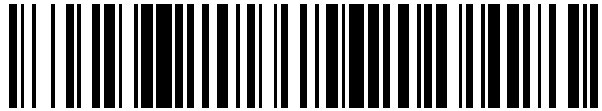


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 634 202**

51 Int. Cl.:

**H02J 3/12** (2006.01)

**H02J 3/18** (2006.01)

**H02P 9/00** (2006.01)

**G05B 11/01** (2006.01)

**H02J 3/38** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **29.06.2011 PCT/DK2011/050251**

87 Fecha y número de publicación internacional: **05.01.2012 WO12000515**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.06.2011 E 11730887 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **21.06.2017 EP 2589124**

54 Título: **Control de un transformador de planta de energía eólica**

30 Prioridad:

**30.06.2010 US 360101 P**  
**30.06.2010 DK 201000574**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**27.09.2017**

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**GARCIA, JORGE MARTINEZ**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

ES 2 634 202 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

**DESCRIPCIÓN**

Control de un transformador de planta de energía eólica

**Campo técnico de la invención**

5 Generalmente, la presente invención se refiere a la generación de electricidad y más particularmente a un método y a un dispositivo para un control mejorado de la tensión generada por los generadores de turbina eólica.

**Antecedentes de la invención**

10 La generación de energía eólica, en la que energía del viento se convierte en electricidad, está aumentando constantemente como fuente de energía. Representando una alternativa altamente respetuosa con el medio ambiente a otras fuentes de energía, las plantas de energía eólica (WPP), en las que los generadores de turbina eólica (WTG) se aglomeran, se están desarrollando y construyendo actualmente en muchos países, tanto en zonas marítimas y terrestres, como en el interior.

15 Aunque los requisitos para la conexión de WPP a la red eléctrica pueden variar, los objetivos comunes incluyen permitir el desarrollo, mantenimiento y funcionamiento de una transmisión coordinada, fiable y económica de electricidad. Sin embargo, como el viento puede cambiar frecuentemente tanto su dirección como su magnitud, la tensión generada a partir de un WTG puede ser errática. A modo de ejemplo, velocidades del viento diferentes se traducen en niveles de generación de energía activa diferentes, que tienen por tanto niveles de tensión diferentes para velocidades del viento diferentes.

20 Para compensar una fluctuación indeseada en el suministro de tensión y para contrarrestar perturbaciones en la generación de energía tales como bajadas de tensión, subidas e interrupciones momentáneas, pueden instalarse equipos de energía reactiva en las WPP. Estos equipos pueden, por ejemplo, incluir compensadores estáticos si se van a mejorar las propiedades dinámicas de las WPP, condensadores conmutables si el requisito se refiere al rendimiento de estado estable, o los equipos pueden comprender una combinación de compensadores tanto estáticos como conmutables.

25 El documento EP 1 933 441 A1 da a conocer un sistema para controlar una microrred que incluye componentes de microrred (1,2, ...,N) y una línea de conexión para acoplar la microrred a una red voluminosa; y un controlador de línea de conexión acoplado a la línea de conexión. Al menos uno de los componentes de microrred (1,2, ...,N) comprende un tipo diferente de componente que otro de los componentes de microrred (1,2, ...,N). El controlador de línea de conexión está configurado para proporcionar señales de control de línea de conexión para ajustar la energía activa y reactiva en los componentes de microrred respectivos (1,2, ...,N) en respuesta a comandos de la entidad de funcionamiento de red voluminosa, condiciones de sistema de microrred, condiciones de red voluminosa o combinaciones de las mismas.

30 El documento EP 1 508 951 A1 se refiere al control de energía real y reactiva para sistemas de generador de turbina eólica. La técnica descrita en el mismo proporciona el potencial para utilizar la capacidad total de un sistema de generador de turbina eólica para proporcionar VAR dinámica (soporte de energía reactiva). El soporte de VAR proporcionado por generadores de turbina eólica individuales en un sistema puede variar dinámicamente para adecuarse a los parámetros de aplicación.

35 La tensión de los WTG y los equipos de energía reactiva que debe suministrarse a la red se transforma a menudo mediante un transformador de WPP (WPPT). Sin embargo, para contrarrestar las perturbaciones de tensión en el suministro de energía, existe el deseo de mejorar el control de los WPPT de manera que se logran los requisitos de red con respecto a la electricidad suministrada. Sin embargo, un control de este tipo puede ser difícil de lograr, especialmente debido a que el número de WTG es grande y/o los equipos de energía reactiva impactan en las WPP.

40 Además, si la tensión en el lado primario de los WPPT es inestable, y posiblemente la tensión en los terminales de WTG también, puede deteriorarse el rendimiento de un control independiente de la tensión que va a suministrarse a la red de electricidad.

**45 Sumario de la invención**

En vista de lo anterior, un objetivo de la presente invención es proporcionar un control mejorado de los WPPT.

Según la presente invención, esto se realiza mediante un método según la reivindicación 1 adjunta.

50 Por tanto, el método de la presente invención determina la señal piloto monitorizando una señal de error que incluye una tensión de caída de línea  $D_V$  sobre una impedancia ficticia de la conexión de los WTG a los WPPT. Por tanto, los terminales de WTG se mantienen a una tensión adecuada cerca del valor nominal. En el presente documento,  $D_V$  se estima basándose en la corriente de compensación  $I_{QC}$  de la carga de compensación reactiva variable y  $I_{QMV}$ . El error de tensión  $V_{err}$ , que va a minimizarse, es igual al valor de tensión nominal  $V_R$  añadido por  $D_V$  y restado por la tensión de lado primario real  $V_{MV}$ . Incluyendo  $D_V$  y  $I_{QC}$  en el control de la señal piloto  $P_S$ , es decir, incluyendo las características de los WTG (remotos) y la carga de compensación reactiva variable, se logra un control mejorado de

los WPPT. Como consecuencia, la desviación de la tensión terminal de WTG con respecto a su valor nominal puede disminuirse, y como consecuencia adicional, la tensión suministrada a la red de electricidad por las WPP puede seguir más de cerca la tensión deseada de la red de electricidad.

5 El término “señal piloto” significa en el presente documento la señal de control de salida que se actualiza mediante  $V_{err}$ , es decir, la señal de control de salida que activa los WPPT. Además, el término “relación de bobina”, significa la relación entre los devanados de un lado primario y un lado secundario de los WPPT, de manera que un cambio de la relación de bobina de WPPT con otros parámetros que no cambian implica un cambio de la tensión transformada.

10 El lado primario de los WPPT está conectado a una pluralidad de WTG. Sin embargo, la conexión entre el lado primario de los WPPT y la pluralidad de WTG puede realizarse de muchas maneras. Como ejemplo, uno o varios transformadores pueden proporcionarse entre un WTG y los WPPT para transformar la tensión generada mediante el WTG antes de que la tensión se transforme además en los WPPT. Además, puede realizarse una barra colectora, con puntos de conexión para cada uno de los WTG para acumular la electricidad generada y conducirla a los WPPT. Generalmente, la tensión de barra colectora es menor que la tensión de red, pero adecuadamente mayor que la que sale inmediatamente de un WTG.

15 El lado primario de los WPPT se conecta también a una carga de compensación reactiva variable. La carga de compensación reactiva variable puede comprender elementos reactivos tales como, por ejemplo, condensadores, en los que la carga de compensación reactiva variable compensa por ejemplo las perturbaciones de WTG en la generación de energía y mejora también el factor de energía. La carga de compensación reactiva variable puede conectarse a una barra colectora tal como se explicó anteriormente. Una motivación importante de las presentes invenciones es que la corriente de compensación no ha sido posible aún predecir o estimar de manera fiable. A su vez, esto ha hecho más difícil el control de transformador automático.

