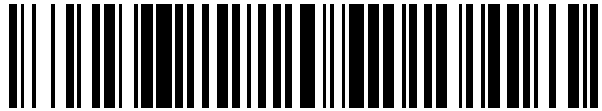


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 701 879**

51 Int. Cl.:

H02J 3/38 (2006.01)

H02J 3/18 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **14.04.2009 PCT/EP2009/002728**

87 Fecha y número de publicación internacional: **22.10.2009 WO09127393**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.04.2009 E 09732166 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.10.2018 EP 2266178**

54 Título: **Aerogenerador con protector de conexión**

30 Prioridad:

14.04.2008 DE 102008018748

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

26.02.2019

73 Titular/es:

**SENVION GMBH (100.0%)
Überseering 10
22297 Hamburg, DE**

72 Inventor/es:

LETAS, HEINZ-HERMANN

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 701 879 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

Aerogenerador con protector de conexión

La invención se refiere a un aerogenerador con un rotor, un generador accionado por éste con un convertidor para la producción de energía eléctrica, que a través de un transformador, para el que se prevé un sistema de control de tensión, se transmite a una red, y un sistema de control que comprende un sistema de mando del convertidor, de manera que se pueda regular una componente reactiva de la energía transmitida.

Los aerogeneradores se conectan normalmente a través de un transformador a una red para la transmisión de energía eléctrica. El transformador sirve para elevar el nivel de tensión relativamente bajo registrado en el propio aerogenerador a un nivel de tensión más alto (tensión media o alta tensión) de la red. Habitualmente, los aerogeneradores producen la energía eléctrica a un nivel de tensión de hasta 1 kV (una tensión empleada frecuentemente es de 690 voltios), y estos aerogeneradores se conectan, por medio del transformador, a una red de tensión media (gama de tensión aprox. 20 kV); algunos aerogeneradores más nuevos de alto rendimiento, como los Reponer 5M o 6M, también pueden proporcionar la energía que transmiten a un nivel de tensión media, encontrándose el transformador dentro del aerogenerador. Los transformadores transmiten toda la energía producida por el aerogenerador, por lo que, especialmente en estados de carga más altos, están sometidos a cargas elevadas. Por lo tanto, para protegerlos contra sobrecargas se conoce el método de prever un sistema de control para el transformador. Es conocido prever un sistema de medición de tensión por uno de los lados del transformador. Con este sistema se determina si la tensión se mantiene dentro de un marco predeterminado, a fin de separar el aerogenerador de la red como medida de precaución en caso de superarse los límites de este marco predeterminado.

En los aerogeneradores con potencias del orden de hasta 2 MW es usual vigilar la tensión por el lado de baja tensión del transformador, es decir, por el lado del aerogenerador. Esta disposición ofrece la ventaja de una buena protección del aerogenerador y del transformador. Sin embargo, también presenta el inconveniente de que, según el caso de carga del transformador, se pueden producir diferencias de tensión de hasta un 5 % con respecto a la relación de transmisión teórica. Como consecuencia, existe el riesgo de que por el lado de alta tensión del transformador se produzcan diferencias de tensión excesivas, o sea, que no se cumpla el marco teórico. En otros aerogeneradores más potentes se aplica con frecuencia el concepto contrario. El mismo consiste en vigilar la tensión por el lado de alta tensión del transformador, es decir, por el lado de la red. Esta disposición ofrece la ventaja de una mejor vigilancia del comportamiento del aerogenerador en la red a proteger. No obstante, también en este caso se da la situación de que, a través del transformador, se puedan producir diferencias de tensión inadmisibles por el otro lado, aquí por el lado de baja tensión, superiores al 5 %. Por lo tanto, al disponer el sistema de medición por el lado de alta tensión del transformador existe el riesgo de que, por el lado de baja tensión, los valores límite no se cumplan. Para proteger el aerogenerador se necesitan, en su caso, medidas especiales, tales como la supervisión del cumplimiento de una potencia activa mínima (a cargo de una transmisión de una potencia reactiva en sí pretendida), para garantizar un autoabastecimiento suficiente del aerogenerador (DE-A-103 44 392).

El documento DE 10 2007 005165 revela un aerogenerador según el preámbulo de la reivindicación 1.

En principio existe la posibilidad de compensar las variaciones de tensión inducidas por el transformador por medio de una elección más estrecha del campo de tolerancias, sin embargo con el inconveniente de que así se limitan (considerablemente) los puntos de trabajo posibles para el aerogenerador, lo que conduce a una reducción correspondiente del rendimiento energético. Por lo tanto, la elección de un marco de tolerancias más estrecho da lugar a una reducción del grado y del plan de rendimiento con pérdidas de productividad notables.

La invención tiene por objeto proponer un aerogenerador del tipo inicialmente mencionado perfeccionado, así como un procedimiento de funcionamiento para el mismo, que evite los inconvenientes antes indicados.

La solución según la presente invención radica en las características de las reivindicaciones independientes y preferiblemente en las de las reivindicaciones dependientes.

En un aerogenerador con un rotor, un generador accionado por éste con un convertidor para la producción de energía eléctrica, que a través de un transformador, para el que se prevé un sistema de control de tensión, se transmite a una red, y un sistema de control que comprende un sistema de mando del convertidor, aplicando el sistema de mando una señal de regulación para una componente reactiva al convertidor, se prevé según la invención que se disponga en el transformador un dispositivo de medición de tensión cuya señal de tensión se aplica a una entrada de un elemento de control deslizante de estado teórico, cuya señal de salida se aplica a un módulo de limitación para la componente reactiva que actúa sobre el convertidor.

En primer lugar se van a explicar algunos de los términos empleados:

Por componente reactiva se entiende un parámetro eléctrico que indica el valor de la parte reactiva de la potencia o corriente eléctrica. Por consiguiente, para la invención es irrelevante si la componente reactiva se refiere a la potencia o a la corriente eléctrica. Si se desea, y teniendo en cuenta la tensión, se puede llevar a cabo la conversión entre las dos magnitudes. Por razones de una representación más clara, se considera en el siguiente texto la componente reactiva como corriente reactiva; conforme a su sentido, las explicaciones también son válidas para la potencia reactiva.

Por dependiente del estado se entiende que el valor de la tensión, de la corriente y/o de la potencia se aplica como señal al elemento de control deslizante de estado teórico. El valor se puede medir directamente o se puede determinar indirectamente a partir de otros valores.

5 La invención se basa en la idea de explotar el aerogenerador por medio de un control específico de la corriente reactiva en dependencia de la tensión de manera que no se consiga sólo una protección del propio aerogenerador, sino también una protección del transformador y de la red, especialmente contra excesos de tensión. La invención se ha dado cuenta de que una clave del problema del riesgo de tensiones inadmisibles en el transformador se debe a la componente reactiva del transformador. Más exactamente, la clave consiste en que el flujo de corriente reactiva a través del transformador cambia la tensión del campo eléctrico principal del transformador y, por consiguiente, la
10 tensión por el lado de tensión mínima en una cuantía considerable (que puede alcanzar y rebasar algunos puntos porcentuales). Esto significa que, adicionalmente a la tolerancia por el lado de red, la tensión por el lado de tensión mínima, que también se tiene que mantener dentro de un determinado campo de tolerancia, cambia debido al flujo de corriente reactiva a través del transformador.

15 La invención se ha dado cuenta de la relación entre el comportamiento de la tensión a través del transformador y el flujo de la componente reactiva y la aprovecha para resolver la tarea según la invención. En este sentido prevé provocar un control específico de la componente reactiva en dependencia de la tensión en el transformador, en concreto en forma del elemento de control deslizante de valor teórico previsto según la invención. La invención aprovecha que los aerogeneradores modernos no introducen solamente potencia activa en la red, sino que también se diseñan para transmitir potencia reactiva; para ello, el aerogenerador presenta una posibilidad de regulación, a través de la cual se puede ajustar una componente reactiva, como una parte de corriente reactiva, un valor de potencia reactiva o un factor de potencia. Estos sistemas de regulación en sí son conocidos. La invención parte de este punto, completando el sistema de regulación ya existente de modo que, mediante el elemento de control deslizante de valor teórico previsto según la invención, que depende del estado de la tensión o de la potencia reactiva del aerogenerador y de la red, especialmente de la tensión en el transformador, y que en caso de necesidad provoca un cambio de la medida de potencia reactiva prevista, a fin de limitar así la tensión en el transformador
25 (determinada en gran medida por la tensión de campo eléctrico principal por medio de un control específico de la componente reactiva. Esto se produce generalmente de manera que, en caso de sobretensiones en la red, el elemento de control deslizante de valor teórico dependiente del estado (aquí dependiente de la tensión) desplaza la componente reactiva hacia el subexcitado. Esto significa para la corriente reactiva que en caso de subexcitación (al igual que en el sistema de flechas de conteo) se vuelve negativa. Como consecuencia, se reduce tanto la tensión en la red anterior gracias a la caída de tensión en las reactancias de la red, como también por el lado de tensión mínima del transformador y del aerogenerador. De forma correspondiente, el control deslizante de valor teórico dependiente del estado actúa en caso de una tensión mínima en la red, mediante un cambio de la componente reactiva, hacia el sobreexcitado, con lo que, como consecuencia de la caída de tensión en las reactancias de red, la tensión se eleva en la red anterior, así como por el lado de tensión mínima del transformador y del aerogenerador. De esta forma se reducen sucesivamente los efectos de las sobretensiones y de las tensiones mínimas inadmisibles (por ejemplo de una desviación del 30 % en la red de alta tensión a todavía un 20 % en la red de tensión media y a sólo un 15 % en el aerogenerador).

40 Solamente con un esfuerzo adicional reducido, la invención logra una protección combinada, es decir, la protección tanto de la red y del transformador, como la del aerogenerador. En principio carece de importancia si el control de la tensión en el transformador se lleva a cabo por su lado de alta tensión o por su lado de baja tensión. En ambos casos se consigue la protección que falta por el respectivo otro lado por medio de la funcionalidad según la invención. Por lo tanto, para la invención basta con el hardware del que normalmente ya se dispone para la medición de las tensiones del transformador (sea en el lado de baja tensión o el lado de alta tensión). Por consiguiente, no se producen costes adicionales de hardware para la invención o sólo unos costes mínimos, dado que se puede recurrir a los valores de medición existentes.

La invención permite además un mejor aprovechamiento del transformador. Por lo tanto, un dimensionamiento excesivo, como el que se ha producido hasta ahora por el hecho de que se rebasaran los límites de tolerancia para la tensión, ya no es necesario. Se pueden utilizar transformadores más pequeños y más eficientes. Al mismo tiempo se mejoran tanto la protección de la red como la del aerogenerador.

