

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 984 978**

51 Int. Cl.:

F03D 7/04 (2006.01)

F03D 9/25 (2006.01)

H02J 3/16 (2006.01)

H02J 3/38 (2006.01)

H02J 3/48 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **03.10.2013** **PCT/DK2013/050313**

87 Fecha y número de publicación internacional: **17.04.2014** **WO14056504**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.10.2013** **E 13774057 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.06.2024** **EP 2904684**

54 Título: **Controlador y método para la compensación de reactancia de línea**

30 Prioridad:

08.10.2012 DK 201270613

09.10.2012 US 201261711477 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
31.10.2024

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 2 984 978 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

Controlador y método para la compensación de reactancia de línea

Campo de la invención

- 5 La presente invención se refiere a un controlador de planta eléctrica, dispuesto para controlar al menos un parámetro eléctrico de una planta de energía eólica en un primer punto en una red eléctrica, en el que la planta de energía eólica comprende una pluralidad de aerogeneradores.

Antecedentes de la invención

- 10 Las redes eléctricas internas de las plantas de energía eólica conectan los aerogeneradores individuales de una planta de energía eólica a un punto de acoplamiento común, siendo este último el punto en el que se alimenta la energía de la planta de energía eólica a una red de suministro de energía.

Para realizarlo correctamente debe tenerse en cuenta la impedancia de la red eléctrica interna entre cada uno de los aerogeneradores de la planta y el punto de acoplamiento común, tal como se reconoce en los documentos US 2010/0025994 y EP 2482421. Especialmente dado que el punto de conexión común es a menudo el lugar donde la planta de energía eólica debe cumplir el requisito del código de red, es decir, la especificación de conexión a la red.

- 15 Los aerogeneradores experimentan impedancia hasta el punto de acoplamiento común y, por tanto, necesitan generar un mayor nivel de tensión en el aerogenerador para compensar las caídas de tensión en la red eléctrica interna. Lo mismo se aplica a la potencia reactiva, ya que la potencia reactiva se absorbe en los cables internos.

- 20 Las plantas de energía eólica suelen estar controladas por un controlador de planta eléctrica. El controlador de planta eléctrica controla y se comunica con los aerogeneradores y otros componentes de la planta de energía eólica. Para controlar los aerogeneradores se necesitan algunos parámetros eléctricos medidos. El controlador de planta eléctrica y los sensores de medición pueden estar ubicados de manera remota con respecto al punto de acoplamiento común, por lo que debido a la impedancia en la red los parámetros controlados no son los mismos en el punto de medición y en el punto de acoplamiento común.

- 25 Puede considerarse un objeto de las realizaciones de la presente invención proporcionar un controlador de planta eléctrica que garantice valores adecuados de los parámetros eléctricos en un punto diferente del punto de medición.

Sumario de la invención

- 30 Este sumario se proporciona para presentar una selección de conceptos de forma simplificada, que se describen con más detalle a continuación en la Descripción detallada. Este sumario no pretende identificar características clave o características esenciales del contenido reivindicado, ni pretende que se use como ayuda para determinar el alcance del contenido reivindicado.

Por tanto, se pretende obtener el objeto descrito anteriormente y varios otros objetos en un primer aspecto de la invención proporcionando un controlador de planta, dispuesto para controlar una tensión de una planta de energía eólica en un primer punto en una red eléctrica en el que la planta de energía eólica comprende una pluralidad de aerogeneradores, comprendiendo el controlador de planta eléctrica:

- 35 - un dispositivo de entrada dispuesto para recibir una tensión medida en un punto de medición, siendo el punto de medición diferente del primer punto,

- 40 - un algoritmo para estimar un valor de delta de una diferencia de la tensión entre el primer punto y el punto de medición, en el que la estimación del valor de delta se calcula basándose en una reactancia entre el punto de medición y el primer punto, y al menos un parámetro de entrada eléctrica, y en el que el al menos un parámetro de entrada eléctrica es al menos una tensión de referencia del controlador de planta eléctrica,

y estando dispuesto el controlador de planta eléctrica para controlar la tensión basándose en la tensión medida y el valor de delta.

- 45 El valor de delta se deriva como una resta entre la tensión de referencia en el primer punto y la tensión en el punto de medición, multiplicado por una función de pendiente predeterminada, y la función de pendiente predeterminada es una función de la reactancia entre el punto de medición y el primer punto, de tal manera que una ganancia proporcional del controlador de planta eléctrica se modifica dependiendo de dicha reactancia, y una multiplicación adicional por la tensión en el punto de medición, estimando de ese modo una referencia de potencia reactiva intermedia, y en el que la referencia de potencia reactiva intermedia se compensa según la reactancia entre el punto de medición y el primer punto, sumando un valor de compensación, proporcionando de ese modo un valor de
- 50 referencia de potencia reactiva.

La invención es particularmente ventajosa, pero no exclusivamente, para estimar valores en el primer punto, ya que el valor de delta se determina basándose en valores de referencia tomados de los valores de referencia del

controlador de planta eléctrica. En algunas situaciones, esto puede ser más seguro en comparación con el uso de la medición, debido a la pérdida de comunicación con los sensores y/o retrasos en la comunicación con los sensores si están lejos.

- 5 Conociendo la reactancia del sistema, un control de caída con la función de pendiente permite controlar la planta de energía eólica en un punto de acoplamiento común diferente del punto de medición.

El uso del valor de compensación permite un control más preciso.

Según una realización de la invención, el controlador de planta eléctrica calcula un punto de ajuste de referencia para la pluralidad de aerogeneradores, y el controlador de planta eléctrica comprende además un distribuidor para distribuir puntos de ajuste de referencia eléctrica a cada uno de la pluralidad de aerogeneradores.

- 10 Una ventaja de esta realización es que el controlador de planta eléctrica proporciona una manera de enviar fácilmente los puntos de ajuste a la pluralidad de aerogeneradores.

Según una realización de la invención, el controlador de planta eléctrica comprende además al menos un dispositivo de medición para medir al menos un parámetro eléctrico medido en el punto de medición.

Una ventaja de esta realización es que el dispositivo para la medición forma parte del controlador de planta eléctrica.

- 15 Según una realización de la invención, el controlador de planta eléctrica actúa como controlador maestro para al menos un controlador de planta eléctrica local, controlando el al menos un controlador de planta eléctrica un subconjunto de la pluralidad de aerogeneradores.

- 20 Una ventaja de esta realización es el aspecto del controlador de planta eléctrica multinivel, en el que varias plantas de energía eólica, cada una con un controlador de planta eléctrica, están controladas por un controlador maestro de planta eléctrica. Un sistema de este tipo suele extenderse por un área geográfica grande, por lo que la necesidad de estimar el parámetro eléctrico al principio está incluso más presente que en un sistema con un nivel de controlador de planta eléctrica.

