

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 742 860**

51 Int. Cl.:

**H02J 3/24** (2006.01)

**F03D 9/00** (2006.01)

**F03D 7/02** (2006.01)

**F03D 9/25** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **03.07.2013 PCT/EP2013/064069**

87 Fecha y número de publicación internacional: **16.01.2014 WO14009226**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.07.2013 E 13732988 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **31.07.2019 EP 2873129**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo para alimentar con energía eléctrica una red de suministro eléctrico**

30 Prioridad:  
**13.07.2012 DE 102012212364**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**17.02.2020**

73 Titular/es:  
**WOBEN PROPERTIES GMBH (100.0%)  
Borsigstrasse 26  
26607 Aurich, DE**

72 Inventor/es:  
**DIEDRICHS, VOLKER;  
BUSKER, KAI y  
BEEKMANN, ALFRED**

74 Agente/Representante:  
**ROEB DÍAZ-ÁLVAREZ, María**

ES 2 742 860 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**

Procedimiento y dispositivo para alimentar con energía eléctrica una red de suministro eléctrico

5 La presente invención se refiere a un procedimiento para controlar un generador de energía eléctrica conectado a un punto de conexión de red en una red de suministro eléctrico. Así mismo, la presente invención se refiere también a un generador de energía eléctrica de este tipo.

Alimentar con energía eléctrica una red de suministro eléctrico, como, por ejemplo, la red de interconexión europea o la red eléctrica de los Estados Unidos de América, es algo ampliamente conocido. En adelante, se entenderá una red de suministro eléctrico como una red de tensión alterna, tal y como está establecido ampliamente a nivel general. Esto no excluye la posibilidad de que haya secciones de corriente continua en la red. Igualmente, los aspectos que son independientes de la frecuencia, en principio, también pueden hacer alusión a una red de tensión continua. Históricamente, la alimentación hacia una red de suministro eléctrico se produce con una gran central eléctrica, que a partir de energía primaria, como carbón, energía nuclear o gas, impulsa un generador síncrono. Dependiendo de la cantidad de pares de polos del generador síncrono y de la velocidad de giro del generador síncrono, este alimenta a la red de suministro a una determinada frecuencia. El generador síncrono puede verse influido por la tecnología de control, por ejemplo, para ajustar la potencia. Sin embargo, un procedimiento de ajuste de este tipo puede ser lento.

20 En el caso de situaciones cambiantes en la red de suministro a alimentar, la reacción física del generador síncrono a menudo produce, al menos a corto plazo, una variación en el estado de la red. Por ejemplo, la velocidad de giro del generador síncrono aumenta cuando la red de suministro no puede absorber completamente la potencia puesta a disposición y/o que puede poner a disposición el generador síncrono. El exceso de potencia acelera el generador síncrono, lo que se refleja en un aumento de la frecuencia de alimentación. A consecuencia de esto puede aumentar la frecuencia en la red de suministro.

30 Cuando se alimenta a una red de suministro, también se debe tener en cuenta la estabilidad de la red. La pérdida de estabilidad de la red, es decir, la pérdida de la estabilidad de la red de suministro, puede provocar el apagado del generador de alimentación. Una pérdida de estabilidad de este tipo, también conocida en el lenguaje técnico del sector como «loss of stability», abreviado «LOS», describe procedimientos de naturaleza física, que no permiten que siga funcionando y que deben ser interrumpidos mediante desconexiones. En el caso de las centrales eléctricas, esto supone una pérdida de su potencia y, por lo tanto, puede tener como consecuencia una escalada de la denominada potencia deficitaria. En el peor de los casos, esta pérdida de estabilidad conduce a una pérdida total de un sistema de energía como resultado de fallos en cascada y la acumulación del déficit. Estas pérdidas totales son extremadamente raras. No obstante, se producen, tal y como ocurrió, por ejemplo, el 24 de septiembre de 2004 en Italia.

40 La pérdida de la estabilidad de la red, la denominada «Loss of stability», debe entenderse como un fenómeno en el que inicialmente se pierde la estabilidad angular, lo que en última instancia puede conducir a la pérdida de la estabilidad de tensión.

45 Como criterios de estabilidad, en particular se establecen las sobrecorrientes alcanzables, que se deben poder soportar en caso de que se produzca una pérdida de estabilidad. Esto implica que el sistema se debe dimensionar de forma correspondiente. Por lo tanto, una nueva central eléctrica, en particular una nueva central eléctrica que se vaya a construir, se adapta así a la red de suministro, tal como está dispuesta en el punto de conexión de red al que se tiene que conectar la central eléctrica.

50 Un criterio importante al conectar grandes centrales eléctricas a una red de suministro eléctrico es la relación de corriente de cortocircuito, también conocida en el lenguaje técnico del sector como «Short circuit ratio», abreviado «Scr». Esta relación de corriente de cortocircuito es la relación entre la potencia de cortocircuito y la potencia de conexión. En este caso, la potencia de cortocircuito se entiende como la potencia que la red de suministro en cuestión puede proporcionar en el punto de conexión de red considerado en el que se va a conectar la central eléctrica, cuando ahí se produce un cortocircuito. La potencia de conexión es la potencia de conexión de la central eléctrica que se va a conectar, en particular, la potencia nominal del generador que se va a conectar.

55 Para garantizar un funcionamiento seguro, es decir, descartar en la medida de lo posible una pérdida de estabilidad (una «loss of stability»), las centrales eléctricas generalmente están diseñadas para el punto de conexión de red correspondiente, de tal forma que la relación de corriente de cortocircuito sea superior a 10, generalmente incluso superior a 15. Así pues, la red de suministro puede proporcionar una potencia de cortocircuito comparativamente alta en el punto de conexión de red. Esto significa que la red presenta una impedancia de red baja y se califica como una red robusta.

En el caso de una red débil, es decir, si hay una alta impedancia de red, solo se puede alimentar con una pequeña potencia de conexión y/o solo se puede conectar una central eléctrica con una pequeña potencia de conexión. Esto generalmente conduce a que no se pueda conectar una nueva central eléctrica en un punto de conexión de red de este tipo, o a que la red deba modificarse, en particular, previendo líneas adicionales más potentes. Esto también se conoce comúnmente con el término refuerzo de red.

Para alimentar con energía eléctrica a través de unidades generadoras descentralizadas, como ocurre en particular con las instalaciones de energía eólica, el problema de la pérdida de estabilidad de la red, es decir, la denominada «loss of stability», en el fondo es desconocida. Aunque a finales de los años 90 ya se hicieron las primeras propuestas para permitir que las instalaciones de energía eólica también contribuyeran al soporte eléctrico de la red, en estas no se tiene en cuenta la causa de una pérdida de estabilidad, en particular, que se origine una pérdida de estabilidad debida a la alimentación de la red de suministro.

Así, por ejemplo, la solicitud de patente alemana US 6,891,281 describe un procedimiento en el cual las instalaciones de energía eólica, dependiendo de la frecuencia de red, pueden cambiar su potencia de alimentación, en particular, disminuyendo su potencia. El documento US 7,462,946 sugiere que, en el caso de un fallo en la red, o sea, en particular en el caso de un cortocircuito, una instalación de energía eólica limite la corriente con la que genera la alimentación, en lugar de desconectarse de la red, para que en este caso también siga dando soporte a la red. En el documento US 6,965,174 se describe un procedimiento para dar soporte a la red mediante una instalación de energía eólica que ajusta el ángulo de fase de la corriente con la que se alimenta la red en función de la tensión de red y, con ello, se alimenta la red con potencia reactiva dependiente de la tensión para conseguir así dar soporte a la red. El documento US 6,984,898 también se refiere a un procedimiento para dar soporte a la red por medio de una instalación de energía eólica, en el que la instalación de energía eólica, dependiendo de la tensión de red, reduce si es necesario la potencia con la que se alimenta la red para, en particular, evitar así la desconexión de la red y para conseguir así dar soporte también a la red a través de una instalación de energía eólica.

La solicitud de patente internacional WO 2009/083448 A2 describe un procedimiento para controlar una tensión por medio de un regulador de tensión en función de al menos una impedancia de cortocircuito. El documento EP 1 909 370 A1 describe un procedimiento, así como un dispositivo para controlar los flujos de carga en una red de suministro eléctrico, en particular mediante un control FACTS (para sistemas de transmisión flexible de corriente alterna). Del documento EP 2 325 968 A1 se conocen un procedimiento, un dispositivo y un programa de ordenador para determinar los parámetros de red mediante una señal de prueba. El documento EP 2 299 555 A1 describe un dispositivo, así como un procedimiento para controlar la oscilación electromecánica en una red. El documento EP 1 841 037 A2 describe un procedimiento, así como un dispositivo para detectar parámetros de red. El documento US 2003/057924 A1 da a conocer un procedimiento, así como un dispositivo para mantener la tensión de una red de suministro de energía.

El hecho de que tales unidades generadoras descentralizadas, como las instalaciones de energía eólica, puedan ser la causa real de la pérdida de estabilidad en la red (la «loss of stability») no se ha tenido en cuenta. V. Diedrichs *et al.* presentó y expuso el artículo «Loss of (Angle) Stability of Wind Plants» (Pérdida de estabilidad (angular) en plantas eólicas) en el «10th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Farms, Aarhus (Denmark), 25 - 26 October 2011» (10.º seminario internacional de integración a gran escala de energía eólica en sistemas de potencia y en redes de transmisión para parques eólicos en alta mar, Aarhus (Dinamarca), 25 y 26 de octubre de 2011). En este se abordó fundamentalmente el problema de que la pérdida de estabilidad en la red (la «loss of stability») también puede ocurrir, en principio, en instalaciones de energía eólica que se conectan a la red de suministro para proporcionar alimentación. Este artículo representa esencialmente una concienciación sobre el problema. Se hace referencia expresa a este artículo, siendo aplicables también sus contenidos a la presente solicitud, en particular, sus explicaciones técnicas.

En principio no son transferibles los hallazgos, las experiencias u otros conocimientos acerca de la conexión y el funcionamiento de grandes centrales eléctricas en la red de suministro eléctrico a partir de instalaciones de energía eólica, incluidos los grandes parques eólicos con múltiples instalaciones de energía eólica, que están conectados a la red de suministro para proporcionar alimentación. En la actualidad, el experto en la materia responsable de conectar una central eléctrica a una red de suministro y que quiere operar en ella es otra persona distinta al experto en la materia que quiere conectar una instalación de energía eólica a la red de suministro y operar en ella. Las instalaciones de energía eólica (y gran parte de lo siguiente también aplica a otras unidades generadoras descentralizadas) dependen del viento y, por lo tanto, tienen que considerar una fuente de energía fluctuante; por lo general, no alimentan a la red con un generador síncrono acoplado directamente a la red de suministro, sino que utilizan un inversor basado en tensión; presentan una magnitud diferente a la de las grandes centrales eléctricas, siendo su potencia nominal generalmente aproximadamente 3 órdenes de magnitud inferior a la de una central eléctrica grande; por lo general, están sujetos a otras regulaciones políticas que a menudo les garantizan una

recepción de la potencia por parte de los operadores de las redes de suministro eléctrico; suelen estar colocados de forma descentralizada; por lo general, alimentan a una red de media tensión, mientras que las grandes centrales eléctricas generalmente alimentan a una red de alta tensión.

5 La Oficina Alemana de Patentes y Marcas ha investigado en la solicitud de prioridad para la presente solicitud el siguiente estado de la técnica: DE 10 2011 053 237 A1, WO 2010/060903 A1, US 2010/0148508 A1, DE 10 2007 044 601 A1, DE 10 2007 018 888 A1, US 2010/0237834 A1 así como el artículo de Volker Diedrichs *et al.*, «Loss of (Angle) Stability of Wind Power Plants - The Underestimated Phenomenon in Case of Very Low Short Circuit Ratio» (Pérdida de estabilidad (angular) de plantas eólicas. El fenómeno subestimado en el caso de muy baja relación de cortocircuito).

15 La presente invención, por lo tanto, tiene el objetivo de abordar al menos uno de los problemas anteriormente mencionados. En particular, se debe proponer una solución gracias a la cual se puedan operar unidades generadoras descentralizadas, como instalaciones de energía eólica, de modo que tengan en cuenta el fenómeno de pérdida de estabilidad de la red de suministro. En particular, se debe proponer una solución en la que las unidades de suministro descentralizadas, como las instalaciones de energía eólica o los parques eólicos, contribuyan a la estabilidad de la red, de manera que se contrarreste la aparición de una pérdida de estabilidad de la red (la aparición de una «loss of stability»). Al menos debe lograrse una solución alternativa.

20 Según la invención, se propone un procedimiento según la reivindicación 1. En base a esto se controla un generador de energía eléctrica que está conectado a una red de suministro eléctrico en un punto de conexión de red. De forma puramente preventiva, para evitar confusiones, cabe aclarar que un generador de energía eléctrica en realidad convierte la energía existente en energía eléctrica, lo que por simplicidad se denominará generación en el presente documento. Según el método de control propuesto, primero se registra al menos una propiedad de red de la red de suministro eléctrico relacionada con el punto de conexión de red. La propiedad de red registrada aquí es, en particular, el comportamiento de la red con respecto a la estabilidad en el caso de diferentes estados operativos de la red y/o en el caso de diferentes condiciones de alimentación o condiciones de contorno de alimentación. En particular, se registran las propiedades de red que describen el comportamiento de la red de suministro en caso de desviaciones del punto de trabajo nominal.