El método de la presente invención comprende además la etapa de recibir una tensión de lado primario real  $V_{MV}$ , es decir, el potencial de tensión en el lado primario de los WPPT. A modo de ejemplo, la tensión  $V_{MV}$  puede obtenerse mediante un voltímetro conectado al lado primario de los WPPT.

25 El método comprende además la etapa de recibir una corriente de lado primario real  $I_{QMV}$ , en la que la corriente  $I_{QMV}$  puede, por ejemplo, recibirse por un amperímetro conectado al lado primario de los WPPT.

30 Tal como se observa, el método comprende además la etapa de estimar una tensión de caída de línea  $D_V$  basándose en la corriente de compensación  $I_{QC}$  y la corriente de lado primario real  $I_{QMV}$ . De manera más precisa, si la carga de compensación reactiva variable y la pluralidad de WTG se conectan a un punto común (por ejemplo la barra colectora), la corriente de la pluralidad de los WTG puede calcularse mediante la ley de corriente de Kirchhoff restando la corriente de lado primario real  $I_{QMV}$  de la corriente de compensación  $I_{QC}$ , es decir  $I_{QC} - I_{QMV}$ . Entonces, puede calcularse la tensión de caída de línea  $D_V$  como  $U=Z_W \cdot I$  con  $D_V=Z_W \cdot (I_{QC} - I_{QMV})$ , donde  $Z_W$  denota una impedancia que va a especificarse a continuación. Por tanto, la tensión de caída de línea ( $D_V$ ) se estima calculando la tensión a través de la impedancia  $Z_W$  que puede interpretarse como impedancia ficticia.

35 La impedancia principal entre la pluralidad de WTG y los WPPT se debe a uno o varios transformadores conectados a dicha pluralidad de WTG. Las impedancias de WTG pueden modelarse como impedancia agregada, y esta impedancia puede a su vez modelarse por un coeficiente de impedancia. El coeficiente de impedancia debe elegirse con el fin de dar la señal piloto  $P_S$  para las propiedades beneficiosas de WPPT. Una impedancia excesivamente grande  $Z_W$  puede dar a la señal piloto  $P_S$  una amplitud indeseablemente grande, provocando también una activación brusca de los WPPT, y una impedancia muy baja  $Z_W$  puede conducir a un control lento o insuficiente.

El método comprende además formar un error de tensión  $V_{err}$  para el control de la señal piloto  $P_S$ , sumando tensiones contributivas sobre un segmento de circuito. El error de tensión desaparece cuando la tensión  $V_{MV}$  menos la tensión de caída  $D_V$  coincide con la tensión nominal  $V_R$ .

45 En otras palabras, el error de tensión  $V_{err}$  se calcula como la suma del valor de tensión nominal  $V_R$  y la tensión de caída de línea estimada  $D_V$  menos la tensión de lado primario real  $V_{MV}$ , concretamente:  $V_{err} = V_R + D_V - V_{MV}$ .

50 El método comprende además actualizar la señal piloto  $P_S$  según el error de tensión  $V_{err}$ . El término “según” en este contexto significa que la señal piloto  $P_S$  se actualiza como función del error de tensión  $V_{err}$  mediante los principios de control automático convencionales. A modo de ejemplo, si el error de tensión  $V_{err}$  es igual a cero como resultado de aplicar un valor de  $P_S$  dado, entonces la señal piloto  $P_S$  debe permanecer sin cambios, de manera que la relación de bobina ajustable de los WPPT no cambia sino que mantiene el valor de tensión nominal  $V_R$  más la tensión de caída  $D_V$  en el lado primario del transformador. Sin embargo, si el error de tensión  $V_{err}$  no es igual a cero, la relación de bobina ajustable de los WPPT puede cambiar para aumentar o disminuir la relación de bobina, y en consecuencia, aumentar o disminuir la tensión suministrada a la red de electricidad, para contrarrestar el error de tensión  $V_{err}$ .

55 Según un aspecto, el método comprende además medir la corriente de compensación  $I_{QC}$ . A modo de ejemplo, medir la corriente de compensación  $I_{QC}$  puede llevarse a cabo disponiendo un amperímetro en la línea de conexión a través de la que la corriente de compensación  $I_{QC}$  fluye desde la carga de compensación.

Según un aspecto, el método comprende además estimar una corriente de compensación  $I_{QC}$  basándose en la carga de compensación reactiva real  $Z_V$  y la tensión de lado primario real  $V_{MV}$ . Por tanto, a partir de la tensión  $V_{MV}$  y la carga  $Z_V$ , puede estimarse la corriente de compensación real  $I_{QC}$ . A modo de ejemplo, si la carga de compensación reactiva real  $Z_V$  comprende varios condensadores dispuestos en paralelo, y la tensión que cae sobre ellos es  $V_{MV}$ , la corriente  $I_{QC}$  puede estimarse como suma de las corrientes de condensador individuales:  $I_n = V_{MV} / (1/(j\omega C_n)) = j(\omega C_n) \cdot V_{MV}$ , donde  $j$  es la unidad imaginaria,  $\omega$  es la frecuencia angular, y  $C_n$  es la capacitancia del condensador número  $n$ . Por tanto, la amplitud será  $\omega C_n$  veces la de  $V_{MV}$ , y el desfase será de  $\pi/2$ .

Según un aspecto, puede controlarse la carga de compensación reactiva variable mediante un sistema de control de supervisión y adquisición de datos (por ejemplo, SCADA), y la corriente de compensación  $I_{QC}$  se calcula basándose en un valor real de la carga de compensación reactiva  $Z_V$  recibida del SCADA. Por tanto, la carga de compensación reactiva variable se conecta de manera comunicativa al SCADA de manera que el sistema puede controlar de manera selectiva la carga de compensación reactiva variable. A modo de ejemplo, si la carga de compensación reactiva variable comprende una pluralidad de elementos capacitivos conectados en paralelo, el SCADA puede conectar o desconectar cada una de ellas.

El SCADA puede estar en contacto con diferentes medios de comunicación inalámbricos o por cable, por ejemplo una red Ethernet, y puede soportar los protocolos estándar para poner en contacto cualquier software de terceros. Una ventaja con el SCADA es la concentración de varias funcionalidades en una pasarela de comunicación central, que reduce el número de líneas de comunicación requeridas a niveles de control más altos. En las WPP, el SCADA puede conectarse de manera comunicativa a los WPPT de manera que el SCADA recibe información, por ejemplo, sobre la relación de bobina de los WPPT. El SCADA y los WPPT y/o el SCADA y la carga de compensación reactiva pueden conectarse mediante una conexión inalámbrica o mediante conexión por cable.

Debe observarse que si los compensadores estáticos STATCOM están comprendidos en las WPP, la corriente de compensación  $I_{QC}$  puede calcularse no solo dependiendo de la carga de compensación reactiva, sino también de las propiedades de los compensadores estáticos.

Según un aspecto, la etapa de estimar la tensión de caída de línea  $D_V$  comprende estimar la tensión de caída de línea  $D_V$  por un múltiplo de la diferencia de la corriente de compensación  $I_{QC}$  y la corriente de lado primario real ( $I_{QM}$ ), concretamente:  $D_V = (I_{QM} - I_{QC}) \cdot K_L$ , donde  $K_L$  es un coeficiente de impedancia. A modo de ejemplo, el coeficiente de impedancia  $K_L$  puede ser función de una o varias variables con respecto a, por ejemplo, el tamaño y/o colocación de la pluralidad de WTG y/o transformadores conectados a la pluralidad de WTG. Alternativamente, puede variarse  $K_L$  mediante un operador de las WPP para compensar las insuficiencias observadas en el control de WTPP.  $K_L$  puede ser positivo o negativo según el convenio de signo para la inyección de energía reactiva. En la presente divulgación, la inyección de corriente capacitiva desde las WPP se considera positiva, por tanto  $K_L$  debe ser negativo. Preferiblemente,  $K_L$  es un coeficiente negativo de constante determinado basándose en la impedancia del transformador conectado a la pluralidad de WTG, una aproximación motivada por el hecho de que esta impedancia es la mayor impedancia entre la pluralidad de WTG y la barra colectora. Por consiguiente,  $K_L$  representa una impedancia constante elegida con el fin de estimar la tensión de caída de línea  $D_V$ .

