

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 547 004**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02 (2006.01)

F03D 7/04 (2006.01)

F03D 9/00 (2006.01)

H02P 9/48 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.11.2006 E 06124882 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **05.08.2015 EP 1790850**

54 Título: **Sistema de control de turbinas eólicas y empresas de energía eléctrica**

30 Prioridad:

29.11.2005 US 289349

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

30.09.2015

73 Titular/es:

**GENERAL ELECTRIC COMPANY (100.0%)
1 RIVER ROAD
SCHENECTADY, NY 12345, US**

72 Inventor/es:

**DELMERICO, ROBERT WILLIAM y
MILLER, NICHOLAS WRIGHT**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 547 004 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

Sistema de control de turbinas eólicas y empresas de energía eléctrica

La invención se refiere en general al campo de los generadores de turbinas eólicas utilizados para la generación de energía para empresas de energía eléctrica y, más particularmente, a técnicas para la estabilización de energía durante condiciones transitorias.

Los generadores de turbinas eólicas son considerados como fuentes alternativas respetuosas del medio ambiente y relativamente baratas de energía que utilizan la energía eólica para producir energía eléctrica. Un generador de turbina eólica incluye generalmente un rotor eólico que tiene palas de turbina que transforman la energía eólica en un movimiento de rotación de un eje de accionamiento, que a su vez se utiliza para conducir un rotor de un generador eléctrico para producir energía eléctrica. Los sistemas de generación de energía eólica modernos normalmente toman la forma de un parque eólico que tiene múltiples de tales turbinas eólicas que son operables para suministrar energía a un sistema de transmisión que proporciona energía a un sistema de empresas de energía eléctrica.

Estos generadores de turbinas eólicas y parques eólicos normalmente están diseñados para suministrar energía al sistema de empresas de energía eléctrica con el poder de ser independientes de la frecuencia del sistema. Algunos generadores de turbinas eólicas tienen una operación de frecuencia variable y requieren un convertidor electrónico de energía de frecuencia variable para conectar la salida del generador de turbina eólica con la red de suministro eléctrico. En un enfoque común la salida del generador de turbina eólica se alimenta directamente a un convertidor electrónico de energía, donde se rectifica la frecuencia de la turbina y se invierte en una frecuencia fija, según sea necesario mediante el sistema de empresas de energía eléctrica. Un enfoque alternativo utiliza un generador asíncrono doblemente alimentado (DFAG) con un convertidor electrónico de energía de frecuencia variable que excita las bobinas del rotor DFAG y del estator estando acoplados directamente al sistema de empresas de energía eléctrica.

En los sistemas tradicionales de energía, la frecuencia de los generadores síncronos del sistema de energía coincide con el sistema de empresas de energía eléctrica, y la respuesta dinámica de la frecuencia del sistema de empresas de energía eléctrica depende de la inercia de los generadores síncronos y cargas. Los generadores sincrónicos utilizados en un sistema de energía tradicional son capaces de contribuir en el control de la frecuencia y el voltaje del sistema eléctrico durante condiciones transitorias, es decir, un fallo repentino de generación, falla en la línea o la conexión de una carga grande. Durante de condiciones transitorias, la frecuencia del sistema comienza a cambiar a una velocidad determinada principalmente por el momento cinético total del sistema. El momento cinético total es una suma del momento angular de todos los generadores y las cargas rotativas conectadas al sistema de energía. En tales condiciones transitorias, los generadores síncronos también pueden proporcionar servicios de control adicionales que modulan la energía activa para estabilizar el sistema de energía y restaurar la frecuencia a su valor nominal.

Las turbinas eólicas, cuando se utilizan para la generación de energía en un sistema de energía, sin embargo, no contribuyen a la estabilización de la frecuencia del sistema de empresas de energía eléctrica. A medida que más energía generada por las turbinas eólicas se interconecta a través del sistema de empresas de energía eléctrica, sería deseable que las turbinas eólicas contribuyan también para el control de voltaje y la frecuencia del sistema de energía en condiciones transitorias con el fin de estabilizar el sistema de energía.

Gonzalo Costales Ortiz et al., Solicitud OMPI N° 03023224, describe un sistema para el uso de la inercia de la turbina mecánica para la estabilidad dinámica y control de frecuencia. El sistema utiliza una referencia de frecuencia fija y la derivada de la frecuencia para calcular el par suplementario y la salida de energía al sistema. Términos derivados de los sistemas de control están sujetos al ruido que puede afectar al rendimiento. Una referencia fija es una dificultad en realizaciones en las que el control de la turbina se desea para realizar un seguimiento de las fluctuaciones normales en la frecuencia de servicio sin par suplementario indebido o interacciones de energía.

El documento DE 198 27 261 C1 divulga un procedimiento para compensar/corregir las fluctuaciones de energía (delta P) de un generador en el que el estator del generador es accionado directamente desde una máquina de producción, y el rotor del generador es accionado directamente desde una unidad de velocidad variable de tal manera que una fluctuación de energía detectada (delta P) se ajusta a cero cambiando las revoluciones del rotor reales (NR). En el documento US-A-5 225 712 se describe un convertidor de energía de turbina eólica que suaviza la energía de salida de una turbina eólica de velocidad variable, para reducir o eliminar las fluctuaciones de energía sustanciales en la línea de salida. El convertidor de energía tiene un convertidor de CA a CC conectado a un generador de velocidad variable que convierte la energía eólica en energía eléctrica, un inversor de CC a CA conectado a una red de suministro eléctrico, y un enlace de voltaje de CC conectado a un dispositivo de almacenamiento de energía eléctrica tal como una batería o una pila de combustible, o una célula fotovoltaica o solar.

Por lo tanto, existe una creciente necesidad de superar las limitaciones mencionadas anteriormente para los sistemas de turbina eólica y para proporcionar técnicas de control de modo que las turbinas eólicas pueden

participar en la regulación de frecuencia y la estabilización del desvío de energía para el sistema de empresas de energía eléctrica.

Un ejemplo de realización incluye un sistema de turbina eólica. El sistema de turbina eólica incluye un generador de turbina eólica que puede operar para suministrar energía de turbina eólica a un sistema de empresas de energía eléctrica. Un convertidor está acoplado al generador de turbina eólica y al sistema de empresas de energía eléctrica. La instalación eólica también incluye un controlador que comprende un marco de referencia interno del generador de turbina eólica, junto al convertidor, y configurado para modular el flujo de energía a través del convertidor en respuesta a las perturbaciones de frecuencia u oscilaciones de energía del sistema de empresas de energía eléctrica relativa al marco de referencia interno. El marco de referencia interno se implementa como un integrador que emula una inercia virtual y está configurado para proporcionar una señal de salida de frecuencia de referencia variable. El controlador está adaptado para utilizar la señal de salida de frecuencia de referencia para proporcionar una señal de entrada suplementaria como una señal de entrada, para cerrar los controles de turbina para controlar características de la turbina, tales como el paso de las palas o la velocidad de la turbina con el fin de aumentar o disminuir la energía de salida del sistema de turbina eólica. El controlador está adaptado además para proporcionar la señal de entrada suplementaria para elemento de suma para sumar con una señal de comando de par o de energía desde los controles de la turbina eólica para proporcionar una señal de entrada al convertidor para modular el flujo de energía a través del convertidor.

Otro aspecto de la invención incluye un sistema de gestión de parque eólico, el sistema comprende una pluralidad de generadores de turbina eólica operables para suministrar energía de turbina eólica a un sistema de empresas de energía eléctrica; una pluralidad de convertidores, estando cada convertidor acoplado a un respectivo generador de turbina eólica y el sistema de empresas de energía eléctrica; y un controlador de supervisión que comprende un marco de referencia interno de los generadores de turbinas eólicas y configurado para modular el flujo de energía a través de la pluralidad de convertidores en respuesta a las perturbaciones de frecuencia u oscilaciones de energía del sistema de empresas de energía eléctrica con respecto al marco de referencia interno. El marco de referencia interno se implementa como un integrador que emula una inercia virtual y está configurado para proporcionar una señal de salida variable de frecuencia de referencia. El controlador de supervisión está adaptado para utilizar la señal de salida de frecuencia de referencia para proporcionar una señal de entrada suplementaria como una señal de entrada, para cerrar los controles de turbina para controlar características de la turbina, tales como el paso de las palas o la velocidad de la turbina con el fin de aumentar o disminuir la energía de salida del sistema de turbina eólica. El controlador de supervisión está adaptado además para proporcionar la señal de entrada suplementaria a un elemento de suma para sumar con una señal de comando de par o energía de los controles de la turbina eólica para proporcionar una señal de entrada al convertidor para modular el flujo de energía a través de los convertidores.

