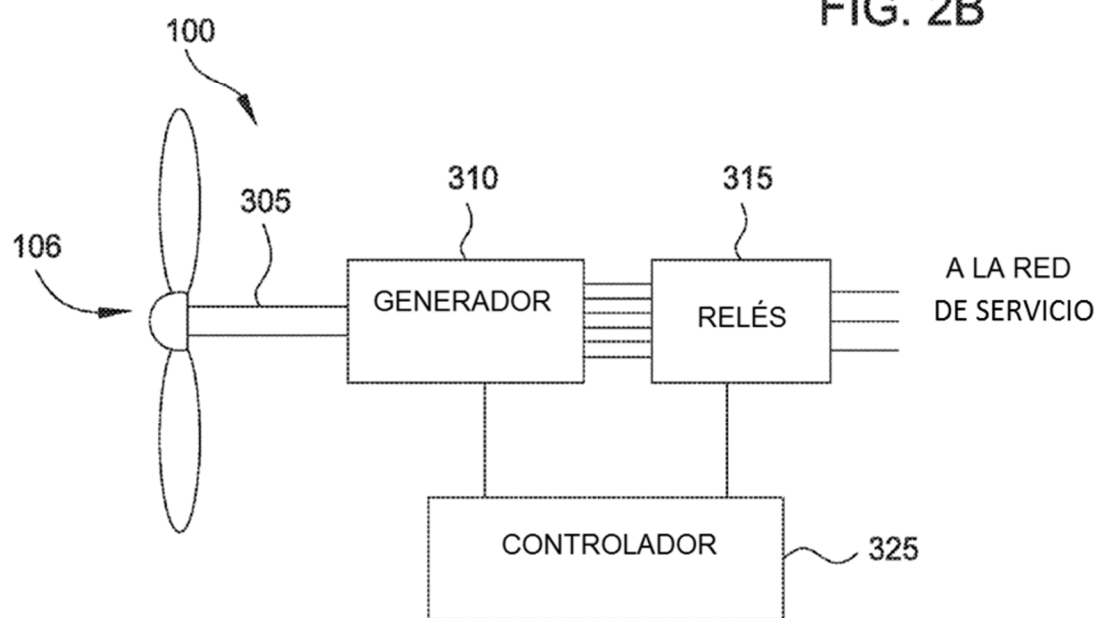


FIG. 3

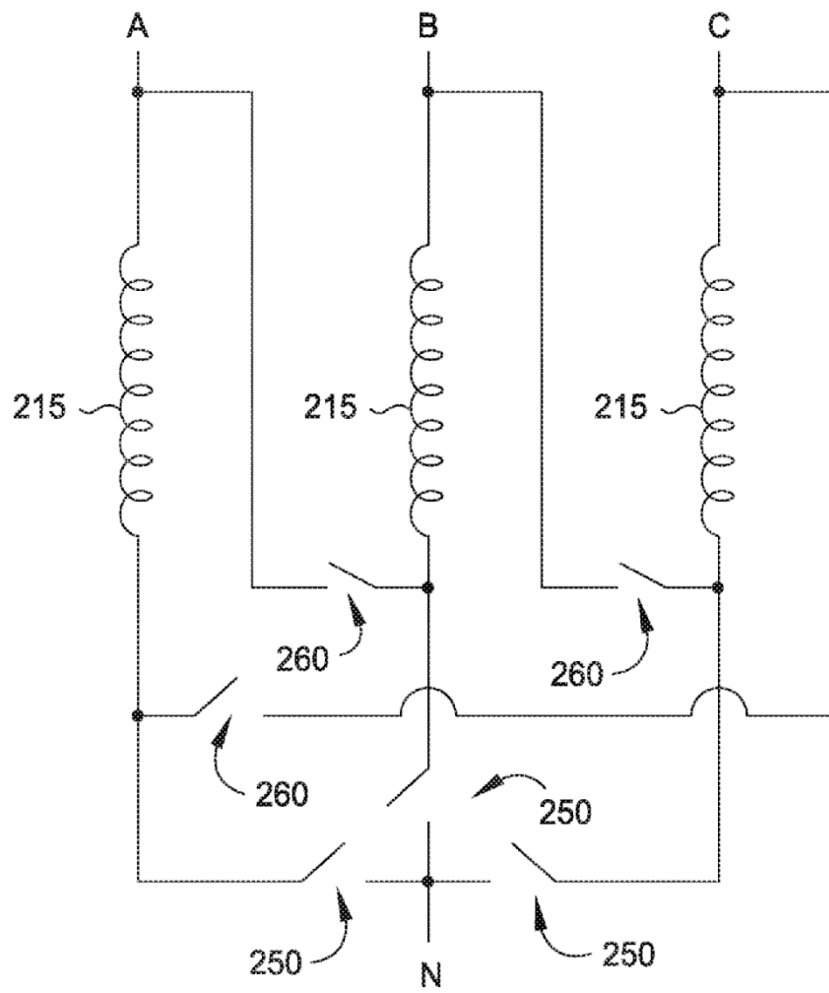