- 25 En un segundo aspecto, la presente invención se refiere a un método para controlar una tensión de una planta de energía eólica en un primer punto de una red eléctrica, en el que la planta de energía eólica comprende un controlador de planta eléctrica dispuesto para llevar a cabo el método y una pluralidad de aerogeneradores, comprendiendo el método:

- recibir una tensión en un punto de medición, siendo el punto de medición diferente del primer punto,

- 30 - estimar un valor de delta de una diferencia de la tensión entre el primer punto y el punto de medición; en el que se calcula la estimación del valor de delta basándose en una reactancia entre el punto de medición y el primer punto, y al menos un parámetro de entrada eléctrica, en el que el parámetro de entrada eléctrica es una tensión de referencia del controlador de planta eléctrica y en el que el valor de delta se deriva como una resta entre la tensión de referencia en el primer punto y la tensión en el punto de medición, multiplicado por una función de pendiente predeterminada, en el que la función de pendiente predeterminada es una función de la reactancia entre el punto de medición y el primer punto de tal manera que una ganancia proporcional del controlador de planta eléctrica se modifica dependiendo de dicha reactancia, y una multiplicación adicional por la tensión en el punto de medición, para estimar de ese modo una referencia de potencia reactiva intermedia, y en el que se compensa la referencia de potencia reactiva intermedia según la reactancia entre el punto de medición y el primer punto, sumando un valor de compensación, proporcionando de ese modo un valor de referencia de potencia reactiva,

- controlar la tensión basándose en la tensión medida y el valor de delta.

- 40 El primer y segundo aspectos de la presente invención pueden combinarse, cada uno, con cualquiera de los otros aspectos. Estos y otros aspectos de la invención resultarán evidentes y se dilucidarán con referencia a las realizaciones descritas a continuación en el presente documento.

- 45 Muchas de las características adjuntas se apreciarán más fácilmente a medida que las mismas se comprendan mejor con referencia a la siguiente descripción detallada considerada en relación con los dibujos adjuntos. Las características preferidas pueden combinarse según sea apropiado, tal como resultará evidente para un experto habitual, y pueden combinarse con cualquiera de los aspectos de la invención. Sin embargo, el alcance de protección sólo está definido por las reivindicaciones adjuntas.

Breve descripción de los dibujos

- 50 Las figuras muestran una manera de implementar la presente invención y no deben interpretarse como limitativas de otras posibles realizaciones que se encuentran dentro del alcance del juego de reivindicaciones adjunto.

La figura 1 muestra un aerogenerador que puede usarse con la presente invención.

La figura 2 muestra un controlador de planta eléctrica conectado a una planta de energía eólica.

La figura 3 muestra un diagrama simplificado de la impedancia de línea.

La figura 4 muestra un esquema del controlador de planta eléctrica, con la tensión como referencia de entrada.

5 La figura 5 muestra un esquema del controlador de planta eléctrica, con la potencia reactiva como referencia de entrada.

La figura 6 muestra un esquema del controlador de planta eléctrica, con control de caída, según la presente invención.

La figura 7 muestra un gráfico con ejemplos de una realización con dos funciones de control de caída de tensión.

La figura 8 muestra un diagrama de flujo de un método según la invención.

10 Descripción detallada de la invención

La presente invención se explicará ahora con más detalles. Aunque la invención es susceptible de diversas modificaciones y formas alternativas, se han dado a conocer realizaciones específicas a modo de ejemplos. Debe entenderse, sin embargo, que la invención no pretende limitarse a las formas particulares dadas a conocer. Más bien, la invención está definida por las reivindicaciones adjuntas.

15 Los elementos individuales de una realización de la invención pueden implementarse física, funcional y lógicamente de cualquier manera adecuada, tal como en una única unidad, en una pluralidad de unidades o como parte de unidades funcionales independientes. La invención puede implementarse en una única unidad, o estar distribuida tanto física como funcionalmente entre diferentes unidades y procesadores.

20 La presente invención se refiere a un controlador de planta eléctrica que está previsto para controlar la producción de energía de una planta de energía eólica, que comprende una pluralidad de aerogeneradores. El controlador de planta eléctrica genera referencias de potencia reactiva y activa, Q_{ref} y P_{ref} , respectivamente, para el control de la pluralidad de aerogeneradores u otros componentes de la planta de energía eólica para satisfacer las condiciones eléctricas en un punto de medición.

25 En una realización, el controlador de planta eléctrica genera referencias de corriente a la pluralidad de aerogeneradores, es decir I_{dref} e I_{qref} , corriente activa y reactiva, respectivamente.

30 El controlador cuenta con valores de medición desde un punto de medición, valores que se modifican según valores estimados en un punto de acoplamiento común, y valores de referencia asociados (por ejemplo, V_{ref} , f_{ref} , Q_{ref} , etc.) para el punto de medición. Los valores estimados en el punto de acoplamiento común se determinan a partir de un modelo de la línea de transmisión entre el punto de medición y el punto de acoplamiento común, no a partir de valores medidos desde el punto de medición, sino a partir de los valores de referencia suministrados al controlador (V_{ref} , f_{ref} , Q_{ref} , etc.). En estado estacionario, los valores de referencia son equivalentes a los valores medidos.

35 Ejemplos no cubiertos por las reivindicaciones adjuntas se refieren a un controlador de planta eléctrica de un sistema de energía eólica con una pluralidad de aerogeneradores. El controlador de planta eléctrica está dispuesto para estimar parámetros eléctricos en un punto de acoplamiento común donde se miden las mediciones reales en un punto de medición, por medio del conocimiento de la impedancia entre el punto de medición y el punto de acoplamiento común, y usando valores de referencia del controlador de planta eléctrica.

En un ejemplo, el punto de acoplamiento común no coincide con el lugar donde se estiman los parámetros eléctricos.

40 El aerogenerador que suministra energía a una red eléctrica puede estar equipado con capacidad de regulación frente al nivel de tensión, la frecuencia de red y las fluctuaciones de potencia activa. "Red eléctrica" o "red" es una red de distribución de energía eléctrica fuera del límite y punto de acoplamiento común de una planta de energía eólica; cuando se hace referencia a la red dentro de una planta de energía eólica, se hace una expresión que indica explícitamente la planta de energía eólica, por ejemplo, "red de planta de energía eólica".

45 Un aerogenerador de velocidad variable, que se usa en al menos una de las realizaciones descritas y que es capaz de conectarse a una red eléctrica 20, está equipado con el sistema de control descrito. Comprende un rotor con un cubo 3 y al menos una pala 4 montada en el rotor tal como se analizó anteriormente. El rotor está conectado, por ejemplo a través de un árbol principal, a un generador 12 para convertir el par motor del rotor en energía eléctrica. En algunas realizaciones, una caja de engranajes está interconectada entre el rotor y el generador para convertir la velocidad de rotación del rotor en una mayor velocidad para el generador.

50 La figura 1 muestra que un aerogenerador (WT) de velocidad variable 1 a modo de ejemplo es uno de una pluralidad de aerogeneradores de una planta de energía eólica (WPP). Tiene un rotor 2 con un cubo 3 en el que están montadas, por ejemplo, tres palas 4. El ángulo de paso de las palas de rotor 4 puede variarse mediante actuadores

de paso. El rotor 3 está conectado a una góndola 5 sostenida por una torre 6 y acciona un generador 12 a través de un árbol principal 8, una caja de engranajes 10 y un árbol de alta velocidad 11. Esta estructura es a modo de ejemplo; otros ejemplos usan un generador de accionamiento directo.

