

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 900 760**

51 Int. Cl.:

H02J 3/24 (2006.01)

F03D 9/25 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **07.12.2016** **PCT/DK2016/050414**

87 Fecha y número de publicación internacional: **22.06.2017** **WO17101941**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.12.2016** **E 16815552 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.11.2021** **EP 3391497**

54 Título: **Modulación de salida de planta de energía eólica usando diferentes componentes de modulación de frecuencia para amortiguar oscilaciones de red**

30 Prioridad:

17.12.2015 DK 201570831

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

18.03.2022

73 Titular/es:

VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)

Hedeager 42

8200 Aarhus N, DK

72 Inventor/es:

KJÆR, PHILIP CARNE y

IOV, FLORIN

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 900 760 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

Modulación de salida de planta de energía eólica usando diferentes componentes de modulación de frecuencia para amortiguar oscilaciones de red

5

Antecedentes**Campo de la invención**

Las realizaciones presentadas en esta descripción generalmente se refieren a técnicas para hacer funcionar turbinas eólicas de una planta de energía eólica para proporcionar una salida de potencia eléctrica modulada a una red eléctrica conectada mientras se evita excitar oscilaciones mecánicas dentro de los componentes de las turbinas eólicas.

Descripción de la técnica relacionada

15

Las redes de generación y distribución de potencia modernas dependen cada vez más de fuentes de energía renovables, tales como turbinas eólicas. En algunos casos, las turbinas eólicas pueden ser sustitutas de los generadores convencionales basados en combustibles fósiles. Más allá de simplemente generar y suministrar energía eléctrica a la red eléctrica, las turbinas eólicas pueden ser responsables de contribuir a la estabilidad de red a través de, por ejemplo, regulación de frecuencia y/o regulación de tensión. Sin embargo, las condiciones de funcionamiento de los generadores de turbina eólica, así como las variaciones naturales en las condiciones de viento, pueden afectar a la capacidad de las turbinas eólicas para suministrar energía de manera predecible. Adicionalmente, las condiciones de viento a veces pueden ser inadecuadas para generar energía.

Las redes eléctricas normalmente abarcan un área geográfica significativa y pueden conectarse con un gran número de generadores eléctricos. Las máquinas síncronas individuales o grupos de máquinas síncronas durante el funcionamiento pueden provocar que se desarrollen oscilaciones de potencia entre áreas de baja frecuencia entre diferentes regiones de la red eléctrica. Para mitigar los efectos de estas oscilaciones de potencia de baja frecuencia, pueden requerirse o solicitarse plantas de energía eólica y otras instalaciones de generación conectadas con la red eléctrica para proporcionar funciones de estabilización del sistema de energía (PSS) o de amortiguación para la red eléctrica modulando sus salidas de potencia para inyectar potencia oscilatoria de baja frecuencia en contrafase con respecto a las oscilaciones de potencia. Para plantas de energía eólica, la frecuencia de modulación solicitada puede corresponder a frecuencias a las que las turbinas eólicas (o componentes de las mismas) son más susceptibles a oscilaciones mecánicas indeseables.

35

Los documentos de la técnica anterior relacionada muestran;

el documento WO2014/121794 se refiere al método para hacer funcionar una planta de energía, con al menos un generador de turbina eólica dispuesto para suministrar potencia a una red eléctrica, al menos un dispositivo de almacenamiento de energía dispuesto para suministrar potencia a la red eléctrica, y un controlador de planta de energía, comprendiendo el método, medir repetidamente conjuntos de medición de al menos un parámetro eléctrico de la red eléctrica, y calcular, con respecto a los conjuntos de medición del al menos un parámetro eléctrico, un cambio en la potencia activa y/o un cambio requerido en la potencia reactiva en un punto de acoplamiento común, y calcular y enviar una primera señal de referencia de control al al menos un generador de turbina eólica y una segunda señal de referencia de control al al menos un dispositivo de almacenamiento de energía, para proporcionar funcionalidades de servicio auxiliares a la red eléctrica.

El documento WO2012/041527 proporciona un parque de generación de energía que comprende una salida de potencia para proporcionar potencia de salida eléctrica a una red eléctrica. Un dispositivo de generación de potencia comprende un dispositivo convertidor configurado para recibir potencia de entrada de un generador de potencia y proporcionar, en respuesta a esto, la potencia de salida eléctrica a la potencia de salida. El parque de generación de energía comprende además un controlador que está configurado para recibir una señal de indicación de oscilación indicativa de una oscilación de potencia en la red eléctrica, estando configurado además el controlador para proporcionar una señal de control de amortiguación en respuesta a la señal de indicación de oscilación; estando configurado el dispositivo convertidor para modular la potencia de salida eléctrica en respuesta a la señal de control de amortiguación para amortiguar la oscilación de potencia en la red eléctrica.

El documento WO2015/085465 da a conocer un sistema y un método para reducir las cargas de oscilación de una turbina eólica inducidas por alta turbulencia y/o combinadas con otras condiciones ambientales. El método incluye determinar al menos un parámetro de viento en la turbina eólica; monitorizar una condición de funcionamiento de la turbina eólica; determinar, por un procesador, una varianza de al menos una de las condiciones de funcionamiento monitorizadas o una pluralidad de los parámetros de viento, en el que la varianza es indicativa de una oscilación que se produce en uno o más componentes de turbina eólica; determinar, por un procesador, un punto de referencia de funcionamiento basado en la varianza; y, hacer funcionar la turbina eólica basándose en el punto de referencia de funcionamiento cuando la varianza indica que la oscilación tiene una frecuencia dentro de una determinada banda de frecuencia para modificar la frecuencia, en el que la frecuencia modificada está fuera de la banda de frecuencia y

reduce las cargas de oscilación que se producen en uno o más componentes de turbina eólica.

El documento WO2008/061698 se refiere a una instalación de energía eólica que comprende un generador que se acciona por un rotor y genera energía eléctrica de manera multifásica para alimentar a una red, un convertidor que está conectado al generador y a la red, y un sistema de control que interactúa con el convertidor y comprende un mecanismo de regulación de sistema de secuencia negativa. El mecanismo de regulación de sistema de secuencia negativa comprende un módulo de control de fase realizado de tal manera que se determina una variable eléctrica del sistema de secuencia negativa según la fase. De esta manera, la corriente disponible puede proporcionarse según la situación de funcionamiento para la potencia activa o la potencia inactiva en el mecanismo de sistema de secuencia negativa.

El documento EP1665494 se refiere a un método para hacer funcionar al menos una turbina eólica que comprende un rotor y un generador eléctrico para suministrar potencia eléctrica a una red de distribución de energía con la ayuda de un dispositivo de control, que garantiza el funcionamiento de la turbina eólica en su rango de trabajo. La turbina eólica se controla según la modificación de un parámetro de funcionamiento de red y durante un período de tiempo de tal manera que se suministra una potencia más alta a la red que en el intervalo de trabajo del funcionamiento estacionario.

Sumario

Una realización de la presente divulgación es un método para hacer funcionar una planta de energía eólica según la reivindicación 1 que comprende una pluralidad de turbinas eólicas, produciendo la planta de energía eólica una salida de potencia de planta.

El método comprende recibir una señal de solicitud de modulación que indica una modulación solicitada de la salida de potencia de planta, especificando la modulación solicitada una frecuencia de modulación. El método comprende además generar una señal de referencia de potencia respectiva para cada una de al menos dos turbinas eólicas de la pluralidad de turbinas eólicas seleccionadas para satisfacer la modulación solicitada.

Cada señal de referencia de potencia generada incluye una componente de modulación respectiva correspondiente a una parte de la modulación solicitada y que tiene una frecuencia diferente de la frecuencia de modulación.

El método permite ventajosamente que la planta de energía eólica proporcione servicios tales como amortiguación o estabilización de sistema de potencia a frecuencias que son adecuadas para la red eléctrica conectada mientras evita hacer funcionar las turbinas eólicas de la planta de energía eólica a frecuencias que hacen que las turbinas eólicas sean particularmente susceptibles a oscilaciones mecánicas. A su vez, esto tiende a impedir el desgaste acelerado de los componentes de turbina eólica.

En otra realización, la frecuencia de cada componente de modulación es una misma frecuencia, y las señales de referencia de potencia se generan para tener diferentes valores de fase. Esta realización proporciona ventajosamente una implementación relativamente simple en la que la componente de modulación de la salida de potencia de cada turbina eólica puede sumarse aritméticamente para coincidir con la forma de onda de la modulación solicitada.

