

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 914 580**

51 Int. Cl.:

**H02P 9/10** (2006.01)

**H02J 3/38** (2006.01)

**H02J 3/46** (2006.01)

**H02J 3/50** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **24.10.2018** **E 18202344 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **02.03.2022** **EP 3644497**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo para el control de inercia de masa virtual para centrales eléctricas con máquina asíncrona de doble alimentación**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**14.06.2022**

73 Titular/es:

**GE ENERGY POWER CONVERSION  
TECHNOLOGY LTD. (100.0%)  
Boughton Road, Rugby  
Warwickshire CV21 1BU, GB**

72 Inventor/es:

**GESKE, MARTIN**

74 Agente/Representante:

**LINAGE GONZÁLEZ, Rafael**

ES 2 914 580 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 el control de inercia de masa virtual para centrales eléctricas con máquina asíncrona de doble alimentación

5

La presente invención se refiere en general a procedimientos y dispositivos para el control de inercia de masa virtual para centrales eléctricas con máquina asíncrona de doble alimentación y, en particular, a un procedimiento para el funcionamiento de una central eléctrica con una máquina asíncrona de doble alimentación, a un dispositivo convertidor para ello y a una central eléctrica con este.

10

En vista de la expansión de las redes para la generación y distribución de energía eléctrica con un número creciente de centrales eléctricas de diferentes diseños y un mayor uso de energías renovables, las instalaciones de energía eólica son cada vez más importantes. La mayoría de las instalaciones de energía eólica se operan a velocidad de giro de rotor variable, donde se utilizan convertidores de frecuencia para adaptar las frecuencias de salida variables del

15

generador del lado del rotor a la frecuencia de red. Un concepto de instalación muy extendido utiliza un generador síncrono de accionamiento directo con excitación magnética permanente o con excitación eléctrica. Pero, el convertidor se debe diseñar con respecto a su potencia nominal aproximadamente conforme a la potencia de la instalación. Un concepto preferido utiliza una máquina asíncrona de doble alimentación (MADA), que es una máquina asíncrona de rotor de anillo deslizante que se alimenta tanto a través de conexiones de estator como también de rotor.

20

Para la aplicación, el estator de la máquina asíncrona está conectado por lo general a través de un transformador de red o también directamente a una red eléctrica, mientras que el rotor está conectado a la red o transformador de red a través de un convertidor de frecuencia, que sirve para regular la velocidad de giro, la potencia activa y la potencia reactiva. Esto hace posible el funcionamiento tanto supersíncrono como subsíncrono con respecto a la frecuencia de red y, por lo tanto, la velocidad de giro del generador es variable. Solo una parte de la potencia debe ajustarse a la

25

frecuencia y potencia deseadas a través del convertidor. A este respecto, el convertidor puede construirse para que sea más pequeño, más rentable y menos perjudicial que un generador síncrono comparable, lo que también resulta en una mejor eficiencia general del sistema. Otras ventajas de la máquina asíncrona de doble alimentación sobre las máquinas síncronas también incluyen una alta eficiencia operativa con carga parcial, la capacidad de regular por separado la potencia reactiva y la potencia activa, la capacidad de controlar el factor de potencia y una mayor dinámica.

30

En los últimos tiempos, los sistemas de energía eléctrica se modifican de los dispositivos de abastecimiento centrales de las centrales eléctricas a una mayor alimentación descentralizada de sistemas fotovoltaicos e instalaciones de energía eólica. Las centrales eléctricas clásicas están acopladas principalmente a la red eléctrica a través de generadores, mientras que el acoplamiento de red de las energías renovables y el almacenamiento descentralizado se realizan principalmente a través de inversores y convertidores. Los generadores de las centrales eléctricas clásicas disponen de masas rotativas, cuya inercia se puede utilizar para apoyar la frecuencia de red en caso de fluctuaciones, en particular caídas repentinas de la frecuencia de red, por ejemplo, como resultado de una pérdida repentina de potencia de alimentación o un aumento repentino de la demanda de carga. El generador puede soportar la frecuencia del sistema gracias a la energía almacenada en la masa rotativa, hasta que otras unidades generadoras asuman el soporte de frecuencia en el marco de la regulación primaria después de aproximadamente 10 a 30 segundos. Con el aumento de la proporción de la alimentación de fuentes de energía renovables a través de convertidores de corriente en relación con las centrales eléctricas clásicas, se reduce la proporción de energía cinética almacenada de los generadores de la central eléctrica, a la que, en caso necesario, se podría recurrir para el soporte dinámico de la frecuencia de red. Sin embargo, además existe una necesidad o una exigencia de un soporte de frecuencia de red

35

40

45

dinámico semejante tanto en redes interconectadas como en una red en isla.

Un soporte de frecuencia dinámico en caso de una caída repentina de la frecuencia de red se puede realizar en general mediante una mayor entrega de potencia activa teniendo en cuenta la estática de la red de corriente alterna. La alta dinámica de los componentes electrónicos de potencia, como MOSFET, IGBT y similares, que se utilizan en los convertidores, es muy adecuada para suministrar energía de un elemento de almacenamiento como potencia activa a la red eléctrica a soportar de inmediato con la ayuda del convertidor. En las instalaciones de energía eólica, la energía cinética de los elementos rotativos, en particular las palas de rotor, se puede utilizar para aumentar la salida de potencia. Para ello, por ejemplo, la curva característica de la instalación se puede operar modificada, de tal manera que el par de fuerzas y la salida de potencia activa se incrementan más allá de la potencia de instalación nominal, donde la velocidad de rotación disminuye lentamente y se reduce la energía de rotación. El principio explicado se denomina como inercia de masa virtual (VM, por sus siglas en alemán) o la emulación de inercia de masa virtual y se describe, por ejemplo, en Xiaorong Zhu et.al. «Virtual inertia control of DFIG-based wind turbines for dynamic grid frequency support», Proceedings of the IET Renewable Power Generation Conference, Edimburgo, UK, 6-8 de septiembre de 2011, págs. 1-6.

55

60

Para instalaciones de energía eólica con una máquina asíncrona de doble alimentación (MADA), para emular la inercia de masa, la curva característica de la instalación se cambia de potencia a velocidad de giro a una curva característica de inercia de masa virtual, de tal manera que, para un amplio rango de velocidad de giro, la potencia de la instalación se sitúa cerca de la potencia de salida requerida o también máxima posible. El funcionamiento de la inercia de masa virtual se realiza a través de una disminución incrementada de la potencia eléctrica, que en este caso supera la potencia mecánica o la potencia eólica de la instalación, lo que tiene como consecuencia un descenso de la velocidad

65

de giro y una disminución lenta de la energía de rotación. Para una velocidad de giro por encima de la velocidad de giro de sincronización  $n_{syn}$ , la potencia entregada puede estar ventajosamente por encima de la potencia nominal y por debajo o igual a la potencia máxima de la instalación. El modo de funcionamiento de la inercia de masa virtual puede tardar unos 10 segundos o más.

5

Debido al enclavamiento de velocidad de giro de la MASA en el modo de funcionamiento de inercia de masa virtual, la máquina pasa muy lentamente de un funcionamiento supersíncrono a uno subsíncrono y, a este respecto, atraviesa en el caso general el punto de sincronización con  $n_{syn}$ . No obstante, el paso del punto de sincronización tiene como resultado una carga significativamente elevada de los componentes de semiconductores de potencia del convertidor, en particular del convertidor de corriente del lado del rotor, ya que las frecuencias de rotor muy bajas en el rango de la velocidad de giro de sincronización tienen como resultado una temperatura de la capa de bloqueo significativamente mayor.

10

Una desventaja de las máquinas asíncronas de doble alimentación es que, durante el funcionamiento con una proximidad creciente a su velocidad de giro de sincronización, la carga térmica cíclica de los componentes de semiconductores de potencia y de otros componentes aumenta significativamente. Los dispositivos semiconductores que se utilizan en la electrónica de potencia de los convertidores son susceptibles a fluctuaciones de temperatura de unión considerables que resultan del funcionamiento de la máquina cerca de la velocidad síncrona, por lo que se puede reducir la vida útil de los convertidores. Dado que la frecuencia de la corriente del rotor en una máquina asíncrona de doble alimentación está determinada por la frecuencia de flujo de estator, por lo tanto, la frecuencia de red, y la velocidad de giro de rotor, y un funcionamiento cerca de la velocidad de giro de sincronización conduce a una frecuencia de corriente de rotor baja, estas corrientes del rotor causan una carga térmica considerable en los dispositivos semiconductores. En este sentido, la salida de potencia máxima de la instalación de energía eólica y del convertidor cerca del punto de sincronización también está limitada claramente en comparación con un funcionamiento a velocidad de giro nominal en el funcionamiento supersíncrono.

15

20

25

Después de que la operación de inercia de masa virtual finaliza después de aproximadamente 10 segundos, la instalación de energía eólica cambia de la curva característica de inercia de masa virtual de vuelta a la curva característica de la instalación para el funcionamiento normal. A este respecto, la velocidad de giro reducida aumenta de nuevo y se dirige en esta curva característica a un punto de trabajo con una velocidad de giro de rotor más alta. Esta transición de modo de funcionamiento se denomina recuperación de velocidad de giro. En la recuperación de velocidad de giro, el punto de sincronización se atraviesa de nuevo y la carga térmica de los componentes de potencia de semiconductores es muy alta, especialmente porque las temperaturas de la capa de bloqueo significativamente más altas ya están predeterminadas como condición previa para la recuperación de velocidad de giro a través del funcionamiento de inercia de masa virtual. En este caso, el margen térmico puede ser eventualmente casi cero, o puede ser necesaria una limitación adicional en los valores límites de corriente máximos, con lo que se reduce el rendimiento de la instalación en términos de suministro de potencia activa y reactiva. Esto debe evitarse en la medida de lo posible.

30

35

40

Además, el convertidor y la instalación de energía eólica también pueden estar limitados por límites de corriente reducidos para el paso de posibles fallos de red. Los operadores de red exigen, en el caso de determinados fallos de red, como por ejemplo caídas de tensión causadas por cortocircuitos, un denominado acoplamiento de subtensión de la instalación para el apoyo dinámico de la red. En este tipo de funcionamiento, el convertidor se carga igualmente muy fuertemente por altas corrientes, ya que, conforme a la exigencia en términos de profundidad de caída de tensión, parcialmente incluso tiene que alimentar más que la potencia activa y reactiva completa en el punto de conexión. Además, el rotor aplica corrientes muy altas al convertidor de corriente del lado del rotor del convertidor de frecuencia, ya que la baja tensión residual del lado de la red reduce allí la magnetización. Si mediante el funcionamiento de la inercia de masa virtual se aplica completamente el margen térmico, entonces ya no se puede realizar un soporte de red dinámico para una caída de tensión de red repentina. Pero, por los operadores de red se exige cada vez más un soporte de red dinámico de este tipo de forma incondicional.

45

50

Se conoce que la corriente máxima para el rango de velocidad de giro crítico se puede incrementar alrededor de la velocidad de giro de sincronización cuando se reducen las pérdidas de semiconductores para reducir la temperatura de la capa de bloqueo. Para ello, se pueden utilizar componentes seleccionados con bajas pérdidas de conductividad, no obstante, lo que incrementa los costes de producción y almacenamiento. También puede ser útil un sobredimensionamiento de los semiconductores de potencia del convertidor y/o de la instalación de refrigeración para una refrigeración mejorada. No obstante, esto conduce a mayores costos de inversión, que generalmente no se pueden justificar en el caso relativamente raro de soporte de frecuencia por parte del funcionamiento de inercia de masa.

55

60

También se puede reducir la frecuencia de conmutación en un punto de trabajo correspondiente para incrementar la posible corriente de salida. Una adaptación de la frecuencia de conmutación en función del punto de trabajo teniendo en cuenta la temperatura de capa de bloqueo máxima se conoce, por ejemplo, por el documento US 5 610 543 A. No obstante, una reducción en la frecuencia de conmutación conduce a un aumento en los armónicos de corriente y tensión, que requieren un mayor esfuerzo de filtrado para poder cumplir con las condiciones de conexión correspondientes.

65

Por el documento US 8 035 240 B2 se conoce un regulador con una característica de velocidad de giro - par de fuerzas modificada para el rango de velocidad de giro cerca del punto de sincronización. En caso necesario, el regulador modifica la característica de la instalación con respecto a la característica de velocidad de giro - par de fuerzas cerca del punto de sincronización, de tal manera que las temperaturas de la capa de bloqueo de los interruptores 5 semiconductores de potencia y la corriente requerida del convertidor de corriente del lado del rotor se pueden limitar para no exceder los valores límite permitidos. Los parámetros y valores límite del regulador se basan en las temperaturas de la capa de bloqueo de los semiconductores de potencia utilizados durante el funcionamiento, sus datos de fiabilidad y/o las corrientes máximas correspondientes. Este enfoque de solución requiere que la característica de la instalación se debe adaptar a nivel del sistema para proteger el convertidor de la sobrecarga. Sería 10 preferible una solución técnica para el convertidor que sea independiente de la instalación de energía eólica y del sistema como tal.

El documento US 2016/0348646 A1 describe en general cómo se puede seguir la potencia de salida de una instalación de energía eólica basada en MASA con la ayuda de una o varias mediciones de temperatura en componentes de 15 instalación seleccionados. Este tipo de limitación de potencia está sujeto a un retraso temporal debido a las constantes de tiempo térmicas. Para los interruptores semiconductores de potencia de los convertidores, este tipo de limitación de corriente sería demasiado lento. Una medición de temperatura en o cerca de la placa de fondo de la instalación en conexión con los disipadores de calor da lugar a constantes de tiempo térmicas en el rango de segundos, mientras que los semiconductores de potencia presentan, conforme a la impedancia térmica transitoria, constantes de tiempo 20 en el rango de microsegundos a milisegundos.

El documento US 9 548 690 B2 describe un sistema y procedimiento para instalaciones de energía eólica con una MASA, que adaptan los parámetros del regulador para el regulador de corriente en función de la velocidad de giro de la instalación. Para un caso de sobrecarga de la inercia de masa virtual con una disminución de la velocidad de giro 25 en el rango de segundos, una solución de este tipo no ofrecería ninguna ventaja, ya que la dinámica del regulador no influye en este rango de tiempo.

El documento WO 2015/014368 A1 describe un método que evalúa una sobrecarga breve de una instalación de energía eólica mediante una simulación de la carga de componentes mecánicos y una comparación del diseño de 30 componentes correspondiente. Este enfoque considera las reservas de diseño adicionales de los componentes individuales para poder utilizarlos para una sobrecarga breve. Requiere un conocimiento detallado de los componentes, no obstante, no ofrece la posibilidad del uso optimizado del convertidor de corriente en caso de sobrecarga en el rango de velocidad de giro de sincronización en un funcionamiento de inercia de masa virtual.

El documento DE 10 2010 014 165 A1 describe una instalación de energía eólica con un rotor eólico, un generador asíncrono de doble alimentación, un convertidor, una regulación de velocidad de giro y un control de convertidor. La regulación de velocidad de giro determina un valor de consigna para la velocidad de giro de rotor eólico y coopera con el control del convertidor, de tal manera que se ajusta un momento eléctrico semejante para alcanzar la velocidad de giro correspondiente. Está prevista una regulación adicional para generar, si es necesario, teniendo en cuenta un 40 momento de inercia del rotor, una señal de cambio de velocidad de giro que modifica la señal de velocidad de giro nominal para extraer energía cinética de forma controlada del rotor eólico mediante la reducción de la velocidad de giro, que se convierte en energía eléctrica adicional por el generador. De esta manera, mediante el cambio de velocidad de giro se puede poner a disposición de manera dirigida la potencia de regulación primaria también en condiciones de viento inestables. Un módulo de supervisión de valores límite está previsto para limitar o desactivar la 45 regulación adicional en función de una infracción de valores límite, para evitar una sobrecarga de la instalación de energía eólica debido a la facilitación de la potencia adicional. Dichos valores límite pueden ser límites de diseño electrotécnico, tales como corrientes aparentes, activas o reactivas, tensiones o límites térmicos en los semiconductores del convertidor. En particular, en caso de un sobrepaso de un par de fuerzas límite dependiente de la velocidad de giro, el momento en el rango de la velocidad de giro de sincronización se puede limitar fuertemente 50 para proteger el convertidor de una sobrecarga térmica.

Partiendo de esto, el objetivo de la presente invención es crear medidas para el control de las corrientes y relaciones de potencia dentro de una central eléctrica, en particular una instalación de energía eólica, con una máquina asíncrona de doble alimentación (MASA), que permitan una limitación efectiva de la carga térmica en el rango de la velocidad de 55 giro de sincronización durante el funcionamiento de la inercia de masa virtual (VM). Esto preferentemente, sin tener que adaptar para ello el sistema de orden superior o la característica de instalación de la central eléctrica.

Este objetivo se consigue mediante el procedimiento para operar una central eléctrica con una máquina asíncrona de doble alimentación con las características de la reivindicación independiente 1 y el dispositivo convertidor para una 60 máquina asíncrona de doble alimentación de una central eléctrica según la reivindicación 20. Formas de realización especialmente ventajosas de la invención son objeto de las reivindicaciones dependientes.

Según un aspecto de la invención se crea un procedimiento para operar una central eléctrica con una máquina asíncrona de doble alimentación, cuyo estator está conectado a una red eléctrica (a través de un transformador de red 65 o directamente) y cuyo rotor está conectado a la red eléctrica a través de un convertidor. La central eléctrica presenta un modo de funcionamiento normal, en el que se opera conforme a una curva característica predeterminada de la

instalación para alimentar la potencia nominal en una red, y además presenta un modo de funcionamiento de inercia de masa virtual (VM), en el que la alimentación de potencia se incrementa más allá de la potencia de instalación nominal, mientras que la energía de rotación del rotor se reduce. El procedimiento en el modo de funcionamiento de la inercia de masa virtual (modo de funcionamiento VM) presenta la etapa de la determinación de una velocidad de 5 giro de rotor actual y una tasa de cambio de velocidad de giro actual del rotor. Alternativamente, el procedimiento presenta una determinación de una frecuencia de rotor actual y una tasa de cambio de frecuencia de rotor. El procedimiento presenta además la etapa de la reducción de un valor límite de corriente máximo actual para una corriente de rotor a proporcionar por el convertidor en función de los valores actuales determinados de la velocidad de giro y de la tasa de cambio de velocidad de giro o frecuencia y tasa de cambio de frecuencia de rotor, cuando la 10 velocidad de giro mecánica actual del rotor se sitúa en un rango de velocidad de giro predeterminado alrededor de una velocidad de giro de sincronización del rotor o la frecuencia de rotor actual se sitúa en un rango predeterminado alrededor de una frecuencia cero del rotor. El procedimiento presenta además la etapa de la determinación de un valor de consigna actual para la corriente de rotor en base a una potencia a proporcionar entre la red eléctrica y la máquina asíncrona de doble alimentación (MASA). El procedimiento presenta además la etapa de la excitación del convertidor para conmutar tensiones y corrientes sinusoidales pulsadas con el valor de consigna de corriente de rotor actual o, si 15 el valor de consigna de corriente de rotor actual alcanza o supera el valor límite de corriente de rotor máximo actual, con el valor límite de corriente de rotor máximo actual al rotor.