El generador 12 (por ejemplo, un generador síncrono o de inducción) produce potencia de salida eléctrica de una frecuencia relacionada con la velocidad de rotación del rotor 3, que se convierte en frecuencia de red (por ejemplo, de aproximadamente 50 ó 60 Hz) mediante un convertidor 19. La tensión de la energía eléctrica así producida se transforma con elevación mediante un transformador 9. La salida del transformador 9 son los terminales 9a del aerogenerador. La energía eléctrica del aerogenerador 1 y de los otros aerogeneradores de la planta de energía eólica se alimenta a una red de planta de energía eólica 18 (simbolizada por "a" en la figura 1). La red de planta de energía eólica interna 18 está conectada en un punto de acoplamiento común 21 y un transformador elevador 22 adicional opcional a una red de distribución de energía eléctrica externa 20 de la planta de energía eólica. La red 20 está equipada con diversas capacidades de regulación frente a fluctuaciones de la red, por ejemplo en forma de productores convencionales que pueden aumentar y disminuir la producción en una escala a corto plazo para controlar la tensión y la frecuencia.

Un sistema de control incluye un controlador de turbina eólica 13 y un controlador de planta eléctrica 23. El controlador de planta eléctrica 23 controla el funcionamiento del aerogenerador 1 individual, por ejemplo selecciona el modo de funcionamiento a carga completa o a carga parcial, dependiendo entre otras cosas, de la velocidad del viento actual, provoca, en el modo de carga parcial, el funcionamiento del aerogenerador en el punto de trabajo óptimo ajustando el ángulo de pala y controlando la razón de velocidad de punta al valor óptimo aerodinámico a la velocidad del viento actual, y controla el convertidor 19 para producir electricidad de acuerdo con las prescripciones del controlador de planta eléctrica, por ejemplo una instrucción para proporcionar una cierta cantidad de potencia reactiva además de la potencia activa, etc. El controlador de planta eléctrica 13 usa diferentes señales de entrada para realizar sus tareas de control, por ejemplo señales que representan las condiciones del viento actuales (por ejemplo, transmitidas desde un anemómetro 14 y una veleta 15 a través de la línea 16), señales de retroalimentación que representan el ángulo de paso, la posición del rotor, amplitudes y fases de la tensión y la corriente en el generador 12 y los terminales 9a, etc., y señales de orden desde el controlador de planta eléctrica 23. El controlador de planta eléctrica 23 recibe señales representativas de la tensión, la corriente y la frecuencia en el punto de acoplamiento común 21 (parámetros que pueden considerarse que representan la tensión, la corriente y la frecuencia en la red de distribución de energía eléctrica 20) y, opcionalmente, recibe señales de orden o información del proveedor de la red de distribución de energía eléctrica (en "c" en la figura 1). Basándose en algunos de estos parámetros de entrada (y, opcionalmente, otros), el controlador de planta eléctrica 23 monitoriza la estabilidad de la red y, al detectar una reducción de la estabilidad de la red, ordena a los controladores de turbina eólica 13 del aerogenerador 1 y los otros aerogeneradores de la planta de energía eólica 2 (en "b" en la figura 1) que cambien el funcionamiento limitando las fluctuaciones de la potencia de salida suministrada. Tras la recepción de una orden de este tipo, el controlador de turbina eólica 13, tras aumentar la velocidad del viento, corta el pico de salida elevada que entonces se produciría en el funcionamiento normal a carga parcial con la máxima eficiencia, por ejemplo, ajustando el ángulo de paso de las palas hacia la posición de bandera, para cumplir con la orden de fluctuación límite del controlador de planta eléctrica. Por tanto, en el ejemplo no cubierto por las reivindicaciones de la figura 1, la tarea de control del sistema de control para limitar las fluctuaciones de salida la comparte el controlador de planta eléctrica 23 y el controlador de turbina eólica 13. En otros ejemplos, esta tarea de control la realiza únicamente el controlador de turbina eólica 13; en esos ejemplos, el "sistema de control" está representado sólo por el controlador de turbina eólica 13, sin un controlador de planta eléctrica 23.

Aunque se espera que el aerogenerador 1 mostrado en la figura 1 tenga tres palas 4, cabe señalar que un aerogenerador puede tener un número diferente de palas. Es habitual encontrar aerogeneradores que tienen de dos a cuatro palas. El aerogenerador 1 mostrado en la figura 1 es una turbina eólica de eje horizontal (HAWT) ya que el rotor 4 rota alrededor de un eje horizontal. Cabe señalar que el rotor 4 puede rotar alrededor de un eje vertical. Un aerogenerador de este tipo cuyo rotor rota alrededor del eje vertical se conoce como turbina eólica de eje vertical (VAWT). Los ejemplos descritos más adelante en el presente documento no se limitan a HAWT que tiene 3 palas. Pueden implementarse tanto en HAWT como en VAWT, y tener cualquier número de palas 4 en el rotor 4.

Algunos ejemplos se refieren a un sistema de control dispuesto para controlar al menos un aerogenerador 1 que puede incluir algunas, o todas, las turbinas eólicas de un parque eólico completo, de la manera descrita anteriormente. El sistema de control puede ser distribuido, por ejemplo incluir controladores en la planta de energía eólica y a nivel del aerogenerador o a nivel de la red de distribución de energía eléctrica.

Cuando un sistema de medición para el controlador de planta eléctrica 23, por ejemplo un contador de red, no coincide con la ubicación física del punto de acoplamiento común, es necesario un sistema de control dedicado para compensar la distancia física. Básicamente lo que es necesario es compensar la impedancia que conecta el punto de medición y el punto de acoplamiento común.

La figura 2 muestra una planta eléctrica con un aerogenerador 1 y un controlador 23 que proporciona información de antecedentes útil para entender la invención. La figura 2 sólo muestra un aerogenerador 1, que comprende elementos similares a los descritos en relación con la figura 1. En la figura 2, la figura sólo muestra un generador 12, conectado a y que alimenta energía a un rectificador de potencia 19b, que convierte energía de CA de frecuencia

variable en energía de CC, un inversor 19a convierte la energía de CC en energía de CA de frecuencia fija, la energía de CA es la transformada a un mayor nivel de tensión en un transformador 9, la energía de CA de mayor tensión se alimenta a la red de planta de energía eólica 18, 202. Un vector de señal 31 que contiene información de producción de energía sobre el aerogenerador 1 individual, se comunica al controlador de planta eléctrica 23, desde todos los demás aerogeneradores 1 en la planta de energía eólica. La señal 31 puede contener información sobre el nivel de tensión del aerogenerador, a ambos lados del transformador 9. A menudo es beneficioso medir el nivel de tensión en el lado de baja tensión del transformador y posiblemente convertir la medición en un valor en el lado de alta tensión del transformador. Las mediciones 32 ó 33 se miden en un punto de medición 204a o 204b, "a" o "b", dependiendo de en qué lado del punto de acoplamiento común 201 se toma la medición real.

El controlador de planta eléctrica 23 recibe un punto de ajuste 30 a seguir desde, por ejemplo, un operador del sistema de red, y tiene, dependiendo de la planta específica, diferentes modos de control 25, 26, 27 entre los que puede elegir el controlador de planta eléctrica. Este puede ser el control de tensión 25, el control de factor de potencia 26 y el control Q (potencia reactiva) 27. Una máquina de estados del controlador de planta eléctrica 23 cambia el modo, si así se requiere. El distribuidor 24 distribuye un punto de ajuste 34 a cada uno de los aerogeneradores 1 en la planta de energía eólica. El distribuidor 24 distribuye o comunica regularmente puntos de ajuste 34 a los aerogeneradores 1, cuando se requiere.