30 Así mismo, se propone alimentar con corriente eléctrica la red de suministro eléctrico en base a esta propiedad de red registrada. Con ello, el control de la alimentación depende de la propiedad de red determinada previamente. Esto debe distinguirse del dimensionamiento técnico a nivel de sistema del generador, para lo que el control no tiene en cuenta las propiedades de red registradas. El control de la alimentación en función de las propiedades de red registradas también se debe distinguir de un control en función de las condiciones de red actuales. No obstante, aquí también resulta ventajoso, además del control de la alimentación en función de la propiedad de red registrada, interpretar el generador en función de la propiedad de red registrada y hacer que el control también dependa de las condiciones de red; si bien esto no es el objeto principal de la presente solicitud.

40 De hecho, según la invención, se ha constatado que, en particular, solo tener en cuenta la propiedad de red para el dimensionamiento del generador conectado o que se va a conectar puede ser una consideración incompleta. Esto aplica en particular a unidades de suministro descentralizadas y/o a generadores descentralizados, que tienen la capacidad de adaptarse dinámicamente a situaciones nuevas. Por otro lado, una adaptación a nuevas situaciones, es decir, a estados cambiantes en la red de suministro, lleva asociado el riesgo de que se actúe con retraso frente a los posibles problemas que se estén produciendo en ese momento en la red de suministro. Más bien, solo teniendo en cuenta al menos una propiedad de red registrada previamente, se puede controlar predictivamente la alimentación con corriente eléctrica de la red de suministro eléctrico. Un control predictivo de este tipo tiene, en particular, el objetivo de evitar, o al menos detectar anticipadamente, problemas de estabilidad en la red de suministro, en particular una pérdida de estabilidad, es decir, una denominada «loss of stability».

50 Preferiblemente, este método de control se propone para un denominado generador descentralizado y/o una instalación de energía eólica o un parque eólico que comprenda varias instalaciones eólicas. Una instalación de energía eólica suele ser un generador descentralizado, debido a que se coloca en lugares descentralizados que están orientados, en particular, hacia donde sopla el viento, y porque no puede considerarse una fuente de energía centralizada por su potencia de conexión en comparación con las grandes centrales eléctricas. Lo mismo aplica generalmente a un parque eólico con múltiples instalaciones de energía eólica. Además, las instalaciones de energía eólica y al menos también los parques eólicos más pequeños están esencialmente conectados a una red de suministro existente. Es posible que esté prevista una línea de conexión o varias líneas de conexión para la conexión a esta red de suministro, pero la estructura básica de la red de suministro generalmente permanece como estaba.

60 Hasta ahora se ha asumido que la conexión de dichos generadores descentralizados no tenía una influencia significativa sobre las características básicas ni sobre la estructura básica de la correspondiente red de suministro.

Se comprobaba si las capacidades de red correspondientes eran suficientes para la conexión del proveedor descentralizado, es decir, si en particular eran suficientes para transportar la potencia de alimentación adicional que se esperaba que fuera a inyectar el generador descentralizado. En particular, los aspectos de la estabilidad de la red cuando se alimenta desde este generador prácticamente no se han tenido en cuenta. En particular, en estos generadores descentralizados no se ha tenido en cuenta hasta qué punto la alimentación con energía eléctrica a través de ellos podría desencadenar una pérdida de estabilidad de la red de suministro. Por lo tanto, el presente procedimiento está especialmente dirigido a tales proveedores descentralizados, en particular, a las instalaciones de energía eólica y a los parques eólicos.

10 Preferiblemente, la alimentación se produce, en particular, por medio de generadores descentralizados, por medio de un inversor de tensión. En el caso de una alimentación de este tipo por medio de un inversor de tensión, se usa un inversor al cual se le proporciona la energía a alimentar, por ejemplo, en un circuito intermedio de tensión continua, y el inversor de tensión genera una señal de tensión alterna, en particular, con una forma lo más sinusoidal que se posible a partir de este. Al usar una inductancia de red, esta señal de tensión alterna a menudo generará una corriente de alimentación correspondiente en la red de suministro. Pueden estar previstas transformaciones de tensión adicionales a través de uno o más transformadores.

En este caso, en particular, se propone el denominado concepto de convertidor completo, en el que la totalidad de la potencia eléctrica que se va a alimentar (en este caso se desprecian las pérdidas) alimenta a la red de suministro mediante este inversor de tensión. No obstante, en las instalaciones de energía eólica se pueden considerar otros conceptos con inversores de tensión, en los que el inversor de tensión controla la alimentación de corriente eléctrica indirectamente a través del control de un generador que produce la corriente, en particular del tipo de una máquina asíncrona de doble alimentación.

25 El uso de un inversor de tensión para alimentar con corriente eléctrica a una red de suministro, en particular según el concepto de convertidor completo, es esencialmente diferente de la alimentación de corriente eléctrica a través de una gran central eléctrica. El inversor de tensión puede y/o debe ajustarse constantemente dependiendo del estado de la red, en particular de la amplitud de tensión y la frecuencia de su alimentación. Esto produce, al mismo tiempo, la capacidad de responder rápidamente a los cambios en la red. Al mismo tiempo, existe en este caso el peligro de entrar rápidamente en un estado inestable si esta reacción rápida se lleva a cabo incorrectamente. Este problema se aborda en particular con esta invención.

Según una forma de realización, se propone que el generador se controle de tal modo que opere en un punto de trabajo que dependa de las propiedades de red registradas. En particular, no solo depende de estas propiedades de red registradas, sino también de la amplitud de tensión y la frecuencia en la red de suministro, es decir, en particular en el punto de conexión de red y/o en sus proximidades. Además, puede depender de la potencia activa de alimentación en ese momento y/o de la potencia reactiva de alimentación en ese momento. Por lo tanto, en primer lugar, se obtiene un punto de trabajo nominal que está diseñado para este punto de conexión de red con la correspondiente propiedad de red registrada y para el generador concreto. Si los estados de la red o de la alimentación ahora cambian, se puede elegir otro punto de trabajo que tenga en cuenta la propiedad de red previamente registrada. El punto de trabajo del generador en el punto de conexión de red se indica preferiblemente a través de la potencia activa y/o la potencia reactiva con la que generador alimenta a la red de suministro.

Según una forma de realización, se propone que, para establecer el punto de trabajo, se use al menos una característica de control que dependa de la propiedad de red registrada. Una característica de control de este tipo también puede ser multidimensional, es decir, puede depender de múltiples parámetros de entrada y/o comprender simultáneamente varios parámetros para el correspondiente ajuste. En particular, la característica de control en función de la tensión de red en el punto de conexión de red predefine la potencia reactiva con la que se va a inyectar alimentación y/o la potencia activa con que se va a inyectar alimentación. La característica de control se establece en base a la al menos una propiedad de red registrada. En particular, la curva característica se elige para que el funcionamiento del generador no conduzca, en la medida de lo posible, a una pérdida de estabilidad de la red de suministro.

Según una propuesta está previsto utilizar un regulador no lineal, en particular un regulador con características de regulación no lineales y/o no continuas. En particular, se propone evitar usar exclusivamente un regulador PID. Se ha constatado que un regulador PID no es suficiente para ciertos requisitos e incluso con una parametrización óptima tampoco es suficiente para satisfacer los requisitos. Con un regulador no lineal se puede conseguir un mejor ajuste sobre el sistema a controlar. Como regulador no lineal se contempla usar, por ejemplo, un regulador difuso, un regulador basado en una red neuronal, un regulador multiplicador, un regulador que cuenta con una función de histéresis y/o un regulador que utiliza una característica de tiempo muerto.

Según una configuración, se usa una regulación que conduce a que el punto de trabajo correspondiente se

establezca en base a la característica de control. Una característica de control de este tipo puede indicar, por ejemplo, la potencia reactiva  $Q$  de alimentación en función de la potencia activa  $P$  de alimentación y de la tensión  $U$  en la red, tal y como describe la fórmula  $Q = f(P, U)$ .

- 5 Preferiblemente, el registro comprende la al menos una propiedad de red (que también se puede llevar a cabo calculando las propiedades de red), el registro de una relación entre la potencia reactiva de alimentación y una tensión de red en el punto de conexión de red. Adicional o alternativamente, el registro comprende una relación entre la potencia activa alimentada y la tensión de red en el punto de conexión de red. Preferiblemente, el registro comprende una relación entre la potencia activa alimentada, la potencia reactiva alimentada y la tensión de red en el
- 10 punto de conexión de red, de modo que en este caso se registra una relación tridimensional. A consecuencia de eso, se excluye una relación entre la potencia reactiva, la potencia activa y la tensión de red en el punto de conexión de red, lo que permite extraer conclusiones sobre el comportamiento de la red de suministro con respecto a este punto de conexión de red y puede servir de base para el control del proveedor al alimentar la red de suministro.
- 15 Según una forma de realización, se propone que el registro de la propiedad de red comprenda el registro de un límite de estabilidad. Un límite de estabilidad de este tipo puede especificarse en función de la tensión de red en el punto de conexión de red en función de una potencia reactiva alimentada y en función de la potencia activa alimentada. Por lo tanto, este límite se define a través de tres parámetros y, en consecuencia, también puede ilustrarse en una representación tridimensional. En una representación tridimensional de este tipo, el límite de estabilidad se extiende
- 20 básicamente sobre una superficie curva o combada, es decir, sobre una superficie límite. Los correspondientes puntos de trabajo se seleccionan, en consecuencia, y con ello también la curva característica dada por los puntos de trabajo del lado estable del límite de estabilidad. Dependiendo también de la dinámica esperada de la red de suministro y/o del generador y, en caso de una instalación de energía eólica también del viento, se puede seleccionar una separación más grande o más pequeña respecto al límite de estabilidad del correspondiente punto
- 25 de trabajo.

Según una forma de realización se propone que la al menos una propiedad de red registrada se calcule a través de un modelo. Para ello, primero se realiza un análisis de red de la red de suministro que, por ejemplo, tiene en cuenta el sistema de líneas de transmisión, los transformadores presentes en la red de suministro, los dispositivos de

30 conmutación, los consumidores y los generadores. Por simplicidad, en adelante también se denominará con el término trafo a un transformador. En particular, sus valores se introducirán en un programa de cálculo o programa de simulación. El análisis de red se realiza específicamente para el punto de conexión de red existente o planificado. Se pueden ignorar ciertos elementos individuales específicos en el análisis de red, en la medida en que sea evidente que estos no tienen una relevancia significativa para el punto de conexión de red. Se pueden tener en cuenta las

35 correspondientes secciones de red mediante modelos equivalentes, en particular, utilizando impedancias equivalentes. A partir del análisis de red, se crea un modelo de la red de suministro, que se puede editar y probar con el software adecuado para obtener un modelo de análisis de red. A continuación, en particular con un software de análisis de ese tipo, en base al modelo de red para el punto de conexión de red concreto, se realiza una simulación de diferentes puntos de funcionamiento y se almacenan los resultados de la simulación. El resultado de la

40 simulación es la al menos una propiedad de red registrada. Para ello, en este caso se adquieren o se toman como base, en particular, cada uno de los múltiples puntos de trabajo simulados.

Cabe señalar que también se puede utilizar el término simplificado «red» como sinónimo del término «red de suministro».

- 45 Preferiblemente, el límite de estabilidad que resulta, por ejemplo, de la simulación anterior también se almacena en una tabla. Adicional o alternativamente, también se puede aproximar con una función analítica. Los valores intermedios no registrados también se pueden determinar por interpolación.

- 50 Según una configuración se propone que al registrar la al menos una propiedad de red también se tenga o tengan en cuenta propiedades o al menos una propiedad del generador y se registre una relación de corriente de cortocircuito. Las propiedades de red del nodo de conexión también se registran en esta conexión de red teniendo en cuenta las propiedades del generador. En este caso, preferiblemente, se propone que el generador se controle con una relación de corriente de cortocircuito de menos de 6. La relación de corriente de cortocircuito es, en este caso,
- 55 preferiblemente menor de 4 y, en particular, menor de 2. Con ello se propone un método de control para una relación de corriente de cortocircuito que es menor de lo que suele ser habitual. Esto también requiere a menudo que específicamente se lleve a cabo un dimensionamiento de este tipo o que al menos se acepte. Es decir, se propone deliberadamente una alimentación en una red débil, en particular con un generador, cuya potencia de conexión es grande en comparación con la potencia de cortocircuito de la red con respecto al punto de conexión, es decir, más
- 60 grande que un sexto, más grande que un cuarto o incluso más grande que la mitad de la potencia de cortocircuito de la red para este punto de conexión. Se ha constatado así que, en cualquier caso, se puede usar una instalación de energía eólica con un convertidor fuente de tensión (por simplicidad denominado convertidor de tensión), en

particular con una estructura de convertidor completo, cuyo funcionamiento permite una red débil. Por lo tanto, se asume deliberadamente que al elegir y/o al aceptar una relación de corriente de cortocircuito baja se lleve a cabo un funcionamiento en la proximidad de un límite de estabilidad. Se ha constatado que una regulación con un convertidor de tensión puede garantizar una regulación adecuada, en particular una regulación adecuada de la alimentación de  
 5 manera rápida y precisa. Como resultado se puede lograr que los puntos de conexión de red que hasta ahora se consideraban inadecuados se puedan usar ahora para conectar un generador.