Otra realización de la presente divulgación es un controlador para una planta de energía eólica que comprende una pluralidad de turbinas eólicas y que produce una salida de potencia de planta según la reivindicación 7.

El controlador comprende un módulo de determinación configurado para recibir una señal de solicitud de modulación que indica una modulación solicitada de la salida de potencia de planta, especificando la modulación solicitada una frecuencia de modulación, y seleccionar al menos dos turbinas eólicas de la pluralidad de turbinas eólicas para satisfacer la modulación solicitada. El controlador comprende además un módulo de producción de potencia acoplado con el módulo de determinación y configurado para generar una señal de referencia de potencia respectiva para cada una de las al menos dos turbinas eólicas seleccionadas. Cada señal de referencia de potencia generada incluye una componente de modulación respectiva correspondiente a una parte de la modulación solicitada y que tiene una frecuencia diferente de la frecuencia de modulación.

Otra realización de la presente divulgación es una planta de energía eólica que comprende una pluralidad de turbinas eólicas y el controlador descrito en una realización anterior.

Otra realización de la presente divulgación es un producto de programa informático según la reivindicación 14 que comprende un dispositivo legible por ordenador que tiene un código de programa legible por ordenador incorporado con el mismo, estando el código de programa legible por ordenador configurado para realizar una operación para controlar una planta de energía eólica que comprende una pluralidad de turbinas eólicas y que produce una salida de potencia de planta.

La operación comprende recibir una señal de solicitud de modulación que indica una modulación solicitada de la salida de potencia de planta, especificando la modulación solicitada una frecuencia de modulación. La operación comprende

además generar una señal de referencia de potencia respectiva para cada una de al menos dos turbinas eólicas de la pluralidad de turbinas eólicas seleccionadas para satisfacer la modulación solicitada. Cada señal de referencia de potencia generada incluye una componente de modulación respectiva correspondiente a una parte de la modulación solicitada y que tiene una frecuencia diferente de la frecuencia de modulación.

5

Breve descripción de los dibujos

Para que la manera en que las características mencionadas anteriormente de la presente descripción puedan entenderse en detalle, una descripción más particular de la divulgación, resumida de manera breve anteriormente, puede tenerse por referencia a realizaciones, algunas de las cuales se ilustran en los dibujos adjuntos. Debe observarse, sin embargo, que los dibujos adjuntos ilustran solo realizaciones típicas de esta divulgación y, por lo tanto, no deben considerarse limitantes para la divulgación.

10

La figura 1 ilustra una vista esquemática de una turbina eólica de eje horizontal, según una realización.

15

La figura 2 ilustra una planta de energía eólica conectada operativamente con una red eléctrica, según una realización.

La figura 3 ilustra un método para hacer funcionar una planta de energía eólica, según una realización.

20

La figura 4 incluye un gráfico que ilustra componentes de frecuencia de modulación de señales de referencia de potencia, según una realización.

La figura 5 ilustra una distribución a modo de ejemplo de una modulación solicitada, según una realización.

25

Para facilitar la comprensión, se han usado números de referencia idénticos, donde ha sido posible, para designar elementos idénticos que son comunes a las figuras. Se contempla que los elementos dados a conocer en una realización pueden utilizarse beneficiosamente en otras realizaciones sin mención específica.

Descripción de realizaciones de ejemplo

30

Las realizaciones se refieren generalmente a técnicas para hacer funcionar una planta de energía eólica que comprende una pluralidad de turbinas eólicas y que produce una salida de potencia de planta. El método generalmente comprende recibir una señal de solicitud de modulación que indica una modulación solicitada de la salida de potencia de planta. La modulación solicitada especifica una frecuencia de modulación. El método comprende además generar una señal de referencia de potencia respectiva para cada una de al menos dos turbinas eólicas de la pluralidad de turbinas eólicas seleccionadas para satisfacer la modulación solicitada, en el que cada señal de referencia de potencia generada incluye una componente de modulación respectiva correspondiente a una parte de la modulación solicitada y que tiene una frecuencia diferente de la frecuencia de modulación. Las frecuencias de las diferentes componentes de modulación se seleccionan de manera que una combinación de la potencia de modulación producida por cada uno de los WTG produzca la modulación solicitada en la salida de potencia de planta mientras se evita hacer funcionar los WTG a las frecuencias susceptibles.

40

La figura 1 ilustra una vista esquemática de una turbina eólica de eje horizontal (también “generador de turbina eólica” o WTG por sus siglas en inglés) 100. La turbina eólica 100 incluye normalmente una torre 102 y una góndola 104 ubicada en la parte superior de la torre 102. Un rotor de turbina eólica 106 puede estar conectado con la góndola 104 a través de un árbol de baja velocidad que se extiende fuera de la góndola 104. Como se muestra, el rotor de turbina eólica 106 incluye tres palas de rotor 108 montadas en un buje común 110, pero puede incluir cualquier número adecuado de palas, tal como dos, cuatro, cinco, o más palas. La pala 108 (o perfil aerodinámico) normalmente tiene una forma aerodinámica con un borde de ataque 112 para orientarse hacia el viento, un borde de salida 114 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 de paso 120 de manera que cada pala 108 pueda hacerse rotar alrededor de su eje longitudinal para ajustar el paso de la pala.

45

50

La figura 2 ilustra una planta de energía eólica conectada operativamente con una red eléctrica, según una realización. En general, la planta de energía eólica (WPP) 200 también puede denominarse parque eólico. La WPP 200 incluye una pluralidad de turbinas eólicas (o WTG por sus siglas en inglés) 100 (es decir, turbinas eólicas 100-1, 100-2, 100-3, ...) conectadas operativamente con una red eléctrica 245 en un punto de acoplamiento común (PCC) 250. La red eléctrica 245 representa cualquier red eléctrica de transmisión y/o distribución adecuada, que puede hacerse funcionar a una o más tensiones. La red eléctrica 245 generalmente incluye varias líneas de transmisión, transformadores, subestaciones, etc. La red eléctrica 245 está conectada con otras instalaciones de generación 255, tales como una o más plantas de energía eólica adicionales y/o una o más instalaciones de generación basadas en energía no eólica, tal como a base de combustibles fósiles, geotérmica, solar, hidroeléctrica, nuclear, etcétera. La red eléctrica 245 también está conectada con una o más cargas (no mostradas), que generalmente representan consumidores de electricidad industriales, comerciales y/o particulares.

60

65

Cada WTG 100-1, 100-2, 100-3, ... incluye un generador eléctrico (no mostrado) configurado para convertir la energía mecánica del rotor de turbina eólica en una o más fases de energía eléctrica como salidas de potencia respectivas 240-1, 240-2, 240-3, ... que finalmente se suministran a la red eléctrica 245 y a cualquier carga conectada con la misma. Cada WTG 100-1, 100-2, 100-3, ... puede incluir un sistema de convertidor de potencia configurado para acoplarse con el generador eléctrico y con la red eléctrica 245, y configurado además para convertir la energía de corriente alterna (CA) recibida del generador eléctrico en energía de CA que es adecuada para suministrar a la red eléctrica 245. Los generadores eléctricos pueden ser de cualquier tipo adecuado, tales como generadores de inducción (IG), generadores de imanes permanentes (PMG) con convertidores de frecuencia, generadores de inducción doblemente alimentados, etc., como conocerá un experto en la técnica.

El funcionamiento de la planta de energía eólica 200 se controla usando un controlador de WPP (o PPC) 205 acoplado de manera comunicativa con uno o más controladores de WTG 230 (es decir, controladores de WTG 230-1, 230-2, 230-3, ...) usando cualquier medio de comunicación adecuado, ya sea por cable, inalámbrico, óptico, etc. En algunas realizaciones, cada WTG 100 está controlado por un controlador de WTG independiente 230. En diversas realizaciones, los WTG 100-1, 100-2, 100-3, ... producen energía eléctrica basándose en señales de control proporcionadas por el controlador de WPP 205 y/o los controladores de WTG 230. Aunque no se muestra, los controladores de WTG 230 pueden proporcionar señales de retroalimentación y/u otra información al controlador de WPP 205.