Según la invención, por lo tanto, el valor límite máximo para la corriente de rotor en el entorno de la velocidad de giro 20 de sincronización (o la frecuencia cero de rotor) se reduce o limita cada vez más en función de tanto la velocidad de giro, en particular la proximidad de la velocidad de giro actual a la velocidad de giro de sincronización (la proximidad de la frecuencia de rotor a la frecuencia cero), como también de la tasa de cambio de velocidad de giro de rotor (la tasa de cambio de la frecuencia de rotor), es decir, la velocidad de aproximación a la velocidad de giro de sincronización (frecuencia cero de rotor) o del paso de la misma. De este modo, la carga en el rango de la velocidad 25 de giro de sincronización se puede limitar de manera efectiva conforme al funcionamiento de inercia de masa virtual individual, sin que el sistema de orden superior o la característica de la instalación de la central eléctrica se tenga que adaptar para ello. La medida se puede implementar completamente a nivel del convertidor, con conocimiento de la característica de la instalación y las magnitudes medibles en el sistema. Esto ofrece la ventaja de que solo un componente del sistema se debe parametrizar y adaptar de forma correspondiente, mientras que la regulación y el 30 control de la central eléctrica no se deben adaptar para ello. También se pueden ampliar rápida y fácilmente las centrales eléctricas existentes basadas en MASA con la función de seguridad según la invención. La invención asegura que un funcionamiento de inercia de masa virtual por encima de la potencia nominal para el soporte de frecuencia o tensión de la red se pueda lograr sin que se sobrepase la carga térmica máxima y las temperaturas de capa de bloqueo máximas de los interruptores semiconductores de potencia de convertidores, tales como, por ejemplo, MOSFET, IGBT 35 o similares, y diodos de rueda libre asociados, y sin que el margen térmico se aplique completamente por el funcionamiento de inercia de masa virtual. Por lo tanto, también se puede garantizar que en caso de una caída de la tensión de red siempre se pueda producir un soporte de red dinámico.

El rango de velocidad de giro predeterminado alrededor de la velocidad de giro de sincronización para la reducción 40 del valor límite de corriente máximo está determinado por una frecuencia de corriente de rotor predeterminada mínima para el funcionamiento estacionario o diferencia de velocidad de giro entre la velocidad de giro de rotor y la velocidad de giro de sincronización  $n_{syn}$ , que se puede situar en el rango de +/- 10 a 15 por ciento o incluso hasta +/- 5 de la velocidad de giro de sincronización. Este rango de velocidad de giro predeterminado puede coincidir con el rango de velocidad de giro para el funcionamiento de inercia de masa virtual (funcionamiento de VM), también puede ser 45 preferentemente solo un rango parcial más estrecho dentro del rango de velocidad de giro de funcionamiento de inercia de masa virtual. Esto se aplica análogamente al rango de frecuencia de rotor predeterminado alrededor de la frecuencia cero.

Se debe mencionar que la velocidad de giro de rotor y la frecuencia de rotor están en una relación fija entre sí. La 50 diferencia entre la velocidad de giro de rotor  $n_r$  y la velocidad de giro de sincronización  $n_{syn}$  en relación con la velocidad de giro de sincronización caracteriza el así llamado deslizamiento  $s$ . El deslizamiento  $s$  se puede entender en consecuencia como una relación relativa o una indicación porcentual de la diferencia de velocidad de giro con respecto a la velocidad de giro de sincronización. El deslizamiento  $s$  corresponde además a la relación de la frecuencia de rotor  $f_r$  y la frecuencia del estator  $f_s$  o la frecuencia de red  $f_N$ . Además, la velocidad de giro de sincronización de la máquina 55 está en una relación fija con la frecuencia nominal de estator o de red  $f_s$ ,  $f_N$ , que resulta del número de pares de polos  $p$  del generador. Se aplican las relaciones siguientes:

$$s = (n_{syn} - n_r) / n_{syn} = f_r / f_s \quad (1)$$

$$n_{syn} = f_s / p = f_N / p \quad (2)$$

La frecuencia de rotor resultante  $f_r$  resulta de la frecuencia de estator  $f_s$  y de la velocidad de giro actual  $n_r$  teniendo en cuenta el número de pares de polos  $p$ . En el punto de sincronización, la velocidad de giro de rotor  $n_r$  corresponde a la 65 velocidad de giro de sincronización  $n_{syn}$ , y el deslizamiento  $s$  como también la frecuencia de rotor  $f_r$  se convierten en cero.

$$f_r = f_s - n_r \cdot p \quad (3)$$

Debido a las relaciones fijas anteriores, la velocidad de giro del rotor  $n_r$  y la frecuencia de rotor  $f_r$  se pueden considerar como magnitudes equivalentes, y todas las realizaciones y relaciones que aquí se hacen o especifican con respecto a la velocidad de giro de rotor  $n_r$  y la tasa de cambio  $dn_r/dt$  de la velocidad de giro de rotor se aplican de forma análoga también con respecto a la frecuencia de rotor  $f_r$  o la tasa de cambio  $df_r/dt$  de la frecuencia de rotor, incluso si esto no se repite explícitamente aquí.

Según la invención, el valor límite de corriente de rotor máximo puede ser menor para una cantidad menor de la desviación de la velocidad de giro actual del rotor con respecto a la velocidad de giro de sincronización o una relación menor de la frecuencia de rotor con respecto a la frecuencia del estator que para una cantidad mayor de esta desviación o de la relación en un rango parcial del rango de velocidad de giro o rango de frecuencia predeterminado. Esto tanto en el rango de velocidad de giro supersíncrono como también en el subsíncrono. En el caso de la velocidad de giro de sincronización (frecuencia cero de rotor), el valor límite de corriente de rotor máximo es preferentemente el más bajo.

Adicionalmente, el valor límite de corriente de rotor máximo puede ser menor para una cantidad menor de la tasa de cambio de velocidad de giro ( $dn_r/dt$ ) o de la tasa de cambio de frecuencia ( $df_r/dt$ ) del rotor que para una cantidad mayor de la tasa de cambio de velocidad de giro o de la tasa de cambio de frecuencia ( $df_r/dt$ ) del rotor en un rango parcial del rango de velocidad de giro predeterminado alrededor de la velocidad de giro de sincronización del rotor o del rango de frecuencia predeterminado. En otras palabras, el valor límite de corriente de rotor máximo es menor cuando la velocidad de giro (frecuencia de rotor) se acerca al punto de sincronización (frecuencia cero) a una velocidad más baja y lo atraviesa más lentamente que cuando atraviesa el punto de sincronización (frecuencia cero) más rápidamente. Esto tiene en cuenta que en el primer caso es mayor la potencia de pérdidas integrada y, por lo tanto, la carga térmica de los semiconductores por los componentes del convertidor con constantes de tiempo térmicas más grandes (p. ej. disipador de calor).

En formas de realización de un procedimiento cualquiera mencionado anteriormente, el valor límite de corriente de rotor máximo puede presentar en varios rangos parciales del rango de velocidad de giro o rango de frecuencia predeterminado por encima, por debajo y en el entorno de la velocidad de giro de sincronización o frecuencia cero del rotor respectivamente un valor fijo y constante, que respectivamente es menor que aquel para el funcionamiento normal. La curva de valor límite para el valor límite de corriente de rotor máximo es entonces una función de escalera con valores límite de corriente de rotor constantes en las respectivos rangos parciales y saltos de los valores límite de corriente de rotor entre los rangos parciales. El valor límite de corriente de rotor máximo disminuye a la velocidad de giro de sincronización o frecuencia cero en función de la velocidad de giro y su tasa de cambio. Un procedimiento de este tipo se puede implementar de forma extremadamente sencilla.

Alternativamente, el valor límite de corriente de rotor máximo se puede reducir de forma continua a la velocidad de giro de sincronización del rotor conforme a una función matemática de la velocidad de giro y de la tasa de cambio de velocidad de giro o la frecuencia y tasa de cambio de frecuencia del rotor. La función matemática puede ser preferentemente, pero no necesariamente, una función lineal que disminuye monótonamente hacia la velocidad de giro de sincronización (la frecuencia cero). Esto independientemente de la dirección de aproximación, es decir, independientemente de si la velocidad de giro cambia del rango supersíncrono al rango subsíncrono o viceversa del rango subsíncrono al rango supersíncrono durante la recuperación de velocidad de giro. En el entorno o a la velocidad de giro de sincronización (frecuencia cero), el valor límite de corriente de rotor máximo es el más pequeño conforme a la función y tanto más pequeño cuanto menor sea la tasa de cambio de velocidad de giro (tasa de cambio de frecuencia).

Se puede definir ventajosamente una curva de valor límite en la que se sitúa el valor límite de corriente de rotor máximo, donde la curva de valor límite para una tasa de cambio de velocidad de giro (tasa de cambio de frecuencia) negativa en el modo de funcionamiento de la inercia de masa virtual se sitúa por encima de la curva de valor límite correspondiente para una tasa de cambio de velocidad de giro (tasa de cambio de frecuencia) positiva, que corresponde a un modo de funcionamiento de la recuperación de velocidad de giro. Ventajosamente, por lo tanto, también el límite de la corriente de rotor máxima para el funcionamiento durante la recuperación de velocidad de giro se reduce o sigue igualmente en función de la tasa de cambio de velocidad de giro (tasa de cambio de frecuencia). En el caso de que la recuperación de velocidad de giro se realice en un rango justo por debajo o por encima del punto de sincronización, el límite de corriente se puede situar claramente por debajo del límite de corriente de rotor habitual para el funcionamiento normal. Esto permite utilizar el margen térmico para el funcionamiento del soporte de frecuencia por medio de la inercia de masa virtual y operar la recuperación de velocidad de giro con un rendimiento reducido y una característica de la instalación modificada eventualmente.

El valor límite de corriente de rotor máximo se puede incrementar al iniciar el modo de funcionamiento de la inercia de masa virtual en al menos un 5 %, preferentemente al menos un 10 %, en comparación con el valor límite de corriente de rotor máximo para el modo de funcionamiento normal. El valor límite de corriente de rotor máximo se puede reducir además en un cambio del modo de funcionamiento de la masa inercial virtual con velocidad de giro decreciente del rotor a la recuperación de velocidad de giro con velocidad de giro creciente del rotor en al menos un 5 %,

preferentemente al menos un 10 %.

En un perfeccionamiento de un procedimiento cualquiera mencionado anteriormente, el valor límite de corriente de rotor máximo se puede determinar además en función de al menos una temperatura de funcionamiento medida en el convertidor. Se pueden registrar varios valores de medición de temperatura, medidos en diferentes lugares sobre o en el convertidor, y se pueden utilizar para determinar el valor límite de corriente de rotor máximo. Por lo tanto, se pueden tener en cuenta las relaciones de temperatura registradas reales y los márgenes térmicos al determinar o reducir el valor límite de corriente de rotor máximo. Por ejemplo, la temperatura del componente en los componentes de semiconductores y/o la temperatura del disipador de calor y/o la temperatura de avance de un fluido de refrigeración y/u otras temperaturas se pueden medir en lugares adecuados del convertidor. La función del valor límite de corriente de rotor se puede seguir conforme la o las temperaturas. Esto se puede realizar mediante cálculo térmico o en base a una tabla de búsqueda que relaciona el valor límite de corriente de rotor máximo con temperaturas de puntos de detección determinados. De este modo, las corrientes de rotor y las facilitaciones de potencia del convertidor se pueden adaptar mejor a las cargas térmicas momentáneas y a las condiciones ambientales (p. ej. temperaturas exteriores).

En todavía otra forma de realización se puede determinar alternativa o adicionalmente el valor límite de corriente de rotor máximo además en función de una frecuencia de conmutación de elementos de conmutación de semiconductores de potencia del convertidor, en particular de un convertidor de corriente del lado del rotor. Cuanto mayor sea la frecuencia de conmutación, tanto mayores serán también las pérdidas de conmutación y las cargas térmicas de los interruptores de semiconductores de potencia. Ventajosamente se puede elevar entonces el valor límite de corriente de rotor máximo con una frecuencia de conmutación reducida y viceversa. A este respecto, para la limitación adicional de la carga térmica, la frecuencia de conmutación para los interruptores de semiconductores de potencia del convertidor de corriente del lado del rotor se puede reducir en el rango de velocidad de giro predeterminado (rango de frecuencia) del rotor en función de la velocidad de giro y la tasa de cambio de velocidad de giro (frecuencia y tasa de cambio de frecuencia) del rotor. Preferentemente, la frecuencia de conmutación es tanto menor cuanto menor sea la desviación de la velocidad de giro con respecto a la velocidad de giro de sincronización (frecuencia con respecto a la frecuencia cero) del rotor y cuanto menor sea la tasa de cambio de velocidad de giro (tasa de cambio de frecuencia) del rotor. La frecuencia de conmutación se puede reducir, por ejemplo, como función, por ejemplo, una función polinomial, de la velocidad de giro (frecuencia) y de la tasa de cambio de velocidad de giro (tasa de cambio de frecuencia) del rotor.

En una forma de realización especialmente preferida del procedimiento, un dispositivo de control interno puede estar concebido para el control del funcionamiento del convertidor para el "autodiagnóstico", reconociendo de forma independiente un quedar por debajo de un valor umbral de la frecuencia de red por debajo de la frecuencia nominal de red durante una duración de valor umbral predeterminada como la exigencia de un soporte de frecuencia de red por el tipo de funcionamiento de la inercia de masa virtual. Acto seguido, el dispositivo de control puede activar de forma independiente el modo de funcionamiento de la inercia de masa virtual. El valor umbral de la frecuencia de red y/o la duración del valor umbral se puede(n) predeterminar directamente por un sistema de control de orden superior de la central eléctrica o por el dispositivo de control interno.

Adicional o alternativamente se puede reconocer un tipo de funcionamiento de la recuperación de velocidad de giro tras la finalización del modo de funcionamiento de la inercia de masa virtual en base a una modificación del signo de la tasa de cambio de velocidad de giro (tasa de cambio de frecuencia), a saber, un cambio de una tasa de cambio de velocidad de giro (tasa de cambio de frecuencia) negativa a una positiva, del rotor. Acto seguido se puede fijar el valor límite de corriente de rotor máximo en una curva de valor límite para la recuperación de velocidad de giro. Esto, a su vez, se puede efectuar por el dispositivo de control interno para el convertidor. Este modo de proceder permite reconocer, independientemente del control de la central eléctrica, si el funcionamiento de la inercia de masa virtual ha finalizado, por ejemplo, en el caso de que para ello no se puedan transmitir más señales al control del convertidor.

El procedimiento según la invención es adecuado en particular para centrales eléctricas basadas en MASA con un convertidor de frecuencia en forma de un convertidor de circuito intermedio de tensión (así llamado Voltage Source Converter, VSC). El convertidor presenta preferentemente un convertidor de corriente del lado del rotor, que está conectado al rotor de la máquina asíncrona, y un convertidor de corriente del lado de la red, que está conectado, por un lado, a la red y, por otro lado, a través de un circuito intermedio de tensión continua al convertidor de corriente del lado del rotor. Esto permite dividir la facilitación de potencia reactiva de forma adecuada en los dos convertidores de corriente, donde se debe cubrir por igual el flujo de potencia activa en el circuito de rotor por ambos. Se pueden utilizar convertidores de corriente de dos puntos o multipunto o convertidores de corriente multipunto modulares que presentan componentes de semiconductores de potencia electrónicos excitables, tal como, por ejemplo, MOSFET, IGBT o similares y diodos.

En conexión con un convertidor de circuito intermedio de tensión, cualquier procedimiento mencionado anteriormente puede presentar además que la potencia activa a proporcionar por el convertidor de corriente del lado del rotor se determina en función de una demanda de potencia activa, es decir, una cantidad de potencia activa solicitada por la red eléctrica, de modo que el valor de consigna de corriente de rotor resultante no exceda el valor límite de corriente de rotor máximo. Eventualmente, la potencia activa alimentada por el convertidor de corriente del lado del rotor se

limita para no exceder el valor límite de corriente de rotor máximo.

Adicionalmente, la potencia reactiva a proporcionar por el convertidor de corriente del lado del rotor se puede determinar en función de una demanda de potencia reactiva, es decir, la cantidad de potencia reactiva requerida por la red, y de la potencia activa actualmente proporcionada de tal manera que el valor de consigna de corriente de rotor resultante no exceda el valor límite de corriente de rotor máximo. Eventualmente se limita la potencia reactiva alimentada o absorbida por el convertidor de corriente del lado del rotor para que no se sobrepase el valor límite de corriente de rotor máximo.

10 En formas de realización preferidas de cualquier procedimiento mencionado anteriormente, en el caso de que el valor de consigna de corriente de rotor actual se limite al valor límite de corriente máximo y la potencia activa proporcionable actualmente por el convertidor de corriente del lado del rotor sea menor que la demanda de potencia activa actual, la potencia reactiva proporcionada por el convertidor de corriente del lado del rotor se puede reducir a cero. El convertidor de corriente del lado del rotor conduce entonces, por ejemplo, solo potencia activa.

15 En otras formas de realización, el convertidor de corriente del lado del rotor y el convertidor de corriente del lado de la red se pueden operar ambos para proporcionar exclusivamente potencia activa. En esta forma de realización no se proporciona potencia reactiva.