Alternativamente, el coeficiente de impedancia  $K_L$  se establece a un primer valor  $K_{L1}$  si la tensión de lado secundario de WPPT en el momento del acoplamiento común (PCC) está en el intervalo 0,90-0,95 p.u. (por unidad), un segundo valor  $K_{L2}$  si la tensión de lado secundario de WPPT está en el intervalo de 0,95-1,05 p.u., y un tercer valor  $K_{L3}$  si la tensión de lado secundario de WPPT está en el intervalo de 1,05-1,10 p.u. Esto permite que las características del control de realimentación varíen según las dinámicas de cambio del sistema así como los requisitos de diseño. Por ejemplo, una estrategia de control diferente puede considerarse como adecuada para errores grandes en vez de para fluctuaciones pequeñas, ya que los errores más grandes pueden tener consecuencias adicionales de gran alcance en los componentes del sistema eléctrico. A pesar de esta posibilidad de configuración potenciada, el controlador observará y esperará el error de tensión de manera completamente lineal dentro de cada intervalo, preservando de ese modo la robustez, la capacidad de análisis y otros beneficios del control lineal. Tal como entenderá rápidamente el experto en la técnica, pueden proporcionarse más de tres intervalos con coeficientes de impedancia configurables independientes, para lograr un comportamiento de control incluso más adaptable.

Según un aspecto, la carga de compensación reactiva variable comprende una pluralidad de elementos reactivos que se disponen en paralelo y se pueden conectar individualmente mediante conmutadores al lado primario del transformador. Por tanto, los elementos reactivos, que pueden ser condensadores, preferiblemente de un tipo de alta tensión, pueden conectarse mediante conmutadores al lado primario de los WPPT de manera que la contribución capacitiva al lado primario de los WPPT puede regularse mediante una operación de los conmutadores respectivos. Se ha comentado anteriormente cómo puede calcularse la corriente de compensación basándose en la corriente de lado primario real en una configuración de este tipo.

Según un aspecto, la señal piloto ( $P_S$ ) rige directamente la relación de bobina entre el lado primario y el lado secundario del transformador. Por tanto, la relación de bobina de los WPPT puede cambiarse según la señal piloto ( $P_S$ ). Ventajosamente, esto se tiene en consideración en la provisión de control automático para el transformador. Para reducir el desgaste mecánico y otras consecuencias negativas de activación muy frecuente, es importante formar una señal de error que refleje correctamente el estado del sistema. Elegir una señal de error bien

fundamentada, tal como mediante la presente invención, evita el dilema en la técnica anterior de tener que elegir entre control muy lento y desgaste excesivo.

5 A modo de ejemplo, si el error de tensión  $V_{err}$ , al que corresponde el valor de la señal piloto  $P_S$ , es cero, o posiblemente, se encuentra dentro de una zona muerta tal como un intervalo pequeño cercano al valor cero, la relación de bobina ajustable de los WPPT no se cambia, con el fin de mantener la tensión real en el lado primario del transformador. Sin embargo, si el error de tensión  $V_{err}$  no es cero, o posiblemente, se encuentra fuera de la zona muerta, la señal piloto  $P_S$  puede activar un cambio en la relación de bobina ajustable de los WPPT, y en consecuencia, aumentar o disminuir la relación entre red y tensión de barra colectora.

10 Además, la señal piloto  $P_S$  puede procesarse mediante un temporizador que determina la duración del error de tensión que supera la zona muerta. El temporizador puede incrementarse si el error de tensión  $V_{err}$ , según el cual se actualiza la señal piloto  $P_S$ , está fuera de la zona muerta. Cuando el temporizador alcanza un tiempo específico, un aumento o disminución de la señal piloto  $P_S$ , que depende de si el error de tensión  $V_{err}$  está por encima o por debajo de la zona muerta, puede ordenarse, y puede restablecerse el temporizador. Un fin de un temporizador de retardo de este tipo es reducir el desgaste del equipo.

15 De manera análoga, el temporizador puede restablecerse y/o bloquearse si el error de tensión  $V_{err}$  está dentro de la zona muerta debido a dinámicas de sistema suaves o un cambio de tomas. El funcionamiento del temporizador también puede bloquearse en los casos en que el error de tensión  $V_{err}$  cae por debajo de un límite definido y/o cuando el error de tensión  $V_{err}$  supera un límite definido.

20 Según un aspecto, la señal piloto  $P_S$  activa un cambiador de tomas dispuesto en el transformador para regir la relación de bobina entre el lado primario y el lado secundario del transformador. En otras palabras, la señal piloto  $P_S$  puede activar una reconexión a una toma de punto de conexión diferente a lo largo del devanado de transformador que permite un número diferente de vueltas del devanado de transformador que va a seleccionarse. A modo de ejemplo, el cambiador de tomas puede ser un cambiador de tomas en carga (OLTC), que cambia el devanado en el lado secundario de los WPPT. Con el fin de lograr, independientemente de la velocidad del viento y carga de red, una tensión terminal de WTG controlada el señal piloto  $P_S$  activa el cambiador de tomas para regir las relación de bobina de WPPT. Preferiblemente la tensión en los terminales de WTG está cerca de un valor nominal y, si es posible, varía solo a una pequeña extensión.

25 Un requisito importante para el cambiador de tomas es que la tensión deseada se mantiene al tiempo que se reduce la frecuencia de los funcionamientos a la menor posible, mitigando de ese modo el desgaste de los componentes y/o minimizando el consumo de energía.

30 Actualizar la señal piloto  $P_S$  puede incluir además un retardo por un periodo predeterminado de cualquier variación en la señal piloto que el error de tensión necesita. Una ventaja de esto es que el retarde se usa para impedir los cambios de tomas innecesarios en respuesta a las variaciones de tensión transitoria o variaciones de tensión de autocorrección. A modo de ejemplo, una señal piloto  $P_S$  que oscila continuamente provocaría ajustes incesantes a la relación de bobina de los WPPT según esta oscilación. Sin embargo, como esto no se desea a menudo y los ajustes consecutivos tienden a cancelarse, el retardo manual impide ventajosamente tales variaciones.

35 Otra ventaja asociada con el retardo predeterminado es que puede proporcionarse un retardo de tiempo deseado antes de que cualquier ajuste de la relación de bobina de los WPPT se active mediante la señal piloto  $P_S$ . A modo de ejemplo, el retardo de tiempo puede ser función del tiempo de manera que el retardo de tiempo para el primer cambio de tomas es mayor que para los cambios de tomas subsecuentes.

Según la presente invención, se proporciona un controlador según la reivindicación adjunta 10.

Según la presente invención, se proporciona un producto de programa informático que incluye un medio legible por ordenador que almacena instrucciones legibles por ordenador para llevar a cabo el método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8.

45 Según la presente invención, se proporciona un transformador de autorregulación de sistema de planta de energía eólica, que comprende un transformador de planta de energía eólica con una relación de bobina ajustable, y un controlador.

50 La descripción anterior en relación con el método de la presente invención también es, en las partes aplicables, relevante para el controlador, el producto de programa informático, y el sistema de WPPT de la presente invención. Por tanto, se hace referencia a la descripción.

Otros objetivos, características y ventajas de la presente invención se harán evidentes a partir de la siguiente divulgación detallada, de las reivindicaciones adjuntas así como de los dibujos.