50 Para conseguir una reacción lo más rápida posible del desplazamiento del valor teórico, el elemento de control deslizante de valor teórico actúa convenientemente sobre el propio convertidor. Por ello se puede entender tanto un efecto directo sobre los elementos de conmutación activos del convertidor, como sobre el rápido control del convertidor. Por un rápido control del convertidor se entiende el circuito de control que actúa a su vez directamente sobre los elementos activos del convertidor; el mismo se diferencia de los circuitos de control por regla general claramente más lentos del propio sistema de control de funcionamiento. Así se consigue un comportamiento mucho mejor del aerogenerador en la red en relación con un la resistencia en caso de procesos transitorios, por ejemplo puntas de tensión momentáneas (HVRT – High Voltage Ride Through) o cortocircuitos (LVRT – Low Voltage Ride Through).

60 Para incrementar el efecto según la invención del elemento de control deslizante de valor teórico se puede prever además que interactúe con un módulo de deslizamiento de carga que, en caso de tensión mínima o de sobretensión, influye en el sistema de control de manera que la parte activa de la potencia o corriente transmitida se reduzca en

beneficio de la parte reactiva. Así se logra un control de prioridad en el que las corrientes activas se reducen en caso de necesidad, para poder recurrir en mayor medida a la capacitancia (limitada) del convertidor para la producción de corriente reactiva. La contribución, que los aerogeneradores pueden aportar precisamente en tiempos de cargas elevadas para apoyar a la red, se aumenta sí de forma significativa. El tiempo adicional necesario, en cambio, es mínimo, y también se pueden desprestigiar las mermas de rendimiento resultantes como consecuencia del menor suministro de potencia activa, dado que un desplazamiento de este tipo a causa del control de prioridad sólo se emplea en caso de diferencias de tensión dinámicas (HVRT, LVRT) durante un espacio de tiempo de pocos milisegundos.

Preferiblemente se prevé un sensor de temperatura para el transformador, cuya señal se aplica como otra señal de estado más a una entrada del elemento de control deslizante de valor teórico. El sensor de temperatura se dispone preferiblemente en el núcleo del transformador. Esto se debe al conocimiento según la invención de que, debido a la importancia de la componente reactiva para la carga del transformador, el núcleo del transformador se tiene que vigilar especialmente, puesto que generalmente se calienta exclusivamente por medio de la tensión aplicada, es decir, la tensión del campo eléctrico principal interno. Uno de los méritos de la invención es el de haberse dado cuenta de que, para el problema que aquí constituye la base, la carga del transformador por transmisión de corriente activa puede carecer de importancia, especialmente en transformadores (de resina de moldeo) con ventilación forzada. La invención ha descubierto que una situación crítica para el transformador incluso se puede producir si la tensión de red es alta, lo que ya puede dar lugar a que el transformador se sobrecaliente funcionando en vacío, a no ser que se adopten contramedidas según la invención. La invención también se ha dado cuenta de que en la tensión del campo eléctrico principal durante el funcionamiento con potencia reactiva no solo influye la tensión sino también considerablemente la componente reactiva transmitida a través del transformador, por lo que en caso de funcionamiento sobreexcitado se puede producir en el núcleo, a causa de las elevadas pérdidas de hierro, un calentamiento inadmisibles y, por lo tanto, una desconexión. Esto se evita por medio de la disposición del sensor de temperatura en el núcleo, en combinación con el elemento de control deslizante de valor teórico según la invención.

El sistema de control presenta además preferiblemente un sistema de mando para el que se prevé un segundo elemento de control deslizante de estado teórico similar. Por similar se entiende aquí que el elemento de control deslizante de estado teórico tiene fundamentalmente la misma funcionalidad como el que se ha mencionado antes, siendo sin embargo posible que en caso de necesidad el comportamiento dinámico sea más lento para facilitar la implementación y adaptarlo mejor a la cuota de exploración generalmente mucho más lenta del sistema de mando. Por medio de este segundo elemento de control deslizante de estado teórico se puede conseguir una supervisión de la funcionalidad según la invención, y en especial se puede desconectar el aerogenerador, cuando el cálculo por medio del segundo elemento de control deslizante de estado teórico demuestra que, sobre todo en caso de funcionamiento casi estacionario o estacionario, todavía sería posible rebasar un valor límite. Con la supervisión del elemento de control deslizante de estado teórico según la invención así conseguida aumenta la seguridad de un aerogenerador equipado debidamente. Por una cuota de exploración baja se entiende preferiblemente una cuota de exploración en el menos un orden de magnitud (1 : 10) más pequeña que la del elemento de control deslizante de estado teórico según la invención antes mencionado.

Con preferencia se aplica una medida para la componente reactiva transmitida por el aerogenerador a otra entrada del segundo elemento de control deslizante de estado teórico. Así es posible que una señal de tensión para el elemento de control deslizante de estado teórico se pueda tomar por cualquier lado del transformador (en función de la existencia de hardware de medición), siendo posible que, en caso de necesidad y teniendo en cuenta la componente reactiva transmitida por el transformador, se calculen los valores de medición de tensión del otro lado del transformador. Basta con prever un equipo de medición por un lado del transformador, con lo que por el otro lado se puede prescindir de otro adicional.

El sistema de control comprende preferiblemente un módulo de control que interactúa con un relé de protección de red con valor límite variable, siendo la componente reactiva la que también determina este valor límite. Por lo tanto, el elemento de control deslizante de estado teórico según la invención se puede emplear igualmente para la activación del relé de protección de red, por lo que el comportamiento de conmutación perfeccionado también favorece la protección del aerogenerador.

Con preferencia, el elemento de control deslizante de estado teórico se diseña de manera que comprenda un regulador PI con un limitador. A una conexión de entrada del regulador se aplica un valor de medición para la tensión del transformador, preferiblemente por el lado de tensión mínima, formándose una diferencia respecto a una tensión máxima. Este valor se conduce para el elemento P y, para la precisión estacionaria, a través del elemento I del regulador, determinándose los parámetros de manera que como potencia de salida se emita una señal para una componente reactiva (por ejemplo, $Q_{\text{límite superior}}$ o $I_{\text{límite superior}}$). Esta señal pasa por el limitador que la limita a un valor regulable para los valores mínimo y máximo.

Convenientemente se prevé una estructura de regulación de dos circuitos, previéndose un circuito para un límite superior, como se ha descrito antes, y un segundo circuito para un límite inferior con estructura correspondiente. Uno de los circuitos sirve para la tensión máxima y el otro para la tensión mínima. El regulador PI se estructura ventajosamente de manera que a partir de una diferencia de tensión respecto a un valor límite, ya sea un valor límite máximo o un valor límite mínimo, un valor de corrección para la componente reactiva. En el caso de la componente reactiva se puede tratar, como se ha descrito antes, de una medida para una potencia reactiva o una corriente

reactiva. Una estructura como ésta ofrece la ventaja de que es sencilla en lo que se refiere a su concepto. Sin embargo, es necesaria una medición de la tensión por el lado de tensión mínima del transformador. Por esta razón, el concepto de regulación se puede combinar ventajosamente con un modelo de distancia del transformador, con lo que es suficiente una medición de la tensión por el lado de red del transformador y se pueden determinar a través del modelo de distancia unos valores de medición equivalentes. En este caso no se produce ningún esfuerzo adicional para un punto de medición especial por el lado de tensión mínima.

En otra forma de realización preferida, el elemento de control deslizante de estado teórico se configura de manera que presente un sistema de control de componente reactiva y un limitador. Un sistema de control ofrece frente a un sistema de regulación la ventaja de que, gracias a la falta de un reacoplamiento, puede actuar de forma muy rápida y prácticamente sin retardo. De este modo se puede conseguir también una limitación más rápida y, por lo tanto, una protección mejor y más específica, especialmente para el sistema electrónico sensible del aerogenerador. El sistema de control ofrece además la ventaja de que por regla general no es necesaria una determinación complicada de parámetros de regulación. Preferiblemente el sistema de control de componente reactiva se diseña de manera que a partir de las señales para la tensión y la potencia reactiva determine directamente un valor de corrección de componente reactiva. Con esta finalidad, el sistema de control de componente reactiva se diseña preferiblemente como elemento de curva característica bidimensional. Por ello se entiende un elemento que contiene curvas límite para combinaciones admisibles de tensión/potencia reactiva o corriente reactiva. Alternativamente también se puede prever que en lugar del elemento de curva característica se disponga una matriz de valor teórico. Una matriz como ésta está especialmente indicada para su implementación en un ordenador, por ejemplo, en forma de una LUT (Look-Up Table). Ésta abre la posibilidad de diseñar las curvas límite de forma no lineal, siendo también posible que se prevean fácilmente desarrollos de curva constantes pero no planos. Al igual que en el caso de la variante para la regulación, se prevé preferiblemente una estructura de control de dos circuitos con un circuito para la tensión máxima y un circuito para la tensión mínima. Al igual que en la variante con la regulación se puede prever que se obtengan valores de medición por el otro lado del transformador que se convierten con un modelo de distancia.

Opcionalmente se puede prever una curva característica especial para un caso de funcionamiento dinámico. Para ello, los elementos de curva característica se configuran preferiblemente de modo que se implemente otra curva característica y que se proceda al cambio al aplicarse una señal de conmutación a la otra curva característica. El sistema de mando presenta preferiblemente un módulo de control dinámico que, en función de criterios predeterminables, emite la señal de conmutación. Con la curva característica adicional, los valores límite se pueden elevar por breve tiempo, siendo, por ejemplo, posible que el convertidor transfiera más corriente. Gracias a la limitación a casos dinámicos no se producen daños a causa de un sobrecalentamiento térmico. Esto se puede prever análogamente en relación con los parámetros para la regulación.

La invención abarca además un procedimiento de protección de red para aerogeneradores con un rotor, un generador accionado por éste con un convertidor para la producción de energía eléctrica, que se transmite a través de un transformado, en el que se vigila una tensión, a la red y con un sistema de control, que comprende un sistema de control de convertidor, ajustándose una parte reactiva de la potencia transmitida a través de una componente reactiva, caracterizado por la medición de una tensión en el transformador, por la determinación de una señal de corrección para la componente reactiva por medio de un elemento de control deslizante de estado teórico dependiente del estado, y por la utilización de esta señal de corrección para la limitación de la componente reactiva.

En relación con una explicación más detallada del procedimiento, se hace referencia a la descripción que antecede.