Estas y otras características, aspectos y ventajas de la presente invención se entenderán mejor cuando la siguiente descripción detallada se lea con referencia a los dibujos adjuntos, en los que los mismos caracteres representan partes similares en todos los dibujos, donde:

La figura 1 es una representación esquemática de un sistema de turbina eólica para la estabilización de la energía y la frecuencia durante condiciones transitorias para un sistema de empresas de energía eléctrica de acuerdo con una realización;

La figura 2 es una representación esquemática de un circuito de control utilizado por el controlador de la figura 1 para proporcionar una señal de entrada suplementaria a fin de estabilizar la energía y la frecuencia durante condiciones transitorias de acuerdo con una realización;

La figura 3 es una representación gráfica de los límites de energía ejemplares forzadas, mientras que genera la señal de entrada suplementaria en el circuito de control de la figura 2;

La figura 4 es una representación gráfica simulada de desviación de frecuencia o respuesta a la perturbación de una perturbación del sistema oscilatorio con y sin el circuito de control como se muestra en la figura 2;

La figura 5 es una representación gráfica simulada de la respuesta a la perturbación de energía suplementaria para una perturbación del sistema oscilatorio con y sin el circuito de control como se muestra en la figura 2;

La figura 6 es una representación gráfica simulada de desviación de frecuencia o respuesta a la perturbación de una perturbación del sistema oscilatorio monotónica con y sin el circuito de control como se muestra en la figura 2;

La figura 7 es una representación gráfica simulada de la respuesta a la perturbación de energía suplementaria para una perturbación del sistema monotónica con y sin el circuito de control como se muestra en la figura 2; y

La figura 8 es una representación esquemática de un sistema de gestión de parques eólicos para la estabilización de la energía y la frecuencia durante condiciones transitorias de acuerdo con una realización.

Con referencia en general a la figura 1, se proporciona un sistema de turbina eólica 10 operable para generar energía eléctrica. El sistema de turbina eólica 10 comprende un buje 12 que tiene múltiples palas 14. Las palas 14 convierten la energía mecánica del viento en un par de rotación, que se convierte adicionalmente en energía

eléctrica por el sistema de turbina eólica 10. El sistema de turbina eólica 10 incluye, además, una porción de la turbina 16 que es operable para convertir la energía mecánica del viento en un par de rotación y un generador 18 que es operable para convertir el par de rotación producido por la porción de turbina 16 en energía eléctrica. Un tren de transmisión 20 se proporciona para acoplar la porción de turbina 16 al generador 18. El generador de turbina eólica 18 comprende típicamente un generador asíncrono doblemente alimentado o un generador síncrono de conversión completa o un generador para su uso con un convertidor completo. En una realización de conversión completa, la bobina del estator del generador de turbina eólica (no mostrado) se alimenta directamente al convertidor. En una realización doblemente alimentada, la bobina del rotor del generador (no mostrado) está acoplada al convertidor y la bobina del estator del generador (no mostrado) está acoplada directamente al sistema de empresas de energía eléctrica.

La porción de turbina 16 incluye un árbol de baja velocidad de rotor de turbina 22 que está acoplada al buje 12. El par de rotación se transmite desde el árbol del rotor de baja velocidad 22 a un árbol del generador 24 a través del tren de transmisión 20. En ciertas realizaciones, como la realización ilustrada en la figura 1, el tren de transmisión 20 incluye una caja de engranajes 26 que transmite par desde un árbol de baja velocidad 22 a un árbol de alta velocidad 30. El árbol de alta velocidad 30 está acoplado al árbol del generador 24 con un elemento de acoplamiento 28. A medida que la velocidad del árbol de baja velocidad de rotor de turbina 22 fluctúa, la frecuencia de salida del generador 18 también varía. En una implementación de la realización anterior, la capacidad de sobrecarga transitoria de los sistemas de turbina eólica eléctricos y mecánicos a plena carga es utilizada por la disminución de paso de las palas y/o velocidad de la turbina para aumentar la energía transitoriamente. El grado y la duración de esta sobrecarga se gestionan de manera que se evita la tensión indebida en los componentes mecánicos y eléctricos del sistema.

En una realización ejemplar, el generador 18 está acoplado a los controles de la turbina eólica 44. Los controles de la turbina eólica 44 reciben señales desde el generador 46 que son representativos de los parámetros de funcionamiento del generador. Los controles de la turbina eólica 44 en respuesta pueden generar señales de control, por ejemplo una señal de paso 56 para cambiar el paso de las palas 14. Los controles de la turbina eólica 44 también están acoplados a un controlador 32 que tiene un marco de referencia interno, que se describe con más detalle en referencia a la figura 2. El controlador 32 está acoplado a un convertidor 34. La entrada 48 de los controles de la turbina eólica 44 y la entrada 50 desde el controlador 32 se suman en un elemento de suma 52 y se suministra como entrada 54 al convertidor 34. El convertidor 34 incluye típicamente componentes de electrónica de energía para convertir la salida de frecuencia variable 36 del generador 18 en una salida de frecuencia fija 38 para el suministro a un sistema de empresas de energía eléctrica o una red eléctrica 40. Los controles de la turbina eólica 44, el controlador 32 y el convertidor 34 se describen con más detalle con referencia a la figura 2.

El controlador 32 está configurado para modular el flujo de energía a través del marco de referencia interno del convertidor. El controlador 32 también está acoplado al sistema de empresas de energía eléctrica 40 y recibe señales de entrada 42 desde el sistema de empresas de energía eléctrica 40. Las señales 42 pueden ser representativas de los parámetros del sistema de empresas de energía eléctrica, por ejemplo, de frecuencia o de energía.

También se muestra en la figura 1 el bloque 60 representativo de elementos de almacenamiento de energía opcional, elementos de consumo de energía opcional o combinaciones de los mismos. Los elementos de almacenamiento de energía pueden comprender elementos tales como baterías, condensadores y volantes de inercia, por ejemplo. Los elementos de consumo de energía pueden comprender cargas o resistencias disipativas, por ejemplo. Tales elementos pueden estar opcionalmente controlados por un controlador de convertidor local (dentro de convertidor de 34) o mediante otro controlador si se desea. Por ejemplo, el flujo de energía en al menos un elemento de almacenamiento de energía o un elemento consumidor de energía puede ser modulado en respuesta a las perturbaciones de frecuencia u oscilaciones de energía del sistema de empresas de energía eléctrica con respecto al marco de referencia interno.

La figura 2 es una ilustración esquemática de un circuito de control ejemplar empleado en el controlador 32. El controlador 32 proporciona una señal de entrada suplementaria al convertidor 34, que puede comprender una señal de energía o de par y se denota generalmente por el número de referencia 50 y el símbolo ΔP . Cabe señalar que energía y par se utilizan indistintamente en la descripción en el presente documento. Como se discute en más detalle a continuación, la señal de entrada suplementaria ΔP es típicamente una función de al menos uno de ángulo relativo, frecuencia relativa, o el tiempo con respecto al servicio del sistema y el marco de referencia interno. Se espera que la señal de entrada suplementaria ΔP conduzca a un aumento o disminución de la energía de salida del sistema de la turbina eólica para estabilizar el sistema general de servicio. ΔP es cero cuando el marco interno de referencia coincide con la frecuencia del sistema de empresas de energía eléctrica y el ángulo durante condiciones de estado estacionario. Bajo condiciones transitorias, si la frecuencia del sistema o el ángulo con relación al marco de referencia interno está disminuyendo entonces ΔP debe aumentarse para mejorar la operación estable. Del mismo modo, si la frecuencia del sistema o el ángulo con relación al marco de referencia interno está aumentando entonces ΔP se reduce para mejorar el funcionamiento estable del sistema de empresas de energía eléctrica. Además, la señal de entrada suplementaria ΔP puede ser continua o discreta y puede ser implementada como una función de circuito cerrado o abierto, sujeto a ciertos límites del sistema como se explica a continuación.

Haciendo referencia de nuevo a la figura 2, una señal de orden de energía o de par 48 desde los controles de turbina eólica 44 también se puede proporcionar como entrada al convertidor 34. La señal de entrada suplementaria ΔP y la señal de mando 48 pueden resumirse en el elemento de suma 52. El convertidor 34 típicamente incluye un controlador de convertidor local (no mostrado) para convertir las entradas en comandos de señal de conmutación del convertidor. En otra realización, la señal de entrada suplementaria 50 se introduce en los controles de la turbina eólica 44, y el elemento de suma 52 se incluye dentro de los controles de la turbina eólica 44. Tales realizaciones proporcionan flexibilidad adicional. Por ejemplo, las funciones de límite adicionales pueden insertarse entre el elemento de suma 52 y el convertidor 34. En otra realización más, el elemento de suma 52 está fuera de los controles de la turbina eólica 44, y la señal de entrada suplementaria 50 se introduce en los controles de la turbina eólica 44 además de ser alimentados al elemento de suma 52. Cuando la señal de entrada suplementaria 50 se proporciona a los controles de turbinas eólicas 44, hay una opción para utilizar la señal de entrada suplementaria 50 para la alimentación de control previo de características tales como el control de paso de pala o velocidad de la turbina, por ejemplo. Cabe señalar, que la señal de control de paso de la pala o la señal de control de velocidad de la turbina se puede proporcionar en respuesta a las perturbaciones de frecuencia o las oscilaciones de energía del sistema de empresas de energía eléctrica con respecto al marco de referencia interno. En aún otra realización, la señal de entrada suplementaria 50 puede utilizarse para modular elementos opcionales de almacenamiento de energía, elementos de consumo de energía opcional o combinaciones de los mismos (mostrado como elemento 60 en la figura 1).