La salida de potencia de planta 242 se controla por el controlador de WPP 205 y representa una energía colectiva suministrada a la red eléctrica 245 por la WPP 200. En una realización, la salida de potencia 242 es una agregación de las diversas salidas de potencia 240. En otra realización, la salida de potencia 242 puede reflejar adicionalmente, además de las salidas de potencia de WTG 240, efectos del acondicionamiento de señal y/o el funcionamiento de otras fuentes de alimentación o cargas controladas por el controlador de WPP 205, tales como dispositivos de almacenamiento de energía 244.

El controlador de WPP 205 incluye uno o más procesadores 210 y memoria 215. Aunque no se muestran, cada uno de los controladores de WTG 230 también incluye uno o más procesadores y memoria. Los procesadores 210 pueden tener cualquier forma adecuada, tal como un microprocesador de propósito general, un controlador, un circuito integrado específico de la aplicación (ASIC), etcétera. La memoria 215 puede incluir una variedad de medios legibles por ordenador seleccionados por su tamaño, rendimiento relativo, u otras capacidades: medios volátiles y/o no volátiles, medios extraíbles y/o no extraíbles, etc.

La memoria 215 puede incluir uno o más módulos para realizar diversas funciones descritas en el presente documento. Los módulos generalmente incluyen código de programa que puede ejecutarse por uno o más de los procesadores 210. Como se muestra, el controlador de planta de energía eólica 205 incluye un módulo de determinación 216 y un módulo de producción de potencia 218 (o "módulo de producción de potencia", "módulo de potencia").

El módulo de determinación 216 está configurado para recibir una señal de solicitud de modulación 225 que indica una modulación solicitada de la salida de potencia. En algunas realizaciones, la señal de solicitud de modulación 225 puede comunicarse al controlador de planta de energía eólica 205 por un operador de sistema de transmisión (TSO) para la red eléctrica 245. Generalmente, la modulación solicitada especifica uno o más parámetros, por ejemplo, una forma de onda, una frecuencia de modulación, una fase, y/o una amplitud de la energía adicional que va a producirse por la planta de energía eólica 200. Puede especificarse cualquier forma de onda periódica adecuada, tal como una onda sinusoidal, onda triangular, onda en dientes de sierra, etc. La frecuencia de modulación especificada es general y significativamente menor que la frecuencia de red nominal. Por ejemplo, las redes eléctricas en Europa operan normalmente a 50 hercios (Hz) y las redes eléctricas en América operan normalmente a 60 Hz. En algunas realizaciones, la frecuencia de modulación está entre aproximadamente 0,1 Hz y 10 Hz, aunque las realizaciones alternativas pueden tener intervalos mayores o menores. El valor de fase especificado ayuda a garantizar que la potencia de modulación generada por la planta de energía eólica 200 para satisfacer la señal de solicitud de modulación 225 está en contrafase con respecto a las oscilaciones de potencia en la red eléctrica. En algunos casos, si la fase de la potencia de modulación es incorrecta, la potencia de modulación podría interferir constructivamente con las oscilaciones de potencia, y, de ese modo, empeorar las oscilaciones en la red eléctrica 245.

La señal de solicitud de modulación 225 puede especificar la modulación solicitada en cualquier forma adecuada, tal como la forma de onda deseada para que coincida con la planta de energía eólica 200, distintos valores de frecuencia, fase, y/o amplitud, etcétera. En algunas realizaciones, el módulo de determinación 216 está configurado además para determinar la amplitud, frecuencia, y/o fase de la solicitud usando técnicas de procesamiento de señal. La frecuencia de modulación 220, ya sea que se especifique directamente o se determine a través del procesamiento por el módulo de determinación 216, puede almacenarse en la memoria 215.

En una realización alternativa, el módulo de determinación 216 no recibe una señal de solicitud de modulación 225, sino que en su lugar determina una modulación que va a incluirse en la salida de potencia 242 basándose en mediciones de sensor u otros datos proporcionados al controlador de WPP 205.

En algunas realizaciones, el módulo de determinación 216 está configurado además para determinar si la frecuencia

de modulación 220 corresponde a una o más frecuencias susceptibles predeterminadas 222. A estas frecuencias susceptibles 222, al menos uno de los WTG 100 tiene una mayor susceptibilidad a las oscilaciones mecánicas, lo que puede provocar desgaste acelerado o daños a los componentes de los WTG 100. En muchos casos, múltiples o todos los WTG 100 en la WPP 200 tienen implementaciones similares y, por lo tanto, una susceptibilidad similar. Un ejemplo de frecuencias susceptibles 222 incluye frecuencias 1P o 3P, que se producen una vez o tres veces, respectivamente, durante cada rotación del rotor de la turbina eólica. El 1P y el 3P pueden corresponder a desequilibrios y efectos del rotor tales como el efecto de sombra de torre (es decir, provocada por la estela fluctuante detrás de las torres). Otros ejemplos de frecuencias susceptibles incluyen frecuencias propias (también llamadas frecuencias naturales o resonantes) de componentes de tren de transmisión tales como el árbol, la caja de engranaje y el rotor, frecuencias que dan lugar a oscilaciones góndola-torre, etcétera. Por ejemplo, las frecuencias propias del tren de transmisión pueden encontrarse en el intervalo de aproximadamente 2-3 Hz, y las resonancias de masa góndola-torre pueden encontrarse en el intervalo de aproximadamente 0,1-0,4 Hz.

La determinación de si la frecuencia de modulación 220 corresponde a una frecuencia 222 susceptible particular puede influir en cómo se satisface la modulación solicitada por la WPP 200. En un ejemplo, cuando se determina que la frecuencia de modulación 220 corresponde a una frecuencia susceptible 222 que afecta a determinados (pero no a todos) de los WTG 100, el módulo de determinación 216 selecciona uno o más de los demás WTG no susceptibles 100 para satisfacer la modulación solicitada. En otro ejemplo, el módulo de determinación 216 selecciona dos o más WTG 100 (al menos uno de los cuales es susceptible a la frecuencia susceptible particular 222) para satisfacer la modulación solicitada. Cada uno de los dos o más WTG seleccionados 100 satisface una parte de la modulación solicitada a una frecuencia que difiere de la frecuencia de modulación 220. Estas frecuencias se seleccionan de manera que una combinación de la potencia de modulación producida por cada uno de los WTG 100 produce la modulación solicitada en la salida de potencia de planta 242 mientras evita hacer funcionar los WTG 100 a la frecuencia susceptible 222. En algunas realizaciones, las frecuencias se seleccionan para estar adecuadamente lejos de la frecuencia susceptible particular 222. Algunos ejemplos no limitantes son menores que o iguales a la mitad de la frecuencia de modulación 220, y mayores que o iguales al doble de la frecuencia de modulación 220. Las frecuencias pueden seleccionarse además para evitar otras de las frecuencias susceptibles 222.

En algunas realizaciones, la frecuencia de modulación 220 puede descomponerse o demodularse en componentes de frecuencia más baja que, cuando se combinan, producen la modulación solicitada a la frecuencia de modulación 220. En una realización (comentada adicionalmente con respecto a la figura 4), cada WTG 100 de N WTG 100 seleccionados para satisfacer la modulación solicitada producen una potencia modulada a una frecuencia que es (1 / N) veces la frecuencia de modulación 220. Las salidas de potencia moduladas producidas pueden escalonarse (es decir, se les puede dar diferentes valores de fase) de manera que el efecto aditivo de las salidas de potencia moduladas en la salida de potencia de planta 242 corresponde a la modulación solicitada.

Adicional o alternativamente a las componentes de frecuencia más baja, la frecuencia de modulación 220 puede modularse en componentes de frecuencia más alta que, cuando se combinan, producen la modulación solicitada a la frecuencia de modulación 220. Esto puede ser útil en casos en los que la modulación solicitada es una forma de onda no sinusoidal periódica. En una realización (comentada adicionalmente con respecto a la figura 5), determinados WTG 100 de la WPP 200 (tales como los WTG susceptibles) pueden producir potencia modulada a armónicos más altos de la frecuencia de modulación 220. La WPP 200 puede controlar otros WTG (no susceptibles) 100 y/o dispositivos de almacenamiento de energía 244 para proporcionar una señal de potencia modulada a la frecuencia de modulación 220. Las componentes de la frecuencia de modulación 220 y las componentes armónicas más altas pueden combinarse entre sí, por ejemplo, como en una serie de Fourier, para aproximar la forma de onda no sinusoidal periódica solicitada.