Según una configuración, se propone que el punto de trabajo del generador se seleccione con un margen de estabilidad predeterminado con respecto al límite de estabilidad. En este sentido, ahora se propone una elección  
 10 concreta del punto de trabajo para garantizar la estabilidad. Esto se diferencia en particular de un concepto en el que se hace un dimensionamiento con una relación de corriente de cortocircuito muy elevada, en el que no se realiza una selección del punto de trabajo concreto. En otras palabras, se evita un diseño excesivamente sobredimensionado. El punto de trabajo se elige en un cierto margen de estabilidad y con ello se lleva a cabo el control con este margen de estabilidad. Si, por ejemplo, cambian las condiciones de la red o las condiciones de  
 15 contorno en la red, haciendo que, por ejemplo, disminuya a corto plazo el margen de estabilidad, entonces se adapta el punto de trabajo de forma correspondiente para seguir manteniendo el margen de estabilidad.

Según una forma de realización, el margen de estabilidad es una separación mínima permitida del punto de trabajo respecto al límite de estabilidad cuando las magnitudes que describen el punto de trabajo y el límite de estabilidad  
 20 están normalizadas. Por ejemplo, el límite de estabilidad y el punto de trabajo pueden definirse respectivamente a través de la magnitud de la potencia reactiva alimentada, la potencia activa alimentada y la tensión en el punto de conexión de red. Así pues, se puede realizar la normalización de la potencia activa a la potencia nominal del generador, así como la de la potencia reactiva a la potencia nominal del generador. La tensión se normaliza preferentemente a la tensión nominal. Como resultado, estas magnitudes se convierten en adimensionales y pueden  
 25 compararse entre sí, algo que no sería posible de una forma directa si se utilizasen unidades diferentes.

En el ejemplo mencionado, el límite de estabilidad forma una superficie curva en un espacio, es decir, en el espacio que se forma cuando la potencia reactiva, la potencia activa y la tensión forman un sistema de coordenadas  
 30 cartesiano. En este ejemplo ilustrativo, el margen de estabilidad puede ser otra superficie curva que, por ejemplo, presente básicamente una separación de 0,1. Por lo tanto, el margen de estabilidad forma, expresado de forma coloquial, una especie de colchón de seguridad.

Por ejemplo, desde el punto de vista computacional, una pequeña separación de este tipo se puede calcular como la raíz de la suma de los cuadrados de las diferencias de cada una de las magnitudes normalizadas.  
 35

Preferentemente están previstos diferentes puntos de trabajo para diferentes márgenes de estabilidad. Así, por ejemplo, el margen de estabilidad de un punto de trabajo óptimo puede seleccionarse para que sea pequeño, cuando, por ejemplo, está presente la tensión nominal, se alimenta potencia activa nominal y no se alimenta potencia reactiva. Para otros puntos de trabajo puede ser razonable prever una separación de seguridad mayor. Por  
 40 consiguiente, el mencionado colchón de seguridad ilustrado no tiene un espesor constante. Tal separación variable o constante de la distancia es, preferentemente, de al menos 0,05, 0,1 o, en particular, de al menos 0,2.

Preferentemente, durante el funcionamiento, se observa constantemente el margen de estabilidad del punto de trabajo actual y precisamente se cambia el punto de trabajo cuando la separación al límite de estabilidad disminuye,  
 45 en particular, cuando cae por debajo del valor del margen de estabilidad en cuestión. Esta observación se puede hacer en línea o casi en línea, es decir, con pequeños intervalos de tiempo entre los tiempos de observación y/o a través de un observador dinámico con un pequeño desfase en el tiempo y/o retraso en el tiempo. Como resultado, es posible responder a corto plazo y rápidamente a las variaciones relevantes para la estabilidad y, por lo tanto, lograr un funcionamiento estable incluso cerca del límite de estabilidad.  
 50

Así mismo, se propone una instalación de energía eólica, que presenta un generador eléctrico acoplado a un rotor aerodinámico para generar energía eléctrica a partir del viento y que presenta un dispositivo convertidor de frecuencia para alimentar con energía eléctrica a la red de suministro, de manera que la instalación de energía eólica se controla según al menos un procedimiento de las formas de realización descritas anteriormente. En este caso, la  
 55 instalación de energía eólica forma un generador, y se controla de forma correspondiente para alimentar a la red de suministro. El dispositivo convertidor de frecuencia presenta preferiblemente un rectificador (que rectifica la tensión alterna del generador eléctrico) y presenta un inversor para transformar la tensión continua en una tensión alterna para alimentar a la red de suministro. Un dispositivo convertidor de frecuencia en el que (ignorando las pérdidas) toda la energía eléctrica generada pasa completamente a través del rectificador ya través del inversor puede  
 60 también denominarse concepto de convertidor completo o topología de convertidor completo. En este caso, en lugar de un rectificador, también puede estar prevista una combinación de varios rectificadores y/o pueden estar previstos varios inversores en lugar de un solo inversor, que invierten en cada caso solo una parte de la energía.

Preferiblemente, la instalación de energía eólica está conectada al punto de conexión de red y la red se alimenta con la energía eléctrica generada en este punto de conexión a la red de suministro, seleccionándose una relación de corriente de cortocircuito de menos de 10, preferiblemente de menos de 6, más preferiblemente de menos de 4, siendo aún más preferible que sea de menos de 2. De este modo es posible la elección de una relación de corriente de cortocircuito muy pequeña en combinación con la correspondiente regulación del generador, es decir, de la instalación de energía eólica durante la alimentación. Con ello se pueden conectar instalaciones de energía eólica con elevadas potencias de conexión, en particular, elevadas potencias nominales en redes comparativamente débiles y, con ello, disponerse a menudo en los correspondientes lugares descentralizados. Por lo tanto, también se puede lograr una explotación de sitios que hasta ahora no eran adecuados y que de otro modo solo podrían haberse explotado con una adaptación considerable de la red de suministro.

Preferiblemente, se detecta y/o indica una pérdida de estabilidad inminente del punto de conexión de red. Con ello debe ser posible evitar, en la medida de lo posible, una interrupción de la alimentación o el generador puede estar preparado para llevar a cabo una realimentación rápida cuando se produce una pérdida de estabilidad.

La detección o la indicación de la pérdida de estabilidad inminente se lleva a cabo preferiblemente cuando la cantidad de una derivada parcial de una tensión de red respecto de la potencia activa alimentada sobrepasa un valor límite predeterminado.

Al considerar la derivada parcial de la tensión de red respecto de la potencia activa, se puede detectar una susceptibilidad de red o sensibilidad de red y se puede utilizar el resultado de la derivada, dado el caso, como indicación para elegir un punto de trabajo más estable.

Preferiblemente, una pérdida de estabilidad inminente se detecta o se indica en base a una cantidad de una derivada parcial de una tensión de red y respecto de la potencia reactiva alimentada, cuando esta cantidad de la derivada parcial excede un valor límite predeterminado. También en este caso se tiene en cuenta y/o se determina la sensibilidad de red.

Preferiblemente, la pérdida de estabilidad inminente se detecta o indica por descomposición de una tensión trifásica de la red de suministro según el método de las componentes simétricas, en el que se espera una pérdida de estabilidad inminente cuando la cantidad de una componente directa de la tensión es mayor que un valor límite de la componente directa de la tensión. De forma adicional o alternativa, se propone suponer una pérdida de estabilidad inminente si la cantidad de una componente inversa de la tensión es mayor que un valor límite de la componente inversa de la tensión. Mediante el conocido método de las componentes simétricas se tienen en cuenta las asimetrías. Si la cantidad de componente directa de la tensión se monitoriza, se monitoriza (dicho de una forma simplificada) en qué medida la parte simétrica de sistema de tensión trifásico supera o se queda por debajo de un valor. Al tener en cuenta la componente inversa de la tensión se puede reconocer, en particular, si un grado de asimetría es demasiado grande e indica una perturbación en la red que hace que sea de esperar una pérdida de estabilidad.

También se puede tener en cuenta la cantidad de una diferencia entre una frecuencia de referencia y una frecuencia nominal. Se puede asumir una pérdida de estabilidad inminente si la diferencia de un valor de frecuencia predeterminado supera o se queda por debajo y/o la sobrepasa en términos de la cantidad.

Así mismo se propone un parque eólico con múltiples instalaciones de energía eólica, en el que cada instalación de energía eólica incluye un rotor aerodinámico, un generador eléctrico y un dispositivo convertidor de frecuencia como se describe arriba. Además, se propone el funcionamiento del parque por medio de un procedimiento como el descrito arriba según una de las formas de realización. En ese sentido, todo el parque se considera y opera como generador en el sentido de los procedimientos descritos. En particular, la relación de corriente de cortocircuito se refiere entonces a la relación de la potencia de cortocircuito de la red de suministro del punto de conexión en función de potencia de conexión del parque eólico, en particular a la suma de las potencias nominales de todas las instalaciones de energía eólica del parque eólico considerado. Según una forma de realización, también se propone que este parque eólico se dimensione con una relación de corriente de cortocircuito pequeña, en particular menor de 10, menor de 6, menor de 4, siendo en particular preferible que sea menor de 2. En particular, a través de la combinación de múltiples instalaciones de energía eólica en un parque eólico se pueden lograr grandes potencias de conexión en comparación con una única instalación de energía eólica. Para ello se propone una solución que permite una conexión a una red comparativamente débil con respecto al punto de conexión.

Una información importante para el control previsto del generador para alimentar la red con energía eléctrica es la sensibilidad de red. Esta sensibilidad de red es una propiedad que está particularmente relacionada con el punto de conexión de red. Depende de las propiedades de red como de la topología de red, pero también de las condiciones

actuales de la red. Básicamente indica con qué sensibilidad reacciona la tensión en el punto de conexión de red ante las influencias. Si el generador es una instalación de energía eólica o un parque eólico con múltiples instalaciones de energía eólica, la velocidad del viento fluctuante es una magnitud externa que puede influir en la red a través de la instalación de energía eólica y, por lo tanto, en la tensión en el punto de conexión. En tal caso, las fluctuaciones en la velocidad del viento pueden tener una influencia fuerte o débil sobre la tensión en el punto de conexión y, en consecuencia, existe una sensibilidad de red alta o débil con respecto a la velocidad del viento.

Así mismo, el estado actual de la red puede influir en la sensibilidad de la tensión en el punto de conexión de red. Por ejemplo, si la red es menos sensible a las influencias externas, la tensión en el punto de conexión de red es más estable precisamente cuando la red funciona en un punto de trabajo estable con respecto al punto de conexión de red. Y viceversa, la tensión en el punto de conexión de red se puede influenciar más fácilmente cuando la red funciona en un punto de trabajo menos estable, como, por ejemplo, un punto de trabajo en el que, en el caso de una instalación de energía eólica, esta ya está dando soporte a la red.

Dicho soporte a la red por medio de una instalación de energía eólica puede, por ejemplo, hacerse alimentando potencia reactiva. Por lo tanto, se propone que la sensibilidad de red se forme preferiblemente dependiendo de la derivada parcial de la tensión en el punto de conexión de red respecto de la potencia reactiva alimentada. Así pues, si la tensión varía drásticamente en el punto de conexión de red con las variaciones en la potencia reactiva alimentada, hay una alta sensibilidad de red, por lo que es más fácil influir en la tensión.

De forma alternativa o adicional, se propone que la sensibilidad de red se forme en función de una derivada parcial de la tensión en el punto de conexión de red respecto de la potencia generada por la instalación de energía eólica, es decir, la potencia activa. La potencia activa generada y alimentada por la instalación de energía eólica es una medida de la velocidad del viento existente. Si una variación en esta potencia alimentada conduce a una variación drástica en la tensión en el punto de conexión de red, hay una alta sensibilidad con respecto a esta potencia y, por lo tanto, con respecto a las variaciones en la velocidad del viento.

Preferiblemente, la sensibilidad de red es una suma de estas dos derivadas parciales, de manera que este sumatorio también puede ser ponderado para tener en cuenta o asumir diferentes grados de influencia.

Ahora se propone preferiblemente llevar a cabo el control del generador en función de esta sensibilidad de red. En particular, se puede implementar y/o se debe implementar un comportamiento del control rápido y/o con una alta ganancia cuando hay una alta sensibilidad y, por lo tanto, debe poder actuar rápidamente en caso de perturbaciones externas. Por contra, si la sensibilidad es baja, puede ser suficiente un regulador más lento y/o regulador con una acción más moderada.

El cálculo del flujo de carga que se describe a continuación se utiliza para el análisis de estados operativos estacionarios de redes de suministro de energía. La fig. 9 muestra la base de la red en cuestión a través de sus impedancias  $Z$  y/o admitancias  $Y$  (conductancias complejas).

En el análisis de redes clásico, la red estaría determinada por la «ley de Ohm» con el consiguiente sistema lineal de ecuaciones en notación matricial que describe una relación para  $n$  nodos.

$$\begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \cdots & \underline{Y}_{12} & \underline{Y}_{1i} & \cdots & \underline{Y}_{1n} \\ \underline{Y}_{21} & \cdots & \underline{Y}_{22} & \underline{Y}_{2i} & \cdots & \underline{Y}_{2n} \\ \cdot & & \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot & \cdot & & \cdot \\ \underline{Y}_{n1} & \cdots & \underline{Y}_{n2} & \underline{Y}_{ni} & \cdots & \underline{Y}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \underline{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \underline{I}_n \end{bmatrix}$$

o abreviado:  $\underline{Y} \cdot \underline{U} = \underline{I}$  (sistema de ecuaciones lineales).

En este caso se buscan las tensiones en cada uno de los  $n$  nodos de red (→estabilidad de la tensión).