55 Generalmente, todos los términos usados en las reivindicaciones van a interpretarse según su significado habitual en el campo técnico, a menos que se defina de otra manera explícitamente en el presente documento. Todas las referencias a "un/el [elemento, dispositivo, componente, medios, etapa, etc]" deben interpretarse abiertamente como

referencia a al menos un ejemplo de dicho elemento, dispositivo, componente, medios, etapa, etc., si no se manifiesta de otra manera explícitamente. Las etapas de cualquier método dado a conocer en el presente documento no tienen que realizarse en el orden exacto dado a conocer, si no se manifiesta explícitamente. Características de dos o más realizaciones expuestas anteriormente pueden combinarse, a menos que sean claramente complementarias, en realizaciones adicionales. El hecho de que dos características se vuelvan a mencionar en diferentes reivindicaciones no impide que puedan combinarse para conseguir ventajas. Asimismo, realizaciones adicionales pueden proporcionar también la omisión de determinadas características que no son necesarias o no son esenciales para el fin deseado.

### Breve descripción de los dibujos

10 Lo anterior, así como objetos, características y ventajas adicionales de la presente invención, se entenderán mejor mediante la siguiente descripción detallada ilustrativa y no limitativa de realizaciones preferidas de la presente invención, con referencia a los dibujos adjuntos, en los que números de referencia similares se usarán para elementos similares.

La figura 1 es una vista esquemática de una planta de energía eólica de la presente invención,

15 la figura 2 es una vista esquemática de un conjunto de circuitos de una planta de energía eólica de la presente invención,

la figura 3 es una vista esquemática del controlador de la presente invención,

la figura 4 muestra una realización esquemática simplificada de un controlador según la presente invención, y

la figura 5 es un diagrama de flujo del método de la presente invención.

### 20 Descripción detallada

La figura 1 es una representación esquemática de una pluralidad de WTG en una WPP para generar electricidad a partir de la energía cinética del viento. Cada WTG está asociada con una impedancia  $Z_j$ , en el que esta impedancia debe interpretarse como la carga conectada al WTG tal como por ejemplo cables y transformadores, es decir una carga que puede ser, por ejemplo, resistiva, inductiva y/o capacitiva. La pluralidad de WTG en las WPP están conectados esquemáticamente, en paralelo, a un cable común. Por tanto, las impedancias  $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N$  de dicha pluralidad de WTG están conectadas en paralelo.

Mediante técnicas que se conocen *per se* en la técnica, esta pluralidad de WTG en las WPP también puede diseñarse como un WTG agregado, mostrado a la derecha en la figura 1. En el presente documento, los elementos de impedancia  $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N$  dispuestos en paralelo corresponden a la impedancia equivalente  $Z_{TOT}$ . Asimismo, el WTG agregado debe considerarse que posee propiedades que se agregan, de una manera bien definida, a partir de los WTG constituyentes en la planta. De este modo, la carga acumulada a partir de la pluralidad de WTG puede estar modelada como impedancia total para todos los WTG en las WPP.

La figura 2 muestra un modelo de conjunto de circuitos esquemático de una WPP, en el que la línea de puntos separa un bucle de control de energía reactiva/tensión interno, ubicado en un nivel de WTG, y un bucle de control tensión externo, controlado por un controlador planta de energía eólica (WPPC).

Describiendo el bucle de control de energía reactiva/tensión interno, se muestra el WTG agregado de las WPP tal como está modelado en la figura 1 en la esquina inferior izquierda. Un transformador está conectado al WTG agregado, denotado por dos círculos que se superponen parcialmente, y un cable, mostrado esquemáticamente como una resistencia. El transformador y el cable pueden interpretarse como la impedancia total  $Z_{TOT}$  tal como se muestra en la figura 1.

El WTG agregado y el transformador están conectados por el cable a una barra colectora de tensión media (MV). Además, un compensador estático (STATCOM) está conectado a la barra colectora de MV, en paralelo con el WTG agregado, siendo el STATCOM un equipo de energía reactiva para habilitar una capacidad estática de las WPP.

Hay dos elementos capacitivos conectados en paralelo con el WTG agregado y con el STATCOM a la barra colectora de MV, CAP 1 y CAP 2. El fin de los elementos capacitivos es, *inter alia*, compensar los requisitos de red de electricidad no cumplidos por la pluralidad de WTG sola, y contrarrestar las perturbaciones en la generación de energía. Esta carga de compensación capacitiva, mostrada en el presente documento como dos elementos capacitivos CAP 1 y CAP 2, se representa esquemáticamente, es decir son factibles un número de variaciones de la configuración de elemento capacitivo, por ejemplo respecto al número de elementos y/o a la disposición de su conexión a la barra colectora de MV.

La barra colectora de MV está conectada a un lado primario de un transformador WPPT de las WPP, estando las WPPT representadas como dos círculos grandes que se superponen. Los devanados de WPPT en el lado secundario pueden ajustarse mediante un cambiador de tomas en carga (OLTC) conectado a las WPPT. Más específicamente, el OLTC puede cambiar la toma de punto de conexión a lo largo del devanado de transformador,

que permite que se seleccione un determinado número de vueltas del devanado de transformador. Por tanto, puede ajustarse la relación de bobina de las WPPT, lo que significa que el OLTC puede cambiar la relación de tensión entre el lado primario de las WPPT y el lado secundario de las WPPT. En el lado secundario de las WPPT, el transformador está conectado a la red de electricidad (RED).

5 El OLTC está conectado de manera comunicativa a un sistema de control de supervisión y adquisición de datos (SCADA), recibiendo el sistema información por ejemplo sobre la relación de bobina de las WPPT. La comunicación entre el SCADA y las WPPT y/o el SCADA y la carga de compensación reactiva puede proporcionarse mediante una conexión inalámbrica o mediante conexión por cable. Además, el SCADA está conectado a los conmutadores C1 y C2, conectando o desconectando los conmutadores los elementos capacitivos CAP 1 y CAP 2, respectivamente. Por tanto, los elementos capacitivos se conectan a un SCADA a través de conmutadores, de manera que el SCADA puede controlar de manera selectiva la conexión de CAP 1 y CAP 2 a la barra colectora de MV en las WPP.

10 Variaciones en el potencial de barra colectora producirán una corriente de compensación  $I_{QC}$  para fluir desde los elementos capacitivos CAP 1 y CAP 2 hasta su punto de conexión en la barra colectora de MV. También se conduce una corriente  $I_{QW}$  a la barra colectora de MV desde el WTG agregado y el STATCOM. En el punto de conexión de la barra colectora de MV, las dos corrientes están añadidas en una corriente de MV,  $I_{QMV}$ , que fluye al lado primario del transformador WPPT de las WPP. En un análisis simplificado, puede suponerse que la barra colectora completa está a la misma potencial.

15 Por tanto, la figura 2 muestra un conjunto de circuitos en el que la corriente de compensación  $I_{QC}$  se añade a la corriente  $I_{QW}$  de los WTG y el STATCOM, y en el que la corriente combinada  $I_{QMV}$  se conduce al lado primario de las WPPT. Basándose en las corrientes, el OLTC regula el lado secundario de las WPPT, y se comunica con el SCADA que regula la carga capacitiva, cargando por lo tanto la  $I_{QC}$ , y así sucesivamente. Para simplificar adicionalmente el análisis de circuito, de una manera suficiente para diseñar y hacer funcionar un sistema de control adecuado, uno puede ignorar todas las corrientes reales y estudiar solo las componentes imaginarias, tal como se indica mediante el índice Q usado constantemente en la notación.

20 La figura 3 es una vista esquemática del controlador de la presente invención. Se proporciona un primer sumador ponderado  $\Sigma$  en la parte izquierda de la figura, que añade la corriente de MV  $I_{QMV}$  conducida al lado primario del transformador WPPT y que resta la corriente de compensación  $I_{QC}$  de los elementos capacitivos CAP 1 y CAP 2. La salida del primer sumador ponderado  $\Sigma$ ,  $I_{QW} = I_{QMV} - I_{QC}$ , es la corriente que fluye según el modelo desde el WTG agregado y el STATCOM. Como la resistencia del transformador y los cables del WTG agregado y/o del STATCOM en algunos casos puede ser despreciable en comparación con la  $I_{QC}$ , la corriente  $I_{QW}$  puede calcularse sin la contribución de la resistencia. Sin embargo, esta característica puede añadirse como una mejora para un control más preciso.