FIG. 2C

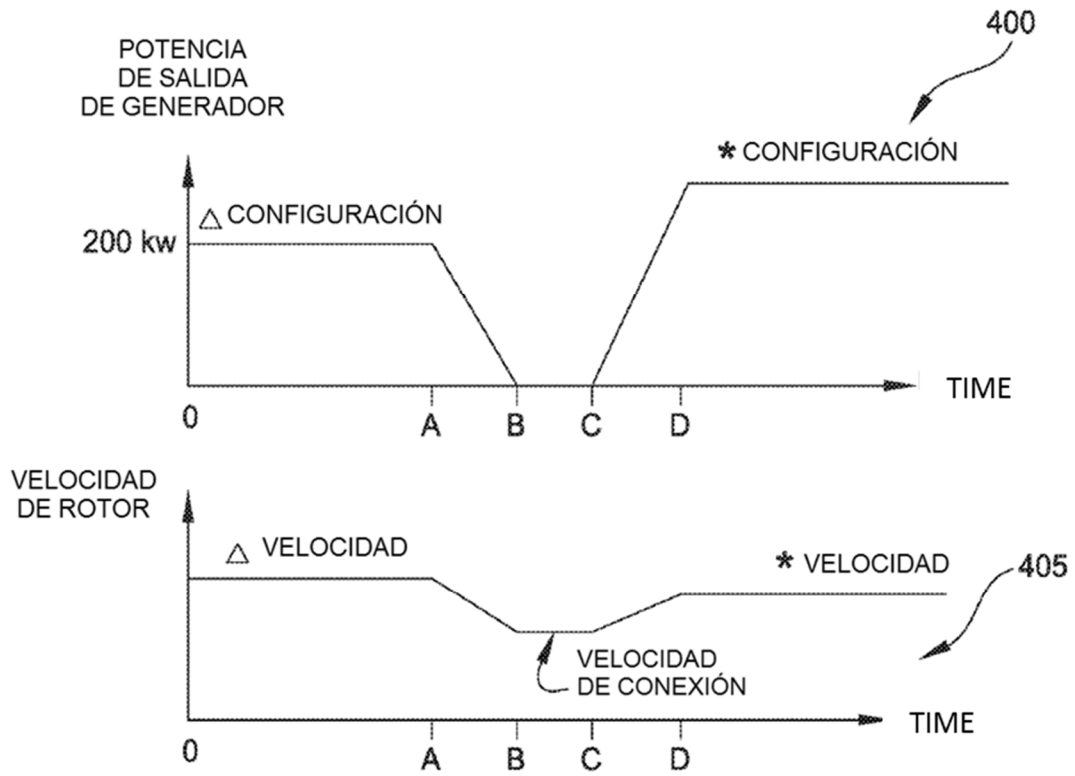