20 En un perfeccionamiento de cualquier procedimiento mencionado anteriormente, un valor límite de corriente de red máximo actual para el convertidor de corriente del lado de la red se incrementa en el rango de velocidad de giro predeterminado alrededor de la velocidad de giro de sincronización (rango de frecuencia alrededor de la frecuencia cero) del rotor en función de los valores actuales determinados de la velocidad de giro (frecuencia) y de la tasa de cambio de velocidad de giro (tasa de cambio de frecuencia) del rotor y de la demanda de potencia. De este modo se puede compensar el efecto de la reducción del valor límite de corriente de rotor al menos parcialmente con respecto a la generación de potencia reactiva. Es decir, la generación de potencia reactiva reducida en el lado del rotor se puede proporcionar a través del convertidor de corriente del lado de la red. El incremento del valor límite de corriente de red máximo también se puede realizar teniendo en cuenta el valor límite de corriente de rotor máximo actual y/o la facilitación de potencia por parte del convertidor de corriente del lado del rotor. También se pueden recurrir a una o varias temperaturas medidas en el convertidor, tal como, por ejemplo, la temperatura de componente, la temperatura de avance de un fluido refrigerante, la temperatura del disipador térmico o similares, para la posición o el seguimiento del valor límite de corriente de red máximo actual. Esto se puede realizar mediante cálculo térmico o en base a una tabla de búsqueda.

35 El incremento del valor límite de corriente de red máximo actual permite incrementar la potencia reactiva a proporcionar por el convertidor de corriente del lado de la red para compensar al menos parcialmente una facilitación de potencia reactiva insuficiente del convertidor de corriente del lado del rotor, siempre que el valor de consigna de corriente de red resultante no supere el valor límite de corriente de red máximo. Ventajosamente, la facilitación de potencia reactiva por el convertidor de corriente del lado de red se puede incrementar conforme a la reducción de la facilitación de potencia reactiva por el convertidor de corriente del lado del rotor. Mediante la división de la facilitación de potencia reactiva dentro del convertidor, el uso del convertidor en caso de sobrecarga en el rango del punto de sincronización se puede optimizar con vistas a la facilitación de potencia activa y reactiva requerida, sin que se excedan los límites térmicos y las temperaturas de capa de bloqueo máximas de los componentes de semiconductores de potencia del convertidor.

45 Según otro aspecto de la invención se crea un dispositivo convertidor para una máquina asíncrona de doble alimentación (MASA) de una central eléctrica, cuyo estator está conectado directamente a una red eléctrica y cuyo rotor está conectado a la red eléctrica a través del convertidor. El dispositivo convertidor presenta un convertidor de corriente del lado del rotor que está concebido para conectarse con el rotor de la máquina asíncrona. El dispositivo convertidor presenta además un convertidor de corriente del lado de la red, que está concebido para conectarse a la red. El convertidor de corriente del lado de la red está conectado al convertidor de corriente del lado del rotor a través de un circuito intermedio de tensión continua. El dispositivo convertidor presenta además un dispositivo de control para el control de un funcionamiento del convertidor, donde el dispositivo de control presenta medios para la comunicación con un sistema de control de orden superior de la central eléctrica y está concebido para realizar un procedimiento para el funcionamiento de la central eléctrica según cualquier forma de realización descrita anteriormente.

Ventajosamente, el procedimiento según la invención puede estar implementado exclusivamente en el dispositivo de control interno del dispositivo convertidor. No se requiere ninguna adaptación al sistema de orden superior o a la característica de la instalación de la central eléctrica. El procedimiento se puede implementar completamente en el nivel del dispositivo convertidor con un conocimiento directo o indirecto (predeterminado por la instalación) de la característica de la instalación y magnitudes medibles en el sistema. Esto ofrece la ventaja de que solo el dispositivo convertidor se debe parametrizar y adaptar de forma correspondiente, mientras que el control y la regulación de la central eléctrica no se ven afectados.

65 Según todavía otro aspecto de la invención, se crea una central eléctrica con una máquina asíncrona de doble alimentación, cuyo estator está conectado a una red eléctrica y cuyo rotor está conectado a la red eléctrica a través



de un dispositivo convertidor según la invención del tipo descrito anteriormente. La central eléctrica presenta además un sistema de control para el control de un funcionamiento de la central eléctrica, donde el sistema de control, en función de los parámetros de red y parámetros de la central eléctrica, determina los valores de demanda  $P^*$ ,  $Q^*$  para la potencia a proporcionar por la central eléctrica. El dispositivo de control del dispositivo convertidor determina a partir de ello los valores de consigna para la potencia de estator  $P_s$ ,  $Q_s$  a proporcionar y la potencia  $P_r$ , ( $P_n$ ),  $Q_r$ ,  $Q_n$  a proporcionar a través del dispositivo convertidor y luego controla el convertidor de corriente del lado de red y el del lado del rotor tanto en el modo de funcionamiento normal como también en el modo de funcionamiento de la inercia de masa virtual según el procedimiento según la invención según cualquiera de las formas de realización descritas anteriormente en función de los valores de consigne de potencia a proporcionar.

10

Por lo tanto, el control de sistema de orden superior solo proporciona los parámetros de red y las especificaciones de consigna con respecto a la potencia activa y reactiva a proporcionar a través de la central eléctrica, mientras que el dispositivo de control interno del dispositivo convertidor se encarga de la implementación del procedimiento de funcionamiento independientemente del sistema de control de orden superior, de modo que se cumplen las demandas de potencia, es decir,  $P^* = P_s + P_r$  ( $P_r = P_n$ ) y  $Q^* = Q_s + Q_r + Q_n$ . (En este documento, P caracteriza potencia activa y Q potencia reactiva, mientras que los índices s, r y n caracterizan el estator, el convertidor de corriente del lado del rotor o el convertidor de corriente del lado de la red del dispositivo convertidor.) Pero, en principio también es posible que el sistema de control de orden superior de la central eléctrica influya directamente en el control del dispositivo convertidor.

20

La instalación de energía puede ser cualquier central eléctrica renovable basada en MASA, que está conectada a la red a través de un convertidor. Preferentemente, es una instalación de energía eólica de velocidad de giro variable, pero también puede ser una central hidroeléctrica, una central de almacenamiento por bombeo. Tales centrales eléctricas no disponen esencialmente de una masa de inercia o centrífuga mecánica para el almacenamiento intermedio de energía, pero con el procedimiento según la invención se pueden utilizar eficazmente en tipos de funcionamiento con bajas velocidad de giro y/o reducciones de velocidad de giro para apoyar la estabilidad de frecuencia y para mantener la tensión en una red eléctrica evitando sobrecargas térmicas de los componentes de sistema utilizados y en la optimización de la facilitación de potencia activa y reactiva.

25

Por lo demás, las realizaciones anteriores en relación con las formas de realización del procedimiento según la invención y sus ventajas también son válidas de la misma manera para el dispositivo convertidor y la central eléctrica según la invención.

30

Se pueden obtener más detalles ventajosos de las realizaciones de la invención a partir de las reivindicaciones secundarias, el dibujo y la descripción asociada. La invención se describe con más detalle a continuación con referencia a un dibujo que muestra realizaciones a modo de ejemplo de la invención, que no son de ninguna manera limitantes, donde se utilizan números de referencia idénticos en todas las figuras para designar elementos idénticos. Muestran:

35

Figura.1 una instalación de energía eólica a modo de ejemplo con una máquina asíncrona de doble alimentación (MASA) según una forma de realización de la invención, en forma de un diagrama de bloques fuertemente simplificado; Figura 2a, 2b representaciones gráficas que ilustran una característica de la instalación a modo de ejemplo y trayectorias a modo de ejemplo para el funcionamiento de la inercia de masa virtual y temperaturas de capa de bloqueo calculadas a modo de ejemplo;

40

Figura 3 un diagrama de flujo de un procedimiento para operar una central eléctrica con una MASA, por ejemplo, la instalación de energía eólica según la Fig. 1, según una forma realización de la invención, en una representación fuertemente simplificada;

45

Figuras 4a, 4b una característica de la instalación a modo de ejemplo y trayectorias a modo de ejemplo, así como temperaturas de capa de bloqueo calculadas a modo de ejemplo para un funcionamiento de la inercia de masa virtual utilizando un procedimiento según la invención;

50

Figura 5 una curva de valor límite a modo de ejemplo para el valor límite de corriente de rotor máximo  $I_{r,max(VM)}$  como función de la velocidad de giro de rotor y de la tasa de cambio de velocidad de giro del rotor, en representación simplificada;

55

Figura 6 una representación gráfica de la corriente de rotor máxima  $I_{r,max(VM)}$  respecto a la velocidad de giro de rotor  $n_r$ , ilustrando la dependencia de la tasa de cambio de velocidad de giro y de la temperatura de funcionamiento;

60

Figura 7 otra forma de realización de un procedimiento según la invención para un funcionamiento en el modo de inercia de masa virtual, proporcionando una potencia reactiva a través del convertidor de corriente del lado del rotor, en representación simplificada;

65

Figura 8 otra forma de realización de un procedimiento según la invención para un funcionamiento en modo de inercia de masa virtual, proporcionando potencia activa y reactiva a través del convertidor de corriente del lado de la red; Figura 9 una representación gráfica de la corriente de red máxima  $I_{n,max}$  respecto a la velocidad de giro de rotor  $n_r$ , ilustrando un incremento de la corriente de red en función de la corriente de rotor, la temperatura y la demanda de potencia nominal, en representación simplificada;

Figura 10 otra forma de realización de un procedimiento según la invención para un funcionamiento en el modo de inercia de masa virtual, proporcionando potencia activa y reactiva tanto por el convertidor de corriente del lado del rotor como también por el del lado de la red, en representación simplificada; y

Figura 11 una representación gráfica de la corriente de rotor máxima  $I_{r,max}$  y de la frecuencia de conmutación  $f_{sw,r}$  en el lado del rotor respecto a la velocidad de giro de rotor  $n_r$  para ilustrar una modificación adicional de un procedimiento según la invención, en una representación fuertemente simplificada.

5 La figura 1 muestra en una representación de diagrama de bloques fuertemente simplificada una instalación de energía eólica 1 para la generación y transmisión de energía a una red eléctrica 2 según una forma de realización a modo de ejemplo de la presente invención. La instalación de energía eólica 1 representa solo un ejemplo para una central eléctrica, que se basa en una máquina asíncrona de doble alimentación (MASA), se puede operar con velocidad de giro de rotor variable y es capaz de adaptar las frecuencias de salida variables del generador de la central eléctrica a la frecuencia de red para la transmisión de energía.

En el sistema de central eléctrica 1 a modo de ejemplo está representada una unidad de rotación 3, que durante la aplicación para una instalación de energía eólica puede ser una turbina eólica que presenta varias palas de rotor 4. Las palas de rotor 4 están acopladas con un buje rotativo 6 y circulan junto con éste en un árbol 7 cuando se accionan girando por la fuerza del viento. El árbol 7 está acoplado a un engranaje 8 opcional, cuyo árbol de salida 9 está conectado a un generador 11. Según la invención, el generador 11 es una máquina asíncrona de doble alimentación (MASA) 11, que presenta un estator 12 y un rotor 13.

El estator 12 de la MASA 11 está conectado a la red eléctrica 2 a través de un bus o circuito de estator 14, mientras que el rotor 13 está conectado a través de un bus o circuito de rotor 16 a un convertidor 17 y a través de éste a la red 2. El circuito de estator 14 proporciona una potencia de salida bifásica o polifásica, preferentemente trifásica, del estator 12 de la MASA 11, y el circuito de rotor 16 proporciona una potencia bifásica o polifásica, preferentemente trifásica, del rotor 13 de la MASA 11.

El convertidor 17 presenta un convertidor de corriente del lado del rotor 18 y un convertidor de corriente del lado de la red 19, que están conectados entre sí a través de un circuito intermedio de tensión continua 21, en el que está dispuesto un condensador de circuito intermedio de tensión continua 22 para el almacenamiento intermedio de energía. El convertidor de corriente del lado del rotor 18 está acoplado a través del circuito de rotor 16 al rotor 13 de la MASA 11. El convertidor de corriente del lado de la red 19 está conectado a su vez a la red eléctrica 2 a través de un bus o circuito del lado de la red 23.

En configuraciones preferidas a modo de ejemplo, el convertidor de corriente del lado del rotor 18 y el convertidor de corriente del lado de la red 19 están configurados para un modo de funcionamiento normal en una disposición preferentemente trifásica, controlada por modulación de ancho de pulso (PWM), utilizando interruptores de potencia, en particular transistores bipolares con electrodo de puerta aislada (IGBT) como dispositivos de conmutación. Se pueden utilizar otros elementos de conmutación de semiconductores de potencia adecuados, tales como, por ejemplo, IGCT (tiristores conmutados de puerta aislada), MOSFET, transistores bipolares u otros dispositivos de conmutación adecuados. En general, los diodos de rueda libre también están conectados en sentido opuesto en paralelo a los interruptores de semiconductores de potencia para poder conducir corriente en ambas direcciones a través del interruptor.

El convertidor 17 está acoplado a un dispositivo de control 24 que sirve para el control del funcionamiento del convertidor de corriente del lado del rotor 18 y del convertidor de corriente del lado de la red 19. Por ejemplo, el dispositivo de control 24 puede enviar comandos de control a los convertidores de corriente 18, 19 para modificar la modulación de los elementos de conmutación, por ejemplo, IGBT, que se utilizan en el convertidor 17 para controlar con el fin de lograr una salida de potencia activa y reactiva deseada. El dispositivo de control 24 puede ser cualquier circuito de control adecuado. Por ejemplo, el dispositivo de control puede contener distintos componentes de hardware, tales como reguladores, convertidores de señal y otros dispositivos que se utilizan para el procesamiento de señales recibidas en el dispositivo de control 24. El dispositivo de control 24 puede contener preferentemente un dispositivo de procesamiento, por ejemplo, un procesador, microprocesador, microcontrolador o similares, que almacena instrucciones ejecutables por ordenador que están almacenadas en un medio legible por ordenador. Cuando se realizan a través del dispositivo de procesamiento, estas instrucciones pueden hacer que el dispositivo de procesamiento lleve a cabo ciertas operaciones de control, tal como, por ejemplo, la regulación de la tensión de la instalación de energía eólica 1 basada en MASA para la alimentación a la red eléctrica 2.

Como se ilustra en la fig. 1, el dispositivo de control 24 recibe una serie de señales de medición que caracterizan las magnitudes de funcionamiento actuales y que el dispositivo de control 24 utiliza para el control del funcionamiento del convertidor 17. Las señales de medición están representadas en la fig. 1 en línea a trazos, mientras que las líneas de señal de control están ilustradas en línea continua. Como se puede ver en la fig. 1, a las señales de medición pertenecen las tensiones  $u$  y corrientes  $i$  medidas en el circuito de rotor 16 así como en el circuito del lado de la red 23. Además, también se pueden detectar las tensiones  $u$  y las corrientes  $i$  del circuito de estator 14 y suministrarse al dispositivo de control 24. Además, a través de las tensiones medidas  $u$  en el circuito de estator y/o en el circuito de red 23 se mide o determina la frecuencia de red de la red 2. Además, la velocidad de giro  $n_r$  del árbol de salida de engranaje 9, que forma al mismo tiempo el árbol de rotor del rotor 13, se detecta por medio de un sensor de velocidad de giro 251. Además, también se pueden medir temperaturas sobre o en el convertidor 17 por medio de un dispositivo de medición de temperatura 252. Como se indica en la fig. 1 por las líneas de medición designadas con  $\vartheta$ , se pueden

registrar temperaturas en diferentes lugares, por ejemplo directamente en los elementos de conmutación de semiconductores de potencia, en particular IGBT, cuyos controladores de puerta, los disipadores de calor de los grupos de interruptores, la temperatura del armario o también en el avance de un fluido de refrigeración para los circuitos.

5 El convertidor 17, junto con el dispositivo de control 24 y diversos dispositivos de medición, en particular las cuchillas de tensión y corriente en el circuito de rotor 16 y el circuito de red 23, puede formar un dispositivo convertidor 26, que se puede integrar o ensamblar y preparametrizar preferiblemente en una unidad constructiva, para servir como tal en distintos sistemas de central eléctrica, tal como, por ejemplo, la instalación de energía eólica 1 según la fig. 1, como convertidor de frecuencia para regular la velocidad de giro, la potencia activa y reactiva, que se deben alimentar en o  
10 extraer de la red 2. Mientras que el estator 12 de la MASA 11 está conectado directamente a la red 2 y suministra una gran parte de la potencia, solo se debe adaptar una parte de la potencia a través del convertidor 17 a la frecuencia y potencia deseadas. En este sentido, los convertidores 17 se pueden utilizar con una potencia significativamente menor que la potencia de la instalación, que son más económicos y con menos pérdidas que en el caso de los generadores síncronos comparables, por lo que también resulta una mejor eficiencia del sistema en su conjunto.

15 Como se ilustra en la fig. 1, el sistema de central eléctrica 1 contiene aquí un transformador 27, que conecta la instalación de energía eólica 1 a la red eléctrica 2. En algunas centrales eléctricas en isla con tensiones de sistema de 400 V a aproximadamente 6 kV, el transformador 27 se puede omitir dado el caso. El transformador 27 presenta aquí un devanado primario 28, que está conectado a la red 2 y puede conducir, por ejemplo, una media tensión en el  
20 rango de algunos kilovoltios, y un devanado secundario 29, al que están conectados tanto el circuito de estator 14 como también el circuito del lado de la red 23, que pueden conducir una tensión alterna en el rango de algunos cientos de voltios a kilovoltios. El transformador 27 también podría presentar varios devanados secundarios, que podrían estar asignados individualmente al circuito de estator 14 o al lado de red 23 del convertidor 17.