25 Además, la corriente  $I_{QW}$  se multiplica por un coeficiente de impedancia negativo  $K_L$ , en el que  $K_L$  se basa en la impedancia  $Z_W$  del WTG agregado. Multiplicar la corriente  $I_{QW}$  por el coeficiente de impedancia  $K_L$  proporciona una tensión  $D_V$  que se toma como modelo para la caída de tensión debida a la impedancia entre la barra colectora y el terminal del WTG agregado.

30 Una tensión nominal  $V_R$  se añade a un segundo sumador ponderado  $\Sigma$ . La tensión de caída  $D_V$  se añade y una tensión de lado primario real  $V_{MV}$  se resta al sumador ponderado  $\Sigma$ , de manera que un error de tensión  $V_{err}$  se encuentra como  $V_{err} = V_R + D_V - V_{MV}$ .

35 En esta realización, el error de tensión  $V_{err}$  se suministra a un filtro que aplica una zona muerta  $-D \leq V_{err} \leq D$ . Si el error de tensión  $V_{err}$  está dentro de la zona muerta  $D$ , la emisión  $P_E$  del filtro de zona muerta es cero. Sin embargo, si el error de tensión  $V_{err}$  está fuera de la zona muerta, la emisión  $P_E$  es distinta de cero, lo que finalmente aumentará o disminuirá la relación de bobina, y por consiguiente, aumentará o disminuirá la relación de tensión.

40 Debe observarse que la función de transferencia del filtro de zona muerta se representa esquemáticamente, es decir la zona muerta puede estar desplazada y/o aumentada o disminuida a lo largo del eje de error, el comportamiento fuera de la zona muerta puede ser, en cambio, no lineal etc.

45 En esta realización, además, la señal  $P_E$  puede procesarse mediante un temporizador en la función LÓGICA con la señal de salida  $P_L$ , determinando el temporizador la duración del error de tensión que supera la zona muerta. El temporizador puede aumentarse si el error de tensión  $V_{err}$ , con el que se actualiza la señal  $P_E$ , está fuera de la zona muerta. Cuando el temporizador alcanza un tiempo específico, se ordena un aumento o disminución de la señal  $P_E$ , dependiente de si el error de tensión  $V_{err}$  está por encima o por debajo de la zona muerta, y se restablece el temporizador.

50 De manera análoga, el temporizador puede restablecerse y/o bloquearse si el error de tensión  $V_{err}$  está dentro de la zona muerta debido a dinámicas estables o a un cambio de toma. El funcionamiento del temporizador también puede bloquearse en caso de que el error de tensión  $V_{err}$  caiga por debajo de un límite definido y/o cuando el error de tensión  $V_{err}$  supere un límite predefinido.

Además, se incluye una función de RETARDO, que retarda cualquier variación en la señal de entrada  $P_L$  que

necesite el error de tensión. Una ventaja de este aspecto es que el retardo se usa para impedir cambios de toma innecesarios en respuesta a variaciones de tensión transitorias o a variaciones de tensión de autocorrección. La funcionalidad de retardo en la etapa de la sección LÓGICA y del RETARDO dedicado procesa la emisión de filtro de zona muerta de diferentes maneras y puede aplicarse de manera individual, en variaciones a esta realización.

- 5 La emisión del bloque más a la derecha es la posición de toma de las WPPT, es decir la señal piloto  $P_S$  que activa la posición de toma. Mediante esto, puede ajustarse la relación de bobina, cambiando mediante la misma la relación de tensión.

10 En circunstancias prácticas, la constante  $K_L$  que aparece en la expresión usada para estimar la caída de tensión  $D_V$  puede determinarse mediante la experimentación dentro de las capacidades de un experto en la técnica. De manera más precisa, ajustando el controlador de realimentación al tiempo que se monitoriza el comportamiento del cambiador de tomas durante el funcionamiento normal de las WPP, que incluye fluctuaciones de viento y de red transitorias normales, puede identificarse un intervalo adecuado para  $K_L$ . Mediante una regla general, que puede servir como punto de inicio para el ajuste preciso,  $K_L$  se refiere a la impedancia de línea  $Z_W$  entre la barra colectora y el WTG (agregado) mediante un factor de multiplicación constante, concretamente  $K_L$  está dentro del 2 y el 20% de la impedancia de base de planta de energía eólica, preferiblemente entre el 5 y el 12% de la impedancia de base de planta de energía eólica y lo más preferiblemente entre el 7 y el 9% de la impedancia de base de planta de energía eólica. Esta regla puede usarse para diseñar un controlador de WPPT para un sistema de WPP de del tipo representado en la figura 2, y puede necesitar adaptarse para proporcionar una guía satisfactoria con respecto a sistemas que tienen un diseño diferente o que comprenden componentes diferentes.

20 La figura 4 muestra una realización simplificada de un controlador según la presente invención. Un primer sumador 501 recibe como corriente de compensación de entrada  $I_{QC}$ , que se pondera mediante un amplificador 500 de factor -1, y corriente de MV  $I_{QMV}$ . La emisión de sumador 501 se suministra al amplificador 502 amplificando el factor  $K_L$ , en el que  $K_L < 0$  es un coeficiente de impedancia. La emisión de 502 se vuelve  $K_L \cdot (I_{QC} - I_{QMV})$ , que es la estimación de la tensión de caída de línea  $D_V$ .

25 Un segundo sumador 503 recibe la emisión  $K_L \cdot (I_{QC} - I_{QMV})$  del amplificador 502, la tensión nominal  $V_R$ , y la tensión de lado primario real  $V_{MV}$ , la última ponderada por un amplificador 504 de factor -1. El sumador 503 suma las contribuciones al error de tensión  $V_{err} = V_R + K_L \cdot (I_{QC} - I_{QMV}) - V_{MV}$ , que va a minimizarse.

30 Además, el error de tensión  $V_{err}$  se pondera mediante un amplificador 505 de factor  $\alpha$ , generando de ese modo la señal piloto  $P_S$  que es la emisión de amplificador 505. La señal piloto  $P_S$  activa las WPPT 506 con el fin de mantener un valor de lado primario deseado que es el valor de tensión nominal  $V_R$  más la caída de tensión  $D_V$ . Evidentemente, el sistema de control que incluye el cálculo de la señal piloto es completamente lineal en este ejemplo.

35 La figura 5 es un diagrama de flujo de un método según una realización de la invención. El diagrama de flujo comienza en el bloque 601, en el que se recibe una tensión de lado primario real ( $V_{MV}$ ). Además, en el bloque 602, se recibe una corriente de lado primario real ( $I_{QMV}$ ). Además, en el bloque 603, se estima una tensión de caída de línea ( $D_V$ ) basándose en una corriente de compensación ( $I_{QC}$ ) y la corriente de lado primario real ( $I_{QMV}$ ). Además, en el bloque 604, se forma un error de tensión ( $V_{err}$ ) como el valor de tensión nominal ( $V_R$ ) más la tensión de caída de línea estimada ( $D_V$ ) y menos la tensión de lado primario real ( $V_{MV}$ ), concretamente:  $V_{err} = V_R + D_V - V_{MV}$ . Finalmente, en el bloque 605, la señal piloto ( $P_S$ ) está actualizada según el error de tensión ( $V_{err}$ ). El método puede ejecutarse mediante un ordenador programable o un circuito de firmware dedicado.