La invención se explica a continuación con referencia al dibujo que se acompaña, en el que se representan ejemplos de realización ventajosos. Éstos muestran en la:

Figura 1 una vista panorámica de un aerogenerador conectado a través de un transformador a una red;

Figuras 2 a-d representaciones de esquemas de conexiones para diferentes tipos de conexión a través de un transformador;

Figuras 3 a, b esquemas de conexión equivalentes para el transformador;

Figuras 4 a, b estructuras de devanado y características del campo magnético de la figura 3;

Figura 5 un esquema de conexión equivalente para al transformador;

Figura 6 una representación en bloque para un primer ejemplo de realización;

Figura 7 una representación en bloque para un segundo ejemplo de realización de la invención;

Figura 8 curvas límite para un elemento de curva característica para el segundo ejemplo de realización;

Figura 9 un diseño alternativo del elemento de curva característica y

Figura 10 diagrama de potencia reactiva de tensión a través del transformador sin y con la invención.

Para mayor claridad se explica en primer lugar, a la vista de ejemplos esquemáticos, la estructura de un aerogenerador, como la que sirve de base para el ejemplo de realización de la invención que se describirá más adelante. Un aerogenerador identificado en su conjunto con la referencia 1, comprende una torre 10 con una sala de máquinas 11 dispuesta de forma rotatoria por su extremo superior en dirección acimutal. Por una de sus caras

frontales se dispone de forma giratoria un rotor eólico 12, que a través de un árbol de rotor (no representado) impulsa un generador 2 para la producción de energía eléctrica. El generador 2 puede ser de cualquier tipo, habitualmente se trata de una máquina sincrónica o de una máquina asincrónica de alimentación doble. El generador 2 está conectado a un convertidor 3. A éste se conecta una línea de alimentación 13 que, a través de la torre 10, conduce a un transformador de tensión media 8 situado en la base de la torre. Al transformador de tensión media 8 se le asigna un interruptor de protección de red 18. A través de una línea de alimentación de red 19 el transformador de tensión media 8 transmite la energía eléctrica producida por el aerogenerador 1 a una red 9. En el caso de la red 9 se puede tratar de una red de transporte de energía pública o de una red interna de un parque eólico.

El flujo de la energía eléctrica producida por el generador 2 bajo la fuerza del rotor eólico 12 se representa en diferentes formas de realización de los aerogeneradores en la figura 2. La figura 2A muestra una forma de realización con un convertidor compacto 3'. Aquí el generador 2' se ha diseñado, por ejemplo, como generador sincrónico y puede girar con cualquier número de revoluciones en dependencia de la fuerza del viento, presentan la energía eléctrica producida por él una frecuencia correspondiente al número de revoluciones del rotor eólico 12. El convertidor 3' se compone de un inversor (aquí no representado en detalle) del lado del generador, un inversor del lado de la red y un circuito intermedio dispuesto entre ambos. Un inversor del lado de la máquina transforma la corriente alterna producida por el generador 2' en corriente continua o tensión continua y la suministra al circuito intermedio, desde el cual se transmite a través del inversor del lado de red y por medio del transformador 8 a la red 9, con una frecuencia correspondiente a la frecuencia de red. En el caso de este tipo de construcción, toda la energía eléctrica producida por el generador 2' fluye a través del convertidor 3. Desde allí se suministra, a través de la línea de conexión 13 y el transformador 8 y la línea de red 19, a la red 9.

La figura 2B muestra una variante en la que el transformador 8' se ha realizado como transformador trifásico con dos devanados de tensión mínima. A cada devanado se conecta un convertidor 3' unido conjuntamente al generador 2'. Así la energía producida por el generador 2 se divide en dos derivaciones, de manera que cada convertidor 3' tenga que transmitir menos energía. Esto es importante para los aerogeneradores de gran potencia. Se entiende que este principio de la división también se puede aplicar para tres o más derivaciones.

En la figura 2C se muestra una variante en la que el generador 2 se ha realizado como generador asincrónico de alimentación doble. Éste comprende un devanado de estator (círculo exterior) y un devanado de rotor (círculo interior). El devanado de estator se conecta de forma rígida a la línea de conexión 13 y al transformador 8 y, a través de éste, a la red 9. El devanado de rotor se conecta al convertidor 3, cuyo otro extremo se conecta a la línea de conexión 13. En este tipo de construcción sólo una parte de la energía producida por el generador 2 fluye a través del convertidor 3 (por regla general aproximadamente una tercera parte), mientras que la parte principal pasa directamente a través del transformador 8 a la red 9. Por esta razón, el convertidor 3 se puede dimensionar más pequeño en este tipo de construcción.

La figura 2D muestra una variante de la figura 2C, en la que se emplea de nuevo un transformador trifásico 8' que presenta dos devanados de tensión mínima. Al devanado de tensión mínima se conecta directamente el estator del generador 2, mientras que al otro devanado de tensión mínima se conecta el rotor a través del convertidor 3. Los devanados de tensión mínima se conciben preferiblemente para niveles de tensión diferentes, de manera que en el devanado de tensión mínima conectado al estator el nivel de tensión es más alto que en el devanado conectado al convertidor. Esto permite una conexión eficiente de aerogeneradores de potencia muy elevada (como 3000 kW y más).

Como se ve en la representación que antecede, el transformador 8, 8' tiene una gran importancia en el sentido de que, en cada variante, la energía completa fluye a través del mismo. Su estructura y su esquema de actuación se explican a continuación brevemente. En la figura 3A se ilustra un esquema de conexión equivalente monopolar para un transformador 8 con dos devanados, y en la figura 3B un esquema de conexión equivalente monopolar para un transformador 8' con tres devanados. Las tensiones U1, U2 y, en su caso, U3 definen las tensiones de los tres devanados, caracterizando el número 1 la cara de alta tensión y el número 2 así como, en su caso, el número 3 los tres devanados de la caja de baja tensión. De forma correspondiente, las resistencias R1 y R2 y, en su caso, R3 representan la resistencia óhmica de los devanados y son una medida para las pérdidas de devanado. Las reactancias X1, X2 y, en su caso, X3 representan las reactancias de dispersión de los devanados. Con XH se define la reactancia principal que provoca la verdadera magnetización del transformador 8, 8'. En paralelo se conecta una resistencia RFE que representa las pérdidas óhmicas del núcleo magnético. Conviene señalar que durante el funcionamiento las reactancias y resistencias mencionadas representan divisores de tensión para la tensión que disminuye en la reactancia principal XH, que se define como tensión de campo principal UH.

La estructura del devanado y el desarrollo correspondiente de la reactancia de dispersión X se representan en la figura 4A para transformadores de baja tensión y, en la figura 4B, para transformadores de tensión media.

Debido a la carga térmica del transformador, los devanados 81, 82 no se encuentran directamente en un brazo de transformador 80, sino que entre ellos se encuentra una hendidura para el paso de un refrigerante (refrigeración forzada). El devanado dispuesto cerca del brazo de transformador 80 es el devanado 81 para la tensión mínima (como consecuencia de las distancias de aislamiento más pequeñas necesarias) y el devanado 82 dispuesto a más distancia es el devanado para la tensión máxima. En el primer diagrama por debajo de la representación del conjunto de devanados se muestra, adaptada a la disposición de los devanados en el espacio, la intensidad del

campo magnético H resultante a través del punto x. Según la tasa de flujo aumenta desde dentro hacia fuera a través del primer devanado, el devanado de tensión mínima 81, alcanza en el entrehierro hacia el devanado de tensión máxima 82 un valor máximo y vuelve a disminuir finalmente de forma lineal por el lado exterior del devanado de tensión máxima 82 hasta retroceder al valor inicial. En el diagrama situado por debajo, se representa el cuadrado de la intensidad de campo magnético, destacándose por medio de rayas una superficie cerrada. Desde el punto de vista matemático se trata en el caso de la superficie de la integral de la intensidad de campo magnético al cuadrado, por lo tanto de una medida de la inductividad X. En la mitad izquierda del diagrama se reconoce la inductividad de dispersión X2 del devanado de tensión mínima 81, en la mitad derecha la inductividad de dispersión X1 del devanado de tensión máxima 82, siendo el resultado de ambas la inductividad de dispersión total X. La figura 4B muestra una representación correspondiente de un transformador de tensión media con un devanado de tensión máxima dividido 82, 82', que para una mejor refrigeración presenta otra hendidura de refrigeración entre los devanados parciales 82 y 82'. El desarrollo de las intensidades de campo magnético H y, por consiguiente también de la inductividad X, corresponde a los principios antes explicados.

Se ve que el valor máximo de la reactancia X en la zona del espacio intermedio se alcanza entre los devanados de tensión mínima y máxima 81, 82. Por lo tanto, la tensión de campo principal determinada fundamentalmente por la reactancia principal alcanza allí su valor máximo. Se puede decir que en los transformadores usuales con valores típicos para las resistencias R1, R2 y, en su caso, R3 así como X1, X2 y, en su caso, X3, se produce una caída de tensión de aprox. un 1 % en fase con la tensión a través de las resistencias, mientras que una caída de tensión de, por regla general, menos del 10 %, casi siempre alrededor del 6 % se produce, como consecuencia de las reactancias, transversalmente respecto a la tensión. La reactancia total se compone de las partes procedentes de cada devanado. Dado que el porcentaje del devanado de tensión mínima 81 es pequeño, la tensión de campo principal corresponde aproximadamente a la tensión por el lado de tensión mínima.

Esto tiene consecuencias para el comportamiento térmico del transformador 8, 8'. en concreto especialmente para los tipos de transformador con espacios intermedios entre los devanados, por ejemplo transformadores de resina de moldeo con refrigeración forzada. Debido a los entrehierros para la refrigeración forzada entre el núcleo y los devanados, estas zonas se desacoplan térmicamente las unas de las otras en una medida considerable. El calentamiento del núcleo del transformador con los brazos 80 es independiente del de los devanados 81, 82, 82'. El calentamiento de los devanados 81, 82, 82' resulta en dependencia de la corriente que pasa a través de ellos, es decir, de la carga eléctrica, mientras que el calentamiento del núcleo (representado como brazo de transformador 80) lo determinan principalmente las pérdidas magnéticas en el hierro. Éstas varían en dependencia de la tensión de campo principal (que, como ya se ha dicho antes, corresponde aproximadamente a la tensión por el lado de tensión baja). Por lo tanto, esta disposición conlleva que el núcleo del transformador ya se puede calentar considerablemente e incluso sobrecalentar sin carga, es decir, funcionando en vacío.