FIG. 4A

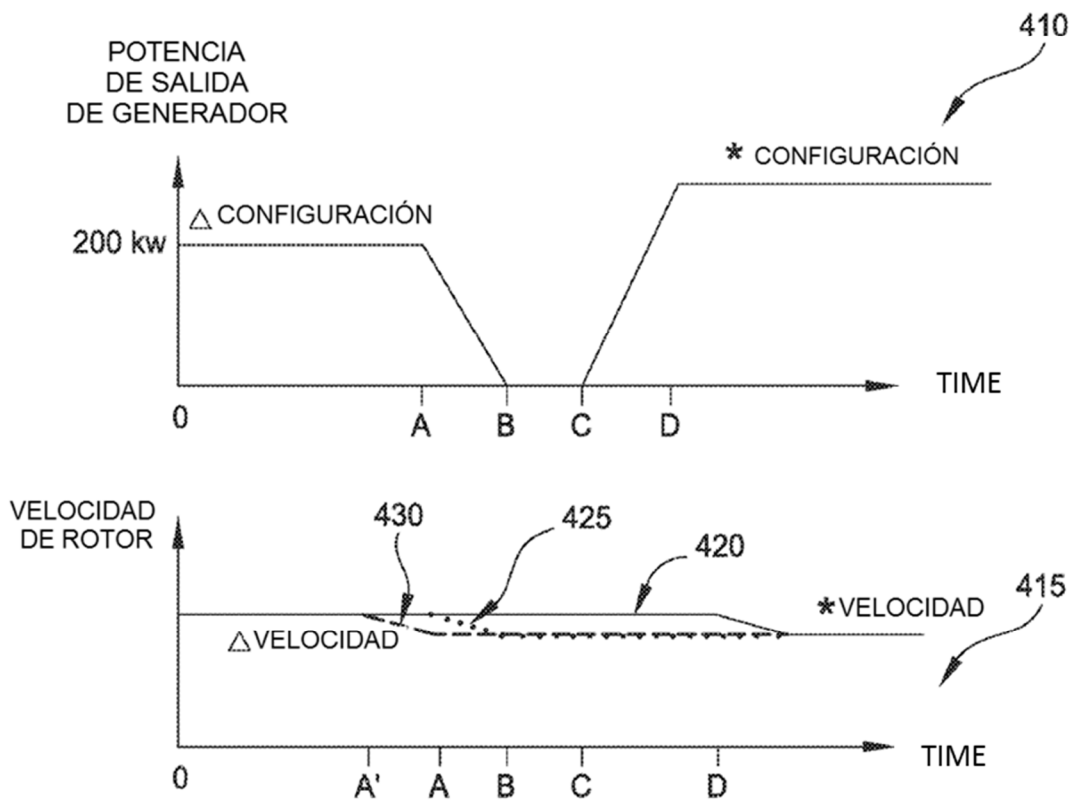


FIG. 4B