El controlador 32, como se describió anteriormente, utiliza una técnica de control que aumenta transitoriamente la energía de salida como una función del ángulo relativo, o frecuencia relativa entre el sistema de empresas de energía eléctrica 40 (que se muestra en la figura 1) y el marco de referencia interno 62 del generador de turbina eólica. El controlador 32 está configurado de este modo para modular el flujo de energía a través del convertidor 34 en respuesta a las perturbaciones de frecuencia o las oscilaciones de energía del sistema de empresas de energía eléctrica con respecto al marco de referencia interno 62. El marco de referencia interno 62 se implementa como un integrador en una realización ejemplar que emula una "inercia virtual" con una magnitud definida por la "M" constante. El marco de referencia interno 62 tiene una salida 64 que es variable y es la frecuencia del marco de referencia interno ω_i . Durante condiciones de estado estables la salida de frecuencia 64 del marco de referencia interno 62 será igual a la frecuencia del sistema de empresas de energía eléctrica.

La salida de frecuencia 64 puede ser diferente del sistema de empresas de energía eléctrica durante los disturbios de frecuencia.

La frecuencia relativa $\hat{\omega}$, dada por el número de referencia 66 se obtiene a partir del elemento de diferencia 68 como una diferencia de frecuencia medida ω_m (frecuencia del sistema de empresas de energía eléctrica medida) representado generalmente por el número de referencia 70 y la frecuencia de rotación del marco de referencia interno ω_i . La frecuencia relativa $\hat{\omega}$ se entrega al bloque 72, donde se ajusta mediante la frecuencia base ω_b y se integra para generar un ángulo $\hat{\delta}$, representado generalmente por el número de referencia 74 que es un ángulo relativo con respecto al marco de referencia interno 62. El ángulo relativo $\hat{\delta}$ se calcula por lo tanto a partir de la integral de la frecuencia relativa $\hat{\omega}$ multiplicado por una frecuencia base constante ω_b para convertir por unidad de frecuencia en radianes.

Una entrada de control suplementario 76 se puede usar como una entrada opcional al marco de referencia interno 62 en un ejemplo para añadir las características de control de caída de energía con frecuencia. Un circuito de realimentación 78 se proporciona para ajustar la salida de marco de referencia interno como una función del cambio en la energía de la turbina o el par, que se puede combinar en el elemento de suma 80 con entrada de control suplementario 76. Para la realización ejemplar, este circuito de retroalimentación emulará el efecto de inercia de la frecuencia de trama de referencia interna debido a los cambios en la energía de salida. En una forma de realización de circuito cerrado opcional, el circuito de realimentación 78 se puede derivar de la diferencia entre el par de control o de mando de energía de la turbina 48 y la energía de turbina medida, que puede además opcionalmente combinarse en el elemento de suma 80 con entrada de control suplementario 76.

El controlador 32 está configurado además para emplear un par o función de transferencia de energía 82, en un ejemplo para generar la señal de entrada suplementaria ΔP . En una realización más específica, en la que la función de transferencia 82 es una función tanto del ángulo relativo como de la frecuencia relativa, la frecuencia relativa es modificada por el elemento de amortiguación D, se muestra en general con la referencia numérica 84, el ángulo relativo es modificado por un par de torsión o energía constante, el elemento Kd, que se muestra generalmente por el número de referencia 86, y la suma se proporciona en el elemento de suma 88 para obtener la señal de entrada suplementaria ΔP . Como se describió anteriormente, una implementación ejemplar también acomoda el almacenamiento de energía adicional y los elementos disipadores de energía.

Una función de límite 90 se emplea, además, en una realización ejemplar para limitar el ángulo relativo 74, una

trama de frecuencia de referencia interna 64, una señal de energía o par de torsión 50, o cualquiera de sus combinaciones. Aunque un solo bloque 90 se ilustra para fines de ejemplo, una o más funciones o controladores pueden utilizarse para implementar la función de límite 90 si se desea. Los límites son útiles porque, cuando el generador de turbina eólica está funcionando en o cerca de una salida de potencia nominal, a continuación, un aumento en el poder tiende a sobrecargar el generador y el convertidor. Los límites 92, 94 o 96, utilizados por la función de límite 90 pueden ser límites insospechados, límites dependientes del tiempo, o combinaciones de los mismos. Algunos ejemplos no limitantes de los límites utilizados por la función de límite 90 incluyen limitaciones físicas en la instalación eólica, límites de energía, límites de par, límites de velocidad de rampa, límites de la energía, y límites de velocidad del rotor del generador de turbina eólica. Ejemplos de límites físicos incluyen la capacidad térmica de los equipos de conversión de energía, límites de corriente del convertidor y el estrés mecánico del árbol de transmisión. Ejemplos de límites de energía incluyen el almacenamiento de energía y los límites de energía de disipación.

Además puede haber límites superiores específicos y límites más bajos para la estabilidad del sistema. Un límite superior utilizado por la función de límite 90 es típicamente una función de uno o más de los siguientes: condiciones térmicas del convertidor, historia de carga, tiempo e incluso la temperatura ambiente. El límite inferior tenderá a ser simétrico en comparación con el límite superior, aunque no se requiere que sea así. Además, la función de límite puede ser un límite en la salida de un bloque de control, o un límite o banda muerta en la entrada a un bloque de control. El límite de la banda muerta es el tipo de límite en el que más de alguna banda en torno a cero no hay acción y más allá de un umbral se requiere una acción para dar cabida al límite. Algunos de los límites ejemplares empleados por el controlador 32 se describen con más detalle a continuación y con referencia a la figura 3.

Como un ejemplo específico, ya que el saldo total de energía en la turbina eólica dicta la velocidad de accionamiento del tren, el balance de energía se puede utilizar para determinar los límites como se discute aquí. La energía extraída de la turbina, más allá de la suministrada por el par inducido por el viento, ralentizará la máquina hacia abajo. La energía total extraída es la integral de esta diferencia de energía. Además, la turbina tiene un límite inferior en la velocidad, por debajo del cual se produce la parada. Por lo tanto, la energía total extraída también debe ser limitada, de modo que se mantiene una velocidad mínima, con cierto margen. En un ejemplo, un límite dinámico que es una función de la energía extraída puede usarse para abordar este aspecto.

La figura 3 es una representación gráfica de un límite de energía superior en la técnica de control de la figura 2. El gráfico 100 muestra el eje X como energía de la turbina (P_i), que se denota generalmente por el número de referencia 102, y el eje Y como límite superior ΔP_{max_0} , se muestra generalmente por el número de referencia 104. Un límite superior máximo $\Delta P_{\text{límite superior}}$ se asigna en una realización ejemplar, como se muestra por el número de referencia 106. Por lo tanto, en cualquier instante de tiempo, el límite superior, ΔP_{max_0} puede calcularse como sigue:

$$\Delta P_{\text{max}_0} = \Delta P_{\text{límite superior}} \left\{ \frac{(P_i - P_{\text{min}})}{(P_{\text{nominal}} - P_{\text{min}})} \right\} \quad (1)$$

donde $\Delta P_{\text{límite superior}}$ es un límite superior duro, tal como 10% de la energía nominal, por ejemplo; P_{nominal} es la energía nominal del generador de turbina eólica, tales como 1500 kW (kilovatios), por ejemplo, que se muestra con la referencia numérica 108; P_i es la lectura de la energía de la turbina en el momento de condición transitoria, que se muestra generalmente por el número de referencia 110; y P_{min} 112 es la energía de la turbina más baja por debajo de la cual la función de controlador es desactivada por cualquier regulación al alza.

Se espera que una limitación de orden superior (es decir, no lineal) optimice el rendimiento. En este ejemplo, el límite es más restringido como una función de la energía, como se muestra a continuación en la ecuación 2:

$$\Delta P_{\text{max}}(t) = \Delta P_{\text{max}_0} - k \int \Delta P \, dt \quad (2)$$

La ecuación 2 ilustra una limitación dependiente del tiempo de un límite de energía superior $\Delta P_{\text{max}}(t)$, basado en la historia de la energía ($k \int P \, dt$) siendo k un momento constante y siendo t el tiempo.

En otra realización, el límite es una función de la velocidad del rotor. La siguiente ecuación utiliza una función lineal para fines de ejemplo; más funciones complejas de velocidad de la turbina se pueden aplicar si se desea.

$$\Delta P_{\text{max}}(t) = \Delta P_{\text{max}_0} \left\{ \frac{(U(t) - U_{\text{min}})}{(U_{\text{nominal}} - U_{\text{min}})} \right\} \quad (3)$$

donde U_{min} es mayor que la velocidad mínima de la turbina para proporcionar margen, U_{nominal} es la velocidad de la turbina a la energía nominal y $U(t)$ es la velocidad instantánea del generador de turbina eólica. Sería muy apreciado por los expertos en la técnica, que las ecuaciones similares se aplicarían a límites mínimos ΔP , pero con signos y límites ajustados apropiadamente.