25 El sistema de central eléctrica 1 presenta además un sistema de control 31 que forma un sistema de control de orden superior con respecto al dispositivo de control 24 del dispositivo convertidor 26 y que está determinado para el control del funcionamiento de toda la instalación de energía eólica 1. El sistema de control 31 y el dispositivo de control 24 del dispositivo convertidor 26 están conectados entre sí en virtud a la comunicación a través de líneas e interfaces de control y comunicación, por ejemplo, una interfaz de comunicación 30 del dispositivo de control 24. El sistema de  
30 control 31 puede recibir (no ilustrado) las demandas de potencia de un operador de red no representado aquí más en detalle, o determinar las demandas de potencia en base a magnitudes de funcionamiento de red medidas, tales como, por ejemplo, corrientes, tensiones y frecuencia en el lado primario o lado de red del transformador 27, y transmitir la demanda de potencia al dispositivo de control 24.

35 Además, el sistema de control 31 puede recibir, procesar y evaluar magnitudes de funcionamiento dentro de la instalación de energía eólica 1, tales como, por ejemplo, diversas corrientes  $i$  y tensiones  $u$ , la velocidad de giro de funcionamiento  $n_r$  del rotor 13 y otras. En consecuencia, se puede realizar una medición de las frecuencias en el lado del estator y del rotor sobre la base de las corrientes y tensiones medidas, tal como se muestra en la figura 1. La determinación de la frecuencia de red también se puede realizar a través de un transformador de sincronización  
40 separado o un devanado adicional en el transformador 27 o en el propio transformador 27. Además, también se puede utilizar un elemento sensor 40 (véase la figura 1) para determinar la frecuencia de rotor, por ejemplo, entre un disyuntor 34 en el lado del rotor 16 del convertidor 17 y el rotor 13. La determinación de la frecuencia de rotor en el sensor 40 se puede realizar igualmente a través de las magnitudes eléctricas de corriente y tensión por medio de transductor/transmisor y/o electrónica de evaluación o indirectamente a través de las magnitudes de los campos  
45 eléctricos y/o magnéticos utilizando la electrónica de medición correspondiente.

Según un aspecto preferido de la invención, el sistema de control 31 no está determinado ni configurado para excitar directamente el convertidor 17. Para ello solo está previsto el dispositivo de control interno 24 para el dispositivo convertidor 26.

50 Pueden estar previstos distintos elementos conmutables, fusibles, disyuntores de corriente y otros dispositivos, tal como, por ejemplo, un interruptor de potencia de red 32, un contactor de estator 33, así como otros interruptores de potencia o disyuntores 34 en el lado del rotor 16 y 36 en el lado de la red 23 del convertidor 17, para cerrar los respectivos circuitos eléctricos o, si es necesario, para desconectarlos, por ejemplo, si un flujo de corriente es  
55 demasiado alto y podría dañar componentes o por otras razones. Pueden estar contenidos otros dispositivos de protección en la instalación de energía eólica 1.

Además, el dispositivo convertidor 26 contiene disposiciones de filtro 37, 38 tanto en el lado del rotor 16 como también en el lado de la red 23 del convertidor 17 en forma de inductancias o circuitos LRC, que sirven para la amortiguación  
60 de vibraciones no deseadas y para la eliminación de interferencias y el filtrado de distorsiones de tensión y corriente de alta frecuencia, que se provocan por la conmutación de los interruptores de semiconductores en el convertidor 17.

Durante el funcionamiento, la energía eólica se capta por las palas rotativas 4 de la turbina eólica 3 y se convierte en energía cinética de los árboles 7, 9 puestos en rotación, que convierte la MASA 11 en potencia eléctrica, que se  
65 suministra a través de una ruta doble a la red eléctrica 2. Las dos rutas de potencia están definidas por el circuito de estator 14 y el circuito de rotor 16. En el lado del circuito de rotor 16, al convertidor 17 se le suministra potencia de

corriente alterna(CA) sinusoidal polifásica (por ejemplo, trifásica) (funcionamiento supersíncrono) o se entrega (funcionamiento subsíncrono). El convertidor de corriente del lado del rotor 18 convierte en el funcionamiento supersíncrono la potencia de CA que se proporciona a través del circuito de rotor 16 en la potencia de tensión continua (DC) que se proporciona en el circuito intermedio de tensión continua 21. Una conmutación de los dispositivos 5 semiconductores de potencia (por ejemplo, IGBT) que se utilizan en circuitos de puente paralelos del convertidor de corriente del lado del rotor 18 se puede modular para convertir la potencia de CA del circuito de rotor 16 en potencia de CC adecuada para el circuito intermedio de CC 21.

El convertidor de corriente del lado de la red 19 convierte en funcionamiento supersíncrono la potencia de CC en el 10 circuito intermedio de CC 21 en potencia de CA con una frecuencia que es adecuada para la red eléctrica 180. En particular, la conmutación de los dispositivos semiconductores de potencia (por ejemplo, IGBT), que se utilizan en los circuitos de puente del convertidor de corriente del lado de la red 19, se puede modular para convertir la potencia de CC en el circuito intermedio de CC 21 en una potencia de CA adecuada en el lado de la red 23. La potencia del 15 convertidor 17, junto con la potencia proporcionada a través del circuito de estator 17, se puede suministrar a la red eléctrica 2 a través del transformador 27 (funcionamiento supersíncrono). También se puede extraer a la inversa potencia de la red 2 y alimentarse a través del circuito de estator 14, así como el convertidor 17 y el circuito de rotor 16 en la MASA 11, que en principio también se puede operar con motor. La potencia intercambiada con la red 2 puede contener potencia activa y/o reactiva.

20 En el funcionamiento normal, el sistema de central eléctrica 1 se opera conforme a una curva característica de la instalación para alimentar la potencia nominal en la red 2. El sistema de central eléctrica 1 está concebido además para proporcionar en caso de fluctuaciones de la frecuencia de red, en particular en caso de una caída repentina de la frecuencia de red debido a una pérdida repentina de potencia de alimentación en una red interconectada o mediante un aumento repentino de la carga en la red 2, un apoyo dinámico de la frecuencia de red. Para ello, el sistema de 25 central eléctrica 1 presenta un modo de funcionamiento que se denomina como el modo de inercia de masa virtual o la emulación de inercia de masa virtual (abreviado modo de funcionamiento de VM) y que se conoce en sí por el estado de la técnica. En el modo de inercia de masa virtual, la energía cinética de los elementos rotativos de una instalación de energía eólica se utiliza para la salida de potencia incrementada, donde la curva característica de la instalación se opera modificada, de tal manera que el par de fuerzas y la salida de potencia activa se incrementan más allá de la 30 potencia de instalación nominal, la velocidad de rotación disminuye lentamente y se reduce la energía de rotación.

La fig. 2a muestra una característica de la instalación a modo de ejemplo, donde la velocidad de giro de rotor de la MASA está representada en la abscisa, mientras que la ordenada muestra la potencia de salida de la instalación. Para la emulación de la inercia de masa, la curva característica de la instalación se modifica de potencia a velocidad de 35 giro, de modo que, para un amplio rango de velocidad de giro, la potencia de la instalación está cerca de la potencia de salida máxima posible  $P_{max}$ . Como se ilustra en la fig. 2a, la MASA se opera, por ejemplo, en función de una velocidad del viento  $v_{viento}$  respectiva en el punto de funcionamiento A a la frecuencia nominal  $f_N$  con la potencia nominal  $P_N$ . Durante una pérdida repentina de potencia de alimentación en la red eléctrica (por ejemplo, en caso de fallo de la central eléctrica), la frecuencia de red disminuye repentinamente. La MASA se conmuta al modo de funcionamiento 40 de inercia de masa virtual, es decir, a una curva característica de control de masa virtual, de modo que el punto de funcionamiento A cambia al punto B, en el que se produce una elevada previsión y disminución de la potencia eléctrica, que corresponde a la potencia máxima  $P_{max}$  de la instalación. Dado que esta elevada disminución de potencia excede la potencia mecánica al proporcionar energía eólica a la instalación, la velocidad de giro  $n_r$  del rotor 13 baja acto seguido y la energía de rotación disminuye lentamente. Para una velocidad de giro de rotor por encima del punto de 45 sincronización  $n_{syn}$ , la potencia suministrada se puede situar ventajosamente por encima de la potencia nominal y por debajo o igual a la potencia máxima de la instalación para soportar la frecuencia de red. Dependiendo del momento de uso posterior de la regulación primaria, el modo de funcionamiento de inercia de masa virtual puede durar unos 10 segundos o más.

50 Debido al enclavamiento de velocidad de giro de la MASA 11 en el modo de funcionamiento de inercia de masa virtual, la máquina pasa relativamente lentamente de un funcionamiento supersíncrono a uno subsíncrono y, a este respecto, atraviesa el punto de sincronización con  $n_{syn}$  en el caso de un funcionamiento de inercia de masa virtual suficientemente largo. En la fig. 2a, el punto de funcionamiento pasa del punto B al punto C y luego se mueve con 55 velocidad de giro de rotor decreciente  $n_r$  y curva característica descendente para la potencia máxima en el modo de funcionamiento de inercia de masa virtual,  $P_{VMmax}$ , hasta el punto de funcionamiento D. En el punto de funcionamiento D se inicia la regulación primaria de otras unidades generadoras en la red 2, y se puede reanudar el funcionamiento normal mediante la llamada recuperación de velocidad de giro. En la curva característica de la instalación en la fig. 2a se puede ver durante el tiempo de la recuperación de velocidad de giro desde el punto de funcionamiento D hasta el punto de funcionamiento A, que la velocidad de giro aumenta de nuevo y en la curva característica de la velocidad de 60 giro  $P_{VMmax}$  se dirige de nuevo al punto de trabajo A con una velocidad de giro de rotor más alta, donde se pasa de nuevo por el punto de sincronización.

Mientras que la MASA 11 en el modo de funcionamiento de inercia de masa virtual pasa lentamente de un funcionamiento supersíncrono a uno subsíncrono, a este respecto, pasa por el punto de sincronización  $n_{syn}$  ( $f_r=0$  Hz). 65 El paso a través de este punto de sincronización significa una elevada carga de los componentes de semiconductores de potencia del convertidor de corriente del lado del rotor, ya que las frecuencias de rotor muy bajas en el rango del

punto de sincronización de aproximadamente 0 a 3 Hz dan como resultado una temperatura de capa de bloqueo significativamente más alta con la misma corriente de salida. Como es bien sabido, la frecuencia angular de las tensiones y corrientes de rotor en una máquina asíncrona de doble alimentación está determinada por la frecuencia angular del campo de estator y la velocidad de giro de rotor. La frecuencia angular de la corriente de rotor corresponde a la velocidad angular de la corriente de estator multiplicada por el deslizamiento, donde el deslizamiento está determinado por la diferencia entre la velocidad angular síncrona y mecánica del rotor. La frecuencia angular de la corriente de rotor se vuelve muy pequeña cuando el deslizamiento es casi cero, es decir, la velocidad de giro de rotor  $n_r$  se aproxima a la velocidad de giro de sincronización  $n_{syn}$ . Como consecuencia de la carga térmica claramente elevada de los componentes de semiconductores de potencia y de las temperaturas de capa de bloqueo más altas, la salida de potencia máxima de la instalación de energía eólica y del convertidor en la zona del punto de sincronización está fuertemente limitada en comparación con un funcionamiento a velocidad de giro nominal en el funcionamiento supersíncrono.

También en la recuperación de velocidad de giro se pasa el punto de sincronización  $n_{syn}$  con  $f_r=0$  Hz cuando la velocidad de giro cambia de la zona subsíncrona a la zona supersíncrona. Por lo tanto, también durante la recuperación de velocidad de giro, la carga térmica de los componentes de potencia de semiconductores se vuelve repetidamente muy alta, en particular porque estos ya están cargados previamente en este caso por el funcionamiento de inercia de masa virtual anterior y presentan temperaturas de capa de bloqueo significativamente más altas al iniciar la recuperación de velocidad de giro. El margen térmico en la recuperación de velocidad de giro se puede reducir significativamente, de modo que la potencia de instalación se puede reducir con vistas a la facilitación de potencia activa y reactiva, como se indica por la rama  $P_{VM\ min}$  de la curva característica en la fig. 2a.

La fig. 2b muestra la frecuencia de rotor y la corriente de rotor, así como temperaturas de capa de bloqueo calculadas a modo de ejemplo, que están referidas al valor límite de diseño máximo, para un funcionamiento de inercia de masa virtual. En el caso de un funcionamiento en el límite de corriente a plena potencia activa y reactiva, la disminución de la velocidad de giro en el rango entre 5 y 15 segundos muestra un aumento de la corriente de rotor del 10 %, que en el sentido de la elevada salida de potencia activa de la MASA soporta la frecuencia de red y, debido a la característica de la instalación, conduce a una disminución de velocidad de giro. En el rango de 13 segundos se pasa por el punto de sincronización de la instalación, con lo que se configuran temperaturas de capa de bloqueo claramente más altas debido a las frecuencias de salida muy bajas en el rango de 0 Hz. Después de que el funcionamiento real de la inercia virtual termina a los 15 segundos, comienza la recuperación de velocidad de giro. En este caso, el sistema vuelve de nuevo al punto de funcionamiento nominal para la facilitación de potencia nominal a través de la característica de la instalación, siempre que estén presentes las velocidades del viento correspondientes. La recuperación de velocidad de giro pasa de nuevo por el punto de sincronización del rango subsíncrono al supersíncrono, lo que se realiza como máximo con el 100 % de la corriente del rotor, ya que el sistema se opera sobre la característica de la instalación para el funcionamiento normal. A partir de la representación de las temperaturas de capa de bloqueo relativas, que están relacionadas con un posible valor de diseño o límite  $T_j^*$ , se ve claramente que los valores de diseño o límite se pueden exceder significativamente en el rango del punto de sincronización para este tipo de funcionamiento.

Para remediar esto, la presente invención proporciona un procedimiento para el funcionamiento de una central eléctrica, tal como, por ejemplo, la instalación de energía eólica 1 según la fig. 1, con una máquina asíncrona de doble alimentación, por ejemplo, la MASA 11, que permite dividir ventajosamente la potencia activa y reactiva dentro del convertidor, por ejemplo, del convertidor 17, y también limitar adecuadamente la corriente de rotor, para evitar que se superen las temperaturas de capa de bloqueo máximas de los componentes de semiconductores de potencia del convertidor. El procedimiento según la invención se explicará con más detalle en conexión con la fig. 3.

La fig. 3 muestra un diagrama de flujo de un procedimiento según la invención para operar una central eléctrica con una máquina asíncrona de doble alimentación (por ejemplo, la instalación de energía eólica 1 según la fig. 1) en el modo de funcionamiento de la inercia de masa virtual (modo de funcionamiento de VM). En la etapa S1, el modo de funcionamiento de inercia de masa virtual se activa por el dispositivo de control (por ejemplo, 24) del dispositivo convertidor (por ejemplo, 26). Esto se puede realizar a petición por el sistema de control de orden superior (por ejemplo, 31), o bien en tanto que el propio dispositivo de control 24 constata mediante "autodiagnóstico" en base a la demanda de potencia y las magnitudes de funcionamiento momentáneas o en base al registro de una frecuencia de subred por debajo de la frecuencia nominal de red durante una determinada duración del valor umbral, que se requiere un soporte de frecuencia de red (por ejemplo, 2).

En la etapa S2 se determinan la velocidad de giro actual  $n_r$  y la tasa de cambio de velocidad de giro  $dn_r/dt$  del rotor (por ejemplo, 13). Estas magnitudes se pueden determinar, por ejemplo, en base a la velocidad de giro  $n_r$  del árbol de rotor 9 detectada por el sensor de velocidad de giro 251.

En la etapa S3 se comprueba en primer lugar si la velocidad de giro mecánica actual  $n_r$  del rotor (por ejemplo 13) se sitúa en un rango de velocidad de giro predeterminado [ $n_{VM-}=n_{syn}-\Delta n$ ;  $n_{VM+}=n_{syn}+\Delta n$ ] del rotor.  $\Delta n$  puede ser de al menos un 5 %, preferentemente de aproximadamente un 10-15 % de la velocidad de giro de sincronización  $n_{syn}$ . Si este es el caso, en la etapa S3, el límite de corriente de rotor máxima actual  $I_{r,max}$  se establece en el rango de velocidad de giro predeterminado [ $n_{VM-}$ ;  $n_{VM+}$ ] en función de los valores actuales de la velocidad de giro  $n_r$  y la tasa de cambio de velocidad de giro  $dn_r/dt$  del rotor. A este respecto, el valor límite de corriente de rotor máximo  $I_{r,max}$  se reduce al

menos en un rango parcial de la zona de velocidad de giro predeterminada cuando la velocidad de giro  $n_r$  del rotor se aproxima a la velocidad de giro de sincronización  $n_{syn}$ . En general, cuanto menor sea la cantidad de la desviación de la velocidad de giro actual  $n_r$  del rotor con respecto a la velocidad de giro de sincronización  $n_{syn}$ , tanto más se reduce el valor límite de corriente de rotor máximo  $I_{r,max}$ . Además, se reduce el valor límite de corriente de rotor máximo  $I_{r,max}$  también en función de la tasa de cambio de velocidad de giro  $dn_r/dt$ . Preferentemente, el valor límite de corriente de rotor máximo  $I_{r,max}$  se reduce al menos en un rango parcial del rango de velocidad de giro predeterminado  $[n_{VM-}; n_{VM+}]$  tanto más cuanto menor sea la cantidad de la tasa de cambio de velocidad de giro  $dn_r/dt$  del rotor. El valor límite de corriente de rotor máximo  $I_{r,max}$  se puede reducir continua o gradualmente en el rango predeterminado  $[n_{VM-}; n_{VM+}]$  alrededor de la velocidad de giro de sincronización  $n_{syn}$ . Igualmente, la reducción se puede realizar continua o gradualmente en función de la tasa de cambio de velocidad de giro  $dn_r/dt$ .

En la etapa S4 se determina, en base a la demanda de potencia nominal y en función de las magnitudes de funcionamiento medidas actualmente, el valor de consigna de corriente del rotor actual, que se debe proporcionar por el rotor. Al menos, el valor de consigna para la corriente activa de rotor se determina en función de la demanda de potencia activa.

En la etapa S5 se excita el convertidor (por ejemplo, 17) para conmutar tensiones y corrientes sinusoidales pulsadas con el valor de consigna de corriente de rotor actual o, si el valor de consigna de corriente de rotor actual alcanza o supera el valor límite de corriente de rotor máximo actual  $I_{r,max}$ , con el valor límite de corriente de rotor máximo actual  $I_{r,max}$  en el rotor. En otras palabras, el convertidor proporciona una corriente de rotor conforme al valor de consigna de corriente de rotor actual, limitado al valor límite de corriente de rotor máximo actual  $I_{r,max}$ .