Un aumento de la potencia reactiva aumentará el nivel de tensión en los terminales del aerogenerador, por lo que al estar en una situación con una mayor tensión a la solicitada por el punto de ajuste 30, es necesario disminuir la producción de potencia reactiva; esto se logra enviando un punto de ajuste de potencia reactiva con un valor de potencia reactiva disminuido. De manera similar, al encontrarse en una situación con una menor tensión a la requerida, debe aumentarse el punto de ajuste de potencia reactiva para elevar el nivel de tensión en los terminales del aerogenerador.

A menudo, las plantas de energía eólica, en modo de funcionamiento en estado estacionario, se controlan de acuerdo con un punto de ajuste del factor de potencia, esto implica que para una producción de potencia activa dada también debe estar presente una cantidad correspondiente de potencia reactiva, inductiva o capacitiva, ya que el factor de potencia de un sistema de energía eléctrica de CA se define como la razón de la potencia real que fluye a la carga con respecto a la potencia aparente en el circuito.

Otro modo de funcionamiento puede ser el control Q, donde se controla la cantidad real de potencia reactiva, por tanto no con respecto a la producción de potencia activa. Aún otro modo puede ser el control de tensión donde el nivel de tensión es el parámetro de control; este control se realiza inyectando potencia reactiva, inductiva o capacitiva en la red y aumentando o disminuyendo de ese modo el nivel de tensión.

Un motivo para usar valores de referencia del controlador de planta eléctrica en lugar de mediciones es, entre otros, la pérdida de comunicación con los sensores de medición, y/o retrasos en la comunicación con los sensores de medición si se encuentran lejos. En un ejemplo, los sensores de medición podrían ni siquiera estar presentes, en caso de que se use control anticipativo.

La compensación de la impedancia de línea puede realizarse, por ejemplo, en:

- un bucle de control de tensión, donde el controlador de planta eléctrica controla la tensión en el punto de acoplamiento común, o

- un controlador de potencia reactiva, donde el controlador de planta eléctrica controla la potencia reactiva en el punto de acoplamiento común.

La figura 3 muestra un diagrama lineal de un sistema que proporciona información de antecedentes útil para entender la invención. En el extremo inicial de la línea está presente una tensión V_s 301, con una admitancia en derivación por longitud unitaria $Y/2$ 304a y una impedancia en serie por longitud unitaria Z 305 y en el extremo de recepción otra admitancia en derivación por longitud unitaria $Y/2$ 304b, y la tensión V_r 302. Por la línea fluye una corriente I_r 308 y una caída de tensión ΔV_s 303 define la caída de tensión a lo largo de la línea a tener en cuenta.

La impedancia en serie por longitud unitaria viene dada por:

$$\vec{Z} = R + j\omega L = R + jX$$

La admitancia en derivación por longitud unitaria

$$\vec{Y} = G + j\omega C$$

Un ejemplo en el que la compensación tiene lugar en el bucle de control de tensión requiere lo siguiente; el término de compensación de línea que se usará en el control es:

$$V_{\text{línea_compensación}} = \text{abs}(\Delta \vec{V}_s)$$

Se usan las siguientes aproximaciones:

$$\vec{V}_r = V_{\text{ref}}$$

$$\vec{I}_r = \vec{I}_{\text{ref}}$$

donde $\vec{I}_{\text{ref}} = (P_{\text{ref}} / V_{\text{ref}}) + (Q_{\text{ref}} / V_{\text{ref}}) \vec{j}$

- 5 y donde la potencia reactiva, potencia activa y referencia de tensión, Q_{ref} , P_{ref} y V_{ref} 402 son las referencias de planta eólica.

La relación entre la tensión de recepción 302 y la tensión de inicio 301 de la línea es:

$$\vec{V}_s = \vec{V}_r + \Delta \vec{V}_s$$

Donde

$$\Delta \vec{V}_s = \vec{I}_{\text{ref}} \cdot \vec{Z}_e + V_{\text{ref}} \left(\frac{\vec{Y}_e \vec{Z}_e}{2} \right)$$

10

Ecuación 1

La ecuación 1 de ΔV_s anterior se usa para derivar el valor de tensión delta, que es la entrada en el controlador de planta eléctrica que se muestra en la figura 4.

15

Usando estas ecuaciones, es posible dibujar la estructura de control del controlador de planta eléctrica, tal como se muestra en la figura 4. Lo que muestra V_M , punto de medición de tensión 401, V_{ref} 402 y ΔV_s 403, todos sumados en el bloque de suma 404, la salida del bloque 404 se alimenta al regulador automático de tensión 405 que emite un Q_{ref} a un regulador automático de potencia reactiva 406 que controla la potencia reactiva basándose en la referencia y mediciones, ambos reguladores pueden implementarse con una estructura de controlador conocida por el experto habitual en la técnica. La salida del bloque 407 es, con la mayor frecuencia, un punto de ajuste de potencia reactiva agregada que tendrá que manejarse por el distribuidor 24, para distribuir valores individuales a cada uno de la pluralidad de aerogeneradores.

20

En un ejemplo en el que la compensación se produce en el bucle de control de potencia reactiva, sucede lo siguiente.

La figura 5 muestra la relación entre los valores de Q de recepción e inicio Q_r y Q_s de la línea, de modo similar al caso de tensión descrito anteriormente:

$$Q_s = Q_r + \Delta Q_s$$

25

Donde

$$Q_r = Q_{\text{ref}}$$

$$\vec{I}_r = \vec{I}_{\text{ref}}, \text{ donde } \vec{I}_{\text{ref}} = (P_{\text{ref}} / V_{\text{ref}}) + (Q_{\text{ref}} / V_{\text{ref}}) \vec{j}$$

$$\Delta Q_s = (-V_{\text{ref}}^2 Y + X I_{\text{ref}}^2) \cdot l$$

Ecuación 2

30

donde Y es la admitancia (Y). La admitancia es una medida de la facilidad con la que un circuito o dispositivo permitirá que fluya una corriente. Se define como la inversa de la impedancia (Z).

35

Usando estas ecuaciones, especialmente la ecuación 2, que deriva el ΔQ_s , es posible dibujar la estructura de control de un controlador de planta eléctrica, tal como se muestra en la figura 5, donde la medición de la potencia reactiva Q_m 501 en el punto de medición, la potencia reactiva de referencia Q_{ref} 502 y el valor de delta de potencia reactiva ΔQ_s 503 se suman en un bloque de suma 504, la salida del bloque se usa como entrada del regulador automático de

potencia reactiva 505 y la salida de ese bloque $Q_{\text{punto_ajuste_ref}}$ 506 está entonces lista para que el distribuidor 24 la distribuya a los aerogeneradores 1 individuales.

Las siguientes ecuaciones son útiles para derivar la impedancia y la admitancia.

$$Z_e = Z_c \sinh(\gamma l)$$

$$\left(\frac{Y_e Z_e}{2} + 1 \right) = \cosh(\gamma l)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{j\omega C}}$$

$$\gamma = \sqrt{j\omega C (R + j\omega L)}$$

- 5 Para una línea con $(\gamma l) \ll 1$, pueden usarse las siguientes aproximaciones:

$$Z_e = Z \cdot l$$

$$\left(\frac{Y_e}{2} \right) = \frac{Y \cdot l}{2}$$

donde (l) es la longitud de la línea.