En otros casos, cuando la frecuencia de modulación 220 no corresponde a una de las frecuencias susceptibles 222, uno o más WTG 100 seleccionados pueden producir una salida de potencia modulada a la frecuencia de modulación 220. En un ejemplo, puede usarse un único WTG 100 para satisfacer la modulación solicitada a la frecuencia de modulación 220. En otro ejemplo, múltiples WTG 100 pueden producir cada uno potencia modulada a la frecuencia de modulación 220 con una amplitud reducida, que cuando se combinan juntos producen la modulación solicitada de la salida de potencia de planta 242 a la frecuencia de modulación 220. Adicional o alternativamente, aunque la frecuencia de modulación 220 no corresponde a una de las frecuencias susceptibles 222, el controlador de WPP 205 puede continuar satisfaciendo la modulación solicitada usando componentes de frecuencia más alta y/o más baja.

El módulo de producción de potencia 218 está configurado para generar señales de referencia de potencia 235, puntos de referencia, u otras señales de demanda adecuadas para controlar la potencia producida por cada uno de los WTG 100 de la WPP 200. El módulo de producción de potencia 218 está configurado además para generar señales de control 243 para controlar uno o más dispositivos de almacenamiento de energía 244 acoplados con la salida de potencia de planta 242.

Las señales de referencia de potencia 235 pueden comprender cada una una componente normal 236 y una componente de modulación 237, que cuando se combinan dan instrucciones al WTG 100 correspondiente para producir una salida de potencia modulada 240 que satisface una parte de la modulación solicitada de la salida de potencia de planta 242. En algunas realizaciones, el módulo de producción de potencia 218 genera las componentes

normales 236 de las señales de referencia de potencia 235 basándose en una señal de demanda de potencia a nivel de WPP recibida o generada, tal como un punto de referencia de salida de potencia de WPP, según cualquier técnica adecuada. El módulo de producción de potencia 218 genera las componentes de modulación 237 basándose en la señal de solicitud de modulación 225. Por lo tanto, cada una de las componentes de modulación 237 para varios WTG 100 representa una parte de la modulación solicitada.

Los controladores de WTG 230 pueden satisfacer las componentes de modulación 237 de cualquier manera adecuada. Por ejemplo, los controladores de WTG 230 pueden oscilar el paso de las palas de rotor para introducir la modulación de baja frecuencia en las salidas de potencia 240. En algunas realizaciones, dependiendo de la amplitud de las componentes de modulación 237, los controladores de WTG 230 pueden permitir que los WTG 100 se sobrecarguen temporalmente de modo que la producción de energía no esté innecesariamente limitada por la operación de modulación. Por supuesto, esto supone que el WTG 100 está funcionando en condiciones en las que puede extraerse energía adicional del viento, por ejemplo, cambiando la velocidad de rotación y/o cambiando el ángulo de paso.

Si bien se han comentado diversas realizaciones en las que la señal de solicitud de modulación 225 se proporciona al controlador de WPP 205 que a su vez controla los controladores de WTG 230, en realizaciones alternativas, los controladores de WTG 230 pueden realizar parte o la totalidad de la funcionalidad del controlador de WPP 205. Por ejemplo, los controladores de WTG 230 pueden recibir la señal de solicitud de modulación 225 y distribuir a partes iguales la modulación solicitada usando comunicación entre los controladores de WTG 230 y/o realizando operaciones predeterminadas.

La figura 3 ilustra un método para hacer funcionar una planta de energía eólica, según una realización. Generalmente, el método 300 puede realizarse por un controlador de WPP 205 en una WPP 200 comentada anteriormente. El método 300 comienza en el bloque 305, donde el controlador de WPP recibe una señal de solicitud de modulación que indica una modulación solicitada de la salida de potencia de planta. La modulación solicitada especifica una frecuencia de modulación, y puede especificar además una fase, amplitud y/o duración. La señal de solicitud de modulación puede tener cualquier forma adecuada, tal como la forma de onda deseada y/o valores que describen la forma de onda, tal como la frecuencia, fase, y/o valores de amplitud, etcétera. En algunos casos, el controlador de WPP puede realizar el procesamiento (por ejemplo, análisis espectral) en la señal de solicitud de modulación recibida para derivar la frecuencia de modulación.

En el bloque 310, el controlador de WPP determina si la frecuencia de modulación corresponde con una frecuencia susceptible predeterminada de al menos uno de la pluralidad de WTG. A una frecuencia susceptible, el WTG tiene una susceptibilidad relativamente mayor a las oscilaciones mecánicas, que puede provocar desgaste acelerado o daños a los componentes del WTG. Algunos ejemplos de frecuencias susceptibles pueden incluir frecuencias 1P o 3P, frecuencias propias de los componentes del tren de transmisión, frecuencias que dan lugar a oscilaciones góndola-torre, etcétera. Si la frecuencia de modulación no corresponde a una frecuencia susceptible (bloque 315: NO), el controlador de WPP selecciona uno o más WTG para satisfacer la modulación solicitada (bloque 325) y genera señales de referencia de potencia para el uno o más WTG seleccionados que incluyen una componente de modulación que tiene una frecuencia que puede ser la misma que la frecuencia de modulación (bloque 335). El método avanza al bloque 340, donde el controlador de WPP comunica la(s) señal(es) a los WTG que son representativos de la(s) señal(es) de referencia de potencia generada(s). En algunos casos, la señal comunicada es la señal de referencia de potencia generada que varía en el tiempo. En otros casos, la señal comunicada incluye información que es representativa de la señal de referencia de potencia que varía en el tiempo. Por ejemplo, la señal comunicada podría ser una señal de superposición que incluye valores de amplitud, frecuencia, fase y/o duración. En estos casos, el controlador de WTG puede realizar cálculos usando la señal comunicada para producir las señales de referencia de potencia deseadas que varían en el tiempo al algoritmo de control de bucle cerrado del controlador de WTG. El método avanza al bloque 345, donde el controlador de WPP produce una salida de potencia en los WTG seleccionados según las señales de referencia de potencia para satisfacer la modulación solicitada de la salida de planta de energía.

Sin embargo, si la frecuencia de modulación corresponde a al menos una frecuencia susceptible (bloque 315: SÍ), el controlador de WPP selecciona dos o más WTG para satisfacer la modulación solicitada en el bloque 320. Los dos o más WTG seleccionados pueden incluir al menos un WTG "susceptible" que tiene una frecuencia susceptible a la frecuencia de modulación. En el bloque 330, el controlador de WPP genera señales de referencia de potencia para los dos o más WTG seleccionados que tienen una componente de modulación con una frecuencia (o frecuencias) diferente de la frecuencia de modulación. La frecuencia puede ser mayor o menor que la frecuencia de modulación, siempre que la salida de potencia de planta refleje colectivamente la modulación solicitada después de realizar los bloques 340 y 345. El método 300 termina después de la finalización del bloque 345.

La figura 4 incluye un gráfico que ilustra componentes de frecuencia de modulación de señales de referencia de potencia, según una realización. Generalmente, el gráfico 400 puede reflejar el funcionamiento del controlador de WPP 205 dentro de la WPP 200.

La señal de solicitud de modulación 225 se representa como una forma de onda de triángulo periódica con amplitud M (es decir, que oscila entre valores +M y -M), aunque son posibles otras formas de onda. La señal de solicitud de modulación 225 también indica una fase y una frecuencia de modulación correspondientes al período 405 (entre

tiempos t_0 y t_1). Después de recibir la señal de solicitud de modulación 225, el controlador de WPP puede seleccionar una pluralidad de los WTG para satisfacer la modulación solicitada, generando una pluralidad de señales de referencia de potencia para controlar el funcionamiento de los WTG seleccionados.

En algunos casos, el controlador de WPP ajusta las señales de referencia de potencia para incluir una componente de modulación 237 que tiene una frecuencia diferente de la de la frecuencia de modulación. La componente de modulación 237 puede añadirse a una componente "normal" de la señal de referencia de potencia correspondiente a la producción de potencia actual del WTG. Como se muestra, el controlador de WPP produce siete componentes de modulación 237-1, 237-2, ..., 237-7 que puede corresponder a siete WTG de la WPP. Alternativamente, pueden seleccionarse diferentes números de WTG para satisfacer la modulación solicitada, y/o una o más de las componentes de modulación podrían satisfacerse por otras fuentes de energía controladas por el controlador de WPP (tal como un dispositivo de almacenamiento de energía).