La dinámica del sistema alrededor de un punto de equilibrio para una colección de generadores conectados a una red de servicio se resumen a continuación en la ecuación (4), donde ω y δ son vectores de frecuencia eléctrica y el ángulo de los generadores, con relación a un marco de referencia común, respectivamente; y M , D , K y C son las matrices equivalentes de inercia del sistema de amortiguación, coeficientes, constantes de par y coeficientes de

acoplamiento, respectivamente. El término $\Delta P(t, \hat{\delta}, \hat{\omega})$ es la contribución de energía suplementaria procedente del generador de turbina eólica con respecto a las variables internas $\hat{\omega}$ y $\hat{\delta}$.

$$\begin{bmatrix} \delta \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & C \\ M^{-1}K & M^{-1}D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta P(t, \hat{\delta}, \hat{\omega}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

5 La respuesta de un sistema de empresas de energía eléctrica de inercia agrupado sencillo 40 sujeta a una perturbación ΔP_d se da a continuación en la ecuación (5):

$$M\omega + D\omega + K\delta = \Delta P(t, \hat{\delta}, \hat{\omega}) + \Delta P_d \quad (5)$$

$$\delta = \omega \cdot \omega_b$$

donde ω_b es la frecuencia base del sistema.

Una de las estrategias de control para generar la señal de entrada de alimentación suplementaria ΔP es añadir
10 términos de sincronización y de amortiguación en fase con elementos de $\hat{\delta}$ y $\hat{\omega}$, respectivamente. Estos términos se utilizan para ayudar a dar forma a la respuesta a la perturbación del sistema para reducir la pendiente y la magnitud de las oscilaciones angulares, y mejorar la amortiguación, como se describirá en referencia con las figuras 4-7. El circuito de control como se muestra en la figura 2 se aprovecha de la capacidad de sobrecarga inherente del sistema eléctrico y mecánico de turbinas eólicas sujetas a límites de par máximo, la energía, las tasas de rampa, y la
15 velocidad del generador. El uso de resistencias de disipación y de almacenamiento de energía suplementario con controles de circuito cerrado de amortiguación minimiza la interacción con resonancias mecánicas turbina.

Las figuras 4-7 ilustran las respuestas de perturbación simulada para un sistema de turbina eólica con y sin el
circuito de control como se muestra en la figura 2. La figura 4 y la figura 5 muestran las respuestas de frecuencia y
20 de energía, respectivamente, para una perturbación del sistema oscilatorio. En la figura 4, el eje X del gráfico simulado 114 se denota por el número de referencia 116 y generalmente representa el tiempo después de la desviación de frecuencia o perturbación (tiempo transitorio) y el eje Y, denotado por el número de referencia 118, representa la frecuencia de la respuesta. Como se ilustra, la curva 120 es la respuesta a la perturbación del sistema de empresas de energía eléctrica sin emplear el circuito de control de la figura 2. La curva 122 en el otro lado muestra la respuesta de frecuencia para la perturbación del sistema de empresas de energía eléctrica de cuando el
25 circuito de control de la figura 2 se emplea en el sistema de turbina eólica. Los límites utilizados fueron +/- 3% del límite en la señal de alimentación suplementaria.

En el gráfico simulado 124, como se muestra en la figura 5, el eje X se denota por el número de referencia 126 y generalmente representa el tiempo transitorio y el eje Y, denotado por el número de referencia 128, representa la
30 señal de energía suplementaria. Como se ilustra, la línea 130 es la entrada de energía adicional cero cuando no se emplea el circuito de control de la figura 2. La curva 132 en el otro lado muestra la entrada de energía suplementaria cuando el circuito de control de la figura 2 se emplea en el sistema de turbina eólica. El comportamiento de frecuencia del sistema resultante como se muestra por la curva 122 en la figura 4 y la curva 132 en la figura 5 muestra una mejora tanto en la magnitud como la amortiguación de la fluctuación de energía.

Del mismo modo, la figura 6 y la figura 7 presentan respuestas a una perturbación para una perturbación del sistema
35 monótona. En el gráfico simulado 134 de la figura 6, el eje X se denota por el número de referencia 136 y generalmente representa el tiempo transitorio y el eje Y, denotado por el número de referencia 138, representa la frecuencia de la respuesta. Como se ilustra, la curva 140 es la respuesta a la perturbación del sistema de empresas de energía eléctrica sin emplear el circuito de control de la figura 2. La curva 142 en el otro lado muestra la respuesta a la perturbación del sistema de empresas de energía eléctrica cuando el circuito de control de la figura 2
40 se emplea en el sistema de turbina eólica.

La figura 7 muestra de manera similar un gráfico simulado 144 que ilustra otro par de respuestas, el eje X se denota
por el número de referencia 146 y generalmente representa el tiempo transitorio y el eje Y, denotado por el número
de referencia 148, representa la energía suplementaria del generador de turbina eólica. Como se ilustra, la línea 150
45 es la entrada de energía suplementaria cero cuando no se emplea el circuito de control de la figura 2. La respuesta 152 en el otro lado muestra la entrada de energía suplementaria cuando el circuito de control de la figura 2 se emplea en el sistema de turbina eólica.

Así como se describió anteriormente, la salida de energía transitoria o la señal de entrada suplementaria pueden
implementarse como una relación lineal o no lineal del ángulo relativo, frecuencia relativa, y/o tiempo, sujeto a
múltiples límites. También se pueden usar limitaciones en la amplitud de energía y energía. Específicamente, las
50 amplitudes de los límites de energía, que se muestran por ejemplo en +/- 0,03 pu (por unidad) en los gráficos de la

figura 5 y la figura 7 son funciones de ambas limitaciones físicas de los equipos eléctricos, especialmente el convertidor y las limitaciones físicas de los equipos mecánicos, sobre todo el par del tren de transmisión y la velocidad.

5 Será bien apreciado por los expertos en la técnica que la técnica de control descrita en este documento también puede utilizarse en un sistema para la gestión de parques eólicos. Tal sistema de gestión de parque eólico 200 se muestra como un ejemplo de realización en la figura 8. El sistema de gestión del parque eólico 200 incluye un parque eólico 210 que tiene las turbinas eólicas 212, 214 y 216 operables para suministrar energía eléctrica a un sistema de empresas de energía eléctrica 218. Se apreciará por los expertos en la técnica que tres turbinas eólicas se muestran con el propósito de ilustración solamente, y el número puede ser mayor basado en la naturaleza geográfica y los requerimientos de energía de cualquier región particular.

10 Las turbinas eólicas 212, 214, 216 incluyen rotores de turbina 220, 222, 224, cada rotor que tiene múltiples palas, que impulsan los rotores 220, 222, 224, respectivamente, para producir energía mecánica, que se convierte, a energía eléctrica por los generadores 226, 228, y 230, respectivamente. Los convertidores 232, 234, 236 se utilizan para convertir la salida de frecuencia variable a partir de los generadores 226, 228 y 230, respectivamente, en una salida de frecuencia fija. La energía producida por los generadores 226, 228 y 230 puede ser acoplada a una red de distribución de tensión o un sistema de colector 238, que está acoplado al sistema de empresas de energía eléctrica 218. En la realización ilustrada, un alimentador 240 se utiliza para acoplar las salidas de energía de los generadores de turbinas eólicas 226, 228 y 230 para el suministro a la red de distribución de tensión 238. En una aplicación típica, la red de distribución de voltaje 238 acopla la energía a partir de múltiples alimentadores (no mostrado), acoplando cada alimentador salidas de energía de múltiples generadores de turbinas eólicas.

15 En una realización ejemplar, el parque eólico 210 incluye un controlador de supervisión del parque eólico 242. El controlador de supervisión 242 está configurado para comunicarse con convertidores de turbinas eólicas individuales a través de enlaces de comunicación 244, que pueden ser implementados en hardware, software, o ambos. En ciertas realizaciones, los enlaces de comunicación 244 pueden estar configurados para comunicar a distancia las señales de datos hacia y desde el controlador de supervisión de acuerdo con cualquier protocolo de comunicación por cable o inalámbrica conocida para un experto en la técnica. El controlador de supervisión 242 incluye un marco de referencia interno, y está acoplado a los convertidores 232, 234, 236, y está configurado para modular el flujo de energía a través de los convertidores 232, 234, 236 en respuesta a las perturbaciones de frecuencia del sistema de empresas de energía eléctrica o las oscilaciones de energía en relación con el marco de referencia interno. La funcionalidad del controlador de supervisión 242 será similar a la del controlador 32 que se describe en referencia a la figura 2. En otra realización, se proporcionan una pluralidad de controladores del tipo mostrado en la figura 1 para modular el flujo de energía a través de cada convertidor respectivo.

20 Se apreciará por los expertos en la técnica, que el sistema de turbina eólica se ha hecho referencia en las realizaciones anteriores como un ejemplo de sistema de generación de energía y de gestión de energía acoplado al sistema de empresas de energía eléctrica. Aspectos de la presente técnica son igualmente aplicables a otras fuentes de generación distribuida operables para suministrar energía al sistema de empresas de energía eléctrica. Ejemplos de tales fuentes incluyen las pilas de combustible, microturbinas y sistemas fotovoltaicos. Tales sistemas de gestión de energía incluirán igualmente convertidores, estando cada convertidor acoplado a una fuente de generación respectiva y al sistema de empresas de energía eléctrica, y un controlador individual o de supervisión acoplado a los convertidores. Como se ha explicado anteriormente en este documento, el controlador incluye un marco de referencia interno configurado para modular el flujo de energía a través de los convertidores en respuesta a las perturbaciones de frecuencia o las oscilaciones de energía del sistema de empresas de energía eléctrica con respecto al marco de referencia interno.