El procedimiento de funcionamiento según la invención según la fig. 3 se ilustra adicionalmente en las figuras 5 y 6, que representan gráficamente curvas características a modo de ejemplo de la corriente de rotor máxima  $I_{r,max}$  respecto a la velocidad de giro de rotor  $n_r$  en el modo de funcionamiento de inercia de máquina virtual. Se supone que es posible un funcionamiento en el límite de corriente, es decir, en el valor límite de corriente de rotor máximo  $I_{r,max}$  con plena facilitación de potencia activa y reactiva. Al activar el modo de funcionamiento de inercia de masa virtual, la corriente del rotor se incrementa en una cantidad determinada, preferentemente en aproximadamente un 10 %, con el fin de incrementar la salida de potencia activa de la MASA (por ejemplo, 11) para el soporte de frecuencia de red. Esto corresponde a la transición del punto de funcionamiento A en la fig. 5 al punto de funcionamiento B. Debido a la característica de la instalación, esto conduce a una disminución de velocidad de giro, tal como se indica en la fig. 5 mediante la transición del punto de funcionamiento de B a C. En el punto de funcionamiento C, la velocidad de giro de rotor alcanza el rango predeterminado  $[n_{VM-}; n_{VM+}]$ , en el que se reduce adecuadamente el límite de corriente de rotor máximo  $I_{r,max}$ . Como está representado en la fig. 5, el valor límite de corriente del rotor máximo se reduce aquí de forma creciente y continua hasta alcanzar la velocidad de giro de sincronización  $n_{syn}$ . Pero, también sería posible reducir la corriente de rotor máxima aquí en varias etapas, conforme a una función de escalera o también según una función continua, que no es una función lineal.

La dependencia de la reducción del valor límite de corriente de rotor máximo  $I_{r,max}$  de la tasa de cambio de velocidad de giro  $dn_r/dt$  del rotor está ilustrada en la fig. 6. Como puede verse, el valor límite de corriente de rotor máximo se reduce tanto más al aproximarse a la velocidad de giro de sincronización  $n_{syn}$  cuanto menor sea la tasa de cambio de velocidad de giro  $dn_r/dt$  de la velocidad de giro de rotor  $n_r$ . La razón de esto es que, con una tasa de cambio de velocidad de giro más pequeña, el punto de sincronización se pasa más lentamente o la duración de funcionamiento es más larga en el rango del punto de sincronización, lo que resulta en una mayor carga térmica de los componentes de semiconductores de potencia debido a los componentes que se calientan cada vez más con constantes de tiempo térmicas más grandes (p. ej. disipadores de calor). Para contrarrestar esto, el valor límite de corriente de rotor máximo  $I_{r,max}$  se reduce tanto más cuanto menor es la tasa de cambio de velocidad de giro  $dn_r/dt$ . Esto se puede realizar según una función continua, preferentemente lineal o también no lineal o en varias etapas fijadas de antemano con valores constantes respectivamente. En cualquier caso, mediante la reducción del valor límite de corriente de rotor máximo  $I_{r,max}$  se limita adecuadamente la carga térmica en el rango del punto de sincronización.

Después del paso por la velocidad de giro de sincronización  $n_{syn}$ , el valor límite de corriente de rotor máximo  $I_{r,max}$  se incrementa de nuevo en función de la velocidad de giro de rotor  $n_r$  y de la tasa de cambio de la velocidad de giro de rotor  $dn_r/dt$ , hasta que en el punto de funcionamiento E comienza la regulación primaria en la red y el modo de funcionamiento de inercia de masa virtual se puede convertir en el modo de recuperación de velocidad de giro. En general, la transición del funcionamiento de inercia de masa virtual al funcionamiento de la recuperación de velocidad de giro se realiza después de aproximadamente 10-15 segundos.

Durante la recuperación de velocidad de giro, la central eléctrica se opera de nuevo conforme al funcionamiento normal. Por lo tanto, el punto de trabajo se convierte en la curva característica de la instalación desde el punto de funcionamiento F hasta el punto de funcionamiento A, en el que se alimenta de nuevo la potencia nominal. La velocidad de giro reducida aumenta de nuevo partiendo del rango subsíncrono  $[n_{VM-}; n_{syn}]$  al rango supersíncrono  $[n_{syn}; n_{VM+}]$ . A este respecto, en el punto de funcionamiento G se pasa de nuevo la velocidad de giro de sincronización  $n_{syn}$ . Después de que los componentes de potencia de semiconductores ya se han precargado térmicamente por el funcionamiento de inercia de máquina virtual y presentan una elevada temperatura de capa de bloqueo, la corriente de rotor máxima  $I_{r,max}$  se reduce en una cantidad determinada, preferentemente un 10 % o más, al comienzo de la recuperación de

velocidad de giro, tal como está representado en la fig. 5 a través de la transición E-F. Por lo tanto, la curva de valor límite F-G-A para la recuperación de velocidad de giro o una tasa de cambio de velocidad de giro positiva está claramente por debajo de la curva de valor límite para una tasa de cambio de velocidad de giro negativa en el modo de funcionamiento de inercia de masa virtual.

5

Las figuras 4a y 4b ilustran los parámetros de funcionamiento eléctricos, incluyendo la potencia de la instalación, la velocidad de giro de rotor, la frecuencia de rotor, la corriente del rotor y las temperaturas de capa de bloqueo calculadas a modo de ejemplo, que están relacionadas con el valor de diseño o límite máximo, de forma similar a las figuras 2a y 2b. En la fig. 4b se puede ver que en el instante de 5 segundos se inicia el modo de funcionamiento de inercia de masa virtual y se incrementa la corriente del rotor en aproximadamente un 10 % para incrementar la facilitación de potencia activa y sostener la frecuencia de red. A continuación, la frecuencia de rotor disminuye en el rango de entre 5 y 15 segundos debido a la característica de la instalación. En este rango se reduce también conforme al procedimiento según la invención el valor límite de corriente de rotor máximo, lo que está ilustrado mediante la disminución de la corriente de rotor en la fig. 4b. En el rango de 13 segundos se pasa por el punto de sincronización de la instalación, en el que se configuran temperaturas de capa de bloqueo más elevadas debido a las frecuencias de salida bajas en el rango de 0 Hz. Después de unos 15 segundos, comienza la recuperación de velocidad de giro. En el ejemplo representado, la recuperación de velocidad de giro pasa de nuevo por el punto de sincronización  $n_{syn}$  durante la transición del funcionamiento subsíncrono al supersíncrono. No obstante, esto ocurre con una corriente de rotor reducida, ya que el valor límite de corriente de rotor máximo  $I_{r,max}$  se reduce suficientemente durante la transición del funcionamiento de inercia de masa virtual a la recuperación de velocidad de giro. De este modo, eventualmente también se puede reducir ligeramente la facilitación de potencia en el rotor, lo que se muestra en el desarrollo modificado de la curva de potencia representado con líneas de trazos en el rango 42 del punto de sincronización. No obstante, esto es irrelevante, ya que tras finalizar el funcionamiento de inercia de masa virtual, ya no se requiere un soporte de frecuencia de red. No obstante, una comparación de las figuras 2b y 4b aclara que mediante el procedimiento según la invención se puede reducir significativamente la carga térmica de los componentes de semiconductores de potencia, en particular interruptores IGBT y diodos, y las temperaturas de capa de barrera de los mismos se pueden mantener esencialmente más bajas, de modo que no se excedan los valores de diseño o límite en la zona del punto de sincronización de la instalación. Los componentes no se cargan de forma indebida y se puede garantizar un margen térmico para posibles fallos de red. Adicionalmente también se puede posibilitar una vida útil de uso más larga del dispositivo convertidor, también porque los componentes de semiconductores de potencia se someten a una sollicitación de cambio de carga reducida y, por lo tanto, se reduce el consumo de vida útil en este tipo de funcionamiento.

Las figuras 5 y 6 muestran además otra modificación opcional del procedimiento según la invención. En particular, el valor límite de corriente de rotor máximo  $I_{r,max}$  se puede determinar o modificar adicionalmente en función de una o varias temperaturas de funcionamiento  $\vartheta$  medidas sobre o en el dispositivo convertidor (por ejemplo, 26). Por ejemplo, la temperatura de componente de los componentes de semiconductores de potencia se puede detectar mediante un dispositivo de medición de temperatura (por ejemplo, 252). Además, en caso necesario se pueden detectar temperaturas en los disipadores de calor y/o una temperatura de avance de un fluido de refrigeración del sistema de refrigeración del dispositivo convertidor. El valor límite de corriente de rotor  $I_{r,max}$  se puede ajustar o seguir entonces como función de esta(s) temperatura(s). Esto se puede realizar mediante cálculo térmico o en base a al menos una tabla de búsqueda previamente almacenada. En cualquier caso, el valor límite de corriente de rotor máximo  $I_{r,max}$  se reduce de forma continua o gradual tanto más cuanto más altas sean una o varias temperaturas de funcionamiento registradas actualmente. Esto contribuye además al funcionamiento optimizado en el modo de funcionamiento de inercia de masa virtual con descarga térmica de los componentes de semiconductores de potencia al pasar por el punto de sincronización.

La fig. 7 muestra un perfeccionamiento ventajoso de un procedimiento 43 según la invención. Siempre que las etapas del procedimiento 43 de la fig. 7 coincidan con las etapas S1-S5 del procedimiento 41 de la fig. 3 se hace referencia a las realizaciones anteriores del procedimiento 41 sobre la base de los mismos números de referencia.

En la etapa S11, el sistema de central eléctrica, incluido el dispositivo convertidor, se opera en el funcionamiento normal.

En la etapa S12 se comprueba si el modo de funcionamiento de inercia de masa virtual está activo. Si este no es el caso, se comprueba a continuación en la etapa S13 si el tipo de funcionamiento de la recuperación de velocidad de giro está activo. En caso de respuesta negativa, el procedimiento vuelve a la etapa S11.

Si uno de los tipos de funcionamiento de la inercia de masa virtual o de la recuperación de velocidad de giro está activo, el procedimiento pasa al paso S14, en el que se registran o determinan los valores de velocidad de giro de rotor actuales  $n_r$  y  $dn_r/dt$ . La velocidad de giro de rotor se puede medir directamente mediante un sensor de velocidad de giro. La tasa de cambio de la velocidad de giro de rotor  $dn_r/dt$  se puede registrar directamente con un acelerómetro o se puede determinar por cálculo en base a los valores de velocidad de giro de rotor registrados, por ejemplo, por medio de un encoder incremental, de forma mecánica, fotoeléctrica o magnética en base a valores de exploración sucesivos. En la etapa S14 también se pueden determinar temperaturas  $T_1, \dots, T_k$ , tal como, por ejemplo, las temperaturas de componentes en semiconductores de potencia, temperaturas del disipador de calor, temperaturas del

fluido de refrigeración, temperaturas ambiente o similares.

En la etapa S15, el valor límite de corriente del rotor se determina en función de los valores actuales de la velocidad de giro de rotor  $n_r$  y la tasa de cambio de velocidad de giro  $dn_r/dt$  y opcionalmente de las temperaturas detectadas  $T_1, \dots, T_k$ . En particular, el valor límite de corriente del rotor se reduce adecuadamente en el rango de velocidad de giro predeterminado  $[n_{VM-}; n_{VM+}]$  conforme a una función matemática, una función continua o una función de escalera o similares, para reducir la carga térmica y las temperaturas de capa de barrera de los componentes de semiconductores de potencia en el entorno del punto de sincronización.

10 En la etapa S16, la corriente del rotor  $I_r$  se determina teniendo en cuenta las demandas de potencia para la potencia activa  $P^*$  y la potencia reactiva  $Q^*$ . Las demandas o especificaciones de potencia para la potencia activa y reactiva  $P^*$ ,  $Q^*$  se pueden comunicar al dispositivo de control 24 del dispositivo convertidor 26 por el sistema de control de orden superior 31. En base a estas magnitudes se puede determinar el valor de consigna  $I_r$  de la corriente de rotor, que se debe proporcionar en el rotor de la MASA.

15 En la etapa S17, la potencia activa del rotor  $P_r$  se determina conforme a la demanda de potencia activa  $P^*$ , de tal manera que la corriente del rotor  $I_r$  no exceda la corriente de rotor máxima  $I_{r,max}$ . En este sentido, se recurre al valor de consigna de corriente de rotor determinado  $I_r$  para la determinación de la potencia activa de rotor  $P_r$  cuando este es menor que el valor límite de corriente de rotor máximo  $I_{r,max}$ , mientras que de lo contrario se recurre al valor límite de corriente de rotor máximo  $I_{r,max}$  para la determinación de la potencia activa de rotor  $P_r$ .

En la etapa S18, la potencia reactiva del rotor  $Q_r$ , que se debe o puede proporcionar en el rotor de la MASA, se determina de forma correspondiente en función de la potencia activa del rotor  $P_r$  y de la demanda de potencia reactiva  $Q^*$ , de tal manera que la corriente del rotor  $I_r$  no supera el valor límite de corriente del rotor máximo  $I_{r,max}$ . Es decir, si el valor de consigna de corriente de rotor determinado  $I_r$  es menor que el valor límite de corriente de rotor máximo  $I_{r,max}$ , se recurre a la proporción de la corriente del rotor, que no se requiere para proporcionar la potencia activa del rotor  $P_r$ , para determinar la potencia reactiva del rotor  $Q_r$ .

En la etapa S19, el convertidor se excita de forma correspondiente para proporcionar los valores de consigna determinados en las etapas S17 y S18 para la potencia activa del rotor  $P_r$  y la potencia reactiva del rotor  $Q_r$ .

La figura 8 muestra otra forma de realización de un procedimiento 44 según la invención. En tanto que está presente una coincidencia con las etapas de los procedimientos 41 y 43 de las figuras 3 y 7 se hace referencia, sobre la base de los mismos números de referencia, a las realizaciones anteriores con respecto a las etapas de procedimiento respectivas de las figuras 3 y 7, que se aplican aquí de forma correspondiente.

El procedimiento 44 según la fig. 8 presenta en primer lugar las etapas S11-S14 del procedimiento según la fig. 7. La siguiente etapa de procedimiento S21 corresponde esencialmente a la etapa de procedimiento S15 según la fig. 7, donde adicionalmente al valor límite de corriente de rotor  $I_{r,max}$  también se determina un valor límite  $I_{n,max}$  para la corriente en el lado de red del convertidor en función de la velocidad de giro de rotor  $n_r$  y la tasa de cambio  $dn_r/dt$  y opcionalmente en función de las temperaturas de funcionamiento medidas ( $T_1, \dots, T_k$ ).

Como se puede ver en particular en la fig. 9, que ilustra una representación gráfica del valor límite de corriente máximo del lado de la red  $I_{n,max}$  respecto a la velocidad de giro de rotor  $n_r$  según una forma de realización a modo de ejemplo de la invención, el valor límite de corriente máximo del lado de la red  $I_{n,max}$  en el funcionamiento de inercia de masa virtual, así como en la recuperación de velocidad de giro en el rango predeterminado  $[n_{VM-}; n_{VM+}]$  en función del valor límite de corriente del rotor máximo  $I_{r,max}$  y la demanda de potencia  $P^*$ ,  $Q^*$  se puede incrementar por encima de la corriente nominal máxima  $I_{n,max}(N)$  en el funcionamiento normal para compensar al menos parcialmente una facilitación reducido de potencia reactiva debido a la corriente de rotor reducida. Esta circunstancia resulta del hecho de que el convertidor de corriente del lado de la red se sitúa en la frecuencia de red casi constante (50 o 60 Hz) y no está sujeto al desafío de frecuencias de salida muy bajas. El valor límite de corriente máximo  $I_{n,max}$  para el lado de red se puede aumentar conforme a una función continua o una función de escalera esencialmente de manera inversamente proporcional al valor límite de corriente de rotor  $I_{r,max}$ . Con el aumento de las temperaturas de funcionamiento se debe reducir el valor límite de corriente  $I_{n,max}$  para el lado de la red.

En la etapa S22, de forma análoga a la etapa S16 según la fig. 7 se determina el valor de consigna  $I_r$  para la corriente del lado de rotor teniendo en cuenta los valores de especificación de potencia  $P^*$ ,  $Q^*$ . Adicionalmente, también se determina el valor de consigna de corriente  $I_n$  para el lado de la red.

Además, en la etapa S23, como en la etapa S17 según la fig. 7, la potencia activa del rotor  $P_r$  se determina conforme a la demanda de potencia activa  $P^*$ , de tal manera que la corriente de rotor máxima  $I_r$  no excede el valor límite máximo  $I_{r,max}$  para la corriente de rotor.

En la etapa S24, a diferencia de la etapa S18 según la fig. 7, el valor de consigna de potencia reactiva de rotor se pone a cero independientemente de si la corriente de rotor  $I_r$  alcanza o excede el valor límite de corriente de rotor máximo  $I_{r,max}$  o no. Como resultado, el convertidor de corriente del lado del rotor (por ejemplo, 18) solo proporciona



potencia activa en el rotor durante la excitación posterior del convertidor en la etapa S27. No se proporciona potencia reactiva en el rotor.

5 En la etapa S25, la potencia activa para el lado de la red del convertidor se determina conforme a la potencia activa en el lado del rotor del convertidor, de modo que la corriente en el lado de la red del convertidor no exceda el valor límite máximo  $I_{n,max}$  para la corriente del lado de la red. Es decir, el convertidor de corriente del lado de la red se puede excitar a continuación de forma adecuada en la etapa S27 para posibilitar el flujo de potencia activa requerido conforme a la potencia activa  $P_r$  requerida por el convertidor de corriente del lado del rotor.