40 La invención se ha descrito anteriormente principalmente con referencia a unas pocas realizaciones. Sin embargo, como se apreciará fácilmente por un experto en la técnica, otras realizaciones distintas de las dadas a conocer anteriormente son igualmente posibles dentro del alcance de la invención, tal como se define mediante las reivindicaciones de patente adjuntas.

45



**REIVINDICACIONES**

1. Método para controlar una señal piloto ( $P_S$ ) para ajustar una relación de bobina de un transformador de planta de energía eólica, cuyo lado primario está conectado a:
  - una pluralidad de generadores de turbina eólica; y
- 5 una carga de compensación reactiva variable para generar una corriente de compensación ( $I_{QC}$ ), comprendiendo el método las etapas de:
  - recibir una tensión de lado primario real ( $V_{MV}$ );
  - recibir una corriente de lado primario real ( $I_{QMV}$ );
  - 10 estimar una tensión de caída de línea ( $D_V$ ) basándose en la corriente de compensación ( $I_{QC}$ ) y la corriente de lado primario real ( $I_{QMV}$ );
  - formar un error de tensión ( $V_{err}$ ) como suma de un valor de tensión nominal ( $V_R$ ) y la tensión de caída de línea estimada ( $D_V$ ) menos la tensión de lado primario real ( $V_{MV}$ ), concretamente:  $V_{err} = V_R + D_V - V_{MV}$ ; y
  - actualizar la señal piloto ( $P_S$ ) según el error de tensión ( $V_{err}$ ).
2. Método según la reivindicación 1, que comprende además medir la corriente de compensación ( $I_{QC}$ ).
- 15 3. Método según la reivindicación 1, que comprende además estimar una corriente de compensación ( $I_{QC}$ ) basándose en la carga de compensación reactiva real ( $Z_V$ ) y la tensión de lado primario real ( $V_{MV}$ ).
4. Método según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la carga de compensación reactiva variable puede controlarse mediante un sistema de control de supervisión y adquisición de datos (SCADA) y la corriente de compensación ( $I_{QC}$ ) se calcula basándose en un valor real de la carga de compensación reactiva ( $Z_V$ ) recibida del sistema de control de supervisión y adquisición de datos (SCADA).
- 20 5. Método según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha etapa de estimar la tensión de caída de línea ( $D_V$ ) comprende estimar la tensión de caída de línea ( $D_V$ ) por un múltiplo de la diferencia de la corriente de compensación ( $I_{QC}$ ) y la corriente de lado primario real ( $I_{QMV}$ ), concretamente:  $D_V = (I_{QMV} - I_{QC}) \cdot K_L$ , donde  $K_L$  es un coeficiente de impedancia.
- 25 6. Método según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la carga de compensación reactiva variable comprende una pluralidad de elementos reactivos que se disponen en paralelo y se pueden conectar individualmente mediante conmutadores al lado primario del transformador.
7. Método según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la señal piloto ( $P_S$ ) rige la relación de bobina entre el lado primario y el lado secundario del transformador.
- 30 8. Método según la reivindicación 7, en el que la señal piloto ( $P_S$ ) activa un cambiador de tomas dispuesto en el transformador para regir la relación de bobina entre el lado primario y el lado secundario del transformador.
9. Producto de programa informático que incluye un medio legible por ordenador que almacena instrucciones legibles por ordenador para llevar a cabo el método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8.
- 35 10. Controlador dispuesto para generar una señal piloto ( $P_S$ ) para un transformador de planta de energía eólica con una relación de bobina ajustable, dicha relación de bobina ajustable está dispuesta para ajustarse en respuesta a la señal piloto ( $P_S$ ), en el que el lado primario del transformador está conectado a una pluralidad de generadores de turbina eólica y una carga de compensación reactiva variable, dispuesto para generar una corriente de compensación ( $I_{QC}$ ), comprendiendo el controlador:
  - 40 un estimador de corriente para estimar la corriente de compensación ( $I_{QC}$ ) basándose en la carga de compensación reactiva real ( $Z_V$ ) y una tensión de lado primario ( $V_{MV}$ );
  - un estimador de tensión de caída de línea acoplado de manera comunicativa al estimador de corriente, para estimar una tensión de caída de línea ( $D_V$ ) basándose en la corriente de compensación estimada ( $I_{QC}$ );
  - 45 un sumador ponderado acoplado de manera comunicativa al estimador de corriente, para calcular un error de tensión ( $V_{err}$ ) como suma de un valor de tensión nominal ( $V_R$ ) y la tensión de caída ( $D_V$ ) menos la tensión de lado primario real ( $V_{MV}$ ); y
  - un controlador de realimentación acoplado de manera comunicativa al sumador ponderado, para generar una señal piloto ( $P_S$ ), estando el controlador de realimentación adaptado para mantener el error de tensión ( $V_{err}$ ) en cero ajustando la señal piloto ( $P_S$ ).

11. Controlador según la reivindicación 10, en el que:
- la carga de compensación reactiva variable puede controlarse mediante un sistema de control de supervisión y adquisición de datos (SCADA) acoplado de manera comunicativa al controlador; y
- 5 el estimador de corriente está adaptado para recibir un valor real de la carga de compensación reactiva ( $Z_V$ ) del sistema de control de supervisión y adquisición de datos (SCADA).
12. Controlador según la reivindicación 10 u 11, en el que el estimador de tensión de caída es un amplificador que tiene como señal de entrada una diferencia en la corriente de compensación ( $I_{QC}$ ) y la corriente de lado primario real ( $I_{QMV}$ ) y que tiene como su ganancia un coeficiente de impedancia ( $K_L$ ).
- 10 13. Controlador según una cualquiera de las reivindicaciones 10-12, en el que el controlador de realimentación está adaptado para generar una señal piloto ( $P_S$ ) que rige la relación de bobina entre el lado primario y el lado secundario del transformador.
14. Controlador según la reivindicación 13, en el que el controlador de realimentación está adaptado para generar una señal piloto ( $P_S$ ) que activa un cambiador de tomas dispuesto en el transformador para regir la relación de bobina entre el lado primario y el lado secundario del transformador.
- 15 15. Transformador de sistema de planta de energía eólica de autorregulación, que comprende un transformador de planta de energía eólica con una relación de bobina ajustable, y un controlador según una cualquiera de las reivindicaciones 10-14.