25 El controlador, como se describe en los ejemplos de realización, proporciona una estructura de control dinámico para modular el componente de par o de energía de la corriente de salida del generador de turbina eólica como una función del ángulo eléctrico (o frecuencia relativa o tiempo) entre el sistema de empresas de energía eléctrica y el marco de referencia virtual del generador de la turbina eólica interno ("marco de referencia interno"). Las implementaciones de las realizaciones anteriores también facilitarán ventajosamente el sistema de empresas de energía eléctrica de operación independiente del sistema de turbina eólica, si se desea, suponiendo condiciones de fuerte viento y la dinámica de carga lenta.

30 Mientras que sólo ciertas características de la invención se han ilustrado y descrito aquí, muchas modificaciones y cambios se les ocurrirán a los expertos en la técnica. Es, por lo tanto, debe entenderse que las reivindicaciones adjuntas están destinadas a cubrir todas las modificaciones y cambios que caigan dentro del alcance de la invención definida en las reivindicaciones adjuntas.

55

LISTA DE ELEMENTOS

10 sistema de turbina eólica
12 buje

	14 palas
	16 porción de turbina
	18 generador
	20 tren de transmisión
5	22 árbol de baja velocidad del rotor
	24 árbol del generador
	26 caja de engranajes
	28 acoplamiento
	30 árbol de alta velocidad
10	32 controlador
	34 convertidor
	36 generador de frecuencia
	38 frecuencia fija
	40 sistema de empresas de energía eléctrica
15	42 señal de control del sistema de empresas de energía eléctrica
	44 controles de la turbina eólica
	46 señal de control del generador
	48 señal de los controles de turbinas eólicas
	50 señal de entrada suplementaria
20	52 elemento de suma
	54 resumen de entrada al convertidor
	56 señales de control de los controles de turbinas eólicas
	60 de almacenamiento de energía o elementos disipativos/consumidores de energía
	62 marco de referencia interna
25	64 frecuencia del marco de referencia interno
	66 frecuencia relativa
	68 elemento diferencia
	70 frecuencia medida
	72 bloque integral
30	74 ángulo relativo
	76 entrada de control suplementaria
	78 señal de realimentación
	80 bloque de suma
	82 función de transferencia
35	84 elemento de amortiguación
	86 constante de par
	88 elemento de suma
	90 función de límite
	92 límites
40	94 límites
	96 límites
	100 gráfica que muestra límites de energía
	102 eje X
	104 eje Y
45	106 límite de energía superior
	108 energía nominal
	110 energía transitoria
	112 energía inicial más baja
	114 gráfico que muestra la respuesta a la perturbación de frecuencia oscilatoria
50	116 eje X
	118 eje Y
	120 respuesta sin circuito de control de la figura 2
	122 respuesta con circuito de control de la figura 2
	124 gráfico que muestra la respuesta a la perturbación de energía suplementaria oscilatoria
55	126 eje X
	128 eje Y
	130 respuesta sin circuito de control de la figura 2
	132 respuesta con circuito de control de la figura 2
	134 gráfico que muestra la respuesta a la perturbación de energía de frecuencia monótona
60	136 eje X
	138 eje Y
	140 respuesta sin circuito de control de la figura 2
	142 respuesta con circuito de control de la figura 2
	144 gráfico que muestra respuesta a la perturbación de energía suplementaria monótona
65	146 eje X
	148 eje Y

	150 respuesta sin circuito de control de la figura 2
	152 respuesta con circuito de control de la figura 2
	200 sistema de gestión de la granja eólica
	210 granja eólica
5	212 turbina
	214 turbina
	216 turbina
	218 sistema de empresas de energía eléctrica
	220 rotor
10	222 rotor
	224 rotor
	226 generador
	228 generador
	230 generador
15	232 convertidor
	234 convertidor
	236 convertidor
	238 red de distribución de tensión
	240 alimentador
20	242 controlador de supervisión

REIVINDICACIONES

1. Un sistema de turbina eólica (10) que comprende:
- 5 un generador de turbina eólica (18) operable para suministrar energía de la turbina eólica a un sistema de empresas de energía eléctrica (40);
- un convertidor (34) acoplado al generador de turbina eólica (18) y el sistema de empresas de energía eléctrica (40); y
- 10 un controlador (32) que comprende un marco interno de referencia (62) del generador de turbina eólica (18); estando dicho controlador acoplado al convertidor (34) y configurado para modular el flujo de energía a través del convertidor (34) en respuesta a las perturbaciones de frecuencia o las oscilaciones de energía del sistema de empresas de energía eléctrica (40) con respecto al marco de referencia interno (62);
- caracterizado porque:**
- dicho marco de referencia interno (62) se implementa como un integrador que emula una inercia virtual; estando dicho marco de referencia interno (62) configurado para proporcionar una señal de salida de frecuencia de referencia variable (64);
- 15 dicho controlador está adaptado para el uso dicha señal de salida de frecuencia de referencia (64) para proporcionar una señal de entrada suplementaria (50) como una señal de entrada a los controles de turbina eólica (44) para controlar características de la turbina, tales como paso de las palas o velocidad de la turbina con el fin de aumentar o disminuir la energía de salida de la instalación eólica; y
- 20 dicho controlador está adaptado además para proporcionar dicha señal de entrada suplementaria (50) para el elemento de suma (52) para sumar con una señal de par o de comando de energía (48) de los controles de turbina eólica (44) para proporcionar una señal de entrada (54) al convertidor para modular el flujo de energía a través del convertidor.
- 25 2. El sistema de la reivindicación 1, en el que el controlador (32) está configurado además para proporcionar una señal de control de paso de pala eólica o una señal de control de velocidad de la turbina (56) en respuesta a las perturbaciones de frecuencia o las oscilaciones de energía del sistema de empresas de energía eléctrica (40) con relación al marco de referencia interno (62).
- 30 3. El sistema de la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en el que el marco de referencia interno (62) está configurado para emitir una frecuencia variable que puede diferir del sistema de empresas de energía eléctrica (40) durante condiciones transitorias, y que comprende además un elemento de diferencia (68) configurado para generar una frecuencia relativa (66) que comprende una diferencia entre una frecuencia del sistema servicio medida (70) y una frecuencia de marco de referencia interna (64).
- 35 4. El sistema de cualquier reivindicación anterior, en el que el controlador (32) está configurado además para proporcionar una señal de entrada suplementaria (50) al convertidor (34), en el que la señal de entrada suplementaria (50) comprende una señal de par o de energía y es una función de al menos uno de un ángulo relativo, una frecuencia relativa, o el tiempo.
5. El sistema de la reivindicación 4, en el que el ángulo relativo (74) se calcula a partir de la integral de la frecuencia relativa (66) multiplicada por una constante para convertir frecuencia por unidad en radianes.
- 40 6. El sistema de cualquier reivindicación anterior, que comprende además una función de límite (90) configurada para limitar un ángulo relativo, una frecuencia relativa de modulación de flujo de energía, una energía o el par de señal suplementaria, o combinaciones de los mismos.
7. El sistema de la reivindicación 6, en el que la función de límite (90) comprende límites que son operables como una función de al menos uno de una limitación física en el sistema de turbina eólica, un límite de energía, un límite de par, un límite de corriente, un límite de energía, o un límite de velocidad del rotor del generador de turbina eólica.
- 45 8. El sistema de cualquier reivindicación anterior, en el que el generador de turbina eólica (18) es al menos uno de un generador asíncrono doblemente alimentado o un generador para su uso con un convertidor completo.
9. El sistema de la reivindicación 8, que comprende además un elemento de almacenamiento de energía, un elemento consumidor de energía o combinaciones de los mismos (60), donde el elemento de almacenamiento de energía, el elemento consumidor de energía o las combinaciones de los mismos están acoplados al convertidor (34).
- 50 10. Un sistema de gestión de parques eólicos (200), comprendiendo el sistema una pluralidad de generadores de turbina eólica (226, 228, 230) que puede operar para suministrar energía de

turbina eólica a un sistema de empresas de energía eléctrica (218);

una pluralidad de convertidores (232, 234, 236), estando cada convertidor acoplado a un respectivo generador de turbina eólica y el sistema de empresas de energía eléctrica; y

5 un controlador de supervisión (242) que comprende un marco de referencia interno (62) de los generadores de turbinas eólicas y configurado para modular el flujo de energía a través de la pluralidad de convertidores en respuesta a las perturbaciones de frecuencia o las oscilaciones de energía del sistema de empresas de energía eléctrica con respecto al marco de referencia interna;

caracterizado porque:

10 dicho marco de referencia interno (62) se implementa como un integrador que emula una inercia virtual; estando dicho marco de referencia interno (62) configurado para proporcionar una señal de salida de frecuencia de referencia variable (64);

15 dicho controlador de supervisión (242) está adaptado para el uso dicha señal de salida de frecuencia de referencia (64) para proporcionar una señal de entrada suplementaria (50) como señal de entrada para controles de la turbina eólica (44) para controlar características de la turbina, tales como el paso de las palas o la velocidad de la turbina de manera de aumentar o disminuir la energía de salida del sistema de turbina eólica; y

dicho controlador de supervisión está adaptado además para proporcionar dicha señal de entrada suplementaria (50) para el elemento de suma (52) para sumar con una señal de par o energía de comando (48) de los controles de turbina eólica (44) para proporcionar una señal de entrada (54) a los convertidores para modular el flujo de energía a través de los convertidores.