10 En la etapa S26, la potencia reactiva  $Q_n$  a proporcionar por el convertidor de corriente del lado de la red se determina conforme a la demanda de potencia reactiva  $Q^*$ , de tal manera que no se exceda el valor límite de corriente  $I_{n,max}$  para el lado de la red. Siempre que la corriente  $I_n$  determinada para el lado de red no exceda el valor límite máximo  $I_{n,max}$ , el convertidor se puede excitar en la etapa S27 siguiente, de tal manera que la demanda de potencia reactiva total conforme a la demanda de potencia  $Q^*$  se cubra por el convertidor de corriente del lado de la red, mientras que el  
15 convertidor de corriente del lado del rotor se encarga de la facilitación de la potencia activa. Mediante la división según la invención de la facilitación de potencia activa y reactiva dentro del convertidor en combinación con la limitación de la corriente del rotor se pueden cumplir en gran medida las demandas de potencia, mientras que los componentes de semiconductores de potencia del convertidor, en particular del convertidor de corriente del lado del rotor, se protegen contra la sobrecarga térmica y el sobrepaso de temperaturas de capa de bloqueo máximas permitidas.

20 Otra forma de realización de un procedimiento 45 según la invención está ilustrado en la fig. 10. En tanto que existe una coincidencia en las etapas del procedimiento con las formas de realización descritas anteriormente, en particular la forma de realización según la figura 8, sobre la base de los mismos números de referencia se hace referencia a la descripción anterior que aquí es válida correspondientemente.

25 El procedimiento según la fig. 10 presenta en primer lugar las etapas S11-S14 y S21-S23, que coinciden con las etapas igualmente designadas en la fig. 8. En la etapa siguiente S31, a diferencia de la etapa S24 según la fig. 8, la potencia reactiva del rotor no se reduce a cero. En cambio, el valor de consigna de potencia reactiva para el convertidor de corriente del lado del rotor se determina conforme al valor de consigna de potencia activa  $P_r$  y la demanda de potencia  
30 reactiva  $Q^*$ , de tal manera que la corriente del rotor  $I_r$  no excede el valor límite de corriente de rotor máximo  $I_{r,max}$ . En consecuencia, el convertidor de corriente del lado del rotor se puede excitar para proporcionar, además de la potencia activa requerida  $P_r$ , también al menos una parte  $Q_r$  de la potencia reactiva necesaria  $Q^*$ .

35 La etapa S25 siguiente en la fig. 10 corresponde a la etapa S25 en la fig. 8, en la que se determina la potencia reactiva para el lado de red del convertidor conforme al valor de consigna de potencia activa, de tal manera que la corriente en el lado de red del convertidor no excede el valor límite máximo  $I_{n,max}$  para la corriente en el lado de red.

40 El paso S32 siguiente en la fig. 10 corresponde en gran medida a la etapa S26 en la fig. 8, no obstante, donde para la determinación del valor de consigna de potencia reactiva  $Q_n$ , que se debe proporcionar por el convertidor de corriente del lado de la red, además de la demanda de potencia reactiva  $Q^*$ , también se tiene en cuenta la parte de potencia reactiva  $Q_r$  proporcionada por el convertidor de corriente del lado del rotor. En este caso, se garantiza que la corriente  $I_n$  en el lado de la red del convertidor no exceda el valor límite máximo  $I_{n,max}$  para esta corriente.

45 Por consiguiente, cuando el convertidor se excita de forma correspondiente en la etapa S27, el convertidor de corriente del lado del rotor proporciona la potencia activa  $P_r$  y al menos una parte de la potencia reactiva  $Q_r$  necesaria, mientras que el convertidor de corriente del lado de la red se excita para permitir el flujo de potencia activa y, además, proporcionar una parte adicional  $Q_n$  de la potencia reactiva para compensar al menos parcialmente la facilitación de potencia reactiva insuficiente por el convertidor de corriente del lado del rotor debido a la reducción de la corriente de rotor. Aquí, en el funcionamiento de la inercia de masa virtual con corriente de rotor reducida para la descarga térmica  
50 de elementos constructivos, la facilitación de potencia reactiva se distribuye de forma especialmente favorable en los dos convertidores de corriente (por ejemplo, 18, 19) del convertidor (por ejemplo, 17).

55 Se entiende que en las formas de realización explicadas anteriormente del procedimiento, los valores límite de corriente máximos para el lado del rotor y de la red,  $I_{r,max}$  o  $I_{n,max}$ , se pueden determinar diferentemente de la manera explicada en relación con las figuras 5, 6 y 9 y para el tipo de funcionamiento de la inercia de masa virtual, por un lado, y para la recuperación de velocidad de giro, por otro lado, como se indica por los índices "VM" y "DE" en las corrientes y valores límite respectivos. Como se ha explicado con más detalle anteriormente, al menos el valor límite de corriente de rotor máximo  $I_{r,max(DE)}$  o ambos valores límite  $I_{r,max(DE)}$  e  $I_{n,max(DE)}$  para la recuperación de velocidad de giro es preferiblemente menor que  $I_{r,max(VM)}$  o  $I_{n,max(VM)}$  en el modo de funcionamiento de inercia de masa virtual.

60 Otra modificación de la invención está ilustrada en la fig. 11. La figura 11 representa gráficamente, además de la corriente de rotor máxima  $I_{r,max}$ , la frecuencia de conmutación  $f_{sw,r}$  en el lado del rotor en función de la velocidad de giro de rotor  $n_r$ . Como se puede ver por ello, la frecuencia de conmutación en el lado del rotor en el tipo de funcionamiento de la inercia de masa virtual se puede reducir en función de la velocidad de giro de rotor  $n_r$  y de la tasa  
65 de cambio de la velocidad de giro de rotor,  $dn_r/dt$  en el rango predeterminado alrededor de la velocidad de giro de sincronización  $n_{syn}$ . Esto se puede realizar esencialmente de forma similar a la reducción del valor límite de corriente

de rotor máximo  $I_{r,max}$ . La frecuencia de conmutación reducida en el rango de la velocidad de giro de sincronización tiene como consecuencia menores pérdidas de conmutación y, por lo tanto, una menor carga térmica de los componentes de semiconductores de potencia del dispositivo convertidor en este rango. La frecuencia de conmutación reducida se puede utilizar además para la modificación adicional del valor límite de corriente de rotor máximo  $I_{r,max}$ .

5 Como se puede ver en la fig. 11, cuando se reduce la frecuencia de conmutación del convertidor de corriente del lado del rotor, el valor límite de corriente de rotor máximo se puede aumentar ligeramente de nuevo a la inversa, como se indica por la curva a trazos superior. La carga térmica de los componentes de semiconductores de potencia permanece aquí igual a aquella que resulta con un valor límite de corriente de rotor más reducido sin tener en cuenta la frecuencia de conmutación.

10

Se debe entender que en lugar de la velocidad de giro de rotor  $n_r$  también se podría medir o determinar la frecuencia  $f_r$  del rotor 13 y utilizarse como base para la determinación del valor límite de corriente de rotor máximo actual  $I_{r,max}$  en cualquier forma de realización descrita anteriormente del procedimiento según la invención, del dispositivo convertidor 26 o de la central eléctrica 1. La velocidad de giro de rotor  $n_r$  y la frecuencia de rotor  $f_r$  están estrechamente vinculadas

15 entre sí a través del deslizamiento  $s$  conforme a la relación  $s = (n_{syn} - n_r) / n_{syn} = f_r / f_s$ . En este sentido, las realizaciones anteriores en referencia a la velocidad de giro de rotor  $n_r$  como la magnitud de referencia también son válidas de igual manera para la frecuencia de rotor  $f_r$  como la magnitud de referencia, cuando la velocidad de giro de rotor  $n_r$ , la tasa de cambio  $dn_r/dt$  de la velocidad de giro de rotor y el rango de velocidad de giro predeterminado  $[n_{VM-}; n_{VM+}]$  se sustituyen alrededor de una velocidad de giro de sincronización  $n_{syn}$  del rotor 13 por la frecuencia de rotor  $f_r$ , la tasa de cambio  $df_r/dt$  de la frecuencia de rotor o el rango de frecuencia predeterminado  $[f_{VM-}; f_{VM+}]$  se sustituyen alrededor de la frecuencia cero  $f_r=0$  del rotor 13.

Es un procedimiento para operar una central eléctrica 1 con una máquina asíncrona de doble alimentación 11 y un convertidor 17 en un modo de funcionamiento de la inercia de masa virtual para sostener la frecuencia de red. El procedimiento muestra que cuando una velocidad de giro mecánica actual  $n_r$  del rotor 13 se sitúa en un rango de velocidad de giro predeterminado  $[n_{VM-}; n_{VM+}]$  alrededor de una velocidad de giro de sincronización  $n_{syn}$  del rotor 13 o una frecuencia de rotor actual  $f_r$  en un rango de frecuencia predeterminado  $[f_{VM-}; f_{VM+}]$  alrededor de una frecuencia cero del rotor 13, se reduce un valor límite de corriente máximo actual  $I_{r,max}$  para una corriente de rotor a proporcionar por el convertidor 17 en función de los valores actuales de la velocidad de giro  $n_r$  o la frecuencia de rotor  $f_r$  y la tasa de cambio de velocidad de giro  $dn_r/dt$  o la tasa de cambio de frecuencia  $df_r/dt$  del rotor 13. El procedimiento presenta además que un valor de consigna actual  $I_r$  para la corriente de rotor se determina sobre la base de una demanda de potencia  $P^*$ ,  $Q^*$  de la red 2 en función de las magnitudes de funcionamiento actuales medidas. El procedimiento presenta además que el convertidor 17 se excita para conmutar tensiones y corrientes sinusoidales pulsadas con el valor de consigna de corriente de rotor actual  $I_r$ , limitado al valor límite de corriente de rotor máximo actual  $I_{r,max}$  en el rotor 13. Igualmente se dan a conocer un dispositivo convertidor 26 y una central eléctrica 1 con este.

35

## REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para el funcionamiento de una central eléctrica (1) con una máquina asíncrona de doble alimentación (11), cuyo estator (12) está conectado a una red eléctrica (2) y cuyo rotor (13) está conectado a la red (2) a través de un convertidor (17), donde la central eléctrica (1) presenta un modo de funcionamiento normal en el que se opera conforme a una curva característica de la instalación predeterminada para alimentar la potencia nominal en la red (2), y además presenta un modo de funcionamiento de inercia de masa virtual en el que la alimentación de potencia se incrementa más allá de la potencia de instalación nominal, mientras que la energía de rotación del rotor (4, 6, 7, 9, 13) se reduce, donde el procedimiento en el modo de funcionamiento de inercia de masa virtual presenta las etapas:
- 5 10 determinación de una velocidad de giro actual ( $n_r$ ) y tasa de cambio de velocidad de giro ( $dn_r/dt$ ) del rotor (13) o una frecuencia de rotor actual ( $f_r$ ) y tasa de cambio de frecuencia de rotor ( $df_r/dt$ );  
si la velocidad de giro actual ( $n_r$ ) del rotor (13) se sitúa en un rango de velocidad de giro predeterminado ( $[n_{VM-}; n_{VM+}]$ ) alrededor de una velocidad de giro de sincronización ( $n_{syn}$ ) del rotor (13) o la frecuencia de rotor actual ( $f_r$ ) se sitúa en un rango de frecuencia predeterminado ( $[f_{VM-}; f_{VM+}]$ ) alrededor de una frecuencia cero del rotor (13), reducción de un valor límite de corriente máxima actual ( $I_{r,max}$ ) para una corriente de rotor a proporcionar por el convertidor (17) en función de los valores actuales determinados de la velocidad de giro ( $n_r$ ) y de la tasa de cambio de velocidad de giro ( $dn_r/dt$ ) o de la frecuencia ( $f_r$ ) y la tasa de cambio de frecuencia ( $df_r/dt$ ) del rotor (13);  
15 20 determinación de un valor de consigna actual ( $I_r$ ) para la corriente del rotor en base a una potencia a proporcionar entre la red (2) y la máquina asíncrona de doble alimentación (11) en función de las magnitudes de funcionamiento actuales medidas;  
excitación del convertidor (17) para conmutar tensiones y corrientes sinusoidales pulsadas en el rotor (13) con el valor de consigna de corriente del rotor actual ( $I_r$ ) o, si el valor de consigna de corriente del rotor actual ( $I_r$ ) alcanza o excede el valor límite de corriente de rotor máximo actual ( $I_{r,max}$ ), con el valor límite de corriente de rotor actual máximo ( $I_{r,max}$ ).
- 25 2. Procedimiento según la reivindicación 1, donde el rango de velocidad de giro predeterminado ( $[n_{VM-}; n_{VM+}]$ ) alrededor de la velocidad de giro de sincronización ( $n_{syn}$ ) o el rango de frecuencia predeterminado ( $[f_{VM-}; f_{VM+}]$ ) alrededor de una frecuencia cero del rotor (13) está definido por una frecuencia de corriente de rotor predeterminada mínima ( $f_r$ ) para el funcionamiento estacionario o diferencia de velocidad de giro de la velocidad de giro de rotor ( $n_r$ ) respecto a la velocidad de giro de sincronización ( $n_{syn}$ ), que se sitúa en el rango de +/- 10 a 15 % de la frecuencia de estator ( $f_s$ ) o de la velocidad de giro de sincronización ( $n_{syn}$ ).
3. Procedimiento según la reivindicación 1 o 2, donde el límite de corriente de rotor máximo ( $I_{r,max}$ ) es menor para una cantidad menor de la desviación de la velocidad de giro actual ( $n_r$ ) del rotor (13) respecto a la velocidad de giro de sincronización ( $n_{syn}$ ) o una proporción menor de la frecuencia de rotor/estator ( $f_r/f_s$ ) que para una cantidad mayor de esta desviación o de la relación, al menos en un rango parcial del rango de velocidad de giro predeterminado ( $[n_{VM-}; n_{VM+}]$ ) o rango de frecuencia ( $[f_{VM-}; f_{VM+}]$ ).
4. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el valor límite de corriente de rotor máximo ( $I_{r,max}$ ) es menor para una cantidad menor de la tasa de cambio de velocidad de giro ( $dn_r/dt$ ) o de la tasa de cambio de frecuencia ( $df_r/dt$ ) del rotor (13) que para una cantidad mayor de la tasa de cambio de velocidad de giro ( $dn_r/dt$ ) o de la tasa de cambio de frecuencia ( $df_r/dt$ ) del rotor (13), al menos en un rango parcial del rango de velocidad de giro predeterminado ( $[n_{VM-}; n_{VM+}]$ ) o rango de frecuencia ( $[f_{VM-}; f_{VM+}]$ ).
5. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el valor límite de corriente de rotor máximo ( $I_{r,max}$ ) en varios rangos parciales del rango de velocidad de giro predeterminado ( $[n_{VM-}; n_{VM+}]$ ) o bien zona de frecuencia ( $[f_{VM-}; f_{VM+}]$ ) por encima, por debajo y en el entorno de la velocidad de giro de sincronización ( $n_{syn}$ ) o frecuencia cero del rotor (13) presenta respectivamente un valor constante que es respectivamente menor que aquel para el funcionamiento normal.
6. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el valor límite de corriente de rotor máximo ( $I_{r,max}$ ) conforme a una función matemática de la velocidad de giro ( $n_r$ ) y tasa de cambio de velocidad de giro ( $dn_r/dt$ ) o la frecuencia ( $f_r$ ) y tasa de cambio de frecuencia ( $df_r/dt$ ) del rotor (13) disminuye continuamente a la velocidad de giro de sincronización ( $n_{syn}$ ) del rotor (13).
7. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el valor límite de corriente de rotor máximo ( $I_{r,max}$ ) se sitúa en una curva de valor límite y donde la curva de valor límite para una tasa de cambio de velocidad de giro negativa ( $dn_r/dt < 0$ ) o tasa de cambio de frecuencia negativa ( $df_r/dt < 0$ ) en el modo de funcionamiento de la inercia de masa virtual se sitúa por encima de la curva de valor límite correspondiente para una tasa de cambio de velocidad de giro positiva ( $dn_r/dt > 0$ ) o tasa de cambio de frecuencia positiva ( $df_r/dt > 0$ ), que corresponde a un modo de funcionamiento de la recuperación de velocidad de giro.
8. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el valor límite de corriente de rotor máximo ( $I_{r,max}$ ) se incrementa en al menos un 5 %, preferentemente al menos un 10 %, en comparación con el valor límite de corriente de rotor máximo para el modo de funcionamiento normal en el inicio del modo de funcionamiento de la inercia de masa virtual y se reduce en al menos un 5 %, preferentemente al menos un 10 %, en un cambio del modo de

funcionamiento de la inercia de masa virtual a la recuperación de velocidad de giro.

9. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el valor límite de corriente del rotor máximo se determina además en función de al menos una temperatura de funcionamiento ( $T_1...T_k$ ) medida en el convertidor (17), preferiblemente varias temperaturas de funcionamiento medidas en el convertidor.
10. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el límite de corriente de rotor máximo ( $I_{r,max}$ ) se determina además en función de una frecuencia de conmutación ( $f_{sw}$ ) de elementos de conmutación de semiconductores de potencia del convertidor (17),  
 10 donde la frecuencia de conmutación ( $f_{sw}$ ) para los conmutadores de semiconductores de potencia del convertidor (17) se reduce en el rango de velocidad de giro predeterminado ( $[n_{VM-}; n_{VM+}]$ ) o rango de frecuencia ( $[f_{VM-}; f_{VM+}]$ ) en función de la velocidad de giro ( $n_r$ ) y la tasa de cambio de velocidad de giro ( $dn_r/dt$ ) o de la frecuencia ( $f_r$ ) y tasa de cambio de frecuencia ( $df_r/dt$ ) del rotor (13).
- 15 11. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde un dispositivo de control (24) para el convertidor (17) reconoce de forma independiente un paso por debajo de un valor umbral de la frecuencia de red por debajo de la frecuencia nominal de red durante una duración de valor umbral predeterminada como la exigencia de un soporte de frecuencia de red a través del modo de funcionamiento de la inercia de masa virtual y, a continuación, activa automáticamente el modo de funcionamiento de la inercia de masa virtual, donde el valor umbral de la frecuencia de red y/o la duración de valor umbral se predetermina(n) directamente por un sistema de control de orden superior (31) para la central eléctrica (1) o por el dispositivo de control (24).
- 20 12. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde se reconoce un tipo de funcionamiento de la recuperación de velocidad de giro después de la finalización del modo de funcionamiento de la inercia de masa virtual mediante un cambio del signo de la tasa de cambio de velocidad de giro ( $dn_r/dt$ ) o tasa de cambio de frecuencia ( $df_r/dt$ ) del rotor (13) y, a continuación, se establece el valor límite de corriente del rotor ( $I_{r,max}$ ) en una curva de valor límite para la recuperación de velocidad de giro.
- 30 13. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el convertidor (17) presenta un convertidor de corriente del lado del rotor (18), que está conectado al rotor (13) de la máquina asíncrona (11), y un convertidor de corriente del lado de la red (19), que está conectado, por un lado, a la red (2) y, por otro lado, a través de un circuito intermedio de tensión continua (21) al convertidor de corriente del lado del rotor (18).
- 35 14. Procedimiento según la reivindicación 13, donde la potencia activa ( $P_r$ ) a proporcionar por el convertidor de corriente del lado del rotor (18) se determina en función de una demanda de potencia activa ( $P_r^*$ ), de modo que el valor de consigna de corriente del rotor resultante ( $I_r$ ) no excede el valor límite de corriente de rotor máximo actual ( $I_{r,max}$ ).
- 40 15. Procedimiento según la reivindicación 13 o 14, donde la potencia reactiva ( $Q_r$ ) a proporcionar por el convertidor de corriente del lado del rotor (18) se determina en función de una demanda de potencia reactiva ( $Q_r^*$ ) y de la potencia activa proporcionada ( $P_r$ ), de tal manera que el valor de consigna de corriente del rotor resultante ( $I_r$ ) no excede el valor límite de corriente de rotor máximo ( $I_{r,max}$ ).
- 45 16. Procedimiento según la reivindicación 14 o 15, donde en el caso de que la potencia activa ( $P_r$ ) proporcionable actualmente por el convertidor de corriente del lado del rotor (18) es menor que la demanda de potencia activa actual ( $P_r^*$ ), la potencia reactiva ( $Q_r$ ) proporcionada por el convertidor de corriente del lado del rotor (18) se reduce a cero.
- 50 17. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 14-16, donde el convertidor de corriente del lado del rotor (18) y el convertidor de corriente del lado de la red (19) se operan para proporcionar exclusivamente potencia activa ( $P_r, P_n$ ).
- 55 18. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde un valor límite de corriente de red máximo actual ( $I_{n,max}$ ) para el convertidor de corriente del lado de la red (19) en el rango de velocidad de giro predeterminado ( $[n_{VM-}; n_{VM+}]$ ) o rango de frecuencia ( $[f_{VM-}; f_{VM+}]$ ) se incrementa en función de los valores actuales determinados de la velocidad de giro ( $n_r$ ) y tasa de cambio de velocidad de giro ( $dn_r/dt$ ) o de la frecuencia ( $f_r$ ) y tasa de cambio de frecuencia ( $df_r/dt$ ) del rotor (13) y de la demanda de potencia ( $P^*, Q^*$ ).
- 60 19. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 14-18, donde la potencia reactiva ( $Q_n$ ) a proporcionar por el convertidor de corriente del lado de la red (19) se determina para compensar al menos parcialmente un suministro de potencia reactiva insuficiente del convertidor de corriente del lado del rotor (18), siempre que el valor de consigna de corriente de red resultante ( $I_n$ ) no exceda el valor límite de corriente de red máximo ( $I_{n,max}$ ).
- 65 20. Dispositivo convertidor (26) para una máquina asíncrona de doble alimentación (11) de una central eléctrica (1), cuyo estator (11) está conectado directamente a una red eléctrica (2) y cuyo rotor (13) está conectado a la red (2) a través del dispositivo convertidor (26),

con un convertidor de corriente del lado del rotor (18) que está concebido para conectarse al rotor (13) de la máquina asíncrona (11),

con un convertidor de corriente del lado de la red (19) que está concebido para conectarse a la red (2), y que está conectado al convertidor de corriente del lado del rotor (18) a través de un circuito intermedio de tensión continua (21);

5 y con un dispositivo de control (24) para el control de un funcionamiento del dispositivo convertidor (26), donde el dispositivo de control (24) presenta medios (30) para la comunicación con un sistema de control de orden superior (31) de la central eléctrica (1) y está concebido para realizar un procedimiento para operar la central eléctrica (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores.

10 21. Central eléctrica, en particular central de energía eólica, con una máquina asíncrona de doble alimentación (11), cuyo estator (11) está conectado a una red eléctrica (2) y cuyo rotor (13) está conectado a la red eléctrica (2) a través de un dispositivo convertidor (26) según la reivindicación 20, y con un sistema de control (31) para el control de un funcionamiento de la central eléctrica (1), donde el sistema de control (1), en función de los parámetros de red y parámetros de central eléctrica, especifica valores de demanda ( $P^*$ ,  $Q^*$ ) para la potencia a proporcionar por la central eléctrica (1), y el dispositivo de control (24) del dispositivo convertidor (26) determina a partir de ellos valores de

15 consigna para la potencia de estator a proporcionar ( $P_s$ ,  $Q_s$ ) y la potencia ( $P_r$ ,  $Q_r$ ,  $Q_n$ ) a proporcionar el dispositivo convertidor (26), y controla el convertidor de corriente del lado de red y del lado del rotor (18, 19), tanto en modo de funcionamiento normal como también en modo de funcionamiento de la inercia de masa virtual, según el procedimiento de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 19 en función de los valores de consigna de potencia a proporcionar ( $P_s$ ,

20  $Q_s$ ,  $P_r$ ,  $Q_r$ ,  $Q_n$ ).

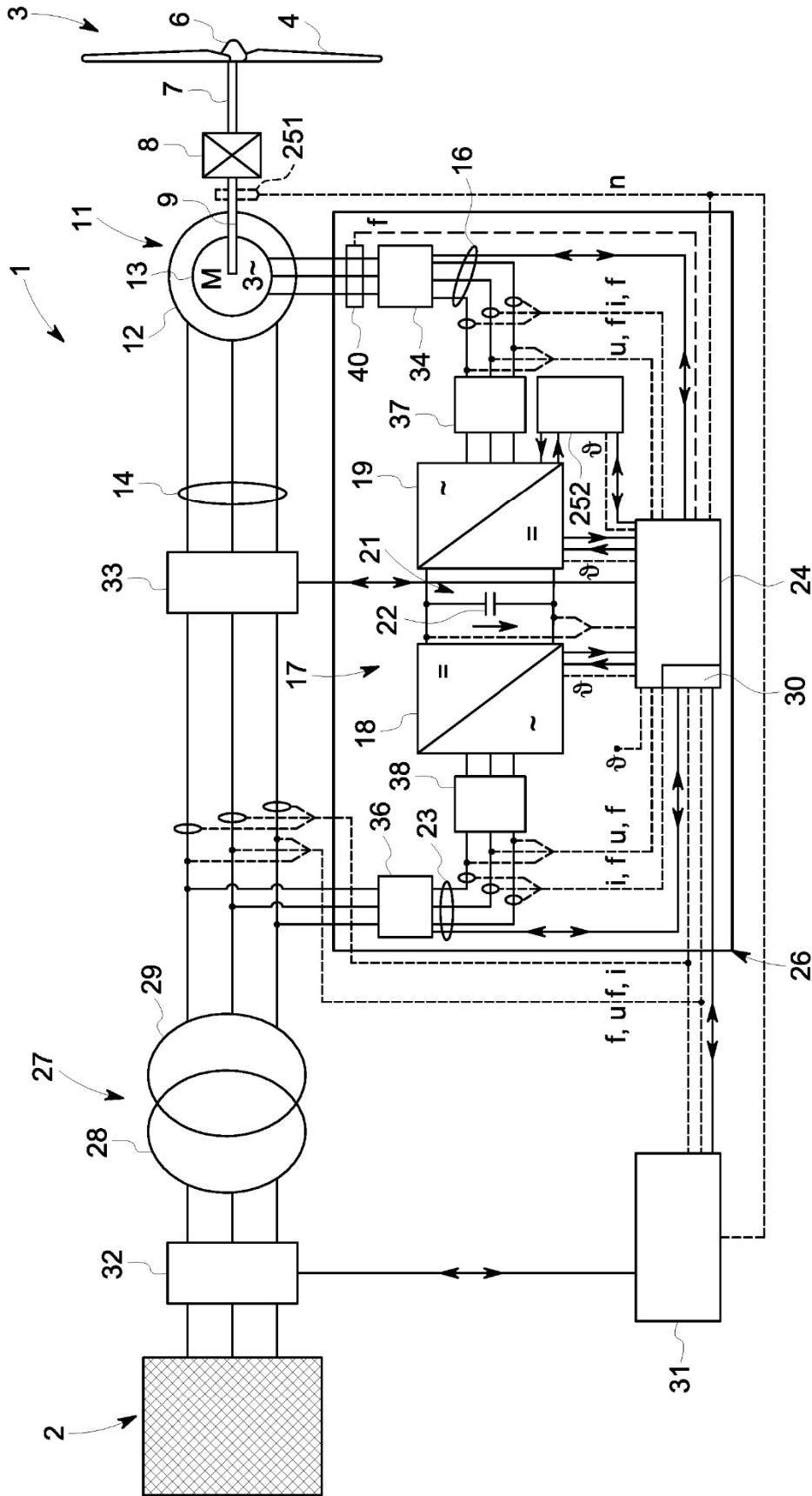
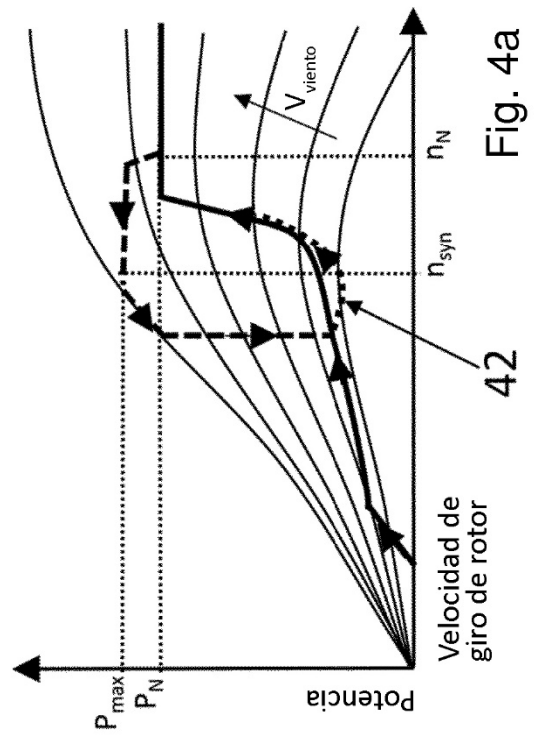
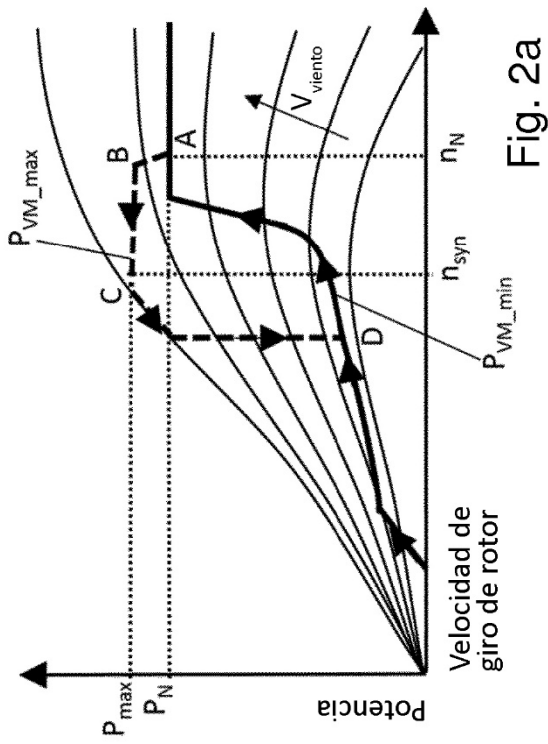
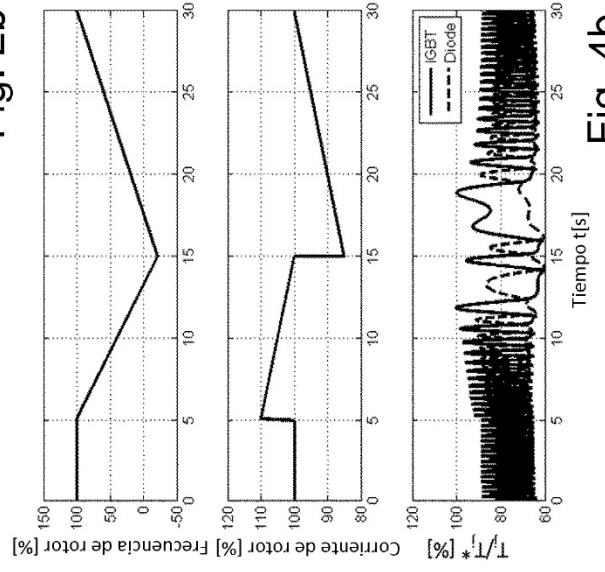
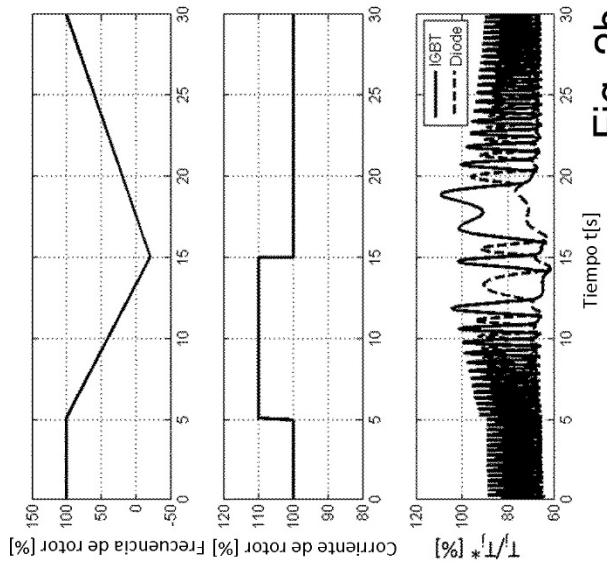