Según la invención se prevé que, para la protección contra un calentamiento excesivo, el flujo de carga pase por el transformador 8, 8' mediante variación de la componente reactiva de manera que se evite una tensión de campo principal demasiado alta durante el funcionamiento en régimen continuo. Así se evita con una carga baja o incluso durante el funcionamiento en vacío que se produzca el riesgo de un sobrecalentamiento. Con preferencia se prevé además que, por motivos de seguridad, el núcleo y los devanados se controlen con ayuda de sensores de temperatura propios (véase figura 6).

Debido a estas relaciones, la invención prevé una protección del transformador contra sobretensiones y sobrecalentamientos nocivos. Esto se explica a la vista de un ejemplo más simplificado de la figura 5, en el que, en lugar de emplear el esquema de conexión equivalente indicado en la figura 3A, el transformador 8, 8' se sustituye por una sencilla conexión en serie de una resistencia R y de una reactancia X, unidas en una impedancia compleja Z. Así resulta sin problemas la tensión por el lado de tensión mínima U2 como suma de la tensión por el lado de tensión máxima U1 más la caída de tensión a través de la resistencia compleja Z, es decir:

$$U_2 = U_1 + Z * I, \text{ siendo } Z = R + j * X \text{ y siendo}$$

$$I = I_w + j * I_b.$$

Aquí se supone para la energía reactiva, al igual que en el sistema de flechas de conteo de producción, que una corriente reactiva sobreexcitada es negativa. Esto significa que cada corriente reactiva sobreexcitada se convierte en negativa y que la potencia reactiva sobreexcitada se convierte en positiva. Si se inserta lo anterior, resulta:

$$U_2 = (U_1 + R * I_w - X * I_b) + j * (X * I_w + R * I_b).$$

El primer término delante del signo más central corresponde a la parte real y se puede simplificar, debido a la resistencia óhmica R muy pequeña, en $U_1 - X * I_b$. El término detrás del signo más central corresponde a la parte imaginaria y representa sólo un giro angular en el diagrama de vectores, que influye poco en el valor de la tensión y que por este motivo se puede despreciar. La fórmula se simplifica quedando en:

$$U_2 = U_1 - X * I_b.$$

A la vista de la fórmula se comprende fácilmente que en caso de I_b negativo, es decir, de sobreexcitación, la tensión U2 aumenta y, en caso de I_b positivo, es decir, de excitación mínima, la tensión U2 disminuye.

La invención se ha dado cuenta de que en base a esta simplificación se puede conseguir para el transformador una regulación o función de protección más eficiente y menos complicada. Esto se explica a continuación a la vista de dos ejemplos de realización.

5 En la figura 6 se representa un diagrama en bloques de un primer ejemplo de realización de la invención. El mismo muestra esquemáticamente el generador 2, el convertidor 3 y el transformador 8, a través del cual la energía eléctrica producida por el generador 2 se aporta a la red 9. Se representa además el sistema de control 4 que actúa como sistema de mando para el aerogenerador. El mismo presenta varias entradas 41 para valores de funcionamiento y teóricos, tales como la tensión U_s , el número de revoluciones n y los factores de potencia $\cos \varphi$. Para el ajuste de la corriente reactiva se prevé una línea para una señal de regulación de componente reactiva 43, que se conecta al convertidor 3, mejor dicho a un sistema de regulación rápida 33, que en dependencia de la señal ajustada para la componente de potencia reactiva acciona los interruptores activos del convertidor 3, para ajustar un ángulo de fase correspondiente para la producción de la corriente reactiva deseada (o potencia reactiva). En este sentido, el conjunto es conocido. Se prevé además un interruptor de protección de red 18 en el transformador 8. Éste es activado por el sistema de mando 4 a través de una línea de control 49. También se conoce este método.

15 Según la invención se prevé en el transformador 8, en el ejemplo de realización representado por el lado de tensión mínima, un sensor 51 para la tensión en el devanado de tensión mínima 81. Ésta se aplica como señal de entrada a un elemento de control deslizante de estado teórico 5. El elemento de control deslizante de estado teórico 5 comprende un núcleo de regulación 55, delante del cual se conecta un elemento diferenciador 53. A un valor de entrada del elemento diferenciador se aplica la señal de la tensión medida por el lado bajo, y a otro valor de entrada una señal para la tensión mínima admisible $U_{m\acute{a}x}$. La señal diferenciadora se aplica a la entrada del núcleo de regulación 55. Este núcleo de regulación 55 se configura en el ejemplo de realización representado como regulador PI. El valor de control que emite es una medida de corriente reactiva, que se aplica a un limitador 57 y que se limita allí a valores entre una corriente reactiva máxima admisible $I_{b\acute{m}\acute{a}x}$ y una corriente reactiva mínima admisible $I_{b\acute{m}\acute{i}n}$. El elemento de control deslizante de estado teórico 5 presenta una segunda derivación paralela que presenta, de forma correspondiente, un elemento diferenciador 54, un núcleo de regulación 56 y un limitador 58. El elemento diferenciador 54 determina la diferencia respecto a un valor mínimo para la tensión mínima $U_{m\acute{i}n}$. El núcleo de regulación 56 y el limitador 58 se configuran como en la primera derivación.

Los valores iniciales respectivamente resultantes se aplican como vector inicial del elemento de control deslizante de estado teórico 5 a un módulo de conexión adicional. En el ejemplo de realización representado el módulo de conexión adicional se ha realizado en forma de módulo de limitación 59, que modifica la señal de regulación de componente reactiva 43 aplicada por el sistema de mando 4 al sistema de regulación del convertidor 33. Esto se lleva a cabo limitando el valor de la medida de corriente reactiva máximo o mínimo admisible en dependencia de la tensión medida a través del sensor 51 por el lado de baja tensión y aplicando la señal así limitada de este modo como medida de corriente reactiva modificada al sistema de regulación del convertidor 33. Así se limita el flujo de corriente reactiva Q a través del transformador 8 en dependencia de la tensión de forma que se cumpla un campo de tolerancia admisible para una zona operacional segura. Al medir el limitador de tensión del regulador 55, 56 la tensión crítica por el lado de tensión mínima por medio del sensor 51 y al compararla con valores teóricos fijos de la tensión mínima y máxima de, por ejemplo, un 90 % o de un 110 % mediante los elementos diferenciadores 53, 54, se puede ajustar específicamente la corriente reactiva aún admisible en el respectivo punto de funcionamiento.

40 Un inconveniente de este ejemplo de realización consiste en que se necesita un punto de medición 51 por el lado de tensión mínima del transformador 8, que normalmente no haría falta. Para ahorrar el coste adicional de este punto de medición, se puede prever alternativamente un módulo de conversión 6. Éste comprende fundamentalmente un elemento modelo 61, que contiene un modelo de distancia del transformador 8. Con ayuda del mismo se puede determinar, a partir de los valores medidos para la corriente $T1$ y, en su caso, la tensión $U1$, por medio de sensores 51 normalmente de por sí existentes por el lado de tensión máxima del transformador 8, el parámetro $U2^*$ correspondiente por el lado de tensión mínima, sin necesidad de sensores adicionales. Por lo tanto, en este caso el elemento de control deslizante de estado teórico 5 no trabaja con valores de medición reales, sino con valores equivalentes calculados (identificados en la figura 6 con un *). El elemento de control deslizante de estado teórico 5 según la invención es lo suficientemente fuerte como para tolerar las pequeñas diferencias que se producen inevitablemente. Por lo tanto, esta variante del primer ejemplo de realización alcanza el pleno efecto según la invención sin necesidad de sensores adicionales.

Un segundo ejemplo de realización de la invención se representa en la figura 7. Se diferencia del primer ejemplo de realización representado en la figura 6 principalmente por la forma del elemento de control deslizante de estado teórico 5' y por otros puntos de medición 51', 52'. Por lo demás, los elementos iguales se identifican con la misma referencia. Al igual que en el primer ejemplo de realización, el sistema de mando 4 controla de manera en sí conocida el convertidor 3 a través de una señal de regulación de potencia reactiva 43 aplicada al sistema de regulación rápida 34.

Los puntos de medición para el elemento de control deslizante de estado teórico 5' se disponen por el lado de red del transformador 8, en concreto en la zona de la conexión de la línea de alimentación de red 19. Se prevé un punto de medición para la tensión 51', así como un punto de medición para la corriente 52'. La señal de tensión se aplica directamente al elemento de control deslizante de estado teórico 5'. Además se conecta, junto con la señal de corriente, a un elemento de cálculo 50 que, a partir de estos dos valores y teniendo en cuenta el desfase entre la

tensión y la corriente, determina una medida para la potencia reactiva Q1 o la corriente reactiva Ib1 transmitida realmente a la red 9 por el transformador 8. Esta medida se aplica también al elemento de control deslizante de estado teórico 5'. El elemento de control deslizante de estado teórico 50' comprende un núcleo de control. En el ejemplo de realización representado, el mismo se configura como elemento de curva característica 55' con una estructura de dos circuitos. En primer lugar se explica la derivación superior para la tensión máxima. A las entradas del elemento de curva característica 55' se aplica respectivamente una señal para la tensión medida U1 y la potencia reactiva medida Q1 o la corriente reactiva Ib1. El elemento de control 55' se configura como elemento de curva característica y presenta curvas de control no lineales. Las curvas de control se determinan convenientemente de manera que en la derivación superior para la tensión máxima una rama prevea una corriente reactiva constante, con una tensión por debajo o hasta inclusive la tensión nominal, mientras que la corriente reactiva con una tensión superior disminuye de forma lineal. Por consiguiente, la curva de control de la derivación inferior se diseña de manera que con una tensión por encima de la tensión nominal, e incluso algo por debajo de la tensión nominal, la corriente reactiva tenga un valor constante, mientras que con una tensión todavía más baja la corriente reactiva aumenta. En caso de tensión máxima la curva se encuentra en el rango capacitativo y en caso de tensión mínima en el rango inductivo. Una de las ventajas de esta variante consiste en que no se tienen que determinar parámetros de regulación y en la posibilidad de una adaptación muy rápida, dado que un sistema de control, al contrario que un sistema de regulación, no presenta retardos técnicos de regulación. Unos ejemplos de una curva de control como ésta se representan en las figuras 8a, b. Se hace constar que las secciones dibujadas en dirección vertical preferiblemente no son exactamente verticales, sino que presentan una inclinación finita con el mismo signo que la inclinación en las secciones inclinadas. De este modo se consigue una monotonía que ejerce un efecto favorable sobre la estabilidad del sistema de control.