20

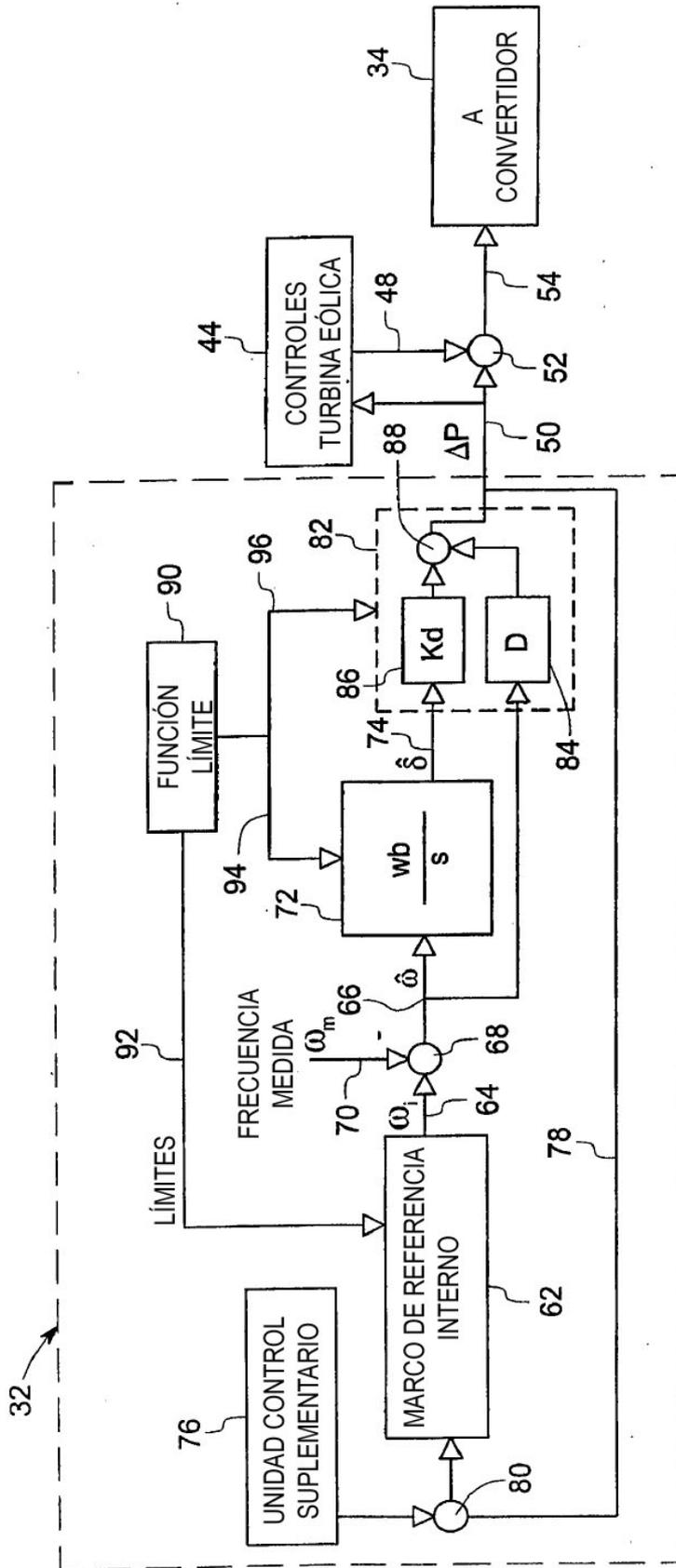


FIG. 2

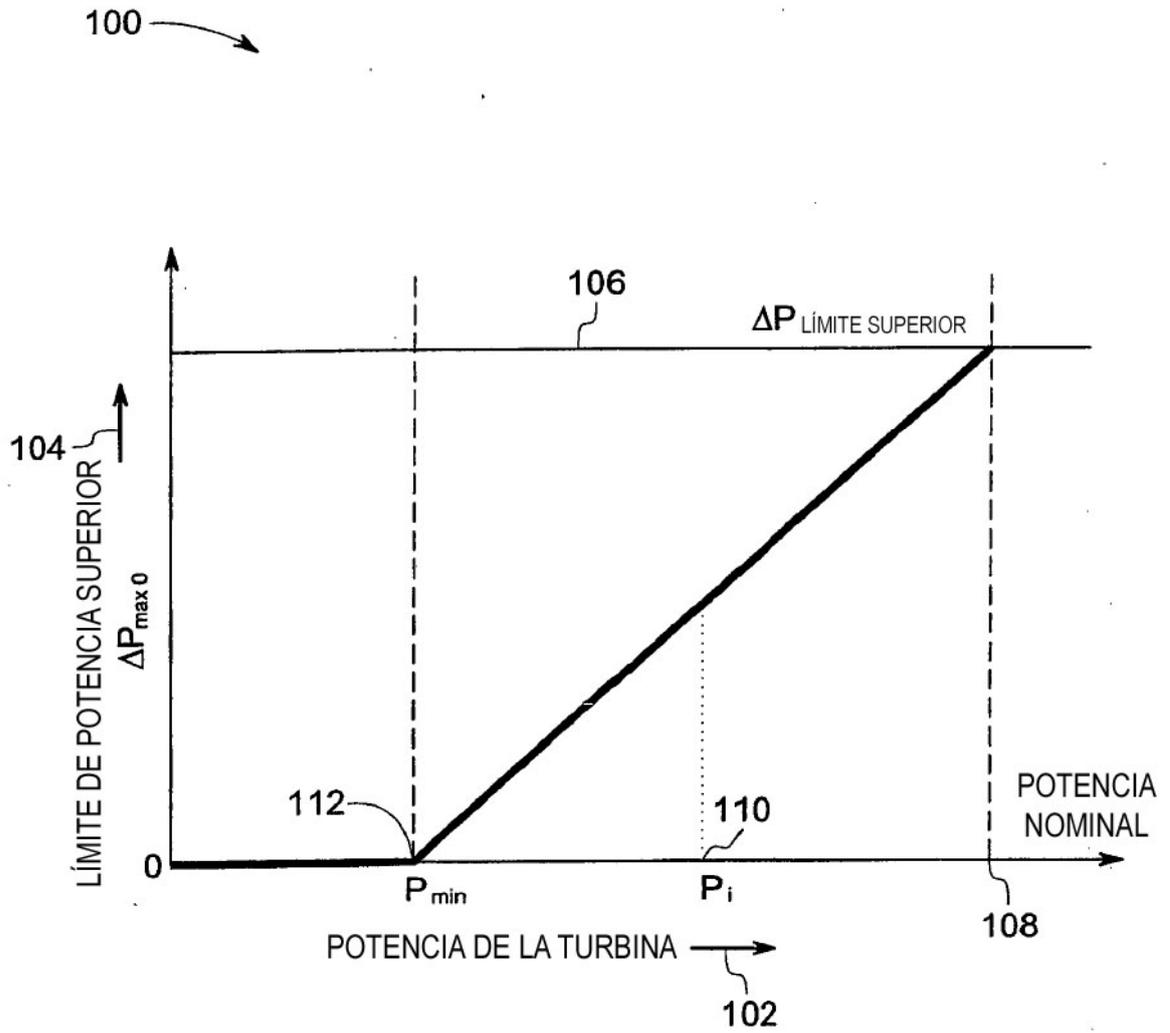


FIG. 3