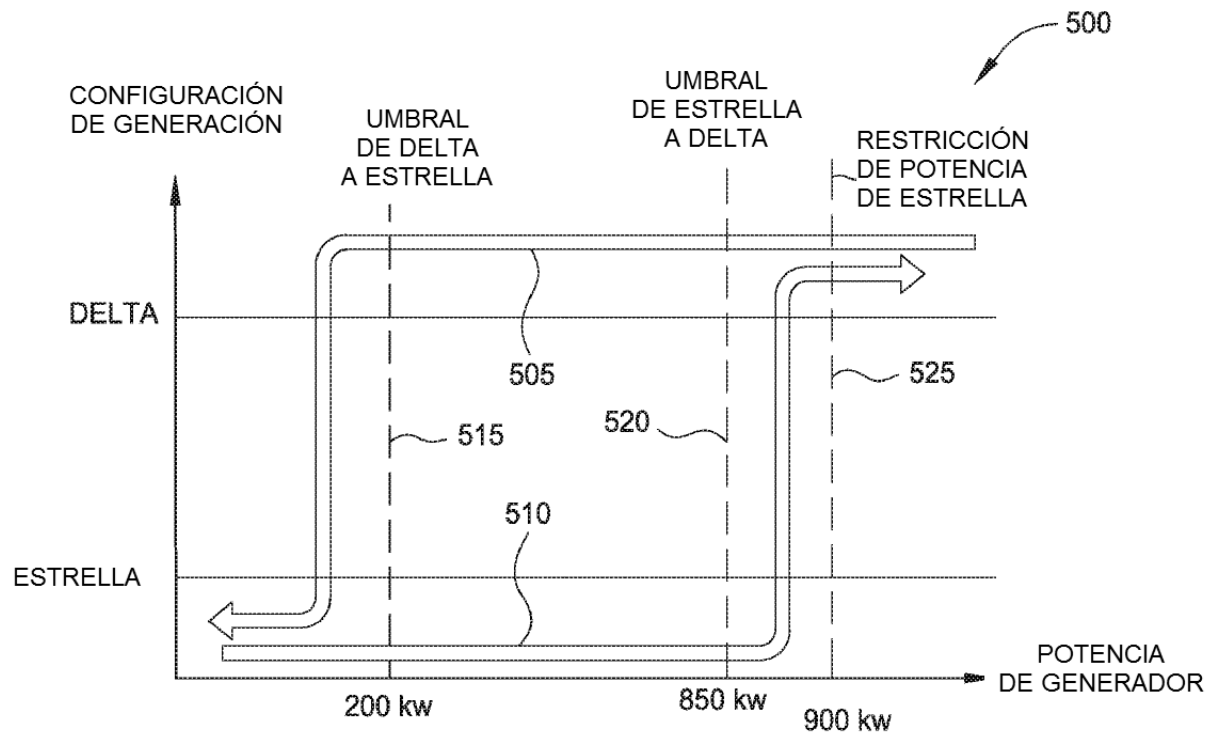


FIG. 5

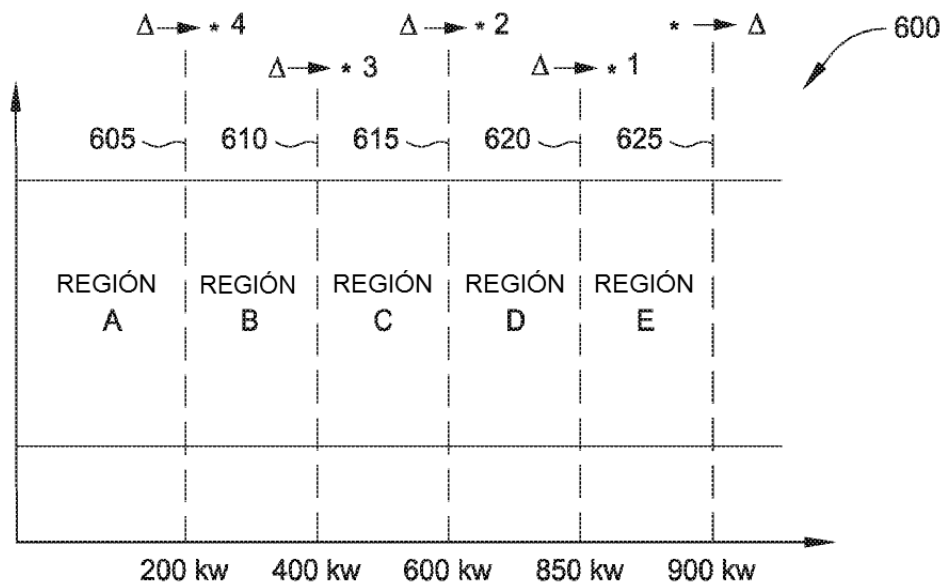