El empleo de un sistema de control para el elemento de control deslizante de estado teórico 5 ofrece además la ventaja especial de que en las curvas características de control se pueden implementar funciones adicionales, ventaja que, en su caso, merece protección independiente. Se puede prever especialmente que el sistema de control se emplee, gracias a su buen comportamiento dinámico, para la compensación de tensión máxima o de tensión mínima dinámicas. Así se puede prever que en caso de una tensión máxima de breve duración en la red (HVRT = High Voltage Ride Through) se proporcione inmediatamente, por medio de las curvas de control, corriente reactiva subexcitada. Ésta contrarresta un aumento excesivo de la tensión. De este modo no sólo se reduce la tensión en la red preconectada 9 (como consecuencia de la caída de tensión en las reactancias de red), sino también en el interior del aerogenerador 1 (concretamente como consecuencia de la caída de tensión a través del transformador 8) y, en el caso del sistema de alimentación doble (aquí representado) adicionalmente también en la parte de la máquina del convertidor 3 (como consecuencia de la caída de tensión en las reactancias del generador 2). Un a sobretensión en la red de alta tensión de, por ejemplo, un 130 % de la tensión nominal, se reduce así cada vez más en la red de tensión media a valores de un 120 %, por ejemplo, de la tensión nominal y dentro del aerogenerador 1, por el lado de baja tensión, a valores de sólo un 115 %, aproximadamente.

Este efecto se puede intensificar permitiendo por breve tiempo una corriente reactiva muy alta, es decir, una corriente reactiva que supere la corriente nominal. Así se puede conseguir una reducción todavía mayor de la sobretensión. Lo anteriormente dicho también es aplicable al caso de tensiones mínimas en la red (LVRT = Low Voltage Ride Through). La curva de control se encarga en este caso inmediatamente de proporcionar corriente reactiva sobreexcitada, que provoca una subida de la tensión. Como consecuencia se eleva el nivel de tensión tanto en la red preconectada 9, como en el interior del aerogenerador 1 y, en el caso del sistema de alimentación doble, además en la parte del lado de la máquina del convertidor 3. Las tensiones mínimas en la red se eliminan así cada vez más en dirección del aerogenerador. Una implementación de curvas de control como ésta, en la que se adoptan medidas tanto para las HVRT como para las LVRT, se representa en la figura 9. Las zonas no rayadas identifican la zona operacional del aerogenerador.

Detrás del elemento de curva característica 55', 56' se conecta respectivamente un módulo de limitación 57', 58'. El mismo limita los valores teóricos emitidos para la corriente reactiva o potencia reactiva a un valor mínimo o máximo admisible. Los dos valores emitidos por las derivaciones superior e inferior se aplican como vector de limitación a un módulo de limitación 59 insertado en bucle en la línea de señales para la señal de regulación de potencia reactiva 43. La señal de regulación de componentes reactivas para la potencia reactiva o corriente reactiva, transmitida por el sistema de mando 4, se corrige así con el elemento de control deslizante de estado teórico según la invención.

Para mejorar todavía más la reacción a fallos de poca duración se puede prever que en los elementos de curva característica se programen curvas características dinámicas adicionales. Esto se explica a la vista del ejemplo del elemento de curva característica 56'. El mismo contiene adicionalmente una segunda curva característica (representada con una línea de puntos en la figura 7), que prevé valores límite ampliados para el funcionamiento de corta duración. El elemento de curva característica 56' cambia a esta segunda curva característica cuando se aplica una señal de conmutación correspondiente a través de una línea de control 47. La línea de control 47 está conectada a un módulo de control dinámico 46. En el ejemplo de realización representado se ha dispuesto en el sistema de mando 4. Sin embargo, esto no tiene que ser obligatoriamente así, sino que también se puede diseñar como módulo autónomo o como módulo funcional adicional en el elemento de control deslizante de estado teórico 5'. Ésta última posibilidad ofrece la ventaja de recorridos de señales cortos, con lo que precisamente en casos altamente dinámicos, como fallos temporales de la red (LVRT o HVRT) se puede garantizar una reacción rápida. La señal de activación generada por el módulo dinámico 46 se aplica a través de la línea de control 47 también al

limitador 58' y provoca que éste cambie a valores límite ampliados. La curva de control ampliada resultante se representa en la figura 8a con una línea de puntos. Con esta medida la zona hasta el sombreado cruzado se gana para el funcionamiento de corta duración. Se advierte que una ampliación correspondiente para el funcionamiento dinámico también se puede prever en el límite de tensión superior (no representado).

5 Al igual que en la primera forma de realización antes descrita, no es obligatorio disponer los sensores de medición para la tensión o para la corriente 51', 52' por el lado de tensión máxima del transformador 8. También se puede prever que se dispongan por el lado de tensión mínima, especialmente en el supuesto de que, de por sí, ya existan allí sensores correspondientes. En este caso se prevé convenientemente un módulo de conversión 6, que comprende un modelo de distancia 61' del transformador 8. Por medio de este módulo de conversión 6 se pueden
10 obtener, a partir de los valores medidos por el lado de tensión mínima, valores correspondientes por el lado de tensión máxima.

El elemento de control deslizante de estado teórico 5 actúa preferiblemente de forma directa sobre el convertidor 3. En principio se puede prever una acción directa sobre los distintos elementos de conmutación (IGBT), pero se prefiere una acción indirecta sobre el sistema de regulación del convertidor 33. Normalmente presenta una dinámica muy alta. Los cambios de los valores teóricos predeterminados por el elemento de control deslizante de estado teórico 5 se pueden aplicar así de manera rápida, con lo que se consigue la capacidad de compensación dinámica antes descrita. Sin embargo, puede ocurrir que el estado de funcionamiento ajustado por el sistema de regulación rápida 33 del convertidor 3 difiera, bajo la influencia del elemento de control deslizante de estado teórico 5, del estado predeterminado por el sistema de mando 4. Para evitar diferencias permanentes entre el estado según el
15 sistema de mando 4 y el estado real del convertidor 3, se prevé convenientemente que en el sistema de mando 4 exista una funcionalidad estructurada de acuerdo con el elemento de control deslizante de estado teórico 5. Para ello el sistema de mando 4 presenta preferiblemente un módulo de control 45. El módulo de control 45 determina, al igual que el elemento de control deslizante de estado teórico 5, cambios para la componente reactiva, que posteriormente serán tenidos en cuenta por el sistema de mando 4. Con preferencia, el sistema de mando 4 presenta un módulo de desplazamiento de carga 44. El mismo se diseña para que, en caso de una tensión máxima o mínima, se actúe sobre el restante sistema de mando 4 de manera que se reduzca la parte activa de la potencia transmitida en beneficio de la parte reactiva. Así se puede ganar capacidad en la barra conductora, a fin de suministrar una corriente reactiva más alta. Esto sirve especialmente para la compensación de un cambio dinámico, como en caso de una tensión máxima dinámica (HRVT) y una tensión mínima dinámica (LVRT) de corta duración.

30 El módulo de control 45 puede colaborar además con un módulo de separación 48 de manera que active el relé de protección de red 18 con un valor límite variable, interviniendo la corriente reactiva transmitida también en la determinación del valor límite. De esta forma, la invención tiene en cuenta el descubrimiento de que la tensión de campo principal, que a su vez depende en primer lugar de la tensión por el lado bajo y prácticamente resulta independiente de la potencia que se transmite, influye de manera decisiva en la determinación de la potencia del transformador 8. Así se contrarresta el riesgo hasta ahora existente de que, incluso con una carga baja, se pueda producir un calentamiento inadmisibles del transformador 8 o de que, en caso necesario, se proceda a una desconexión.

El funcionamiento y efecto de la invención se explican a continuación más detalladamente a la vista de la figura 10. Se representan en el sistema de coordenadas la potencia reactiva normalizada en el eje X y la tensión normalizada en el eje Y. Las líneas continuas muestran respectivamente la tensión de red por el lado de tensión máxima y las líneas discontinuas la tensión por el lado de tensión mínima del transformador 8. La zona admisible de las diferencias de tensión se fija por el lado de red en +/- 10 % con una potencia reactiva normalizada (Q/Q_{nom}) que, tanto como reactancia capacitativa como inductiva, puede ser de hasta 0,45. El resultado es, por lo tanto, un rectángulo para la zona operacional admisible. Sin embargo, surge el problema de que, debido a las caídas de tensión a través del transformador 8, se produzca un desplazamiento del rectángulo. Las tensiones por el lado de baja tensión del transformador 8 difieren (véanse las líneas finas en la figura 10A) y, especialmente en el caso de la tensión máxima con una potencia reactiva que aumenta la tensión, pueden superar el valor nominal en hasta un 15 % y, en el caso de tensión mínima con una potencia reactiva que baja la tensión, puedan ser en hasta un 30 % inferiores al valor nominal. Así ya no queda garantizada una protección suficiente del aerogenerador contra tensiones máximas o mínimas.

La situación es muy parecida cuando se emplea como base, no a la situación por el lado de red (lado de tensión máxima) del transformador 8, sino a la del lado de tensión mínima del transformador 8 como (véanse las líneas finas de la figura 10A). La zona operacional admisible se representa por medio de un rectángulo que ilustra las condiciones por el lado de tensión mínima. Se ve que por el lado de red se pueden producir tensiones excesivamente altas o bajas inadmisibles.