Aunque los ejemplos descritos anteriormente cubren el parámetro eléctrico tensión y potencia reactiva, puede realizarse un ejemplo similar para la potencia activa. En un ejemplo, el controlador de planta eléctrica usa control anticipativo en lugar del esquema de control de la figura 5, incluida la compensación de ΔQ_s . La ecuación es:

$$Q_{\text{ref}} - \Delta Q_s = Q_{\text{punto_ajuste_ref}}$$

Anticipativo significa que no hay ningún bloque de controlador 505 ni Q_m 501, en comparación con la figura 5.

Según la invención, se aplica otra estructura de control donde se usa la reactancia $X_{\text{línea}}$ 620 de la línea para calcular un $K_{\text{pendiente}}$ equivalente, que genera la misma cantidad de I_q ya que no había línea entre PoM 204 y PCC 201.

- 15 Según la presente invención, se proporciona un controlador de tensión, que está incluido en el controlador de planta eléctrica, para generar un valor de referencia de potencia reactiva, Q_{ref} 611 para el control de uno o más aerogeneradores para satisfacer las condiciones eléctricas en un punto de medición 204.

El controlador de tensión cuenta con valores de medición desde el punto de medición y un valor de referencia de tensión asociado (V_{ref}) para el punto de medición. Para permitir el control en el punto de acoplamiento común que está separado del punto de medición por una línea de transmisión que tiene una reactancia $X_{\text{línea}}$, la ganancia proporcional del controlador se modifica dependiendo de $X_{\text{línea}}$, de modo que se satisfaga el valor de referencia de tensión (V_{ref}) en el punto de acoplamiento común. Por consiguiente, el controlador de tensión se modifica de modo que la ganancia proporcional del controlador de tensión permita el control de la tensión en el punto de acoplamiento común.

- 25 En lugar de usar el término ΔV_s derivado en la ecuación 1, este término representa la caída de tensión a través de la línea, se propone el siguiente diagrama mostrado en la figura 6, que ofrece las mismas características de I_q inyectada en PCC.

La figura 6 muestra cómo se usan la V_m 601 y la V_{ref} 602 como entradas al regulador automático de tensión 650, junto con la P_{ref} 610 y Q_{ref} 611. La V_m 601 y V_{ref} 602 se comparan en un bloque de suma 604, el resultado se usa como entrada para la función $K_{\text{pendiente}}$ 605. La función $K_{\text{pendiente}}$ viene dada por:

$$K_{\text{pendiente}}$$

$$1 - (K_{\text{pendiente}} \cdot X_{\text{tiempo}})$$

La $K_{\text{pendiente}}$ es la ganancia de caída de tensión del controlador 605. La salida del bloque de $K_{\text{pendiente}}$ 605 se alimenta como entrada a un bloque de filtro 606 opcional, que es una función de filtrado, que en una realización puede ser de segundo orden o incluso de orden superior. La P_{ref} 610, Q_{ref} 611 y V_{ref} 602 son todas las referencias de planta eléctrica. La V_m 601 es la tensión medida en el punto de medición (PoM).

La salida del filtro 606 opcional, y en caso de que el filtro no esté presente, la salida de 605 es una referencia de corriente reactiva, $I_{q\text{ref}}$ 607, que se multiplica en el multiplicador 608 por V_m 601, que luego se convierte en una referencia de potencia reactiva intermedia 612. Es necesario compensar la referencia de potencia reactiva

intermedia 612 mediante una función de compensación de pérdida, que determina un valor de compensación, que compensa las pérdidas a lo largo de la línea, la $X_{\text{línea}}$ 620 es la reactancia de la línea que ha de compensarse, en la figura 3, la línea entre 307 y 308. La compensación es un producto de $X_{\text{línea}}$ 620 y la potencia aparente (610 y 611) al cuadrado, se deriva tomando la suma del cuadrado de la potencia activa 610 y el cuadrado de la potencia reactiva, finalmente se calcula la raíz cuadrada de la suma como la potencia aparente. La referencia de potencia reactiva 611 es la suma 609 de la función de compensación de pérdida y la referencia de potencia reactiva intermedia 612.

La figura 7 muestra las características del sistema en el punto de acoplamiento común, PCC 201 y en el punto de medición, PoM 204a o 204b, mostrándose la corriente reactiva a lo largo del eje x y mostrándose la tensión a lo largo del eje y de la figura 7.

El PCC de sistema 601 en la figura 7 representa la reactancia total X_{total} de la red y la línea desde el punto de medición y el punto de acoplamiento común, el sistema PoM 604 representa sólo la reactancia de red X_{red} , no la reactancia de línea. El PCC de control 602 es el control de caída con $K_{\text{pendiente}}$ según la reactancia total, X_{total} . Donde el PoM de control 603 es el control de caída con $K_{\text{pendiente}}$ según la reactancia de red, X_{red} . Tener una función de pendiente predeterminada según la reactancia permite el control de la tensión en un punto de acoplamiento común diferente a un punto de medición.

Puede observarse que la cantidad de I_q 607 inyectada es la misma, véase la intersección 612 y 610, para $I_q = -0,2$ u.p., cuando se usa el control anterior, independientemente de dónde esté ubicado el PoM.

La figura 8 muestra un diagrama de flujo de un método según la invención para controlar la tensión de una planta de energía eólica en un primer punto de una red eléctrica, en el que la planta de energía eólica comprende un controlador de planta eléctrica y una pluralidad de aerogeneradores. La etapa 801 es recibir una tensión medida en un punto de medición, siendo el punto de medición diferente del primer punto, la etapa 802 es estimar un valor de delta de una diferencia de la tensión entre el primer punto y el punto de medición, en el que se calcula la estimación del valor de delta basándose en una reactancia entre el punto de medición y el primer punto, y al menos un parámetro de entrada eléctrica, en el que el parámetro de entrada eléctrica es un valor de referencia del controlador de planta eléctrica y en el que se deriva el valor de delta como una resta entre la tensión de referencia en el primer punto y la tensión en el punto de medición, multiplicado por una función de pendiente predeterminada, en el que la función de pendiente predeterminada es una función de la reactancia entre el punto de medición y el primer punto, de tal manera que una ganancia proporcional del controlador de planta eléctrica se modifica dependiendo de dicha reactancia, y una multiplicación adicional por la tensión en el punto de medición, para estimar de ese modo una referencia de potencia reactiva intermedia, y en el que se compensa la referencia de potencia reactiva intermedia según la reactancia entre el punto de medición y el primer punto, sumando un valor de compensación, proporcionando de ese modo un valor de referencia de potencia reactiva,

y la etapa 803 es controlar la tensión basándose en la tensión medida y el valor de delta. El método mostrado en la figura 8 se lleva a cabo en el controlador de planta eléctrica.

En una realización, el punto de acoplamiento común 201 está situado más cerca de los aerogeneradores que del punto de medición 204b, es decir, el punto de medición 204b está ubicado en la red eléctrica 203, y no en la red interna 202 de la planta de energía eólica.

En una realización de la presente invención, el método se aplica tanto a un sistema con una planta de energía eólica como también a sistemas en los que varias plantas de energía eólica están controladas por el mismo controlador maestro de planta eléctrica, teniendo cada planta de energía eólica un controlador de planta eléctrica local.

Cualquier intervalo o valor de dispositivo proporcionado en el presente documento puede ampliarse o modificarse sin perder el efecto buscado, tal como resultará evidente para el experto habitual.

La invención puede implementarse por medio de hardware, software, firmware o cualquier combinación de estos. La invención o algunas de las características de la misma también pueden implementarse como software o código programable por ordenador que se ejecuta en uno o más procesadores de datos y/o procesadores de señales digitales, es decir, un ordenador.