Cada una de las componentes de modulación 237 tiene una frecuencia correspondiente al período 410 (entre los tiempos t_0 y t_1). Como se muestra, el período 410 es siete veces más largo que el período 405, por lo que la frecuencia de las componentes de modulación 237 es una séptima parte ($1/7$) de la frecuencia de modulación. Por supuesto, la frecuencia puede diferir dependiendo del número de WTG seleccionados. En este ejemplo simplificado, se muestra que cada componente de modulación 237 tiene la misma amplitud M que la señal de solicitud de modulación, pero otras implementaciones pueden tener amplitudes diferentes.

Cuando se suman entre sí, por ejemplo, como parte de una salida de potencia de planta colectiva 242, las componentes de modulación 237 forman sustancialmente la señal de solicitud de modulación 225. Por ejemplo, en el tiempo t_1 , el valor de la señal de solicitud de modulación es cero. Las componentes de modulación 237-1, 237-2, 237-3 tienen cada una un valor $+M$ ($+3M$ en total), las componentes de modulación 237-5, 237-6, 237-7 tienen cada una un valor $-M$ ($-3M$ en total), y la componente de modulación 237-4 tiene un valor cero. Por lo tanto, la suma de las componentes de modulación 237 es igual al valor de la señal de solicitud de modulación 225 en el tiempo t_1 , así como a lo largo del gráfico 400.

La figura 5 ilustra una distribución a modo de ejemplo de una modulación solicitada, según una realización. Se representan seis WTG 100-1, 100-2, ..., 100-6, pero este número puede variar en función del tamaño de la WPP, qué WTG están disponibles operativamente para satisfacer una parte de la modulación solicitada, etcétera. En la disposición 500, se recibe una señal de solicitud de modulación 225 por el controlador de WPP 205. Como se muestra, la señal de solicitud de modulación 225 es una forma de onda triangular que tiene una frecuencia de modulación f_0 . El módulo de determinación 216 determina si la frecuencia de modulación f_0 corresponde a cualquier frecuencia susceptible de los WTG, y basándose en la determinación puede agrupar los WTG como WTG susceptibles 505 y WTG no susceptibles 510. Generalmente, el controlador de WPP no hará que los WTG susceptibles 505 funcionen a la frecuencia susceptible para satisfacer sus partes respectivas de la modulación solicitada, pero puede aumentar o disminuir la frecuencia según sea apropiado.

Dependiendo de la amplitud de la modulación solicitada, uno o más de los WTG no susceptibles 510 y/o los dispositivos de almacenamiento de energía 244 pueden usarse para proporcionar una componente de modulación a la frecuencia de modulación f_0 . En algunas realizaciones, la salida modulada proporcionada por los WTG no susceptibles 510 y/o la salida de los dispositivos de almacenamiento de energía 244 puede ser suficiente para satisfacer la modulación solicitada (es decir, la forma de onda triangular) en la salida de potencia de planta 242.

Sin embargo, en otra realización, las salidas de potencia combinadas 240 de los WTG susceptibles 505 y los WTG no susceptibles 510 y/o la salida de los dispositivos de almacenamiento de energía 244 pueden combinarse para producir la forma de onda solicitada. Por ejemplo, las diversas salidas pueden combinarse como en una serie de Fourier para aproximarse a cualquier forma de onda no sinusoidal periódica. Como se muestra, los WTG no susceptibles 510 y/o los dispositivos de almacenamiento de energía 244 producen sinusoides de frecuencia f_0 , y los WTG susceptibles 505 producen sinusoides a armónicos más altos ($k \times f_0$), donde $k = 2, 3, 4, 5, \dots$. Cuando se añaden juntos, los sinusoides a las diferentes frecuencias se aproximan a la forma de onda triangular solicitada dentro de la salida de potencia 242.

En las diversas realizaciones, los WTG se representan de manera simple como que tienen una frecuencia única dentro de la componente de modulación. Sin embargo, se observará que los WTG no necesitan limitarse a contribuir a la modulación de la salida de potencia de planta a una frecuencia única, sino que pueden tener componentes de modulación que incluyen múltiples componentes de frecuencia.

En lo anterior, se hace referencia a las realizaciones presentadas en esta divulgación. Sin embargo, el alcance de la presente divulgación no se limita a las realizaciones descritas específicas. En su lugar, cualquier combinación de las características y elementos anteriores, ya sea relacionado con diferentes realizaciones o no, se contempla implementar y poner en práctica realizaciones contempladas. Además, aunque las realizaciones dadas a conocer en el presente documento pueden lograr ventajas sobre otras posibles soluciones o sobre la técnica anterior, si se logra o no una ventaja particular mediante una realización dada no es limitante del alcance de la presente divulgación. Por lo tanto, los aspectos, características, realizaciones, y ventajas anteriores son meramente ilustrativas y no se consideran elementos o limitaciones de las reivindicaciones adjuntas, excepto cuando se menciona explícitamente en

una o más reivindicaciones. Del mismo modo, la referencia a "la invención" no se interpretará como una generalización de cualquier materia objeto inventiva dada a conocer en el presente documento y no se considerará como un elemento o limitación de las reivindicaciones adjuntas, excepto cuando se mencione explícitamente en una o más reivindicaciones.

Como apreciará un experto en la técnica, las realizaciones descritas en el presente documento pueden realizarse como un sistema, método, o producto de programa informático. En consecuencia, los aspectos pueden tomar la forma de una realización completamente de hardware, una realización completamente de software (incluyendo firmware, software residente, microcódigo, etc.) o una realización que combina aspectos de software y hardware que generalmente pueden denominarse en el presente documento "circuito", "módulo," o "sistema". Adicionalmente, los aspectos pueden tomar la forma de un producto de programa informático incorporado en uno o más medios legibles por ordenador que tienen código de programa legible por ordenador incorporado en el mismo. El código de programa incorporado en un medio legible por ordenador puede transmitirse usando cualquier medio apropiado, incluyendo, pero sin limitarse a, inalámbrico, de línea alámbrica, cable de fibra óptica, RF, etc., o cualquier combinación adecuada de lo anterior.

Se han descrito anteriormente aspectos de la presente divulgación con referencia a ilustraciones de diagramas de flujo y/o diagramas de bloques de métodos, aparatos (sistemas), y productos de programas informáticos según las 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 del diagrama de flujo y/o diagramas de bloques, puede implementarse mediante instrucciones de programa informático. 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 modo que las instrucciones almacenadas en el medio legible por ordenador producen un artículo de fabricación que incluye instrucciones que implementan la función/el acto especificado en el bloque y/o bloques de diagrama de flujo o bloques.

El diagrama de flujo y los diagramas de bloques en las figuras ilustran la arquitectura, funcionalidad y funcionamiento de posibles implementaciones de sistemas, métodos y productos de programas informáticos según diversas realizaciones. A este respecto, cada bloque en los diagramas de flujo o de bloques puede representar un módulo, segmento o parte 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 pueden, de hecho, ejecutarse sustancialmente de manera concurrente, o los bloques a veces pueden ejecutarse en el orden inverso, dependiendo de la funcionalidad implicada. También se observará que cada bloque de los diagramas de bloques y/o la ilustración de diagrama de flujo, y combinaciones de bloques en los diagramas de bloques y/o la ilustración de diagrama de flujo, puede implementarse mediante sistemas basados en hardware de propósito especial que realizan las funciones o actos especificados, o combinaciones de hardware de propósito especial e instrucciones informáticas.