La mejora que se puede alcanzar gracias a la invención se indica con líneas en negrilla. El diagrama de tensiones – potencia reactiva se optimiza en el sentido de que las tensiones se limitan al lado de red, en concreto con referencia al valor de tensión superior, con potencia reactiva que aumenta la tensión y, en relación con el valor de tensión inferior, con potencia reactiva que baja la tensión. Así se obtiene una figura característica similar a un rombo de las líneas de delimitación de la zona operacional admisible. En la figura 10A se puede ver que en caso de una elección correcta de los parámetros se consigue que un ladeo por parte del transformador (línea gruesa discontinua) ya no dé lugar a que se alcancen valores excesivamente altos para la diferencia de tensión, ni en caso de tensión máxima ni

5 en caso de tensión mínima. Las tensiones se mantienen más bien dentro del rango admisible. De este modo la invención consigue que las especificaciones se cumplan tanto por el lado de red del transformador 8, como por el lado del aerogenerador. Esto también ocurre cuando las condiciones por el lado de tensión mínima 8 sirven de base, como se ve en la figura 10B. La tensión máxima se limita debidamente en el caso de potencia reactiva que aumenta la tensión (véase la línea gruesa discontinua), limitándose análogamente la tensión mínima en caso de potencia reactiva que baja la tensión.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Aerogenerador con un rotor (12), un generador (2) accionado por el mismo con un convertidor (3) para la producción de energía eléctrica, que a través de un transformador (8), para el que se prevé un sistema de control de tensión, se transmite a una red (9), y con un sistema de control (4), que comprende un sistema de control de convertidor (34), aplicando el sistema de control (4) una señal de regulación para una componente reactiva al convertidor (34) a través de una línea de señal para la señal de regulación de potencia reactiva (43), caracterizado por que
- 10 en la línea de señal para la señal de regulación de potencia reactiva (43) se inserta en bucle un módulo de limitación (59) y se dispone en el transformador (8) un dispositivo de medición de tensión (51) cuya señal de tensión se aplica a una entrada de un elemento de control deslizante de estado teórico (5) que depende del estado, cuya señal de salida se aplica al módulo de limitación (59) para la componente reactiva que actúa sobre el convertidor (3).
- 15 2. Aerogenerador según la reivindicación 1, caracterizado por que el elemento de control deslizante de estado teórico (5) dependiente del estado se diseña para desplazar la componente reactiva en caso de tensión máxima hacia la parte subexcitada y, en caso de tensión mínima, hacia la parte sobreexcitada.
- 20 3. Aerogenerador según la reivindicación 1 o 2, caracterizado por que el elemento de control deslizante de estado teórico (5) interactúa con un módulo de desplazamiento de carga (44), que en caso de tensión mínima o máxima actúa sobre el sistema de control (4) de manera que la parte activa de la potencia transmitida se reduzca en beneficio de la parte reactiva.
- 25 4. Aerogenerador según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que se prevé un sensor de temperatura (85) para un núcleo del transformador (8), cuya señal se aplica como señal de estado adicional a una entrada del elemento de control deslizante de estado teórico (55).
- 30 5. Aerogenerador según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el sistema de control (4) presenta un módulo de control (45) que comprende un segundo elemento de control deslizante de estado teórico del mismo tipo.
- 35 6. Aerogenerador según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el sistema de control (4) comprende un módulo de separación (48) con valor límite variable, que actúa sobre un relé de protección de red (18) en el transformador, interviniendo la potencia reactiva transmitida también en la determinación de su valor límite.
- 40 7. Aerogenerador según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el elemento de control deslizante de estado teórico (5) interactúa con un modelo de distancia (61) del transformador, al que se aplican las tensiones por un lado del transformador (8), para la determinación de la tensión por el otro lado del transformador (8).
- 45 8. Aerogenerador según la reivindicación 7, caracterizado por que el modelo de distancia (61) se diseña para la determinación correspondiente de la componente reactiva.
- 50 9. Aerogenerador según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el elemento de control deslizante de estado teórico (5) comprende un regulador PI (55), diseñado preferiblemente para determinar a partir de una diferencia de tensión respecto a un valor límite un valor de corrección para la componente reactiva.
- 55 10. Aerogenerador según una de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizado por que el elemento de control deslizante de estado teórico (5') comprende un elemento de control (55') configurado preferiblemente para determinar, a partir de las señales aplicadas para la tensión y la potencia reactiva, un valor de corrección de potencia reactiva.
- 60 11. Aerogenerador según la reivindicación 10, caracterizado por que el elemento de control (55') consiste en un elemento de curva característica bidimensional con líneas características de caída monótona o presenta una matriz de valores teóricos.
- 65 12. Aerogenerador según una de las reivindicaciones 9 a 11, caracterizado por que se prevé una estructura de dos circuitos con un circuito para la tensión máxima y un circuito para la tensión mínima.
13. Aerogenerador según una de las reivindicaciones 9 a 12, caracterizado por que se prevé un dispositivo de conmutación (46), que permite un funcionamiento de corta duración con valores límite ampliados.
14. Procedimiento para la explotación del aerogenerador con un rotor (12), un generador (2) accionado por el mismo con un convertidor (3) para la producción de energía eléctrica, que se transmite a través de un transformador (8) a una red (9), vigilándose la tensión en el transformador (8), y un sistema de control (4), que comprende un sistema de control de convertidor (33), con un ajuste de de una señal de regulación para una componente reactiva de la potencia transmitida,

caracterizado por
la medición de una tensión en el transformador (8), la determinación de una señal de corrección para la medida de potencia reactiva por medio de un elemento de control deslizante de estado teórico (5) dependiente del estado y el empleo de esta señal desplazada para la limitación de la señal de regulación de la componente reactiva.

- 5
15. Procedimiento según la reivindicación 14, caracterizado por el empleo de un elemento de control deslizante de estado teórico (5) según una de las reivindicaciones 1 a 13.

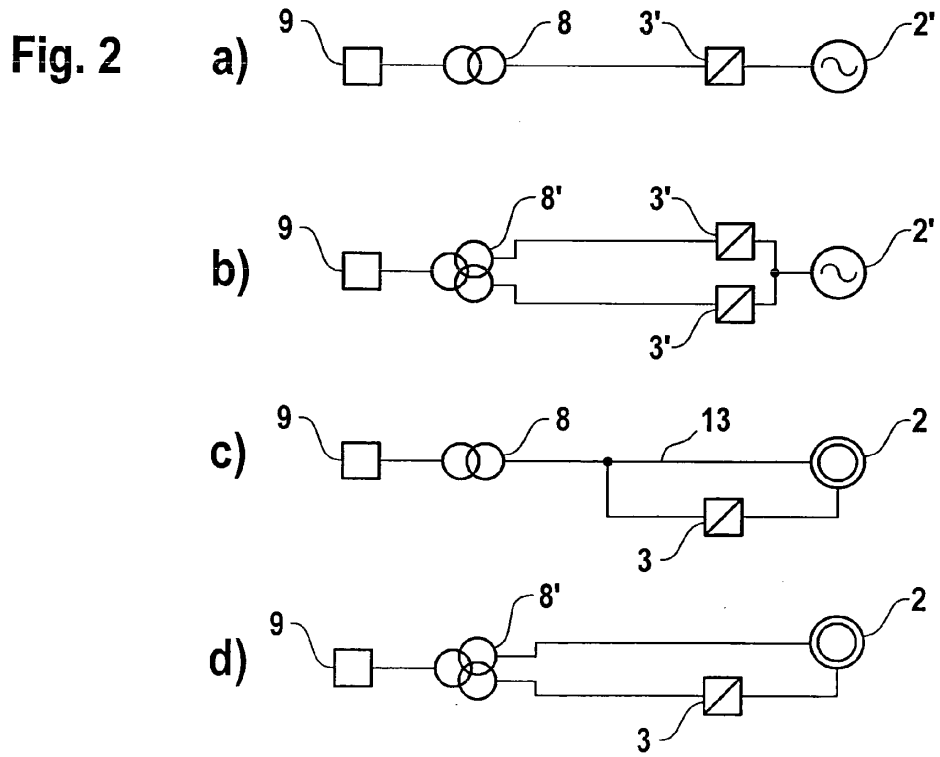
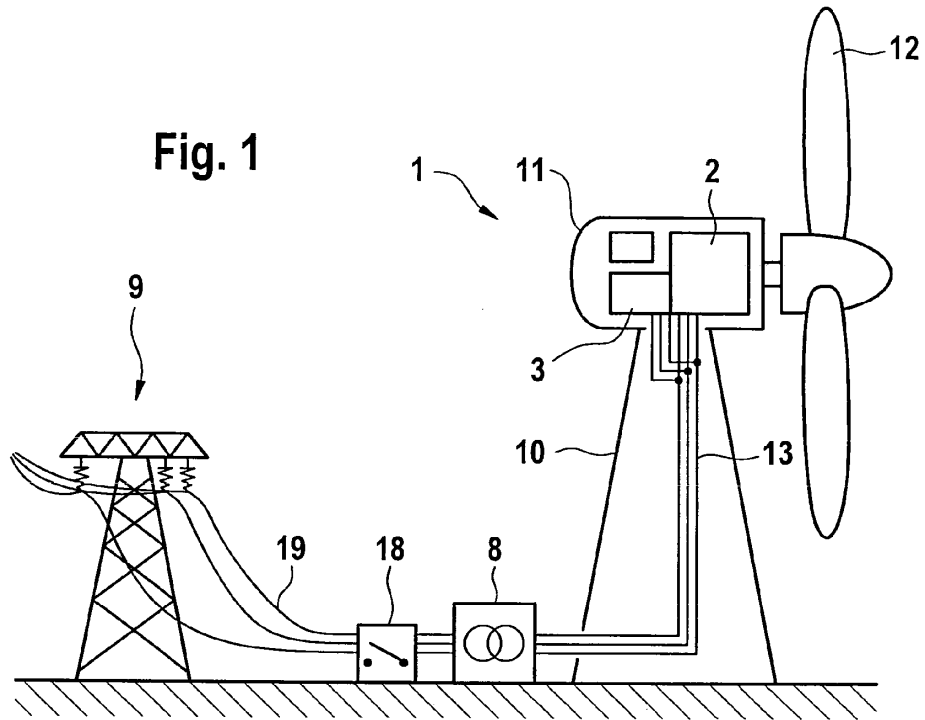