Los elementos individuales de una realización de la invención pueden implementarse física, funcional y lógicamente de cualquier manera adecuada, tal como en una única unidad, en una pluralidad de unidades o como parte de unidades funcionales independientes. La invención puede implementarse en una única unidad, o estar distribuida tanto física como funcionalmente entre diferentes unidades y procesadores.

Aunque la presente invención se ha descrito en relación con las realizaciones especificadas, no debe considerarse que se limita de ninguna manera a los ejemplos presentados. El alcance de la presente invención se establece en el juego de reivindicaciones adjunto. En el contexto de las reivindicaciones, los términos "que comprende" o "comprende" no excluyen otros posibles elementos o etapas. Además, la mención de referencias como "un(o)" o "una", etc., no debe interpretarse como excluyente de una pluralidad. El uso de símbolos de referencia en las reivindicaciones con respecto a los elementos indicados en las figuras tampoco se interpretará como limitativo del alcance de la invención. Además, las características individuales mencionadas en diferentes reivindicaciones

posiblemente pueden combinarse ventajosamente, y la mención de estas características en diferentes reivindicaciones no excluye que una combinación de características no sea posible y ventajosa.

REIVINDICACIONES

1. Un controlador de planta eléctrica (23), dispuesto para controlar una tensión de una planta de energía eólica en un primer punto (201) en una red eléctrica (20) en el que la planta de energía eólica comprende una pluralidad de aerogeneradores (1), comprendiendo el controlador de planta eléctrica (23):
 - 5 - un dispositivo de entrada dispuesto para recibir una tensión medida (601) en un punto de medición (204), siendo el punto de medición (204) diferente del primer punto (201),
- un algoritmo para estimar un valor de delta de una diferencia de la tensión entre el primer punto (201) y el punto de medición (204), en el que se calcula la estimación del valor de delta basándose en una reactancia (Xlínea) entre el punto de medición (204) y el primer punto (201), y al menos un parámetro de
10 entrada eléctrica, y en el que el al menos un parámetro de entrada eléctrica es al menos una tensión de referencia (602) del controlador de planta eléctrica (23), y estando dispuesto el controlador de planta eléctrica (23) para controlar la tensión basándose en la tensión medida (601) y el valor de delta,
en el que el valor de delta se deriva como una resta entre la tensión de referencia (602) en el primer punto (201) y la tensión (601) en el punto de medición (204), multiplicado por una función de pendiente (605)
15 predeterminada, en el que la función de pendiente (605) predeterminada es una función de la reactancia (Xlínea) entre el punto de medición (204) y el primer punto (201), de tal manera que una ganancia proporcional del controlador de planta eléctrica (23) se modifica dependiendo de dicha reactancia (Xlínea), y una multiplicación adicional por la tensión (601) en el punto de medición (204), para estimar de ese modo una referencia de potencia reactiva intermedia (612)
20 y en el que la referencia de potencia reactiva intermedia (612) se compensa según la reactancia (Xlínea) entre el punto de medición (204) y el primer punto (201), sumando un valor de compensación, proporcionando de ese modo un valor de referencia de potencia reactiva (611).
2. El controlador de planta eléctrica (23) según la reivindicación 1, en el que el controlador de planta eléctrica (23) está configurado para calcular un punto de ajuste de referencia para la pluralidad de aerogeneradores (1), y el controlador de planta eléctrica (23) comprende además un distribuidor (24) para distribuir puntos de
25 ajuste de referencia eléctrica (4) a cada uno de la pluralidad de aerogeneradores (1).
3. El controlador de planta eléctrica (23) según la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en el que el controlador de planta eléctrica (23) comprende además al menos un dispositivo de medición para medir la tensión medida (601) en el punto de medición (204).
- 30 4. El controlador de planta eléctrica (23) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el controlador de planta eléctrica (23) está configurado para actuar como controlador maestro para al menos un controlador de planta eléctrica local, el al menos un controlador de planta eléctrica local controla un subconjunto de la pluralidad de aerogeneradores (1).
5. Planta de energía eólica dispuesta para que se controle por un controlador de planta eléctrica (23) según la
35 reivindicación 1 a la reivindicación 4.
6. Un método para controlar una tensión de una planta de energía eólica en un primer punto (201) de una red eléctrica (20), en el que la planta de energía eólica comprende un controlador de planta eléctrica (23) dispuesto para llevar a cabo el método y una pluralidad de aerogeneradores (1), comprendiendo el método:
40 - recibir una tensión medida (601) en un punto de medición (204), siendo el punto de medición (204) diferente del primer punto (201),
- estimar un valor de delta de una diferencia de la tensión entre el primer punto (201) y el punto de medición (204), en el que se calcula la estimación del valor de delta basándose en una reactancia (Xlínea) entre el punto de medición (204) y el primer punto (201), y al menos un parámetro de entrada eléctrica, en el que el parámetro de entrada eléctrica es una tensión de referencia (602) del controlador de planta eléctrica (23) y
45 en el que el valor de delta se deriva como una resta entre la tensión de referencia en el primer punto (201) y la tensión en el punto de medición (204), multiplicado por una función de pendiente (605) predeterminada, en el que la función de pendiente (605) predeterminada es una función de la reactancia entre el punto de medición (204) y el primer punto (201) de tal manera que una ganancia proporcional del controlador de planta eléctrica (23) se modifica dependiendo de dicha reactancia (Xlínea), y una multiplicación adicional por la tensión (601) en el punto de medición (204), estimando de ese modo una referencia de potencia reactiva intermedia (612),
50 - compensar la referencia de potencia reactiva intermedia (612) según la reactancia (Xlínea) entre el punto de medición (204) y el primer punto (201), sumando un valor de compensación, proporcionando de ese modo un valor de referencia de potencia reactiva (611),

- controlar la tensión basándose en la tensión medida (601) y el valor de delta.