En vista de lo anterior, el alcance de la presente divulgación está determinado por las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un método para hacer funcionar una planta de energía eólica (200), para mitigar efectos de oscilaciones de potencia de baja frecuencia en una red eléctrica (245), que comprende una pluralidad de turbinas eólicas (100), produciendo la planta de energía eólica una salida de potencia de planta, comprendiendo el método:
5 recibir una señal de solicitud de modulación (225) que indica una modulación solicitada de la salida de potencia de planta, especificando la modulación solicitada una frecuencia de modulación (220), la señal de solicitud de modulación está en contrafase con respecto a las oscilaciones de potencia en la red eléctrica; y
10 generar una señal de referencia de potencia respectiva (235) para cada una de al menos dos turbinas eólicas de la pluralidad de turbinas eólicas seleccionadas para satisfacer la modulación solicitada,
15 caracterizado porque
cada señal de referencia de potencia generada (235) incluye una componente de modulación respectiva (237) correspondiente a una parte de la modulación solicitada y que tiene una frecuencia diferente de la frecuencia de modulación (220),
20 en el que la forma de onda de la modulación solicitada es una suma aritmética de la componente de modulación (237) de la salida de potencia de cada turbina eólica, y
en el que generar la señal de referencia de potencia y si incluir la componente de modulación respectiva (237) se realiza en respuesta a la determinación de que la frecuencia de modulación (220) corresponde a una
25 frecuencia susceptible predeterminada a la que al menos una de la pluralidad de turbinas eólicas tiene una mayor susceptibilidad a oscilaciones mecánicas.
2. El método según la reivindicación 1, en el que la frecuencia de la componente de modulación de la señal de referencia de potencia generada es una de: mayor que o igual al doble de la frecuencia de modulación, y
30 menor que o igual a la mitad de la frecuencia de modulación.
3. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la frecuencia de cada componente de modulación es una misma frecuencia, y en el que las señales de referencia de potencia se generan para tener diferentes valores de fase.
- 35 4. El método según la reivindicación 3, en el que la frecuencia es $(1 / N)$ veces la frecuencia de modulación, en el que N representa un número de las al menos dos turbinas eólicas seleccionadas para satisfacer la modulación solicitada.
- 40 5. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la frecuencia de modulación está entre aproximadamente 0,1 hercios (Hz) y aproximadamente 10 Hz.
6. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que generar la señal de referencia de potencia da como resultado una sobrecarga temporal de las al menos dos turbinas eólicas.
- 45 7. Un controlador para una planta de energía eólica (200), para mitigar efectos de oscilaciones de potencia de baja frecuencia en una red eléctrica (245), que comprende una pluralidad de turbinas eólicas (100) y que produce una salida de potencia de planta, comprendiendo el controlador:
50 un módulo de determinación (216) configurado para:
recibir una señal de solicitud de modulación que indica una modulación solicitada de la salida de potencia de planta, especificando la modulación solicitada una frecuencia de modulación (220), la señal de solicitud de modulación está en contrafase con respecto a las oscilaciones de potencia en la red eléctrica; y
55 seleccionar al menos dos turbinas eólicas de la pluralidad de turbinas eólicas para satisfacer la modulación solicitada; y
un módulo de producción de potencia (218) acoplado con el módulo de determinación (216) y configurado para generar una señal de referencia de potencia respectiva (235) para cada una de las al menos dos turbinas eólicas seleccionadas,
60 caracterizado por que
cada señal de referencia de potencia generada (235) incluye una componente de modulación respectiva (237) correspondiente a una parte de la modulación solicitada y que tiene una frecuencia diferente de la frecuencia

de modulación (220),

la componente de modulación (237) de la salida de potencia de cada turbina eólica está configurada además para sumarse aritméticamente para coincidir con la forma de onda de la modulación solicitada, y

en el que el módulo de determinación (216) está configurado además para determinar si la frecuencia de modulación (220) corresponde a un valor de frecuencia predeterminado en el que al menos una de la pluralidad de turbinas eólicas (100) tiene una mayor susceptibilidad a oscilaciones mecánicas,

en el que generar la señal de referencia de potencia (235) para incluir la componente de modulación respectiva se realiza en respuesta a la determinación.

8. El controlador según la reivindicación 7, en el que la frecuencia de la componente de modulación de la señal de referencia de potencia generada es una de: mayor que o igual al doble de la frecuencia de modulación, y menor que o igual a la mitad de la frecuencia de modulación.

9. El controlador según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la frecuencia de cada componente de modulación es una misma frecuencia, y en el que las señales de referencia de potencia se generan para tener diferentes valores de fase.

10. El controlador según la reivindicación 9, en el que la frecuencia es $(1 / N)$ veces la frecuencia de modulación, en el que N representa un número de las al menos dos turbinas eólicas seleccionadas para satisfacer la modulación solicitada.

11. El controlador según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la frecuencia de modulación está entre aproximadamente 0,1 hercios (Hz) y aproximadamente 10 Hz.

12. El controlador según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que generar la señal de referencia de potencia da como resultado una sobrecarga temporal de las al menos dos turbinas eólicas.

13. Una planta de energía eólica que comprende una pluralidad de turbinas eólicas y el controlador de cualquiera de las reivindicaciones 7 a 12.

14. Un producto de programa informático que comprende un dispositivo legible por ordenador que tiene un código de programa legible por ordenador incorporado con el mismo, estando el código de programa legible por ordenador configurado para realizar una operación para controlar una planta de energía eólica (200), para mitigar efectos de oscilaciones de potencia de baja frecuencia en una red eléctrica (245), que comprende una pluralidad de turbinas eólicas y que produce una salida de potencia de planta, comprendiendo la operación:

recibir una señal de solicitud de modulación que indica una modulación solicitada de la salida de potencia de planta, especificando la modulación solicitada una frecuencia de modulación (220), la señal de solicitud de modulación está en contrafase con respecto a las oscilaciones de potencia en la red eléctrica; y

generar una señal de referencia de potencia respectiva para cada una de al menos dos turbinas eólicas de la pluralidad de turbinas eólicas seleccionadas para satisfacer la modulación solicitada,

en el que cada señal de referencia de potencia generada incluye una componente de modulación respectiva correspondiente a una parte de la modulación solicitada y que tiene una frecuencia diferente de la frecuencia de modulación (220),

en el que la forma de onda de la modulación solicitada es una suma aritmética de la componente de modulación (237) de la salida de potencia de cada turbina eólica, y

en el que generar la señal de referencia de potencia y si incluir la componente de modulación respectiva (237) se realiza en respuesta a la determinación de que la frecuencia de modulación (220) corresponde a una frecuencia susceptible predeterminada a la que al menos una de la pluralidad de turbinas eólicas tiene una mayor susceptibilidad a oscilaciones mecánicas.