Fig. 3

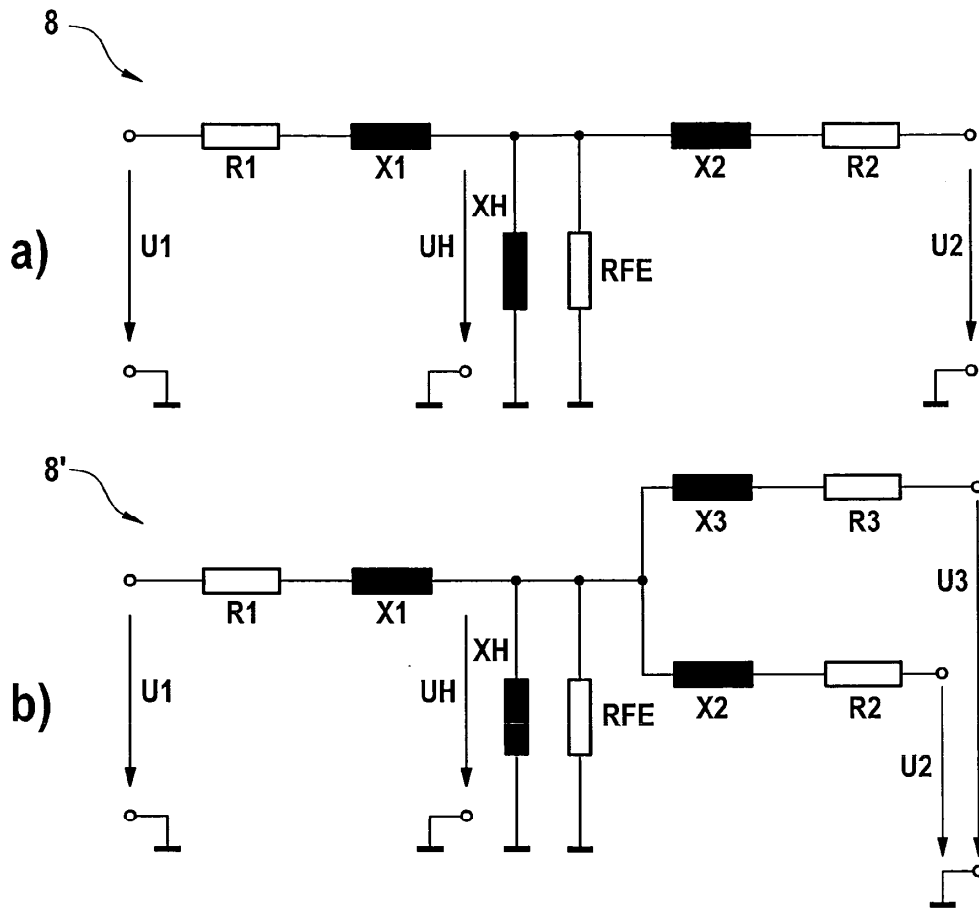
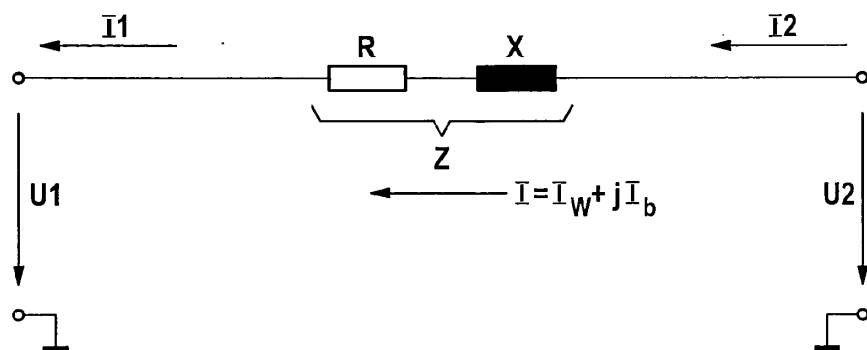


Fig. 5



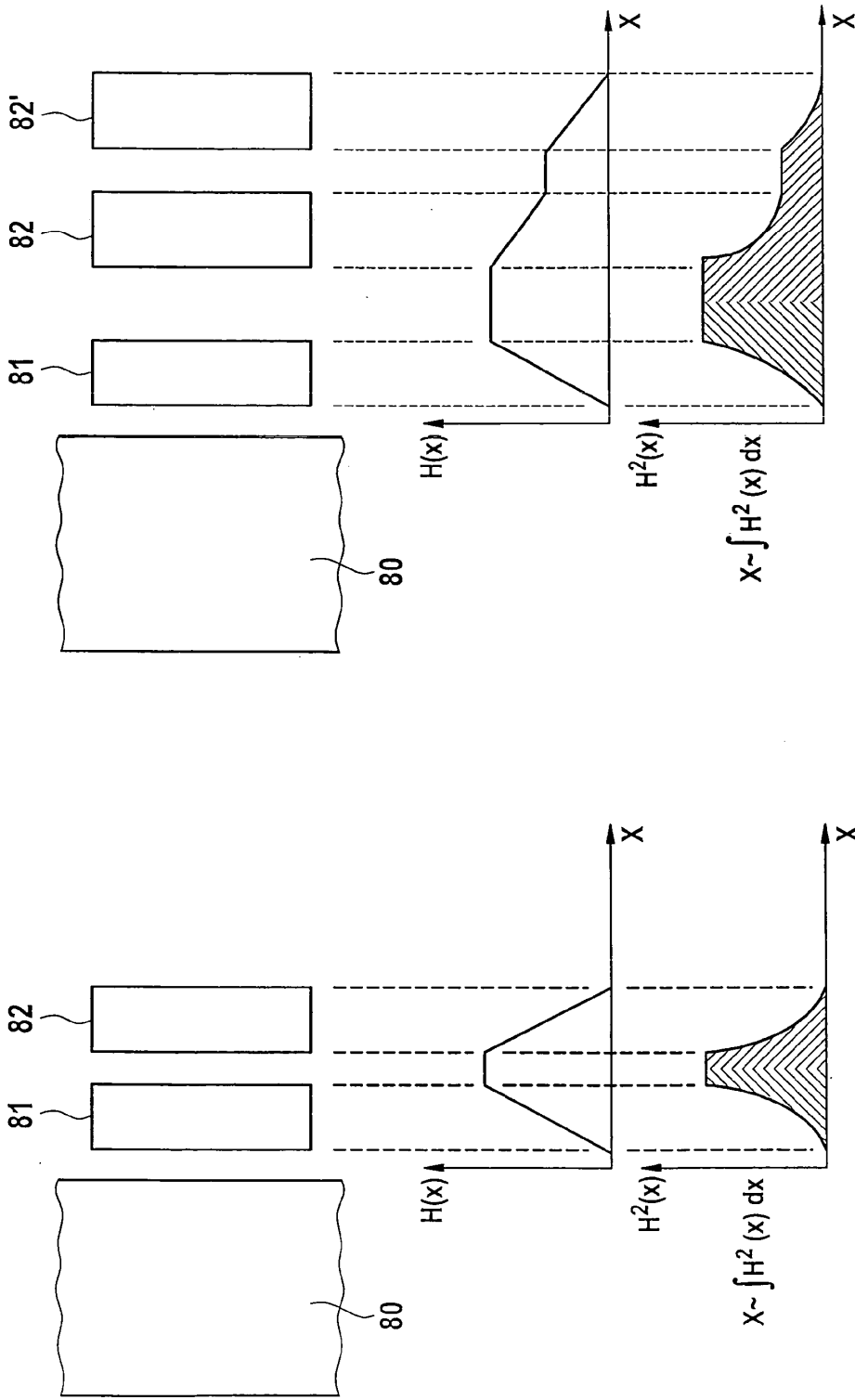


Fig. 4 b)

a)