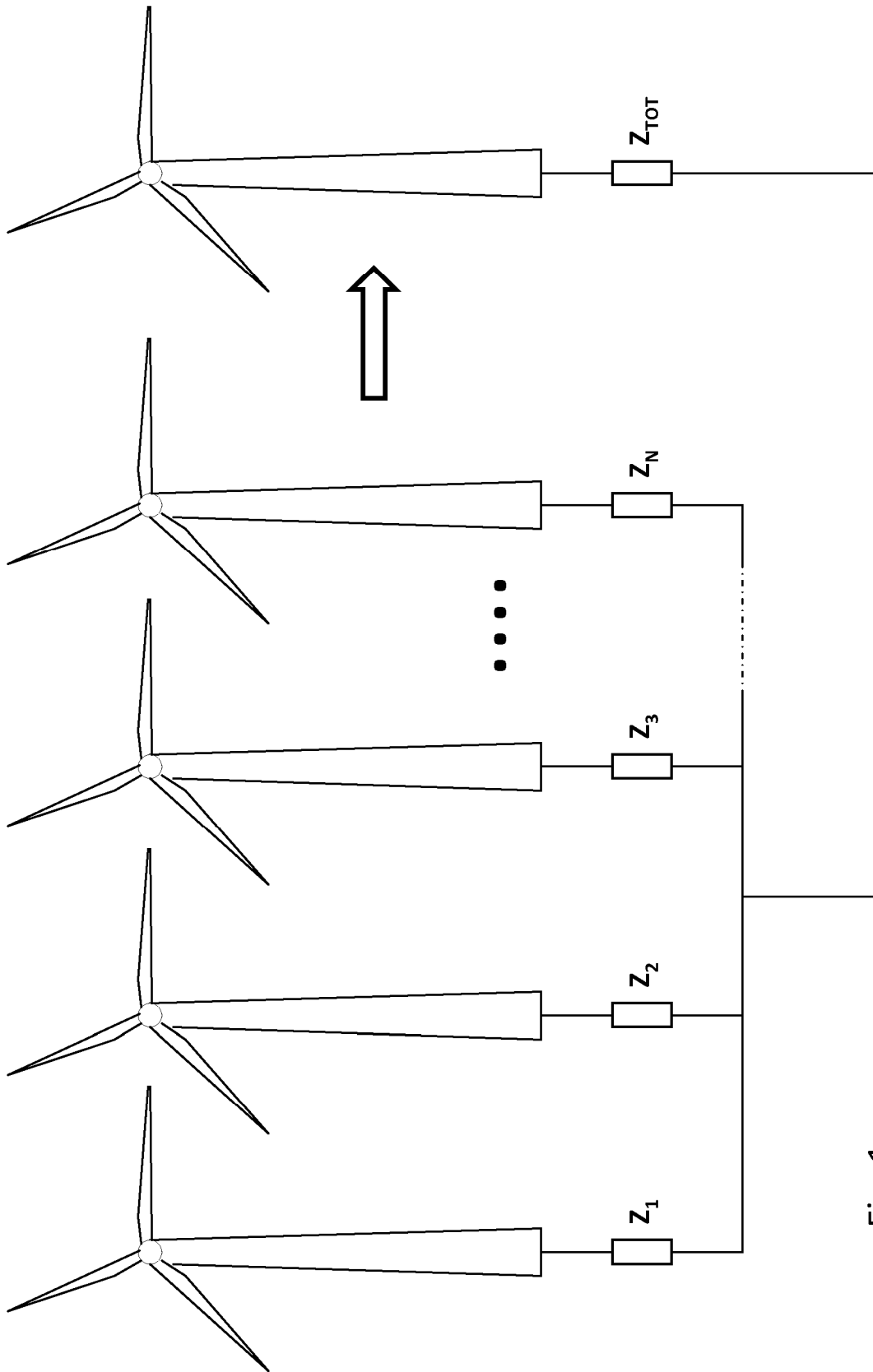


Fig. 1

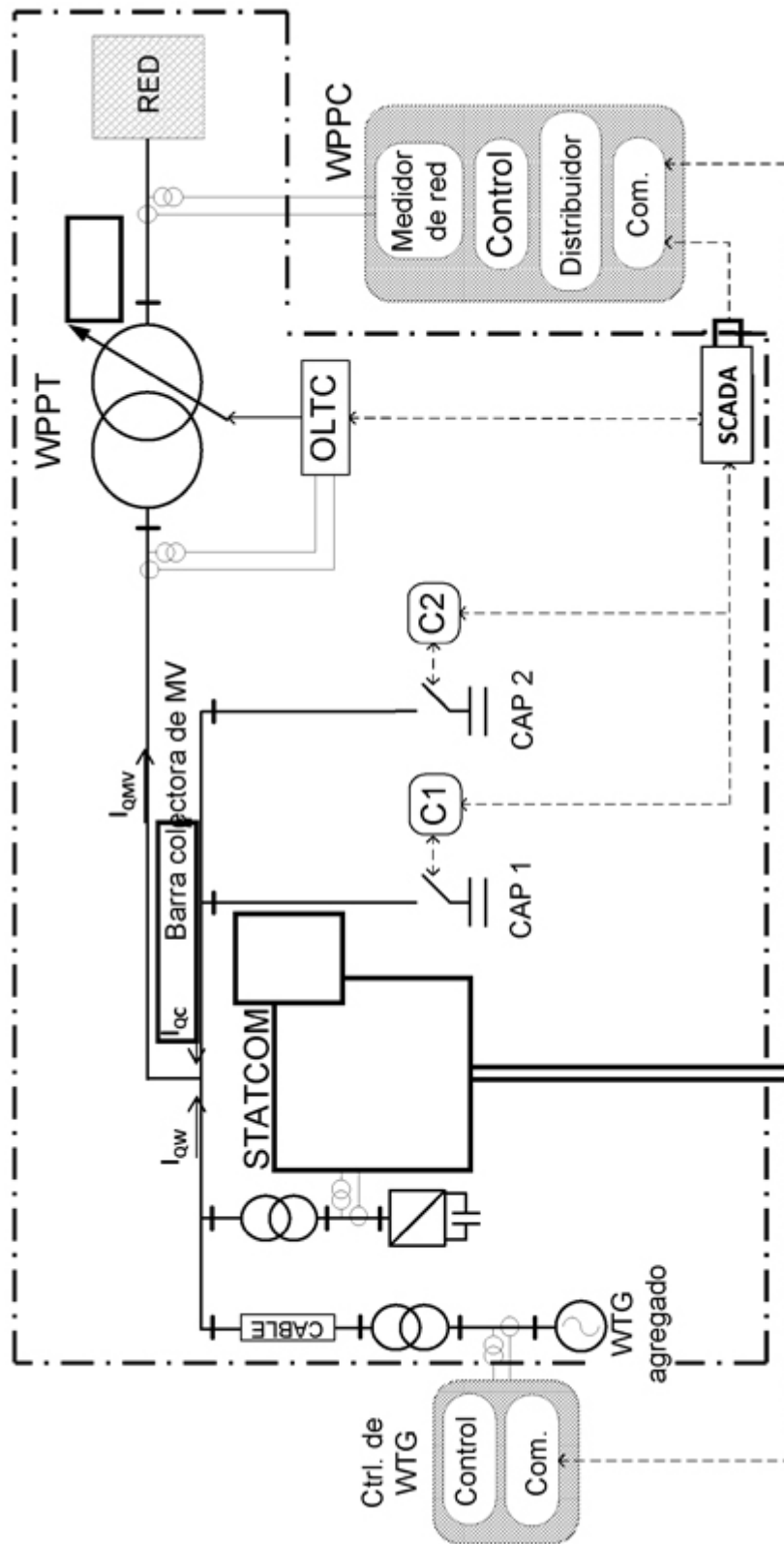


Fig. 2

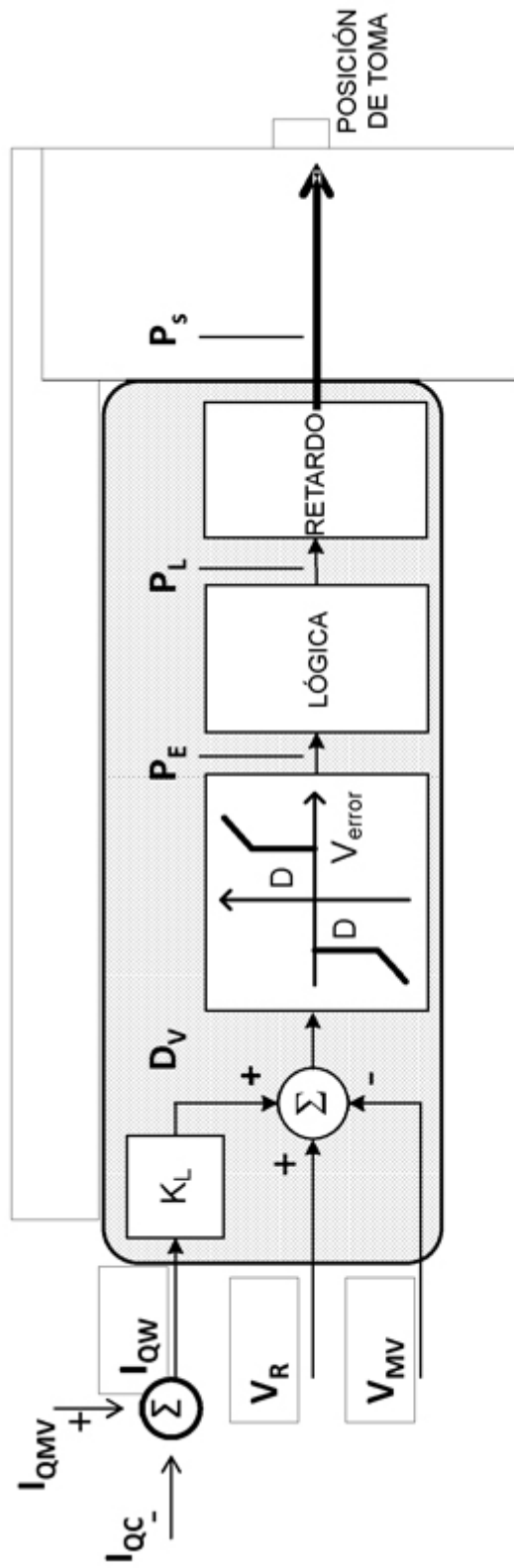