Como las corrientes en las redes son desconocidas, pero la inyección de alimentación y/o el consumo de

alimentación (planificados) sí son conocidos, los flujos se expresan en términos de potencias.

$$\underline{I}_{ii} = \frac{\underline{S}_i^*}{\underline{U}_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{\underline{U}_i^*}$$

5 A través de la representación de las ecuaciones de red mediante potencias se crea ahora crea un sistema no lineal de ecuaciones.

$$\underline{S}_i^* = P_i - jQ_i = \underline{Y}_{i1} \underline{U}_1 \underline{U}_i^* + \underline{Y}_{i2} \underline{U}_2 \underline{U}_i^* \dots = \underline{U}_i^* \sum_{k=1}^n \underline{Y}_{ik} \underline{U}_k$$

10 Este sistema no lineal de ecuaciones se resuelve numéricamente (generalmente mediante el método de Newton). Como parte de la resolución numérica del sistema de ecuaciones, este debe ser linealizado. La linealización se lleva a cabo mediante las derivadas parciales de los elementos de la matriz respecto de las incógnitas, es decir, en este caso la amplitud ( $U_2 \dots U_n$ ) y el ángulo ( $\delta_2 \dots \delta_n$ ) de las tensiones del nodo.

15 La matriz con las derivadas parciales se denomina matriz de Jacobi. Para resolver el sistema de ecuaciones esta matriz debe ser invertible, es decir, regular.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta Q_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial P_2}{\partial U_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial U_n}\right)^{(0)} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial P_n}{\partial U_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial U_n}\right)^{(0)} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial U_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial U_n}\right)^{(0)} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial U_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial U_n}\right)^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta U_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta U_n^{(0)} \end{bmatrix}$$

20 Matriz de Jacobi

A continuación, la invención se explicará con más detalle por medio de formas de realización a modo de ejemplo haciendo referencia a las figuras adjuntas.

25 La fig. 1 muestra una instalación de energía eólica en una vista en perspectiva.

La fig. 2 muestra esquemáticamente una instalación de energía eólica conectada a una red basada en un sistema de control de tensión, también conocido como «Voltage Control System» o VCS para abreviar.

30 La fig. 3 muestra esquemáticamente una disposición de un circuito de una alimentación controlada en tensión de una instalación de energía eólica en una red de tensión alterna.

La fig. 4 muestra esquemáticamente dos instalaciones de energía eólica conectadas a una red a través de un punto de conexión de red común.

35 La fig. 5 ilustra magnitudes de influencia que pueden influir en la sensibilidad de una instalación de energía eólica

conectada a una red.

La fig. 6 muestra un diagrama como una evaluación del comportamiento de una red en el punto de conexión de red como curvas de tensión en función de la potencia reactiva alimentada y la potencia activa alimentada.

5

La fig. 7 muestra una sensibilidad como variaciones de tensión condicionadas por variaciones de la potencia activa en función de la potencia reactiva y activa alimentadas y normalizadas.

La fig. 8 muestra una sensibilidad como variación de tensión condicionada por el cambio en la potencia reactiva en función de la potencia reactiva y la potencia activa normalizadas.

10

La fig. 9 muestra un esquema de red generalizado.

En adelante, se pueden proporcionar números de referencia idénticos para elementos similares pero no idénticos o también para elementos que se muestran solo de forma esquemática o simbólica y que pueden diferir en detalles que no son relevantes para la correspondiente explicación.

15

La fig. 1 muestra una instalación de energía eólica 100 con una torre 102 y una góndola 104. En la góndola 104 está dispuesto un rotor 106 con tres palas de rotor 108 y un buje 110. Durante el funcionamiento, el rotor 106 se pone a girar accionado por el viento y de este modo acciona un generador en la góndola 104.

20

La fig. 2 muestra esquemáticamente una instalación de energía eólica 1 que está conectada a una red de suministro eléctrico 4 a través de un punto de conexión de red 2. En adelante, por simplicidad, se hará referencia a la red de suministro eléctrico 4 como red 4, de manera que estos términos deben considerarse como sinónimos.

25

La instalación de energía eólica 1 presenta un generador 6, que es accionado por el viento y, como consecuencia, genera energía eléctrica. En una forma de realización, el generador 6 está formado como un generador síncrono polifásico 6 excitado eléctricamente con dos sistemas trifásicos interconectados en estrella, lo que se ilustra mediante los dos símbolos de estrella en el generador 6 de la fig. 2. La corriente alterna así generada, en concreto, en el ejemplo mencionado de corriente alterna de 6 fases, se rectifica mediante un rectificador 8 y se transmite como una corriente continua a través de una línea de corriente continua 10 correspondiente, que puede comprender múltiples líneas individuales, desde la góndola 12, bajando por la torre 14 hasta un inversor 16. El inversor 16 genera una corriente alterna a partir de la corriente continua, es decir, en el ejemplo mostrado, una corriente alterna trifásica para alimentar a la red 4. Para ello, la tensión alterna generada por el inversor 16 todavía se debe transferir por medio de un transformador 18, para luego alimentar a la red 4 en el punto de conexión de red 2. El transformador 18 mostrado emplea un circuito estrella-triángulo, es decir, un circuito en estrella en el lado del primario y un circuito en triángulo en el lado del secundario, que se muestra aquí solo a modo de ejemplo de una forma de realización. La alimentación hacia la red 4 puede incluir, además de la alimentación con potencia activa P, la alimentación con potencia reactiva Q. Esto se ilustra con la flecha 20. Para la alimentación específica, el inversor 16 está controlado por una unidad de control 22 correspondiente, pudiéndose también combinar estructuralmente la unidad de control 22 con el inversor 16. En general, la fig. 2 pretende ilustrar la estructura constructiva básica, por lo que la disposición específica de los elementos individuales también se puede elegir de manera diferente a la mostrada. Por ejemplo, el transformador 18 puede estar dispuesto fuera de la torre 14.

30

35

40

La unidad de control 22 controla el inversor 16, en particular, de modo que se controla la manera de alimentar a la red 4. Para ello se llevan a cabo otras tareas como adaptar a la situación de la red 4 la corriente con que se alimenta, en particular, la frecuencia, la fase y la amplitud de la tensión en la red 4. Además, la unidad de control 22 se ha previsto para que controle la proporción de potencia activa P y de potencia reactiva Q de la potencia con la que se está alimentado a la red 4 en ese momento. En este caso se realizan mediciones en la red 4, en particular, en el punto de conexión de red 2, y se analizan de manera consecutiva. Entre otras cosas, se mide la tensión actual en la red 4, en particular en forma del valor efectivo actual de la tensión, y se compara con un valor predeterminado para la tensión, es decir, con el valor predeterminado  $V_{SET}$ .

50

Por consiguiente, el sistema mostrado y, en particular, el inversor 16 con la unidad de control 22, representan un sistema de control de tensión, también conocido en el lenguaje técnico del sector como «Voltage Control System», abreviado VCS.

55

Para el control del generador de la instalación de energía eólica están previstos un bloque de control de potencia 24 y un bloque de evaluación de potencia 26 en la zona de la góndola. El bloque de control de potencia 24 controla, en particular, la excitación, es decir, la corriente de excitación, del generador síncrono de excitación independiente en el ejemplo de la realización mostrada. El bloque de evaluación de potencia 26 evalúa la potencia suministrada al rectificador 8 y la compara con la potencia que el rectificador 8 entrega a través de las líneas de corriente continua

60

10 al inversor 16. El resultado de esta evaluación se pasa al bloque de control de potencia 24.

La fig. 2 ilustra también que, para una alimentación inteligente correspondiente, el sistema mostrado debe estar provisto de un sistema de control de tensión para hacer que la instalación de energía eólica funcione de la forma más estable posible durante la alimentación, en particular, para funcionar cerca de un límite de estabilidad.

La fig. 3 ilustra la conexión de una instalación de energía eólica T en una denominada «red débil 4». En este contexto se entiende que una red débil es una red con una impedancia elevada. Esto se ilustra en la fig. 3 mediante una impedancia en serie 5'. Además, está prevista dicha impedancia en serie 5' en una configuración de prueba que corresponde a la estructura de la fig. 3 y con la que se examina el comportamiento de la instalación de energía eólica 1' en la red débil 4'.

La estructura de la fig. 3 se basa en un generador 6' accionado por el viento, y que está previsto como un generador síncrono. La potencia eléctrica generada por el generador 6' se rectifica en un rectificador 8' y se proporciona a un inversor 16' en el lado de entrada de un circuito intermedio de tensión continua con un condensador de un circuito intermedio 28'. La estructura mostrada equipara una línea de tensión continua 10' con el circuito intermedio de tensión continua en el lado de entrada del inversor 16' para simplificar la ilustración. De hecho, una línea de corriente continua en el lado de entrada puede ser eléctricamente idéntica a un circuito intermedio, o está previsto un convertidor elevador en el lado de entrada (no implementado aquí en detalle). El rectificador T y el inversor 16' también pueden estar separados físicamente entre sí, como ya se ha explicado en la fig. 2 para el rectificador 8 y el inversor 16.

Finalmente está previsto un control de excitación 24', que puede ser alimentado a partir de energía del circuito intermedio de tensión continua, representado mediante el condensador de un circuito intermedio 28'. Este control de excitación 24' controla la corriente de excitación del generador 6' excitado externamente y corresponde básicamente al bloque de control de potencia 24 de la fig. 2.

El inversor 16' puede alimentar potencia activa P y/o potencia reactiva Q. En este caso se especifica en la fig. 3 la tensión en la salida del inversor 16' como tensión de la instalación de energía eólica  $V_{WEC}$ . Para llevar a cabo la inyección de la alimentación, se transforma elevando la tensión por medio del transformador 18' y se alimenta a la red 4' en el punto de conexión de red 2'. En este caso, la red 4' también presenta un transformador de red 30' adicional. La red propiamente dicha que comienza después del transformador de red 30' se indica con el número de referencia 4". La tensión en el punto de conexión de red 2' se denomina tensión de red  $V_{Grid}$ .

Para ilustrar la red débil, la impedancia en serie 5' está representada antes del punto de conexión de red 2'. Esta impedancia en serie 5' está presente solo en esta configuración de prueba y/o estructura ilustrativa e indica la impedancia de red. Por lo tanto, el punto representado directamente junto al transformador 18' también puede considerarse como el punto de conexión de red 2". La distinción entre estos dos puntos de conexión de red 2' y 2" se produce solo por este uso de la impedancia en serie 5' y no se halla en redes reales.

La fig. 4 muestra una representación ilustrativa y esquemática adicional según la cual dos instalaciones de energía eólica 1 están conectadas a una red de suministro 4. Cada instalación de energía eólica 1 está construida básicamente como se explica en la fig. 2, es decir, con un generador 6, un rectificador 8 y una línea de corriente continua 10, que en realidad presenta al menos dos líneas individuales, en concreto para corriente positiva y negativa, lo cual también aplica para la línea de corriente continua 10 de la fig. 2. Así mismo, la instalación de energía eólica 1 presenta un inversor 16 y un transformador 18. Desde cada una de las dos instalaciones de energía eólica 1 transcurre una línea de conexión 32 a un y/o el punto de conexión de red del lado de la instalación de energía eólica 2'. Por lo tanto, estas dos instalaciones de energía eólica 1 mostradas a modo de ejemplo, que también pueden ser representativas de un parque eólico con muchas más instalaciones de energía eólica, alimentan la potencia que generan conjuntamente a este punto de conexión de red del lado de la instalación de energía eólica 2'. La potencia alimentada P y la potencia reactiva alimentada Q, en caso de que la hubiera, se suministran al punto de conexión del lado de la red 2' y alimentan a la red de suministro eléctrico 4.

La conexión entre el punto de conexión de red del lado de la instalación de energía eólica 2' y el punto de conexión de red del lado de la red 2" no es despreciable y, por lo tanto, aparece una tensión del lado de la instalación de energía eólica  $V_{WP}$  en el punto de conexión de red del lado de la instalación de energía eólica 2', mientras que en el punto de conexión del lado de la red 2" aparece la tensión  $V_{GRID}$ .

Para llevar a cabo el control, se registra la tensión del lado de la instalación de energía eólica  $V_{WP}$  y se evalúa en un bloque de evaluación 34. La evaluación se lleva a cabo, en principio, de tal modo que los valores medidos se registran con el bloque de medición 36. Los resultados de la medición se suministran, entre otras cosas, al bloque de control de estabilidad 38, que también puede denominarse bloque SVCS. Cabe aclarar que SVCS es una

abreviatura derivada del término en inglés «Stability Voltage Control System». El bloque de control de estabilidad 38 calcula un valor predeterminado para la potencia reactiva  $Q_{set}$  que se va a proporcionar. Esta potencia reactiva que se debe establecer se transmite a ambas instalaciones de energía eólica 1 como el valor predeterminado correspondiente, y se transmite como una cantidad de manera correspondiente a todas las instalaciones de energía eólica. Este valor predeterminado puede transmitirse como un valor absoluto, en particular, si las instalaciones de energía eólica 1 presentan la misma magnitud y están expuestas al mismo viento. Sin embargo, también es posible transmitir como valor predeterminado, por ejemplo, un valor porcentual relacionado con las propiedades de la instalación de energía eólica correspondiente, como, por ejemplo, la potencia nominal de la instalación de energía eólica en cuestión.