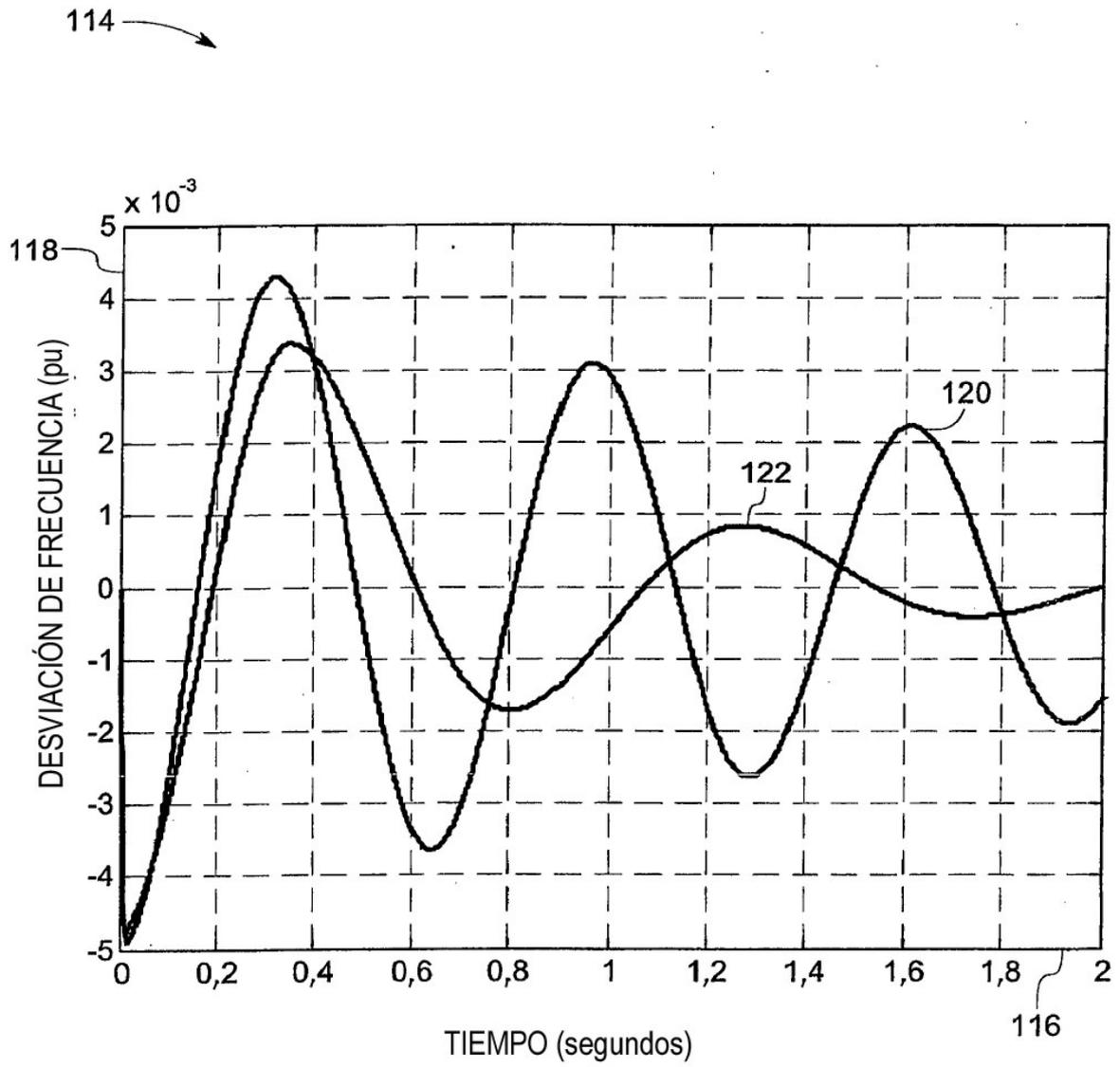


FIG. 4

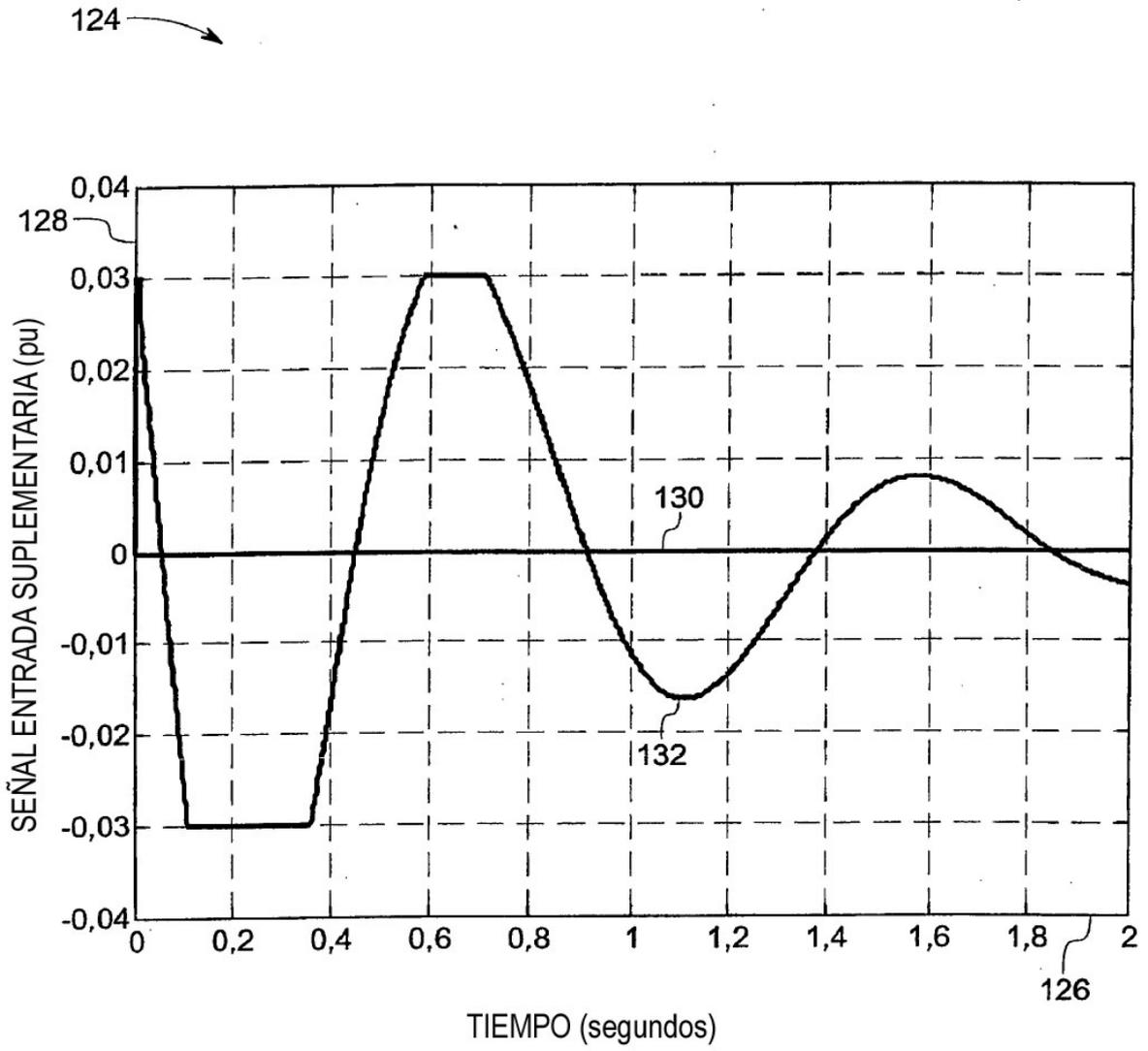


FIG. 5

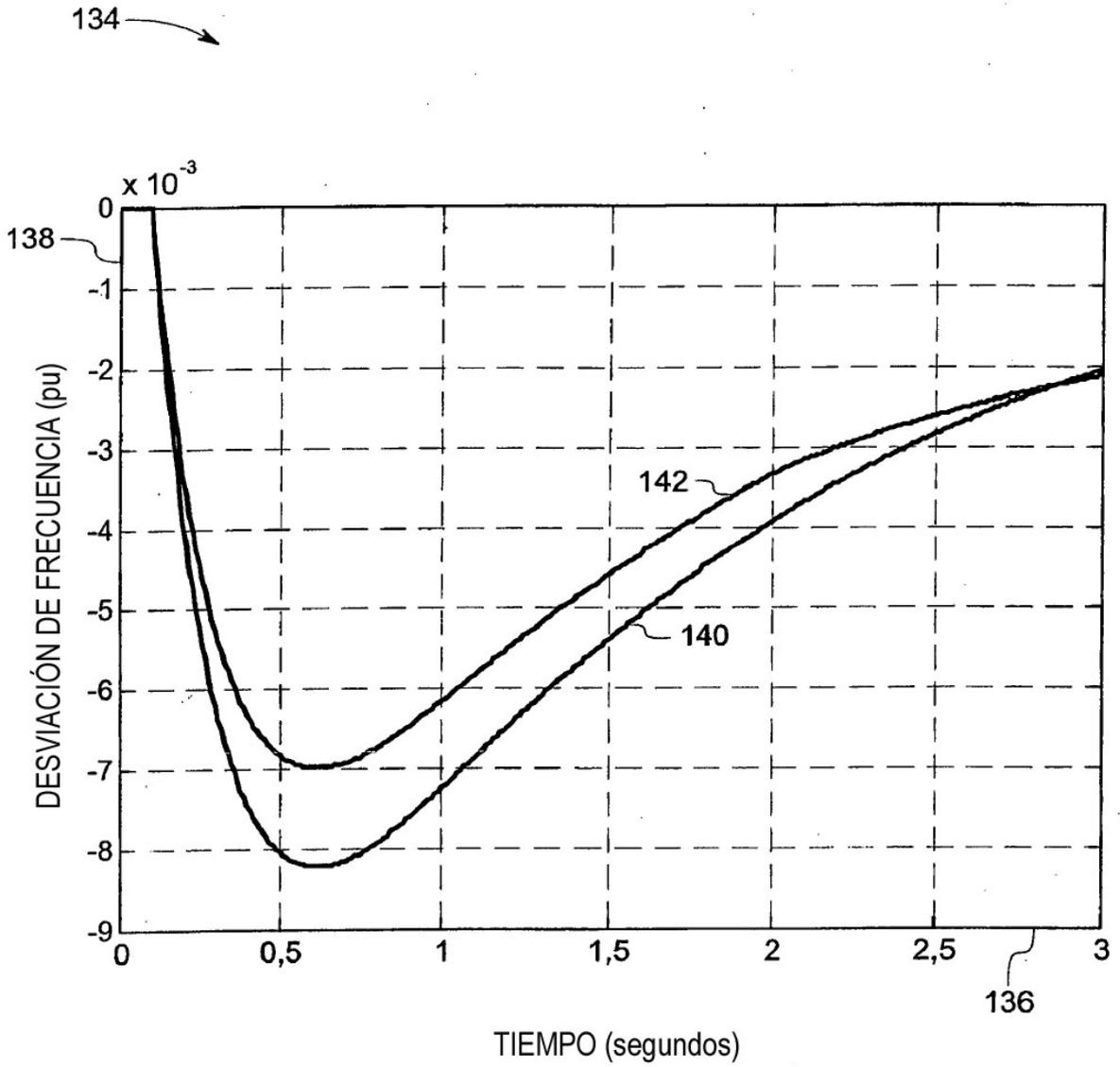