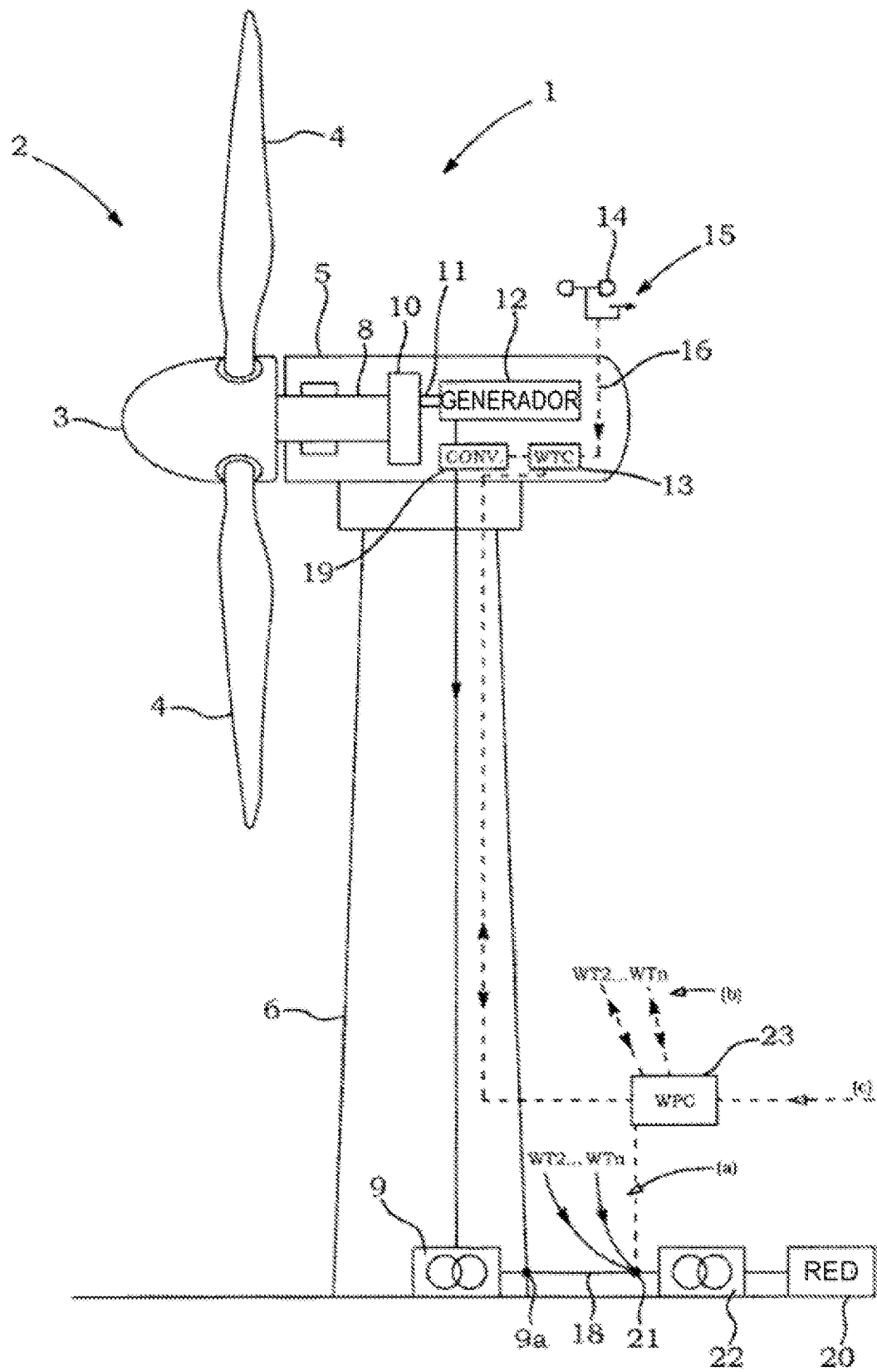


Figura 1

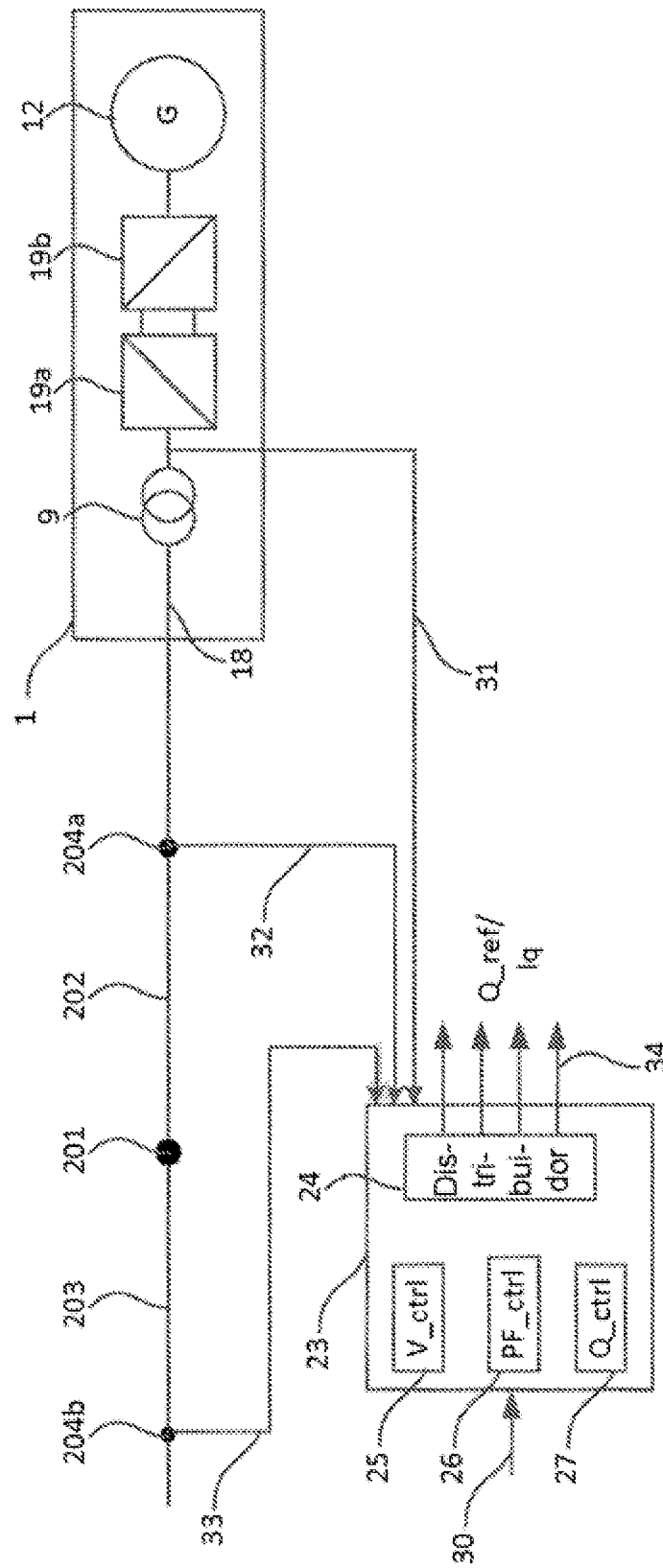


Figure 2

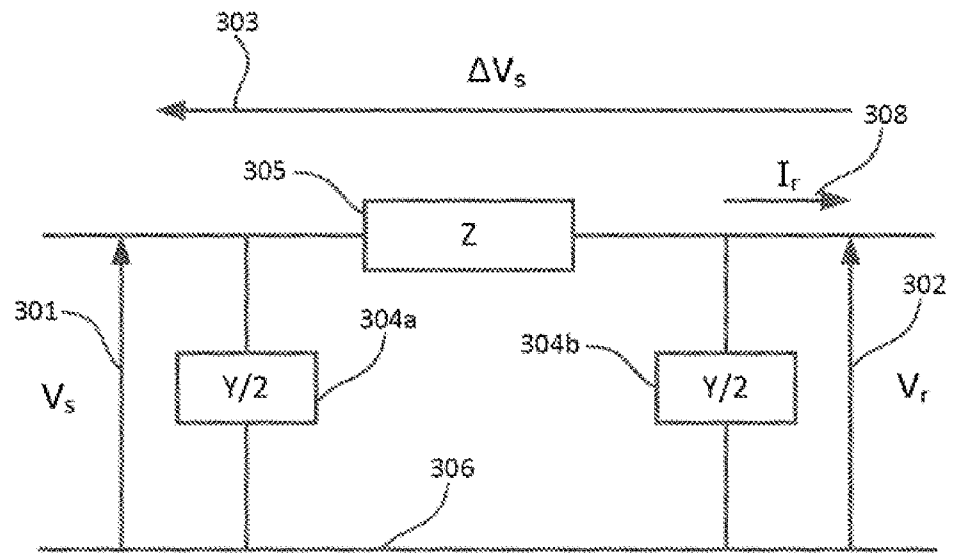


Figura 3

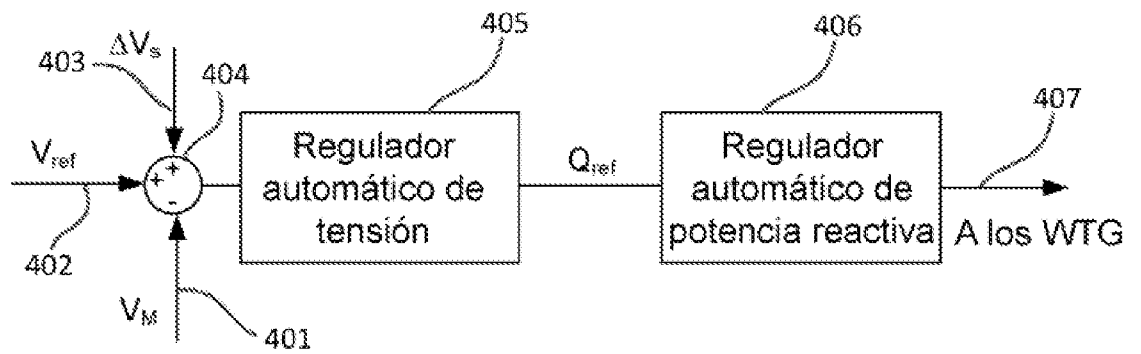


Figura 4