10

Así mismo, el bloque de medición 36 pasa valores al bloque de observación 40, que determina estados adicionales a partir de los valores de medición determinados, como, por ejemplo, la potencia activa alimentada o la potencia reactiva alimentada, y pasa sus resultados al bloque del modelo del sistema 42. Dado el caso, el bloque de observación 40 también puede determinar o derivar información sobre una demanda de potencia.

15

El modelo del sistema del bloque del modelo del sistema 42 se utiliza para determinar una potencia máxima  $P_{max}$  y transmitirla a las instalaciones de energía eólica 1. Esta potencia activa máxima que se va a inyectar para alimentar también se puede transmitir como un valor absoluto o un valor relativo. Cabe señalar que la ilustración del bloque de evaluación 34 pretende clarificar la estructura. En principio, no es necesario que el bloque de evaluación 34 esté físicamente constituido como un dispositivo independiente.

20

La potencia reactiva predeterminada  $Q_{set}$  y la potencia activa máxima  $P_{max}$  se asignan al bloque de control FACTS 44 de cada instalación de energía eólica 1. El término «FACTS» también es común en el lenguaje técnico del sector y es una abreviatura de «Flexible AC Transmission System» (sistema de transmisión flexible de corriente altera). El bloque de control FACTS 44 aplica los valores predeterminados y controla correspondientemente el inversor 16, pudiendo tener en cuenta también los valores medidos de los estados de la instalación de energía eólica.

25

En particular, pero no exclusivamente, los requisitos relevantes desde el punto de vista de la estabilidad para una alimentación estable en la red 4 pueden realizarse mediante el bloque de evaluación 34. En particular, se puede predeterminar un punto de trabajo que sea favorable en términos de cantidad de energía y/o nivel de potencia a alimentar y estabilidad. En particular, en este sentido se puede predeterminar un punto de trabajo con un margen de estabilidad. En este sentido, el bloque de control de estabilidad 38 puede lograr un margen de estabilidad con respecto a la potencia reactiva a alimentar mediante un valor predeterminado correspondiente de la potencia reactiva  $Q_{set}$ .

30

La fig. 5 ilustra la sensibilidad de una red conectada a la instalación de energía eólica y las magnitudes de influencia empleadas para ello. El bloque de red 50 de la fig. 5 es representativo del comportamiento de la red, concretamente en el punto de conexión de red. El bloque de red 50 ilustra que la red puede responder a influencias a través de un cambio de tensión. Como influencias se ilustran, en este caso, las variaciones de la potencia activa  $\Delta P$  y la variación de la potencia reactiva  $\Delta Q$ . El bloque de potencia activa 52 tiene en cuenta la influencia de las variaciones de potencia, mientras que el bloque de potencia reactiva 54 tiene en cuenta la influencia de las variaciones de la potencia reactiva. El bloque de potencia activa 52 muestra una derivada parcial de la tensión respecto de la potencia activa y, en consecuencia, el bloque de potencia reactiva 54 muestra una derivada parcial de la tensión respecto de la potencia reactiva. Esta es una posibilidad para tener en cuenta la correspondiente dinámica del comportamiento de la red, o sea, de la sensibilidad de red, es decir, las reacciones a las variaciones de la potencia activa y de la potencia reactiva a través de las derivadas parciales correspondientes, cuyo resultado se suma en el bloque sumador 56. Por lo tanto, el bloque de red 50, junto con el bloque sumador 56, tiene en cuenta la dependencia de la tensión de la red en el punto de conexión de red con respecto a dos magnitudes que son la potencia activa y de la potencia reactiva. Aquí la dependencia se tiene en cuenta a través de las dos derivadas parciales.

35

Las variaciones en la potencia activa se producen, en particular, por cambios en la velocidad del viento  $\Delta V_W$ , que actúan sobre el bloque de la instalación de energía eólica 58. Este bloque de la instalación de energía eólica 58 ilustra la influencia de la variación de la velocidad del viento  $\Delta V_W$  sobre la variación de la potencia activa  $\Delta P$ . No obstante, también se debe tener en cuenta el control de la instalación de energía eólica; y precisamente con este bloque 58 se tiene en cuenta.

40

Aunque la variación de la potencia reactiva  $\Delta Q$  también puede depender de la instalación de energía eólica, o al menos del control de la instalación de energía eólica, esta se rige por otras relaciones que son esencialmente independientes de la velocidad del viento. Su variación se ilustra a través del bloque de control 60. En este sentido, este bloque de control 60 se divide, por claridad, en el bloque de ajuste de potencia reactiva 62 y el bloque FACTS 64. El bloque de control 60 y, por lo tanto, el bloque de ajuste de potencia reactiva 62 son, en principio, dependientes de una desviación de la tensión  $\Delta V$ , es decir, en el punto de conexión de red, menos una desviación de tensión

45

50

55

predeterminada  $\Delta V_{\text{set}}$ . En base a esta desviación de tensión resultante, el bloque de ajuste de potencia reactiva 62 determina la potencia reactiva a alimentar y/o, dependiendo de una variación de la tensión, una variación predeterminada de la potencia reactiva a alimentar. Esto se transfiere al bloque FACTS 64, que realiza una conversión correspondiente de la alimentación de la potencia reactiva y/o de la variación de la alimentación de la potencia reactiva.

El bloque de la instalación de energía eólica 58 y el bloque de control 60 también pueden entenderse como función de transferencia de la respectiva magnitud de entrada y/o el bloque de ajuste de potencia reactiva 62 y el bloque FACTS 64 pueden entenderse respectivamente como funciones de transferencia individuales, que están concatenadas en el bloque de control 60.

La fig. 6 muestra, para una forma de realización, una dependencia de la tensión en el punto de conexión de red en función de la potencia reactiva Q alimentada y de la potencia activa P alimentada. La potencia reactiva Q se normaliza a la potencia de cortocircuito Ssc de la red en el punto de conexión de red examinado y se representa gráficamente en el eje de abscisas. La potencia P también se normaliza a la potencia de cortocircuito Ssc del mismo punto de conexión de red y se representa gráficamente en el eje de ordenadas. La tensión  $V_{\text{PCC}}$  es la tensión en el punto de conexión de red normalizado a la tensión nominal  $V_N$ . Esta tensión normalizada en el punto de conexión de red se representa gráficamente para diferentes valores, en cada caso como un gráfico en función de la potencia reactiva Q normalizada y la potencia activa P normalizada. De manera correspondiente, el gráfico y/o la curva característica con el valor 1 es la curva característica que representa a qué valores de potencia reactiva y potencia activa se establece la tensión nominal.

Por ejemplo, la tensión nominal se establece, cuando se alimenta un 10 % de potencia reactiva Q y un 50 % de potencia activa P (porcentajes respecto a la potencia de cortocircuito Ssc).

El gráfico de la fig. 6 muestra las propiedades de un punto de conexión de red de una red con una impedancia elevada, al menos con respecto a este punto de conexión de red.

Típicamente, para el punto de conexión de red ilustrado de la red de ejemplo, se realizaría una alimentación aproximadamente en el rango de funcionamiento estándar 200. Por lo tanto, se produciría una alimentación con una potencia activa P de aproximadamente el 10 % de la potencia de cortocircuito Ssc, con una alimentación de potencia reactiva de aproximadamente el 5 % de la potencia de cortocircuito Ssc. Suponiendo idealmente que la potencia activa P alimentada corresponda con la potencia nominal y/o la potencia de conexión del generador y/o la suma de los generadores conectados al punto de conexión de red, la alimentación sería el 10 % de la potencia de cortocircuito Ssc equivalente, de modo que la potencia de conexión  $P_{\text{Gen}}$  sería el 10 % de la potencia de cortocircuito Ssc. Por lo tanto, existe una relación de corriente de cortocircuito  $S_{\text{sc}}/P_{\text{Gen}}$  de aproximadamente 10. Esto corresponde aproximadamente con el punto medio de la zona de funcionamiento estándar 200 ilustrada. En la fig. 6, para que sirva de orientación, se muestran otras relaciones de corriente de cortocircuito Scr como líneas cortas; en particular, se muestran para los valores de Scr de 10; 6; 4; 2 y 1,5.

No obstante, según la invención se propone alimentar significativamente más potencia activa P, es decir, en el rango del 60 al 70 % de la potencia de cortocircuito  $S_{\text{sc}}$ . En consecuencia, está prevista la alimentación del 20 al 30 % de potencia reactiva Q respecto a la potencia de cortocircuito  $S_{\text{sc}}$  para mantener la tensión en el punto de conexión de red en el rango del 100 al 110 % de la tensión nominal. De forma preventiva, para evitar confusiones, cabe aclarar que la alimentación del 110 % de la tensión nominal en el punto de conexión de red no significa que se vaya a medir una tensión que ha aumentado hasta 110 % en el lado del consumidor. Por un lado, por lo general, todavía hay una sección de red no despreciable entre el punto de conexión de red y el primer consumidor relevante; por otro lado, también pueden estar previstos en la red, por ejemplo, transformadores adaptadores de tensión, los cuales pueden proporcionar una compensación dentro de ciertos límites. Las medidas que en consecuencia habría que implementar, y que dependen en gran medida de la red (incluidos los consumidores y los generadores) y de otras condiciones de contorno diversas, no pueden abordarse en el contexto de esta solicitud. Generalmente, las medidas necesarias son conocidas para un experto en la materia.

Este rango propuesto se muestra en la fig. 6 como un rango de funcionamiento elevado 210. En este rango de funcionamiento elevado hay aproximadamente una relación de corriente de cortocircuito Scr de 1,5. Hasta ahora nunca se había conectado a la red ningún generador digno de mención con tal relación de corriente de cortocircuito.

La representación de la fig. 6 es el resultado de un análisis de red de la red subyacente con respecto al punto de conexión de red considerado. Para este propósito, como se explicó anteriormente, se realiza un análisis de los elementos relevantes en la red y se determina en cada caso mediante la resolución de la matriz de Jacobi. En este caso, la representación que se encuentra en la fig. 6, expresada de forma simplificada como las curvas características de la derecha, o sea, con una mayor potencia reactiva Q alimentada, también reflejan tensiones

crecientes en el punto de conexión de red. A medida que la potencia reactiva  $Q$  disminuye, es decir, a medida que nos desplazamos a la izquierda, disminuye la tensión en el punto de conexión de red. En este caso, la potencia reactiva  $Q$  no puede disminuir arbitrariamente y para una potencia reactiva  $Q$  demasiado pequeña (ya negativa), dependiendo de la potencia activa  $P$  asociada, la matriz de Jacobi se vuelve singular, por lo que no se puede resolver matemáticamente. Una matriz de Jacobi singular significa que nos encontramos ante un estado inestable. En consecuencia, existe un límite de estabilidad 202, que se muestra en la parte ubicada más a la izquierda de la representación de la fig. 6. La región situada a la izquierda del límite de estabilidad 202, es decir, la que presenta una potencia activa  $P$  mayor y/o una potencia reactiva  $Q$  menor, es la región inestable 204. De forma puramente preventiva, para evitar confusiones, cabe aclarar que el límite de estabilidad 202 no interseca con una sola curva característica de un valor de tensión en el punto de conexión de red, sino que más bien parece que la familia de curvas características lo podría cortar. De hecho, la familia de curvas características no puede cortar, porque más allá del límite de estabilidad 202 no hay valores y, por lo tanto, tampoco una familia de curvas características.

El rango de funcionamiento preferido ahora, es decir, el rango de funcionamiento aumentado 210, en principio tiene una separación menor hasta el límite de estabilidad 202 que el rango de funcionamiento estándar 200. Sin embargo, debe observarse que hasta el momento no se han realizado consideraciones ni análisis concretos con respecto a las propiedades de red tal y como se refleja en la fig. 6. En particular, no se conocía, o al menos no se conocía con la calidad indicada y la cantidad indicada en la fig. 6, la separación a un límite de estabilidad 202 de la forma en que se muestra en la fig. 6. Más bien, la instalación de grandes centrales eléctricas se lleva a cabo orientativamente según el criterio de la relación de corriente de cortocircuito, haciendo que esta relación sea lo más grande posible, eligiéndose preferiblemente por encima o incluso muy por encima de 10. Por su parte, los pequeños generadores, como las instalaciones de energía eólica, se han conectado hasta ahora a redes fuertes que pueden hacer frente fácilmente a la conexión de una instalación de energía eólica adicional. Como resultado, esto hace que se produzca también una conexión, de forma intencionada o no, con una alta relación de corriente de cortocircuito  $S_{sc}$ .

La solución propuesta analiza primero exactamente la red en relación con el punto de conexión de red previsto, en particular tomando relaciones cuantitativas como se muestra en la fig. 6 (y preferiblemente en las figuras 7 y 8 posteriores donde se clarifica aún más). En particular, este tipo de análisis se lleva a cabo planteando y resolviendo repetidamente la matriz de Jacobi para varios puntos. Sobre la base de dicho análisis de red se puede establecer un límite de estabilidad según el límite de estabilidad 202, así como también se puede seleccionar un rango de funcionamiento deseado según el rango de funcionamiento elevado 210 de la fig. 6.