Fig. 3

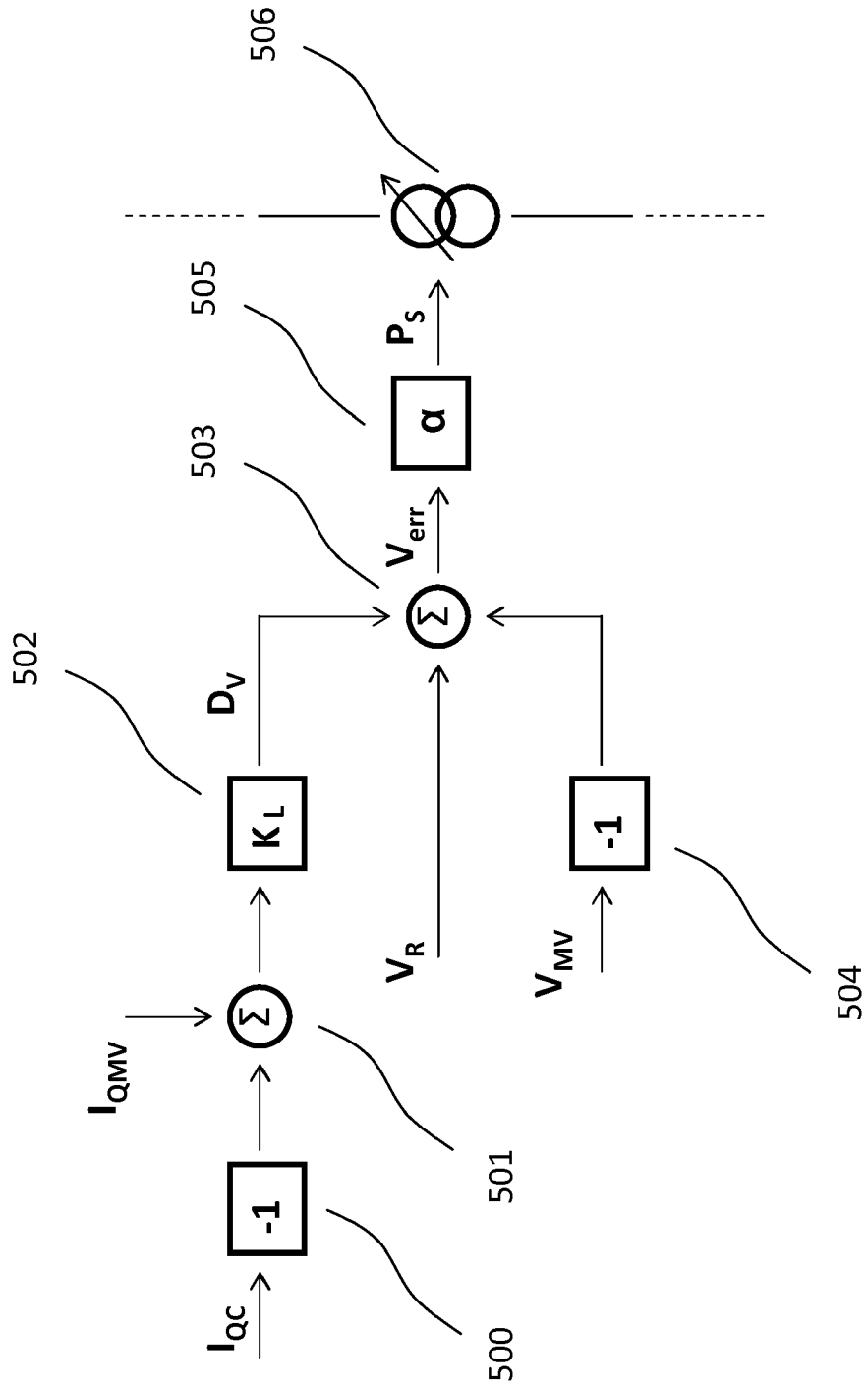


Fig. 4

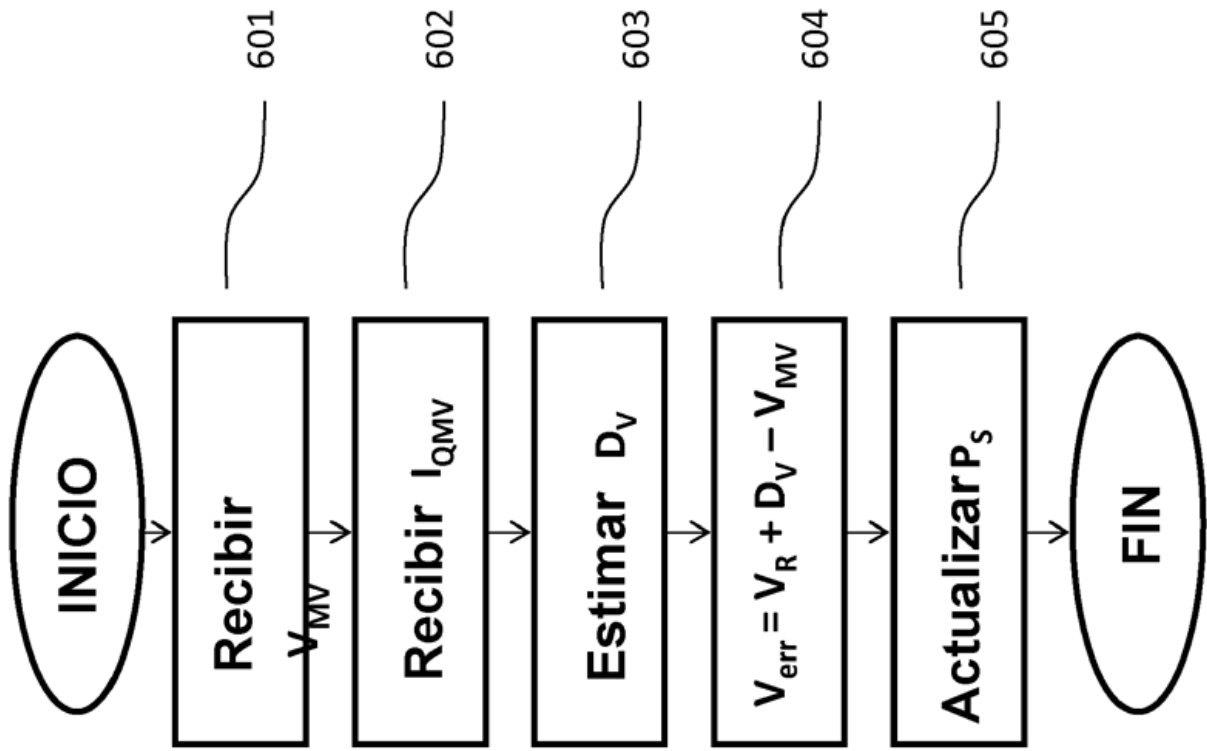


Fig. 5