FIG. 6

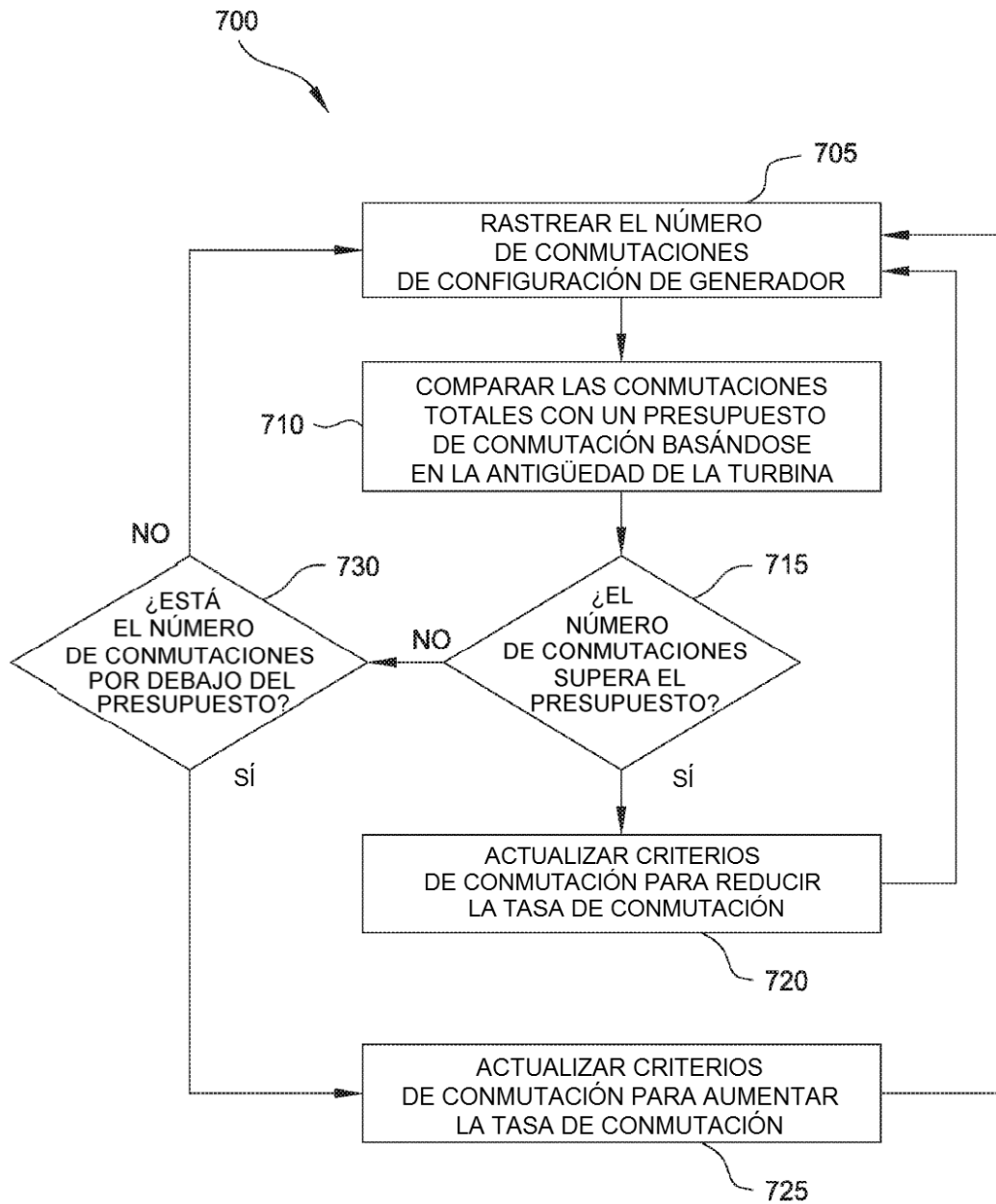


FIG. 7