Complementariamente se propone que la regulación de la instalación de energía eólica se lleve a cabo en forma de lazo de regulación cerrado, como se muestra, en particular, en la fig. 2 o también en la fig. 4. En la fig. 2, el lazo de regulación consiste esencialmente en el inversor 16, el transformador 18 y la unidad de control 22; dicho lazo tiene en cuenta los valores medidos en el punto de conexión de red 2 y controla el inversor 16, ajustando así la potencia activa  $P$  y la potencia reactiva  $Q$  alimentadas según la flecha 20. Aunque la regulación también puede tener un efecto sobre el control de la instalación de energía eólica en la zona del generador 6, en principio el lazo de regulación descrito puede funcionar con el inversor 16, el transformador 18 y la unidad de control 22 sin elementos mecánicos, pudiendo reaccionar de manera sumamente rápida. Para ello, se puede tener en cuenta el conocimiento de las propiedades de red en el punto de conexión de red, es decir, el punto de conexión de red 2 según la fig. 2, en particular en la unidad de control 22. Por lo tanto, es posible implementar una regulación rápida, que conozca el comportamiento de la red en el punto de conexión de red, en particular el límite de estabilidad. Esto hace posible que la instalación de energía eólica o el parque eólico (dado el caso, también otros generadores) funcionen en un rango de funcionamiento deseado, como el rango de funcionamiento elevado 210 de la fig. 6, sin dejar de garantizar una elevada estabilidad y seguridad.

Las figuras 7 y 8 muestran la sensibilidad de la tensión en función de la potencia reactiva  $Q$  y de la potencia activa  $P$ . Para ello, ambas figuras 7 y 8 utilizan los mismos valores en los ejes de abscisas y ordenadas, es decir, la potencia reactiva normalizada en el eje de abscisas y/o la potencia activa normalizada en el eje de ordenadas.

La sensibilidad de la tensión mostrada es la variación de la tensión con la variación de la potencia activa según la fig. 7 y/o la variación de la tensión con la potencia reactiva según la fig. 8. En otras palabras, en la fig. 7 se muestra la derivada parcial de la tensión en el punto de conexión de red respecto de la potencia activa, mientras que en la fig. 8 se muestra la derivada parcial de la tensión respecto de la potencia reactiva. Por lo tanto, la fig. 7 muestra el comportamiento del bloque de potencia activa 52 de la fig. 5. La fig. 8 muestra el comportamiento del bloque de potencia reactiva 54 de la fig. 5, mostrándose en ambos casos la representación en función de los puntos de funcionamiento, los cuales se determinan respectivamente a través de la potencia reactiva  $Q$  y la potencia activa  $P$  alimentadas en ese momento. Los valores de las respectivas curvas características se refieren a un punto de conexión de red con una potencia de cortocircuito  $S_{sc} = 3,73$  MVA en el que se deben conectar, por ejemplo, dos instalaciones de energía eólica con una potencia nominal de 2 MW cada una. Por lo tanto, con esta disposición de prueba se podrían llevar a cabo las pruebas para una relación de corriente de cortocircuito de un poco menos de 1.

No obstante, para las pruebas realizadas se utilizó la potencia actual del parque eólico de prueba como base y se definió como potencia de conexión del parque eólico objetivo, es decir, del parque eólico (ficticio) a examinar.

En relación con la presente forma de realización, es decir, la configuración de ejemplo, se describe en cada caso la variación de la tensión normalizada con respecto a una variación de la potencia P en MW y/o una variación de la potencia reactiva Q en MVar. En las figuras 7 y 8 se muestra, además, el rango de funcionamiento 210 deseado, es decir, el aumentado. Por consiguiente, la sensibilidad de la tensión con respecto a las variaciones de la potencia activa, según la fig. 7, está comprendida aproximadamente entre menos 0,2 y menos 0,4. La sensibilidad de la tensión en el rango de funcionamiento elevado 210 con respecto a las variaciones de la potencia reactiva, según la fig. 8, está comprendida aproximadamente entre 0,3 y 0,5. Por lo tanto, para el dimensionamiento de la instalación de energía eólica que se va a conectar al punto específico de conexión de red, se propone tener en cuenta esta sensibilidad de la tensión con respecto a las variaciones de la potencia activa, como se muestra a modo de ejemplo en la fig. 7 y/o con respecto a las variaciones en la potencia reactiva, como se muestra a modo de ejemplo en la fig. 8, y tenerla en cuenta en el control. En particular, estos valores también deben tenerse en cuenta para el control y preferiblemente también para el dimensionamiento del control. Preferiblemente, se selecciona una ganancia del regulador que dependa de la sensibilidad, en particular, de la sensibilidad de la tensión.

En particular, se propone tener en cuenta estos valores en el circuito de regulación de lazo cerrado, como se muestra esquemáticamente mediante los elementos mostrados en la fig. 2: el inversor 16, el transformador 18 y unidad de control 22. En este caso se depende menos del transformador 18, aunque en ocasiones tendría que estar presente y ser necesario para poder alimentar una alta tensión correspondiente en el punto de conexión de red 2. En la unidad de control 22 se tienen en cuenta, en particular, los hallazgos sobre la sensibilidad de la tensión. Por lo tanto, conociendo estos valores, se puede diseñar e implementar un control y/o regulación a medida para el punto de conexión de red concreto. Por lo tanto, es posible disminuir los grandes valores que se usaban hasta ahora para la relación de corriente de cortocircuito de 10 e incluso mayores y proporcionar valores bajos, como, por ejemplo, un valor de 1,5 para la relación de corriente de cortocircuito, y así operar la instalación de energía eólica en el rango de funcionamiento elevado 210, que en las figuras 6 a 8 se muestra con fines ilustrativos.

Por lo tanto, la invención propone, en particular, no conectar una instalación de energía eólica ni, en última instancia, tampoco un parque eólico según el antiguo principio de funcionamiento en paralelo de la red, suponiendo que la capacidad de la red es suficiente, sino más bien evaluar específicamente el punto de conexión y considerar estos hallazgos por adelantado y luego conectar ahí una instalación de energía eólica o parque eólico a medida. En este caso, preferiblemente el control y/o la regulación y también el rango de funcionamiento a elegir también se implementan a medida, en particular con respecto a la potencia reactiva Q a alimentar y la potencia activa P a alimentar, y se dispone más cerca de un límite de estabilidad de lo que se ha estado haciendo hasta ahora en este campo de la técnica. En este caso se aplican específicamente las ventajas de una instalación de energía eólica, en concreto en lo que respecta a las variaciones, en particular para poder reaccionar rápida y específicamente a variaciones de estados de la red. Así, para la conexión de instalaciones de energía eólica en la red se evita en cualquier caso un sobredimensionamiento masivo de la red, en particular del punto de conexión de red concreto. No obstante, la estabilidad se puede mantener o incluso mejorar si el control y/o la regulación conoce(n) con mucha exactitud las propiedades del punto de conexión de red y/o de la red respecto al punto de conexión de red y además observan los estados de la red.

De forma puramente preventiva, para evitar confusiones, cabe aclarar que se entiende que una regulación es básicamente un circuito de regulación cerrado con realimentación, entendiéndose que un control básicamente designa un «circuito de regulación» abierto, es decir, una situación sin realimentación. No obstante, un bloque de control, que a su vez implementa un método de control, puede usarse en un lazo de regulación. Para el ejemplo de la fig. 2 esto significa que la unidad de control 22 es un control en la medida en que presenta una determinada función de control o función de transferencia, que también puede ser no lineal y/o discontinua y/o puede incluir varias magnitudes. Dicho esto, esta unidad de control se usa en el circuito de regulación que se muestra en la fig. 2 y básicamente comprende junto con la unidad de control 22, el inversor 16, el transformador 18 y finalmente una unidad de medición en el punto de conexión de red 2 con unidad de comparación 23. La unidad de control 22 controla, por lo tanto, el inversor y participa para ello en el circuito de regulación cerrado y, por consiguiente, forma parte de una regulación.

**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento para controlar un generador (1) de energía eléctrica conectado a un punto de conexión de red (2) en una red de suministro eléctrico (4) con un inversor de tensión para detectar anticipadamente problemas de estabilidad en la red de suministro, que comprende las siguientes etapas:

- Registrar al menos una propiedad de red de la red de suministro eléctrico (4) relacionada con el punto de conexión de red (2), que describe el comportamiento de la red de suministro en caso de desviaciones del punto de trabajo nominal, en el que el registro de al menos una propiedad de red comprende el registro de un límite de estabilidad (202) y el límite de estabilidad (202) se puede especificar en función de la tensión de red (V) en el punto de conexión de red (2) en función de la potencia reactiva (Q) alimentada y en función de la potencia activa (P) alimentada.
- Controlar el generador (1) de manera que, en función de la propiedad de red registrada, se alimente la red de suministro eléctrico (4) con potencia activa y potencia reactiva, de manera que el punto de trabajo del generador se selecciona con un margen de estabilidad predeterminado hasta el límite de estabilidad y en el lado estable del límite de estabilidad.

2. Procedimiento según la reivindicación 1,

**20 caracterizado porque**

el generador (1) es un generador (1) descentralizado y/o una instalación de energía eólica (1) o un parque eólico que comprende múltiples instalaciones de energía eólica (1), y alimenta a la red de suministro (4), en particular, por medio de un inversor de tensión (16).

3. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que como generador (1) se utiliza al menos una instalación de energía eólica (1) y en el que se registra una sensibilidad de red para el punto de conexión de red (2) que indica una dependencia instantánea de la tensión en el punto de conexión de red (2) respecto a la velocidad actual del viento y/o al estado actual de la red.

4. Procedimiento según la reivindicación 3, en el que la sensibilidad de red se forma en función de:

- la derivada parcial de la tensión (V) en el punto de conexión de red (2) respecto de la potencia (8) generada por instalación de energía eólica (1) y/o
- la derivada parcial de la tensión (V) en el punto de conexión de red (2) respecto de la potencia reactiva (Q), en particular como suma de ambas derivadas parciales.

5. Procedimiento según la reivindicación 3 o 4,

**40 caracterizado porque**

se lleva a cabo un control del generador (1) en función de la sensibilidad de red actual, en el que se usa, en particular, una característica de regulación rápida y/o una característica regulación con una elevada ganancia, cuanto mayor sea la sensibilidad de red y/o se usa un regulador no lineal.

6. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores,

**caracterizado porque**

el límite de estabilidad (202) se puede representar como una superficie curva en un espacio que abarca la tensión de red (V) en el punto de conexión de red (2), la potencia reactiva (Q) alimentada y la potencia activa (8) alimentada.

7. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores,

**55 caracterizado porque**

la al menos una propiedad de red registrada se registra de tal modo que

- se realiza un análisis de red de la red de suministro (4),
- se crea un modelo de la red de suministro (4) a partir del análisis de red,
- en base al modelo de red para el punto de conexión de red (2) se simulan varios puntos de funcionamiento diferentes y

- los resultados de la simulación se utilizan como al menos una propiedad de red.

8. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores,

**5 caracterizado porque**

un y/o el límite de estabilidad (202) se almacena en una tabla y/o se aproxima con una función analítica.

9. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores,

10

**caracterizado porque**

al registrar la al menos una propiedad de red, también se tienen en cuenta las propiedades del generador (1), y se registra una relación de corriente de cortocircuito (Scr).

15

10. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores,

**caracterizado porque**

20 en un punto de conexión de red (2) se detecta y/o se muestra una pérdida de estabilidad (LOS) inminente cuando

- la cantidad de una derivada parcial de una tensión de red respecto de la potencia activa alimentada sobrepasa un valor límite predeterminado,

- la cantidad de una derivada parcial de una tensión de red respecto de la potencia reactiva alimentada sobrepasa un valor límite predeterminado,

25

- al hacer la descomposición de una tensión trifásica de la red de suministro (4) según el método de las componentes simétricas, la cantidad de una componente directa de la tensión es mayor que un valor límite de la componente directa de la tensión,

- al hacer la descomposición de una tensión trifásica de la red de suministro según el método de las componentes simétricas, la cantidad de una componente inversa de la tensión es mayor o menor que un valor límite de la componente inversa de la tensión y/o

30

- la cantidad de una diferencia entre una frecuencia de referencia y una frecuencia nominal sobrepasa un valor límite de frecuencia predeterminado en términos de la cantidad.

35

11. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores,

**caracterizado porque**

el generador (1) se controla para una relación de corriente de cortocircuito de menos de 6, más preferiblemente de menos de 4, siendo aún más preferible que sea de menos de 2.

40

12. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores,

**caracterizado porque**

45

un y/o el punto de trabajo del generador (1) se selecciona con un margen de estabilidad respecto a un y/o el límite de estabilidad (202).

13. Procedimiento según la reivindicación 11,

50

**caracterizado porque**

el margen de estabilidad respecto al límite de estabilidad (202)

55

- una pequeña diferencia entre la potencia reactiva (Q) alimentada y la potencia reactiva del límite de estabilidad (202),

- una pequeña diferencia entre la potencia activa (P) alimentada y la potencia activa del límite de estabilidad (202) o

- una pequeña diferencia entre la tensión (V) en el punto de conexión de red y la tensión del límite de estabilidad,

60

calculándose en particular a partir de al menos una de estas diferencias.

14. Procedimiento según la reivindicación 11 o 12,

**caracterizado porque**

el margen de estabilidad hasta el límite de estabilidad (202) se define como la raíz de la suma

5

- del cuadrado de una pequeña diferencia normalizada entre la potencia reactiva (Q) alimentada y la potencia reactiva del límite de estabilidad (202),

- del cuadrado de una pequeña diferencia normalizada entre la potencia activa (P) alimentada y la potencia activa del límite de estabilidad (202) y

10 - del cuadrado de una pequeña diferencia normalizada entre la tensión (V) en el punto de conexión de red (2) y la tensión en el límite de estabilidad (202),

en el que tanto la potencia reactiva (Q) como la potencia activa (P) están normalizadas respecto a la potencia de cortocircuito (Scr) de la red de suministro (4) en el punto de conexión de red y la tensión en el punto de conexión de red (2) está normalizada a la tensión nominal (VN) de la red de suministro (4) en el punto de conexión de red (2), y la separación es menor de 0,2, en particular menor de 0,1.