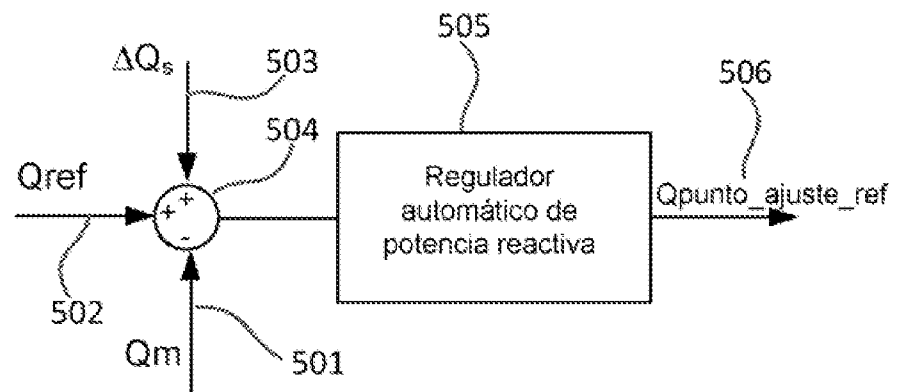


Figura 5

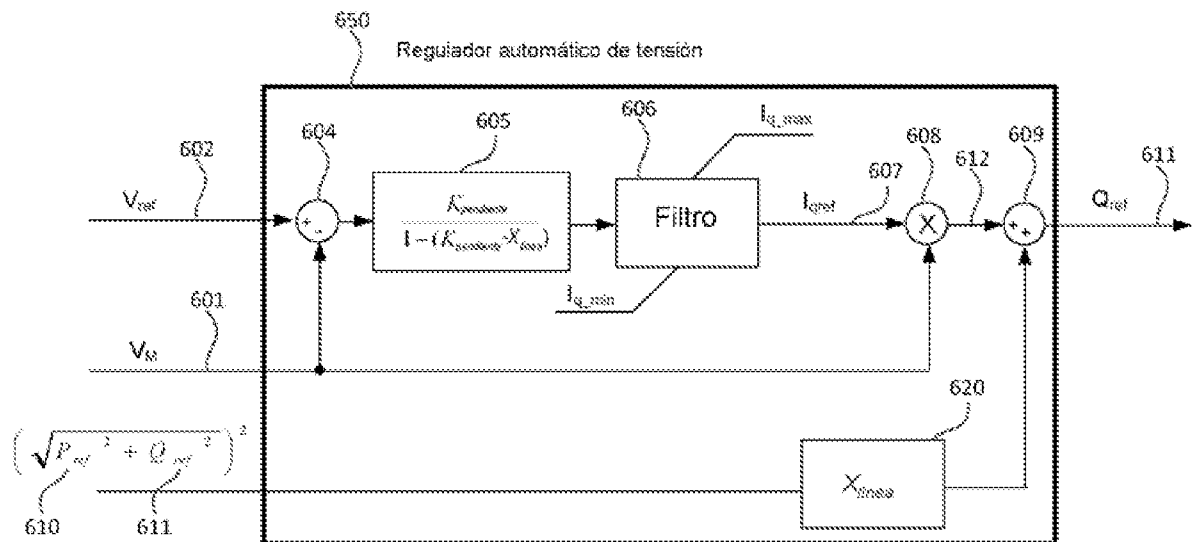


Figura 6

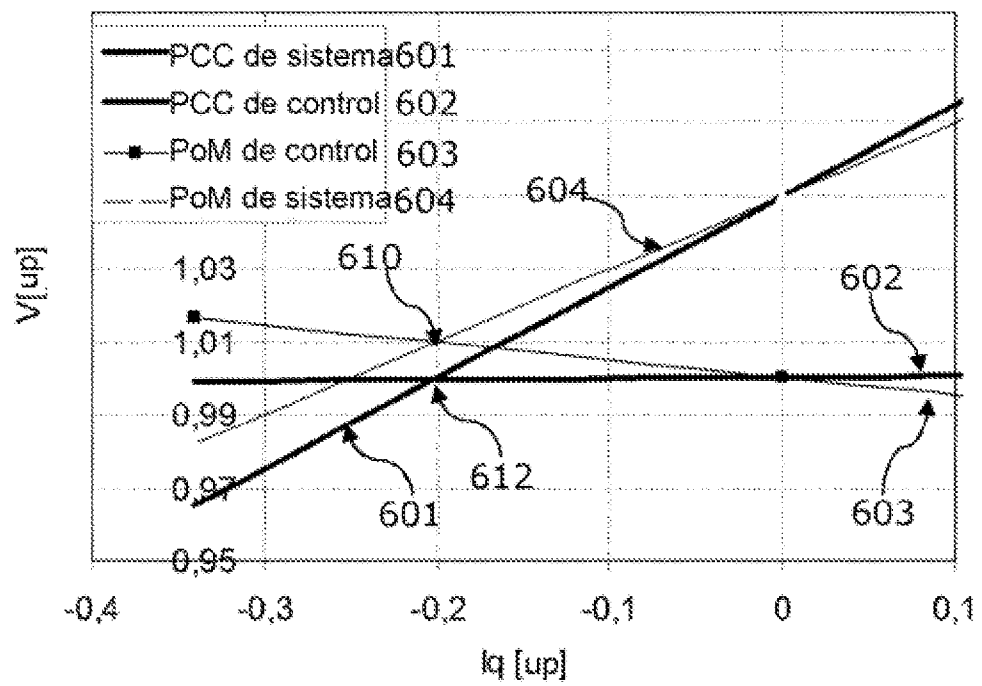


Figura 7

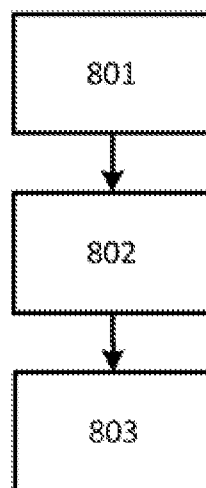


Figura 8