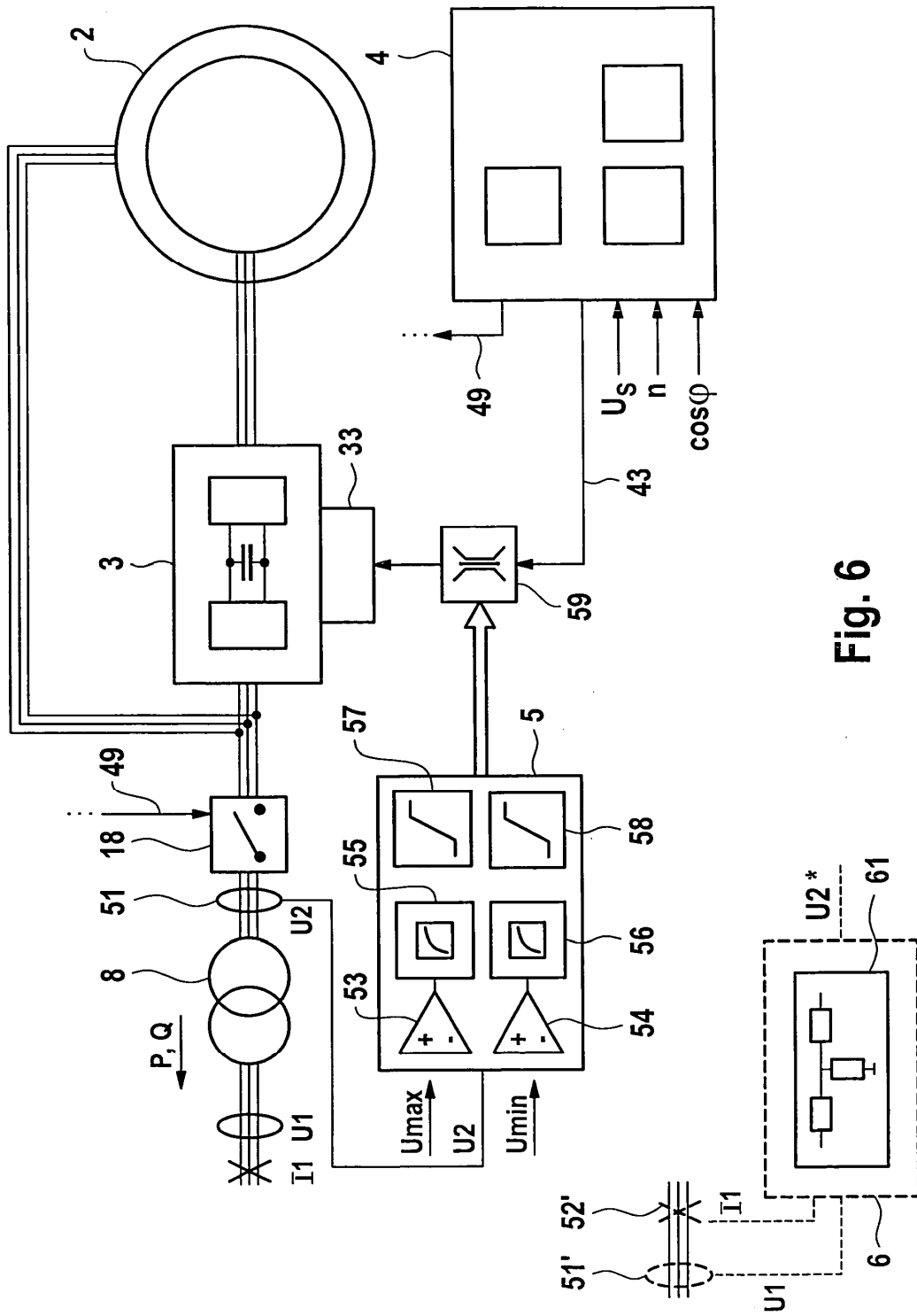


Fig. 6

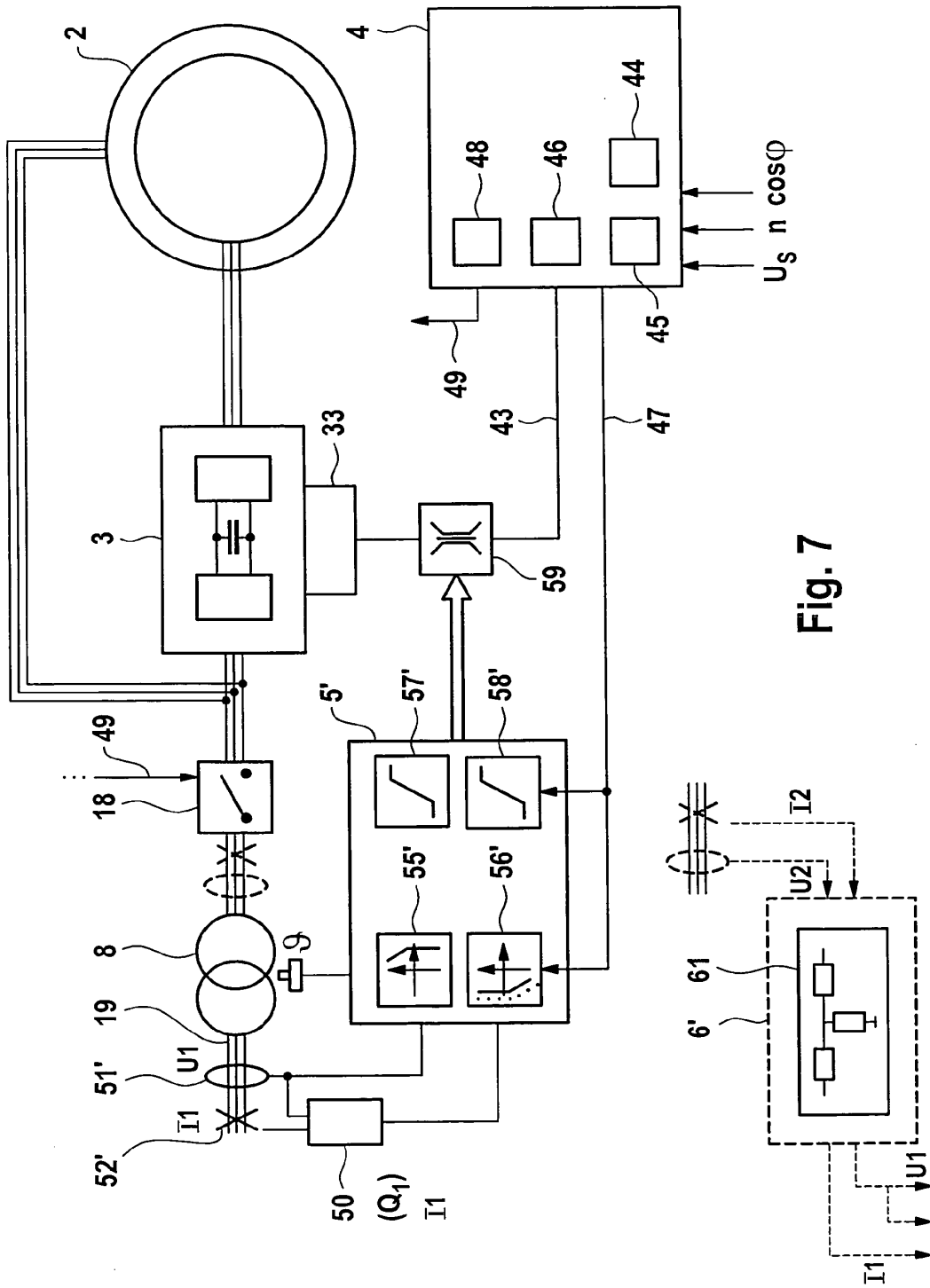


Fig. 7

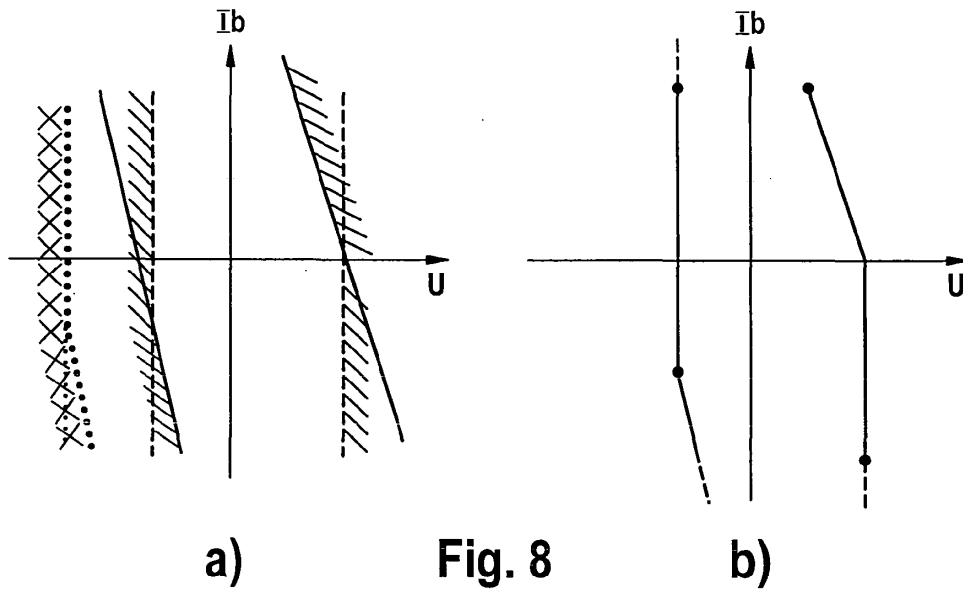


Fig. 8

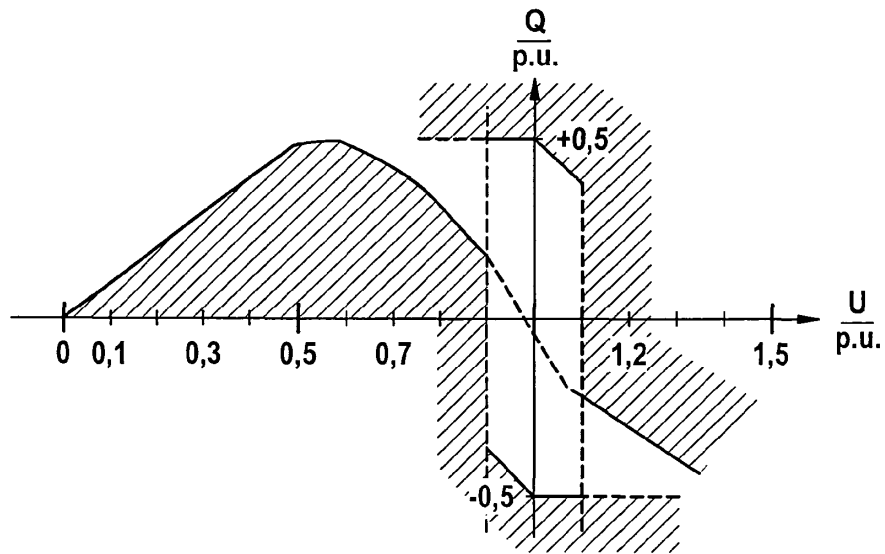


Fig. 9

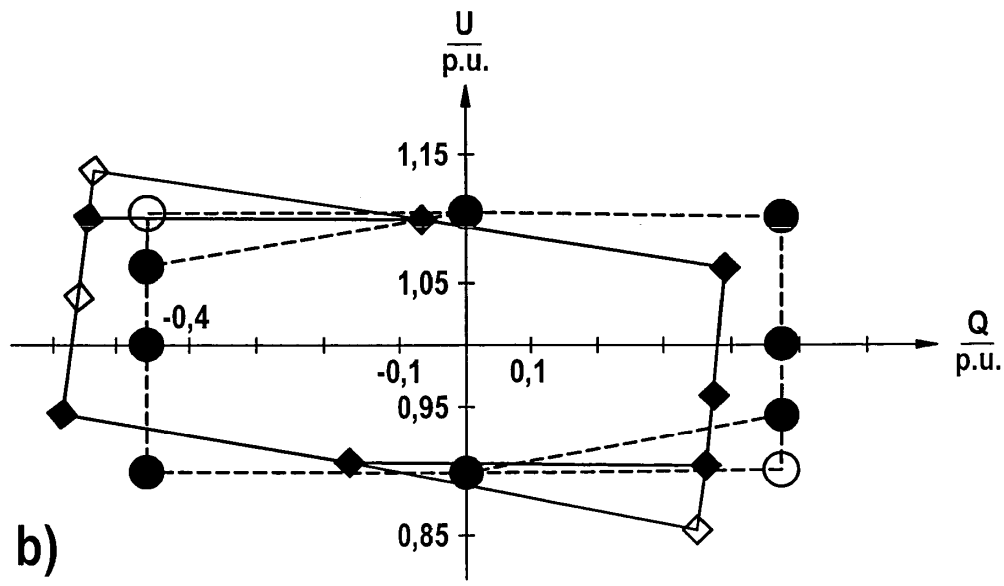
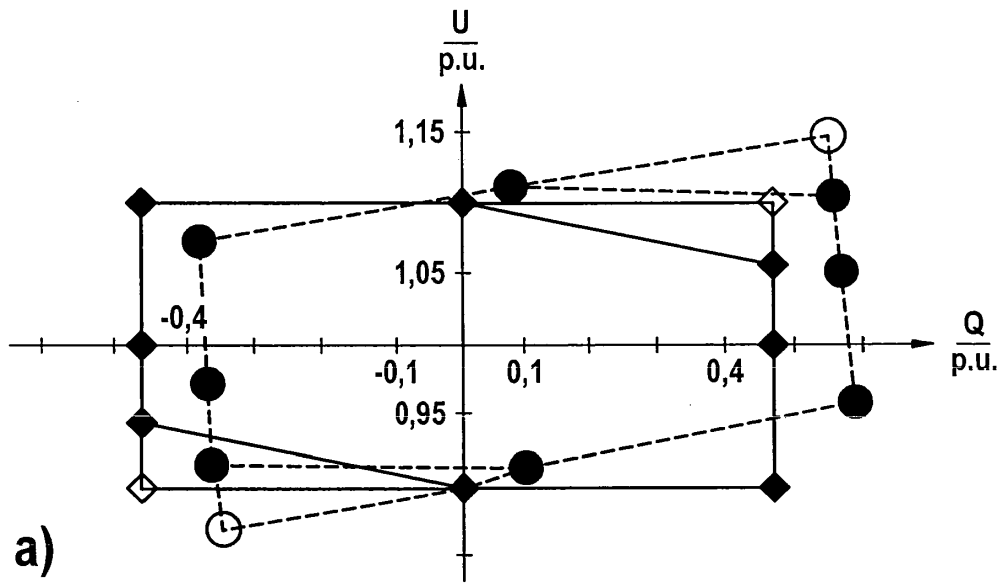


Fig. 10