15

15. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores,

**20 caracterizado porque**

un y/o el margen de estabilidad del punto de trabajo actual del límite de estabilidad es observado y, en particular, el punto de trabajo se modifica cuando el margen de estabilidad disminuye hacia el límite de estabilidad.

25

16. Instalación de energía eólica (1) que comprende

- un generador eléctrico (6) con un rotor aerodinámico (106) para generar energía eléctrica a partir del viento y

- un dispositivo convertidor de frecuencia (16), en particular, un inversor (16) acoplado con un rectificador (8) para alimentar con energía eléctrica la red de suministro (4).

30

en el que la instalación de energía eólica se controla según un procedimiento de las reivindicaciones anteriores.

17. Instalación de energía eólica (1) según la reivindicación 16,

**35 caracterizada porque**

la instalación de energía eólica (1) está conectada al punto de conexión de red (2) y alimenta con energía eléctrica en ese punto de conexión de red (2) a la red de suministro (4), en la que en este punto de conexión de red la relación de corriente de cortocircuito (Scr) es menor que 10, preferiblemente menor de 6, siendo particularmente preferible que sea menor de 4.

40

18. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 15,

caracterizado porque en función de

45

- la al menos una propiedad de red registrada y/o

- al menos un estado de red y/o

- una desviación del control de un punto de trabajo predeterminado identifica una pérdida de estabilidad y/o una pérdida de estabilidad inminente.

50

19. Procedimiento según la reivindicación 18,

**caracterizado porque**

55 el generador (1) es un parque eólico con múltiples instalaciones de energía eólica (1) y la identificación de una pérdida de estabilidad o de una pérdida de estabilidad inminente se lleva a cabo para cada instalación de energía eólica (1) individual o al menos para un subgrupo de la instalación de energía eólica del parque.