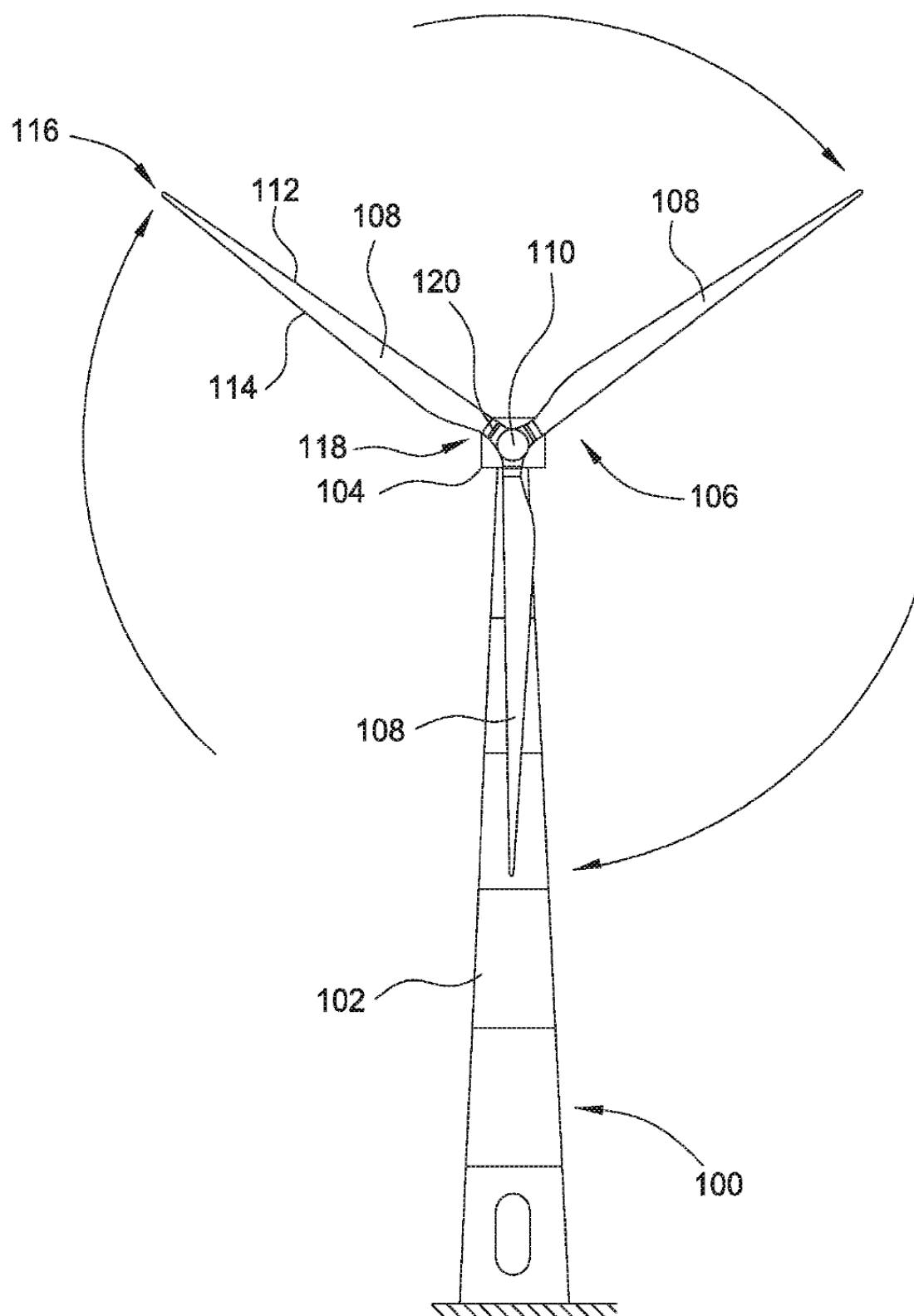


FIG. 1

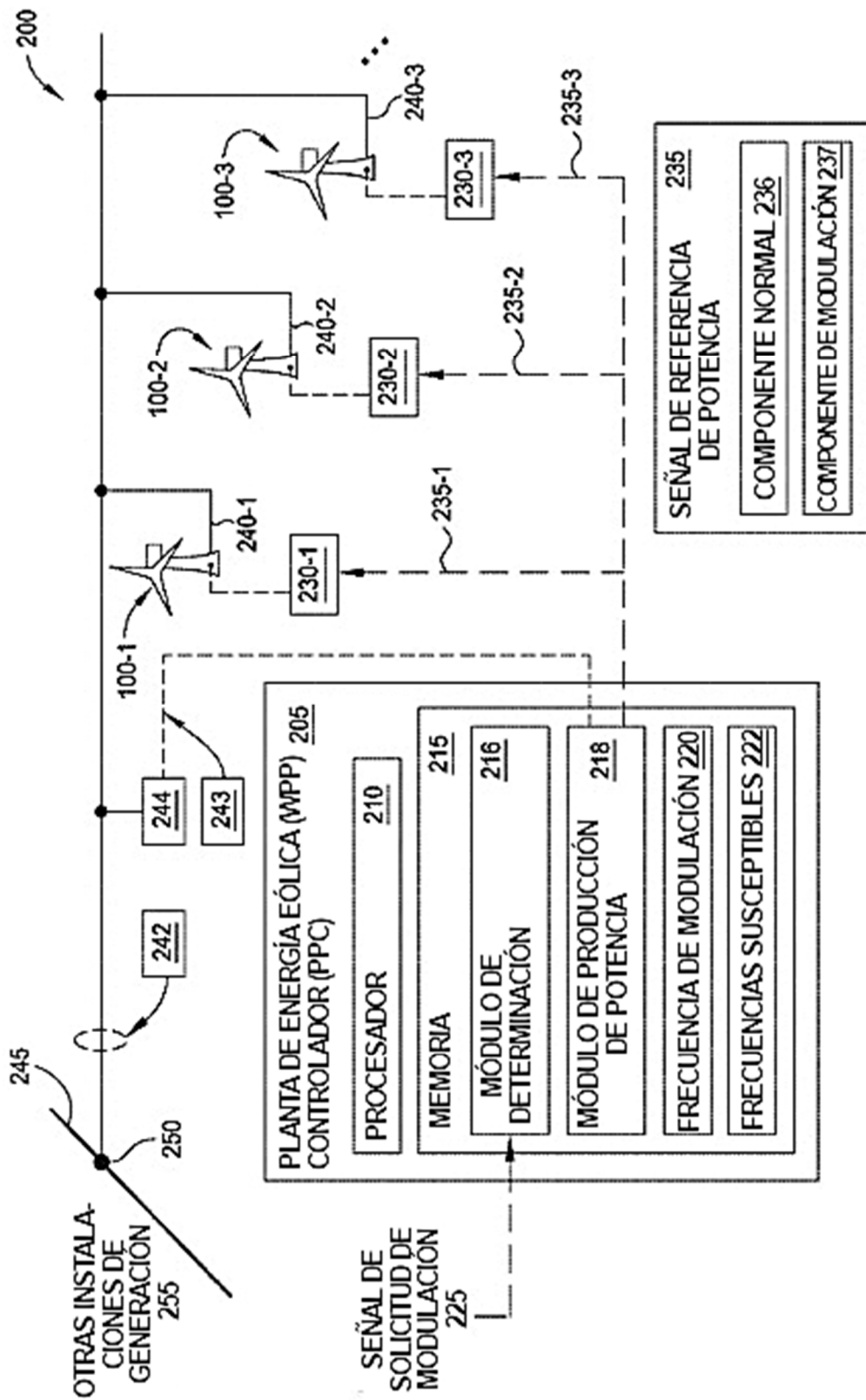


FIG. 2

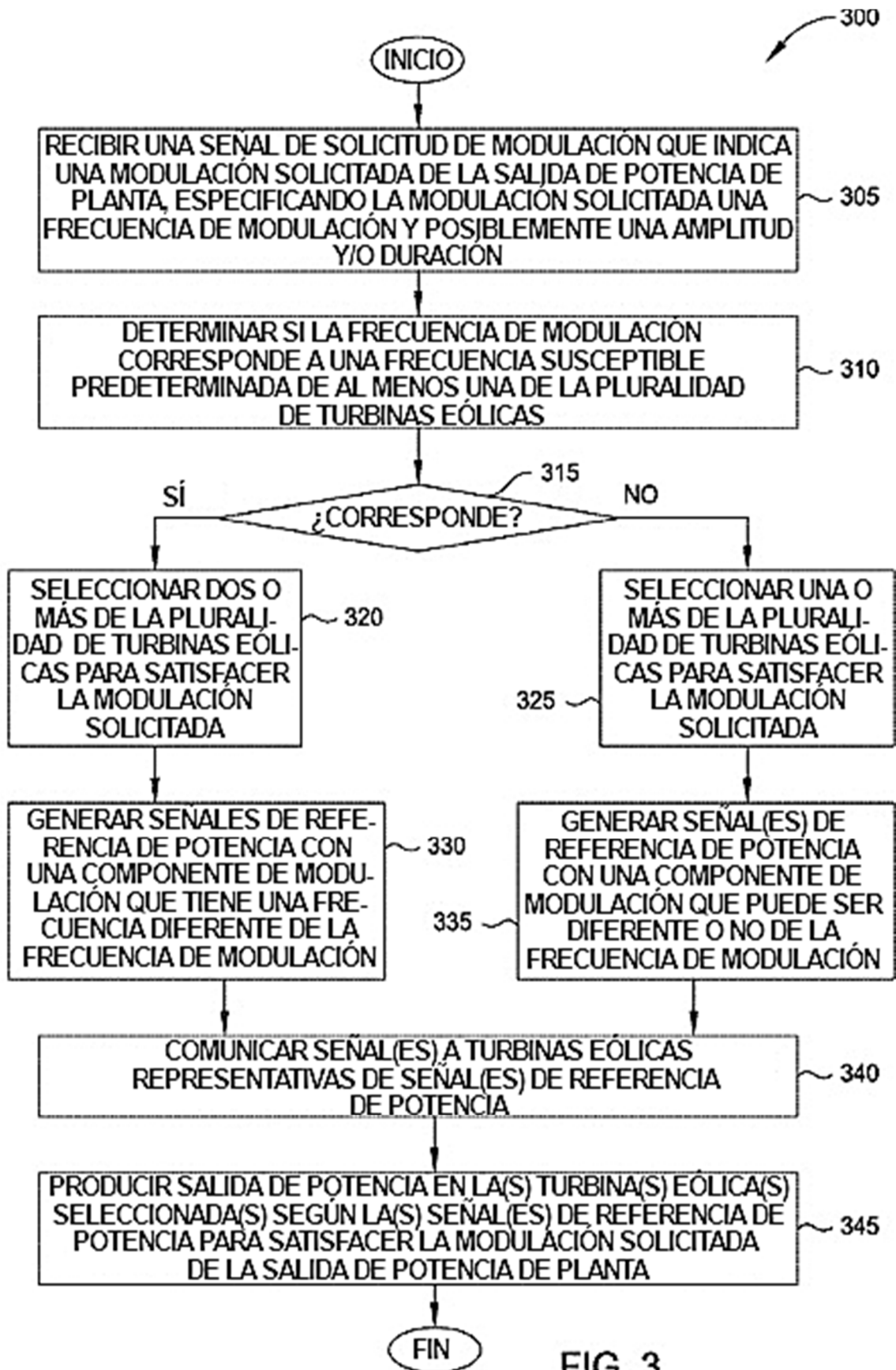