FIG. 6

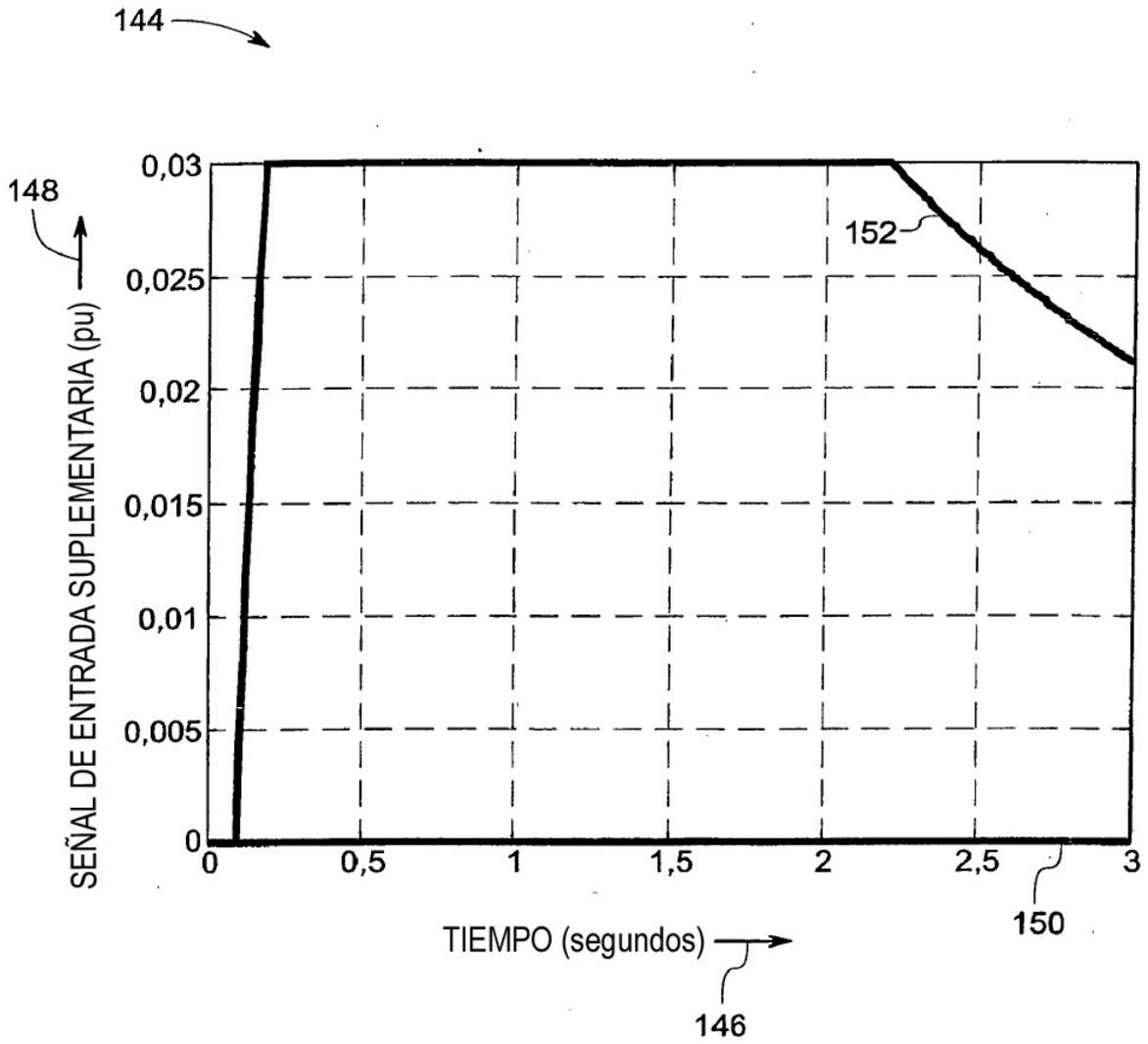


FIG. 7

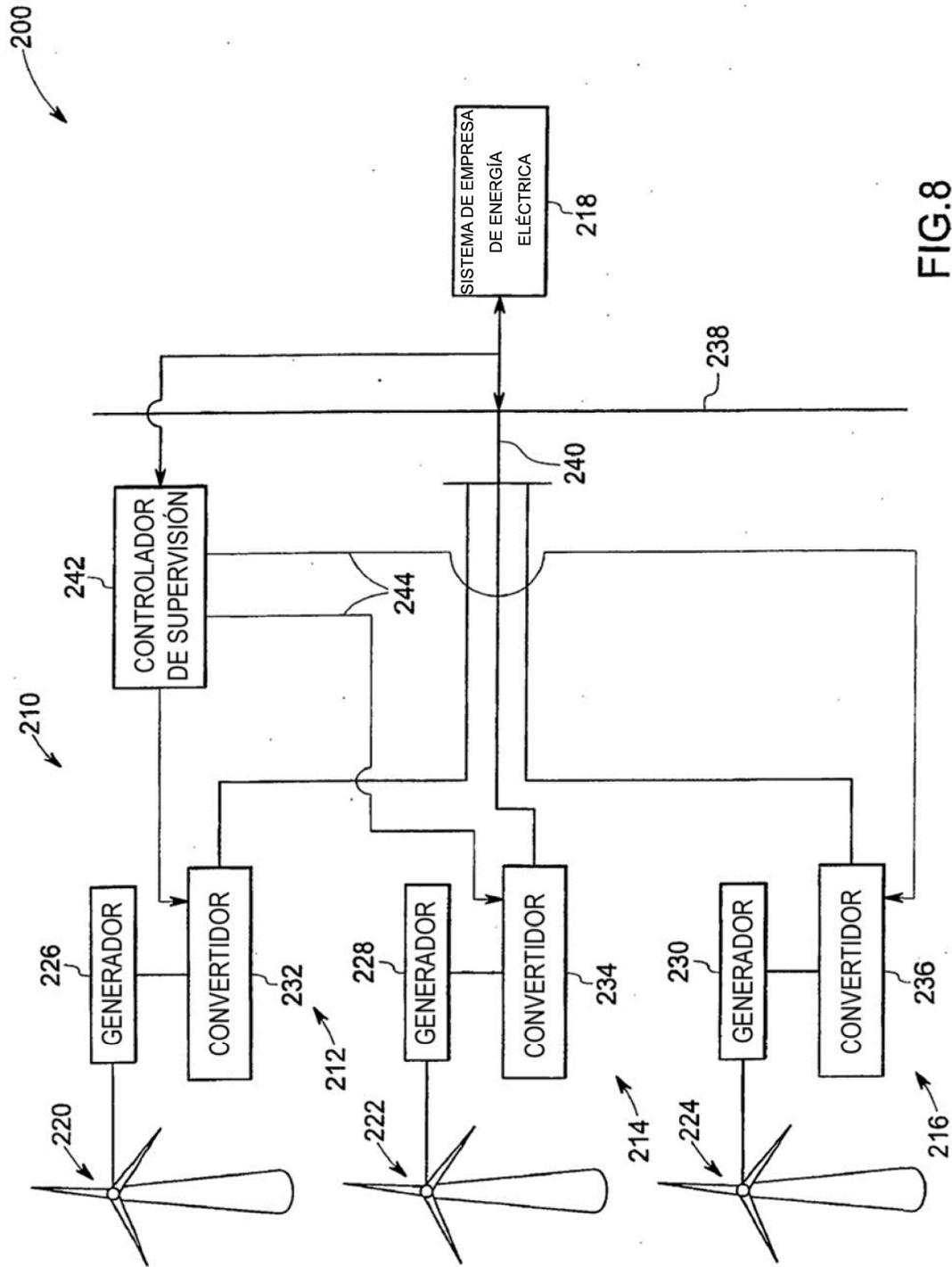


FIG.8