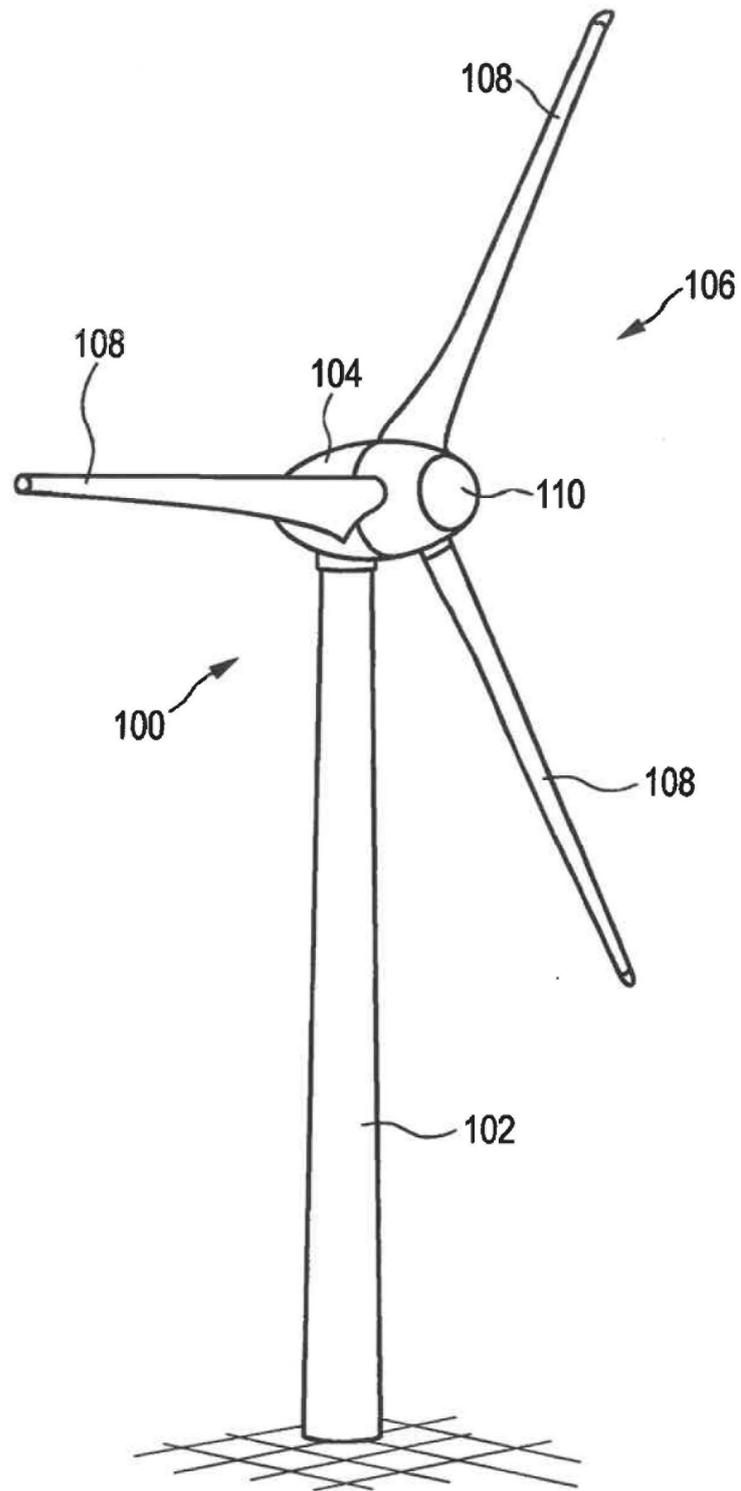


Fig. 1

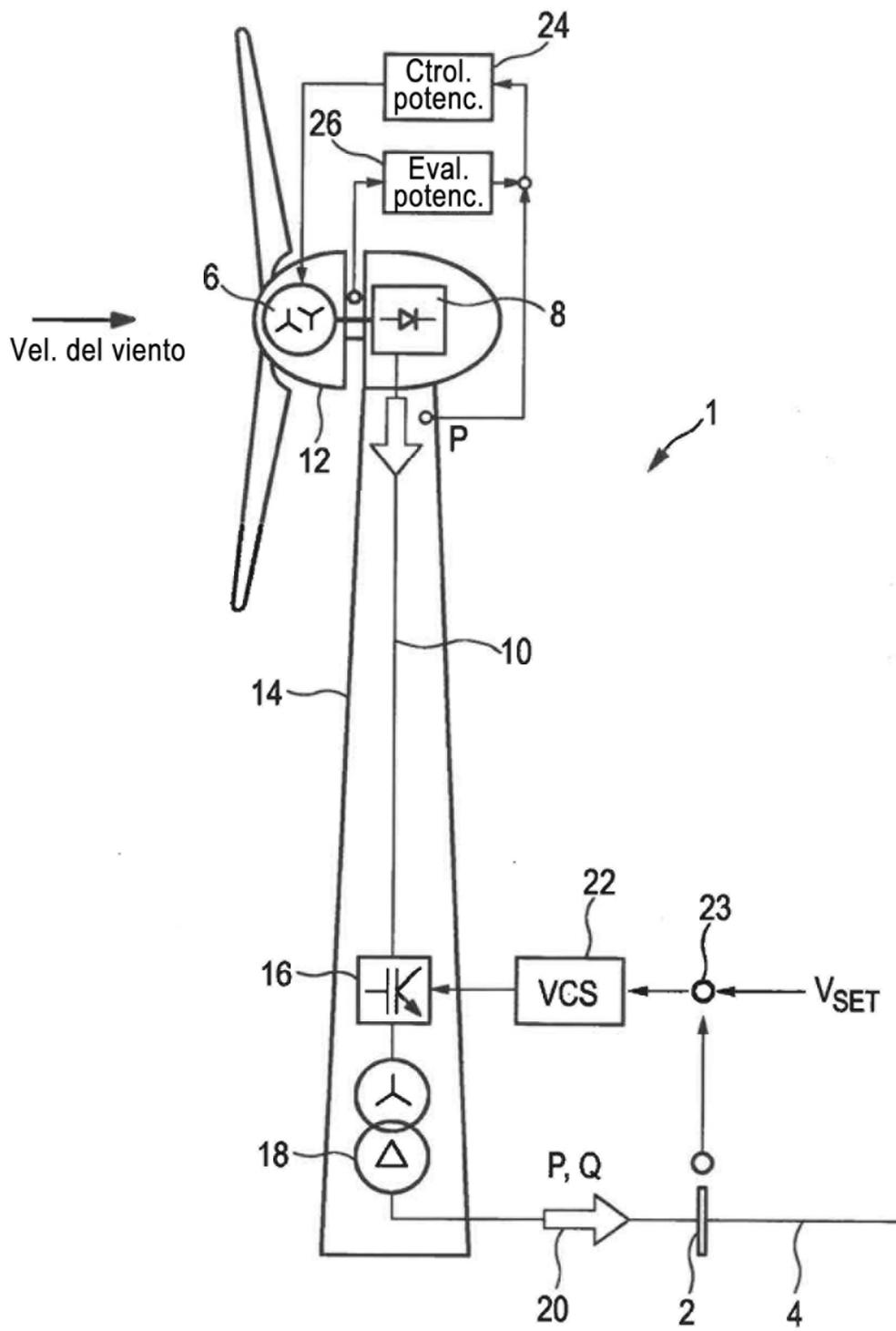


Fig. 2

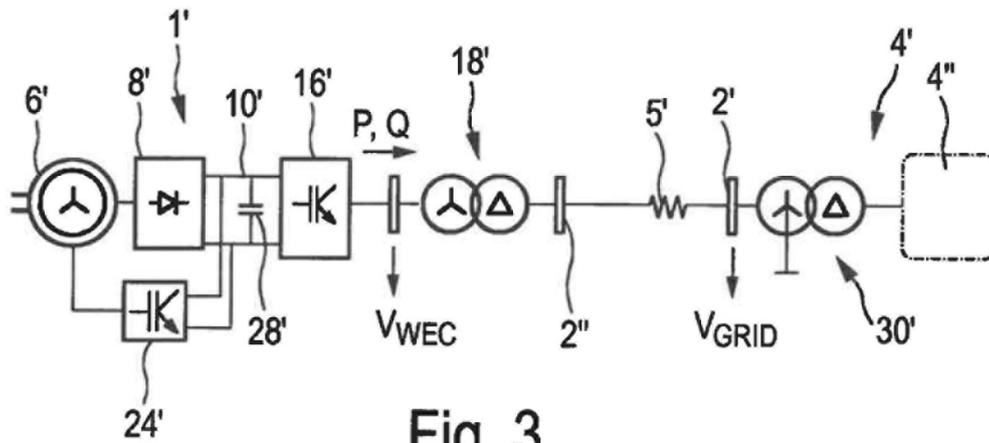


Fig. 3

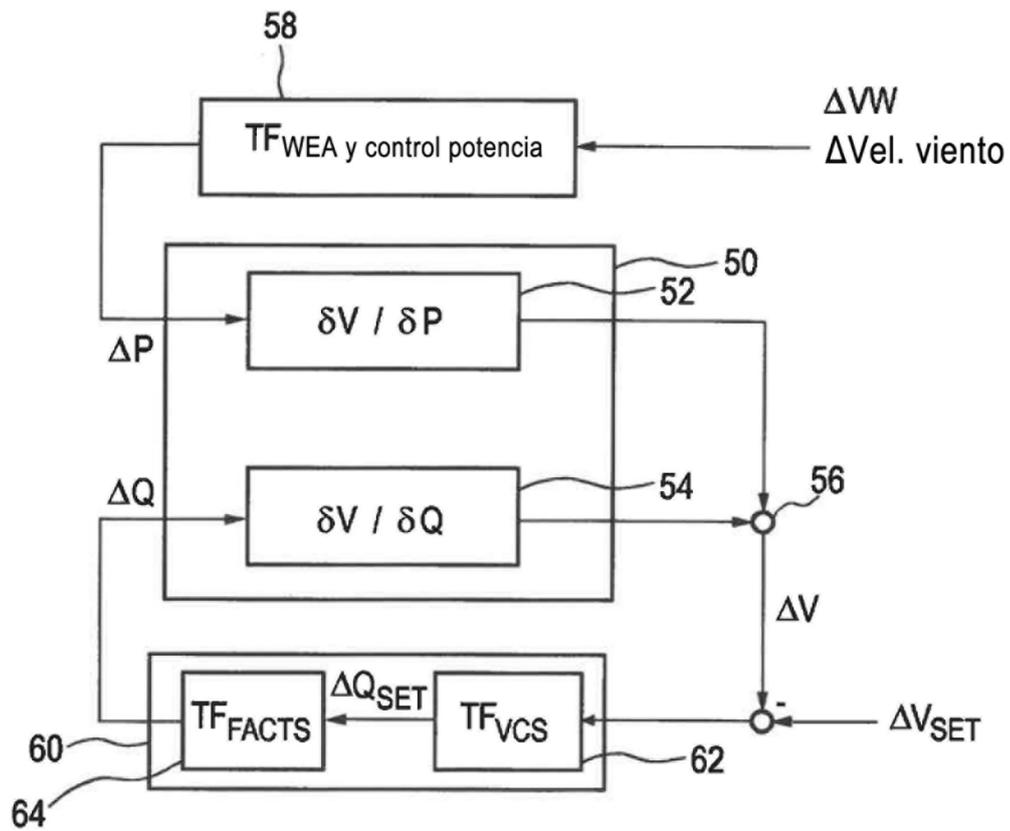


Fig. 5

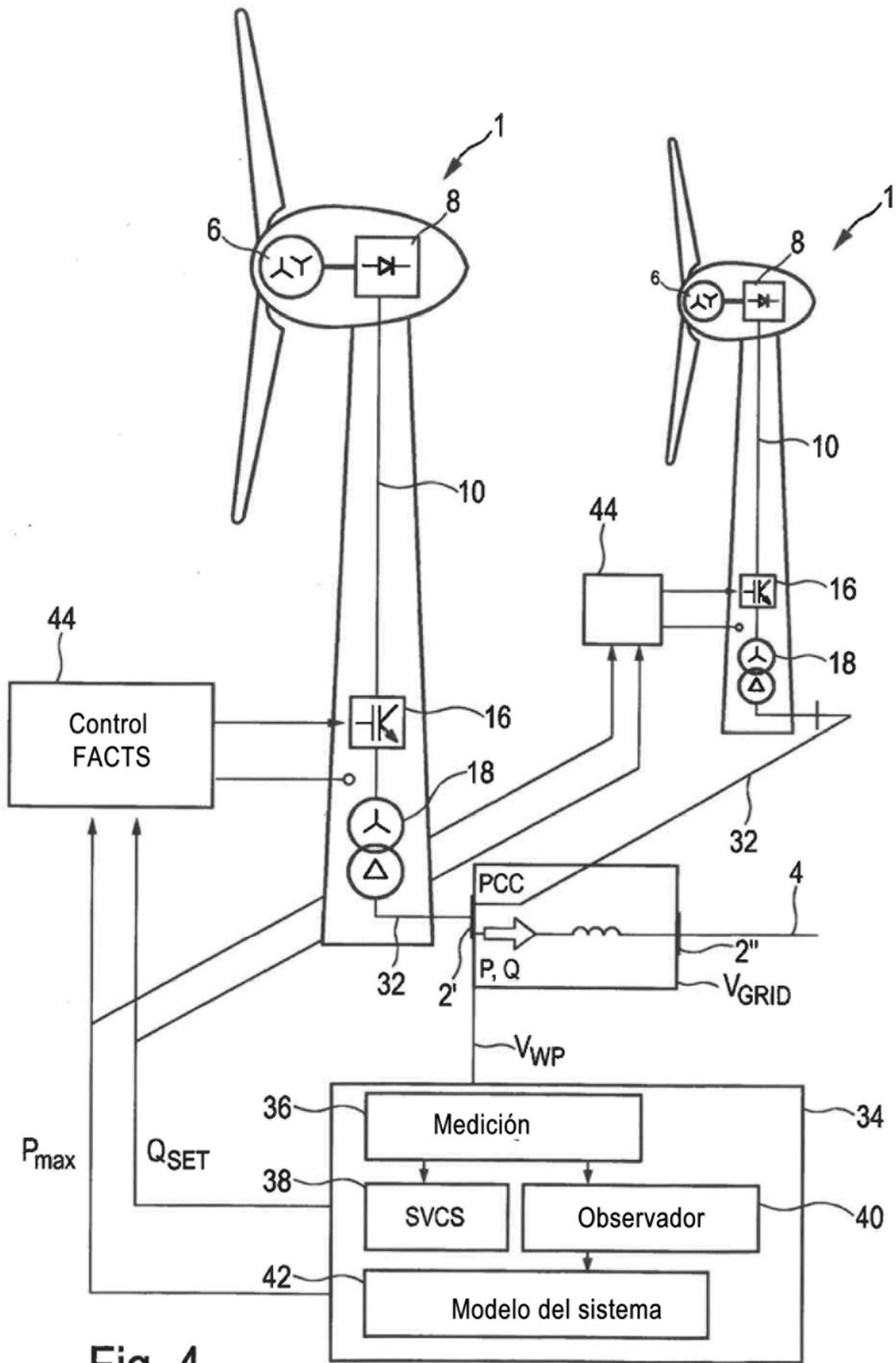


Fig. 4

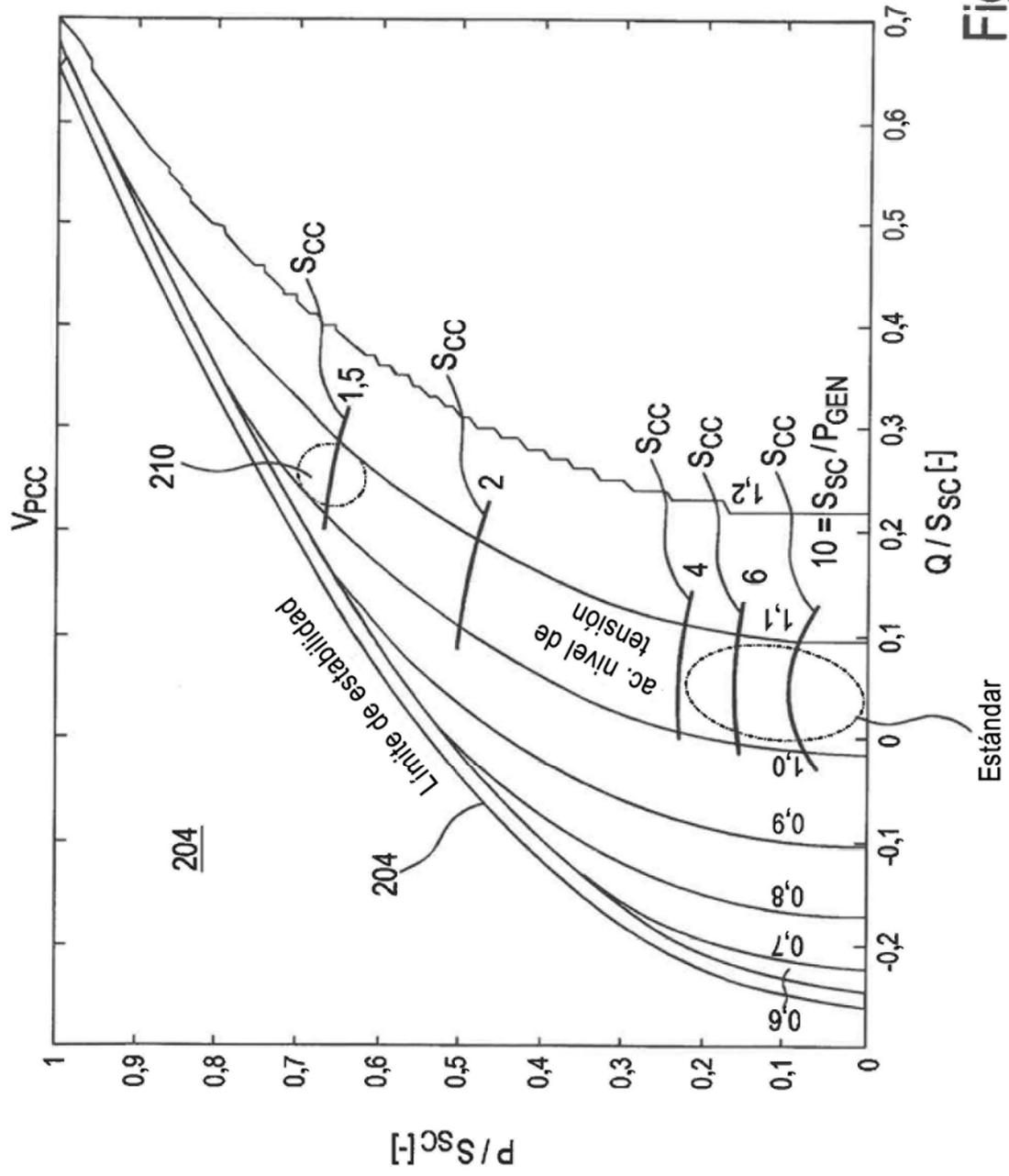
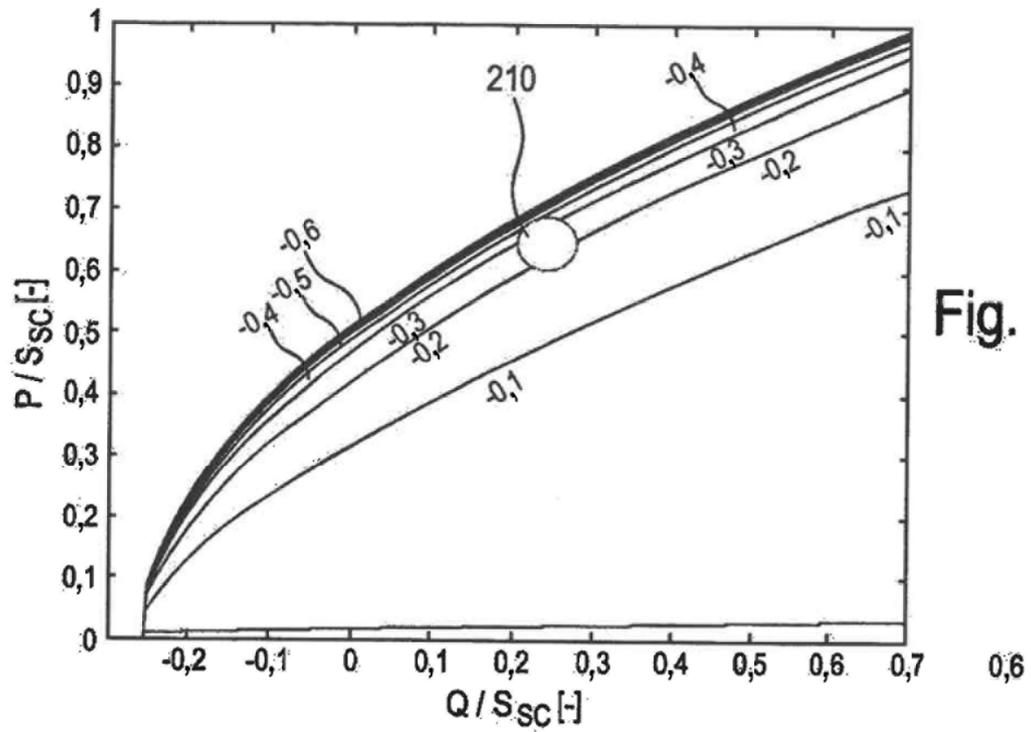
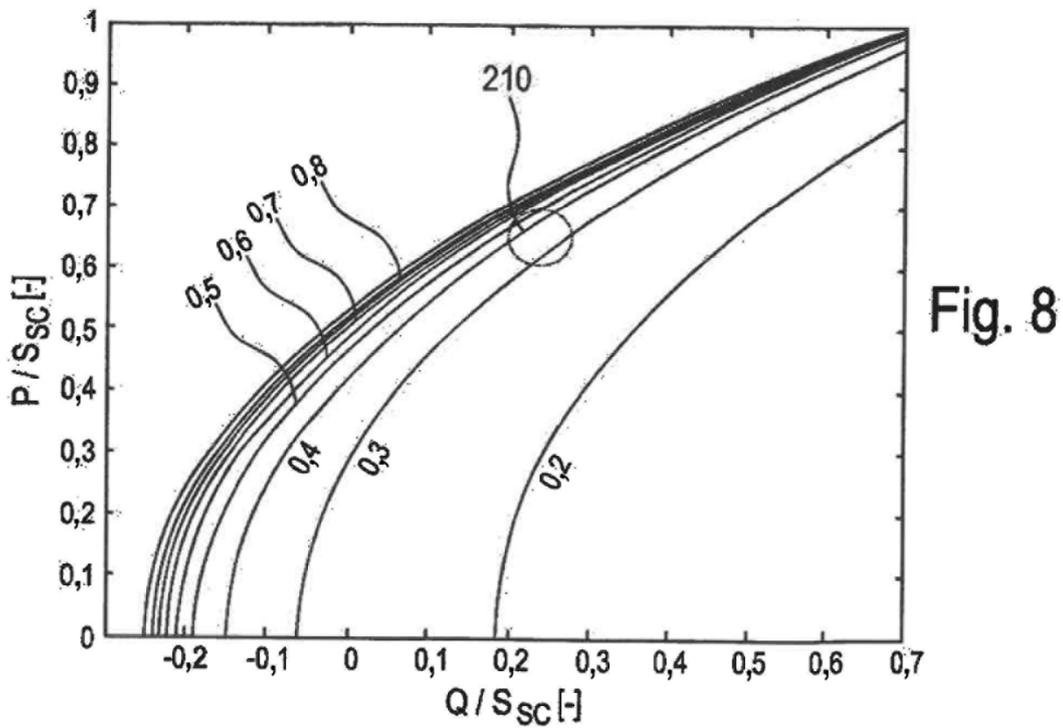


Fig. 6

Sensibilidad de la tensión [pu/MW] en PCC en función de la potencia de Micro-WEA



Sensibilidad de la tensión [pu/MVar] en PCC en función de la potencia de Micro-WEA



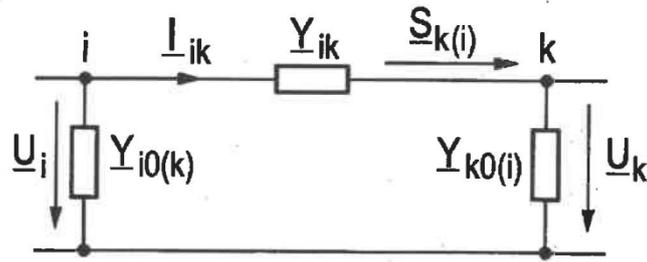


Fig. 9