FIG. 3

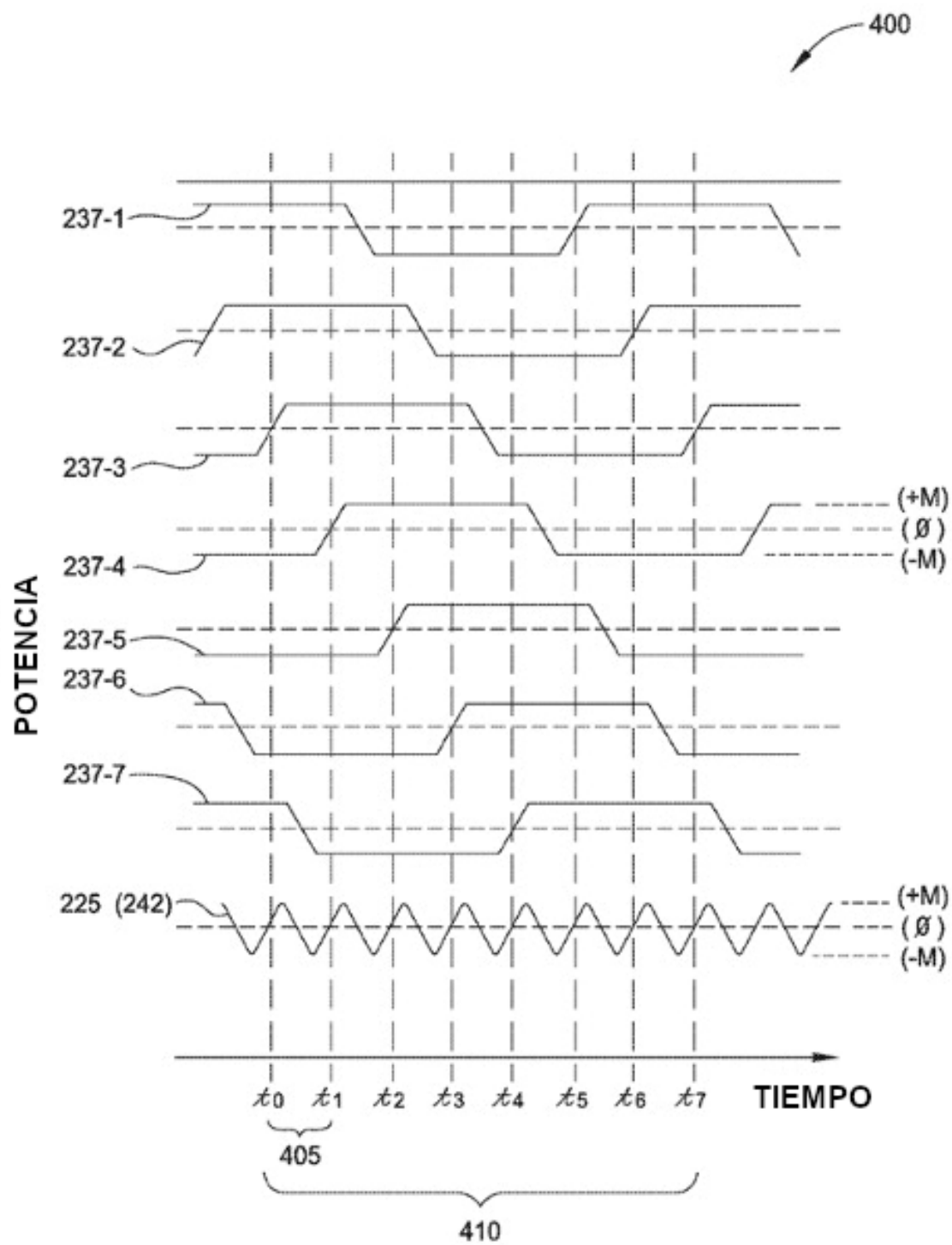


FIG. 4

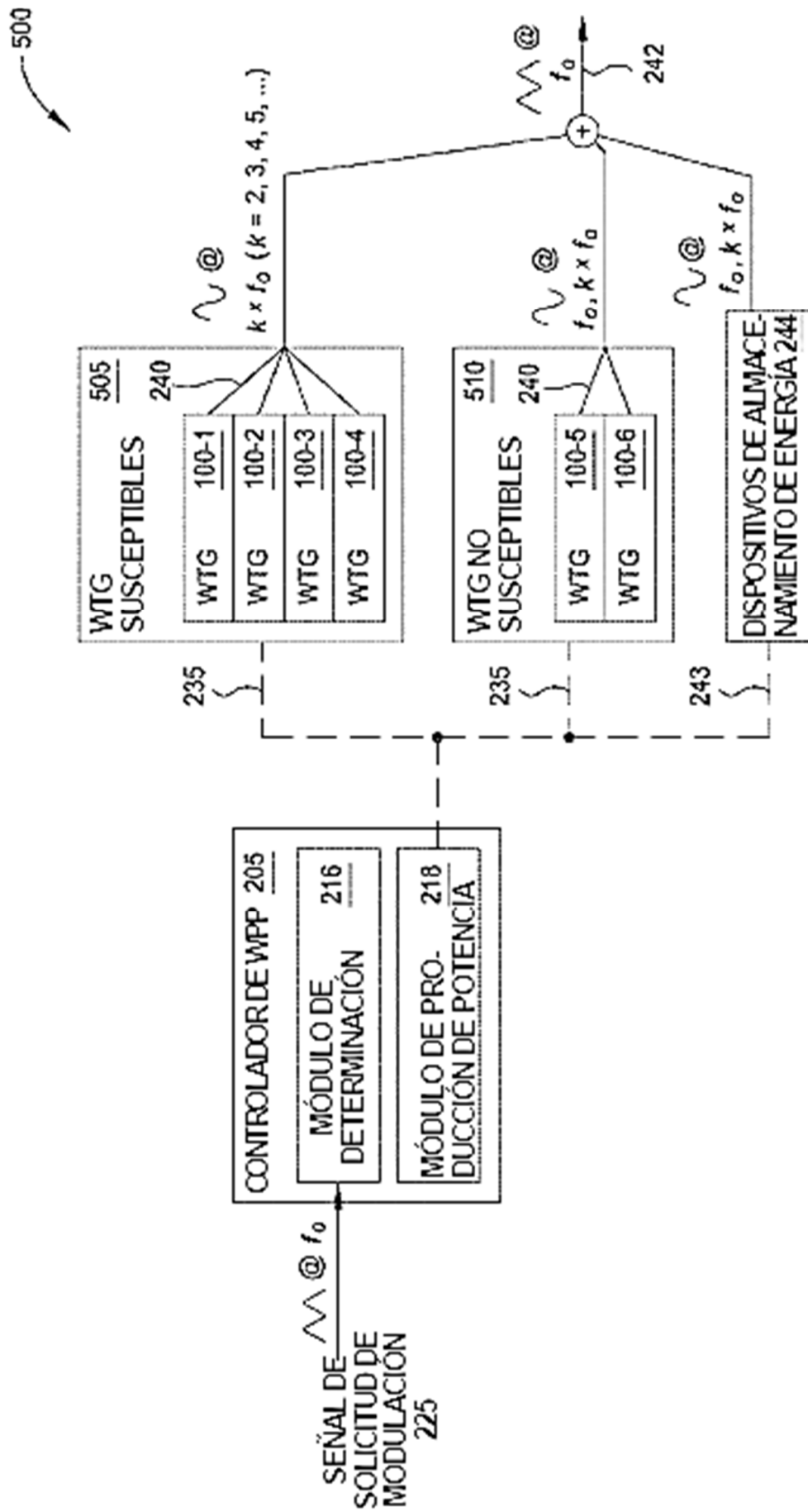


FIG. 5