Fig. 1



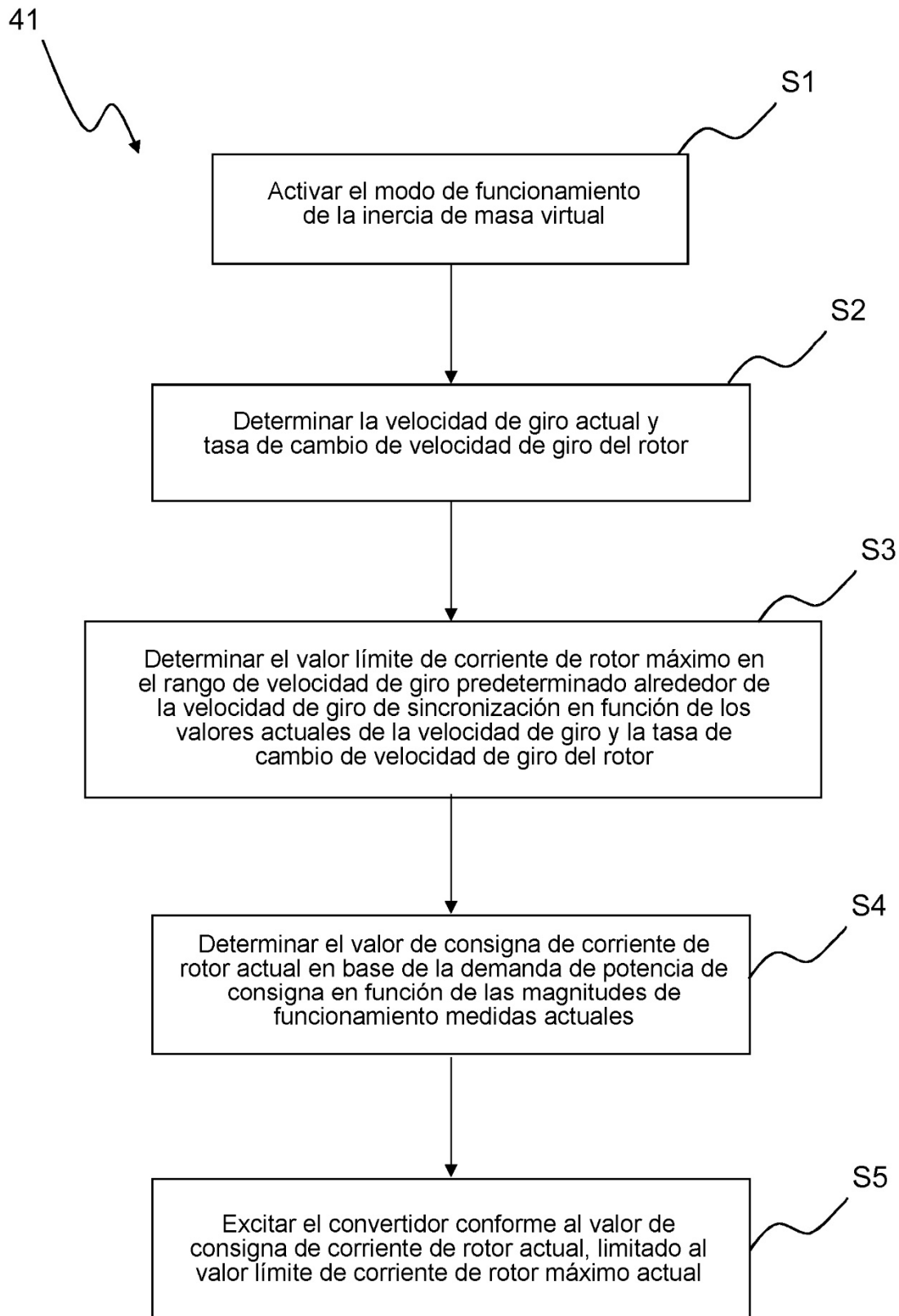


Fig. 3



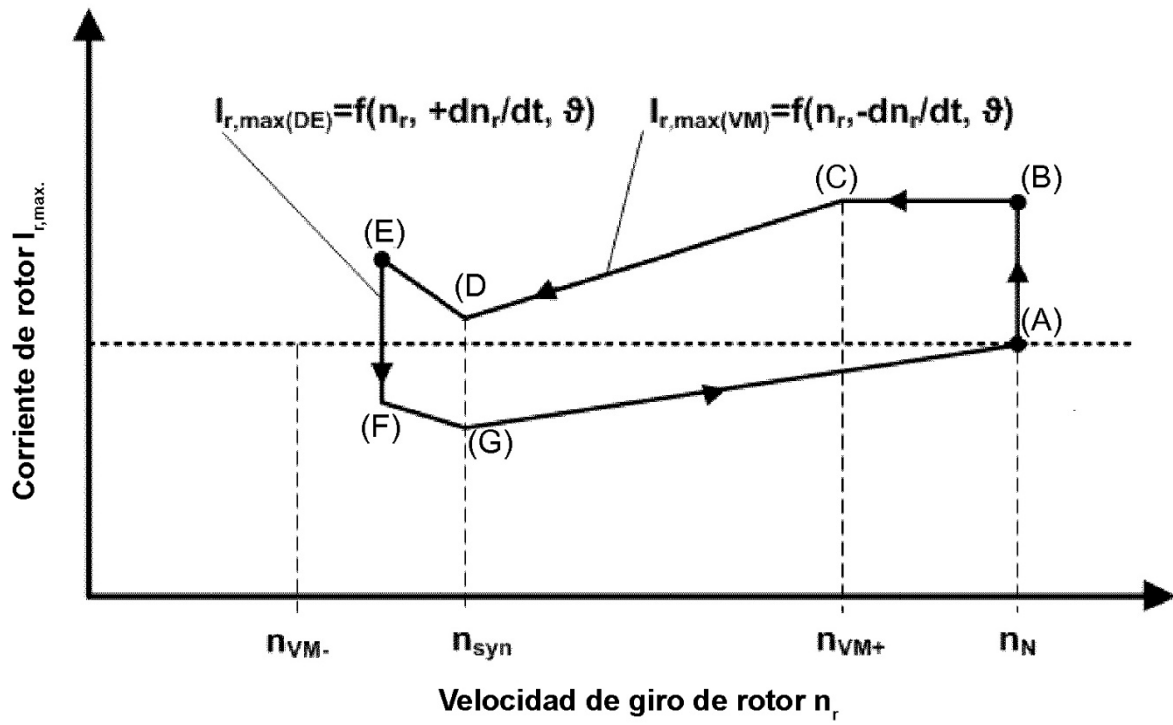


Fig. 5

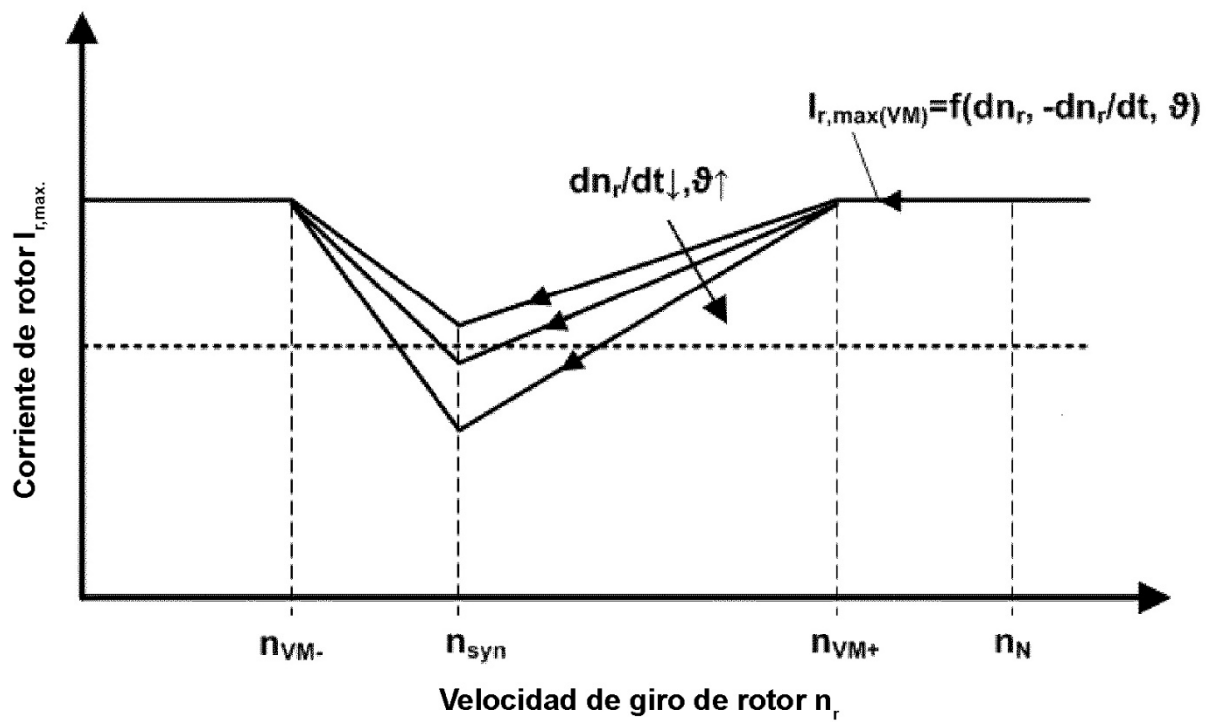


Fig. 6

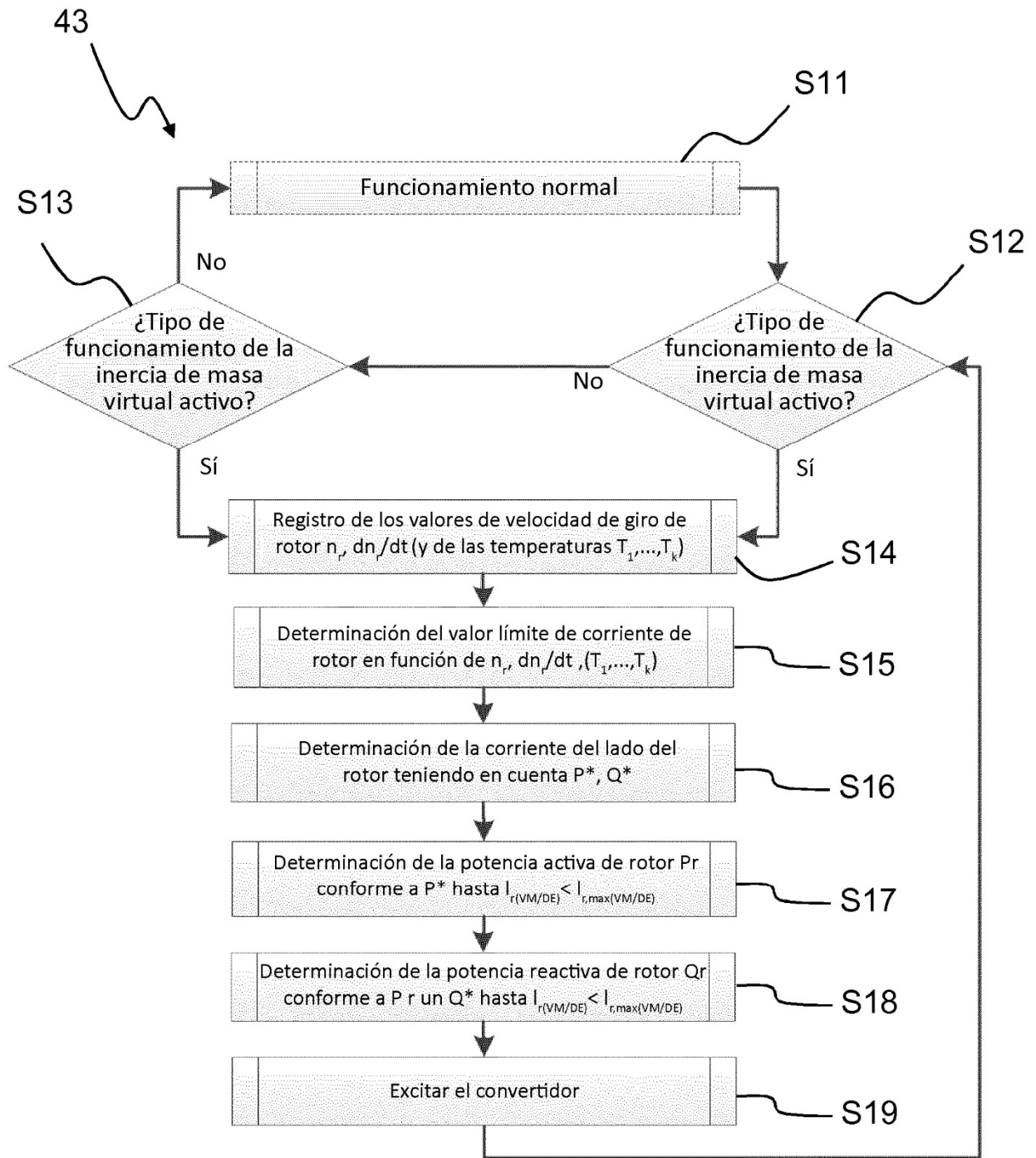


Fig. 7

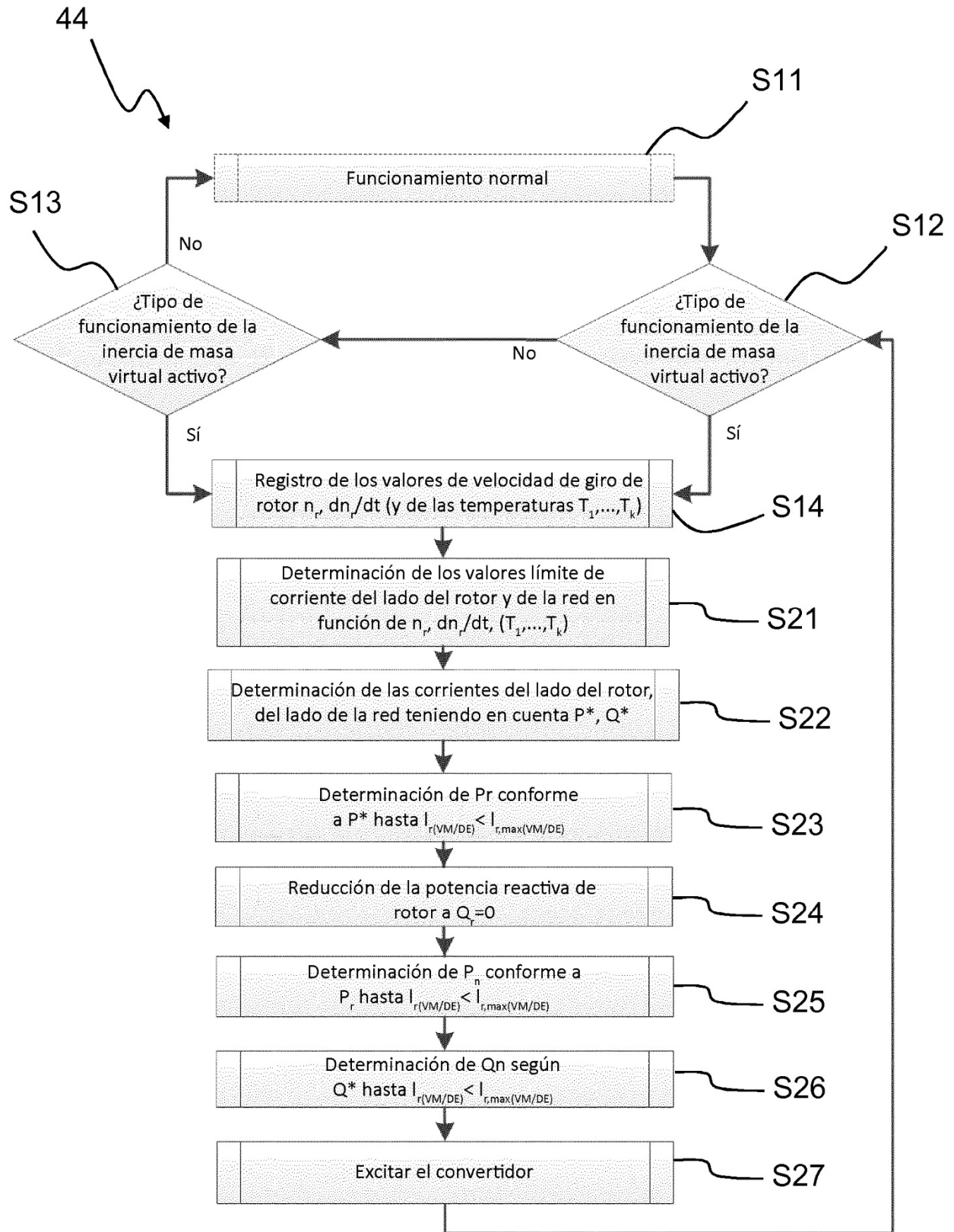


Fig. 8

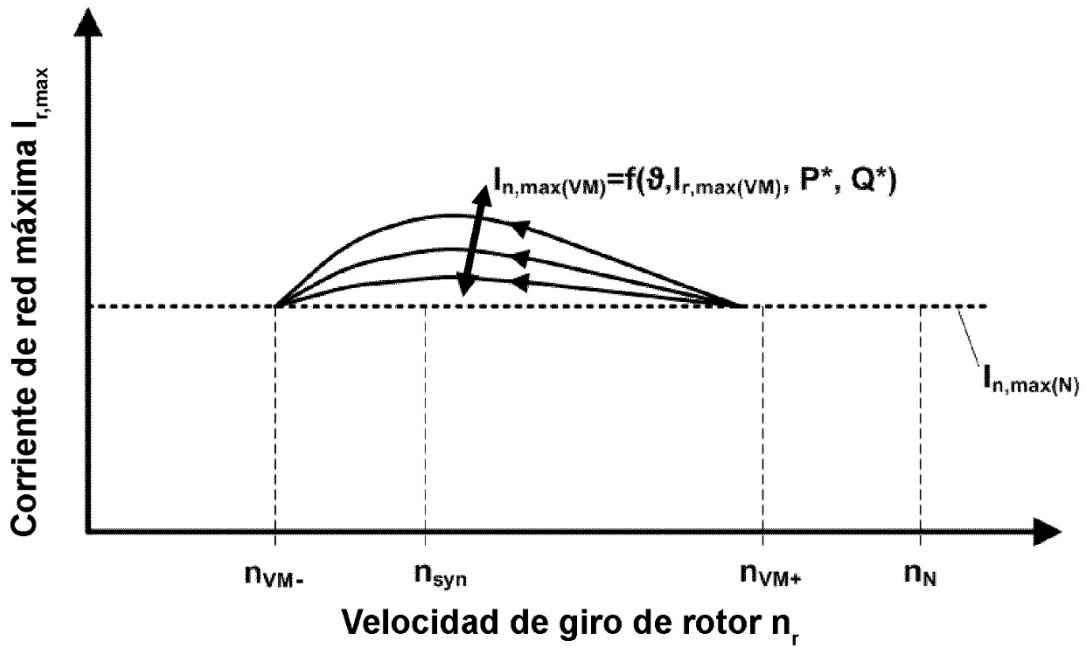


Fig. 9

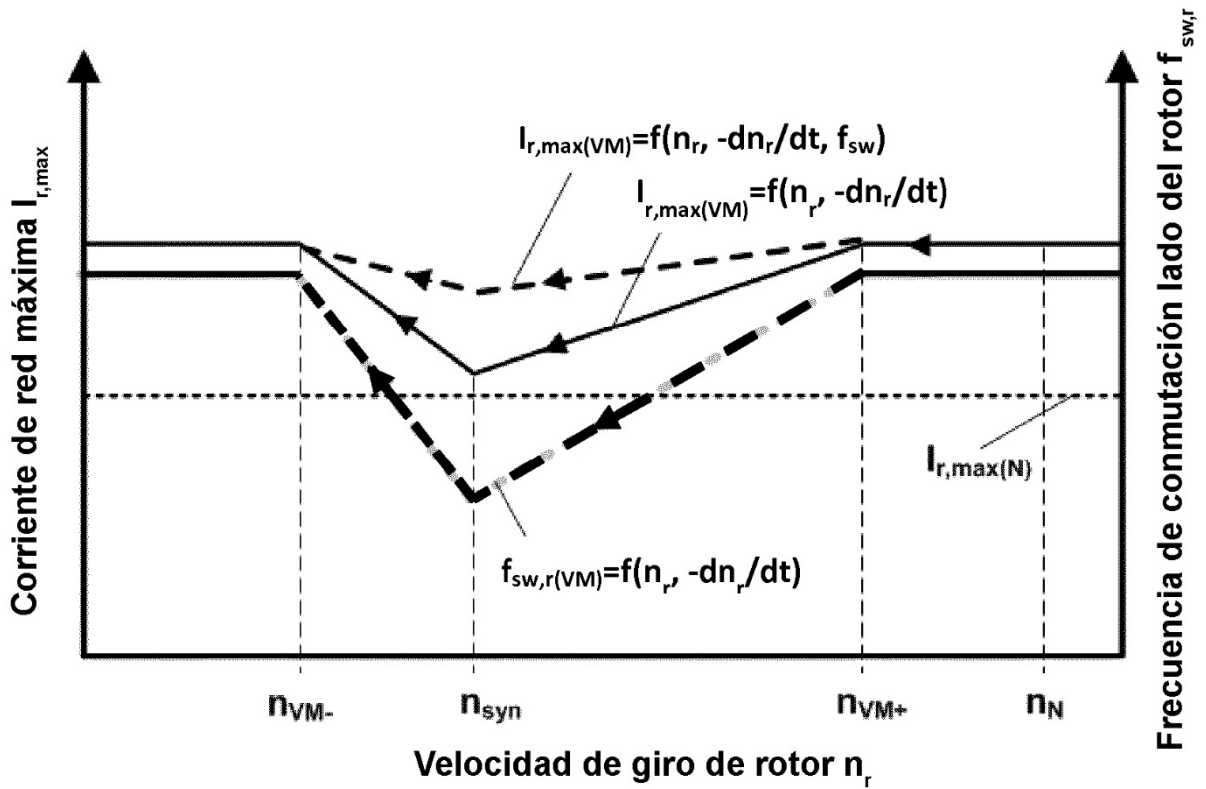


Fig. 11

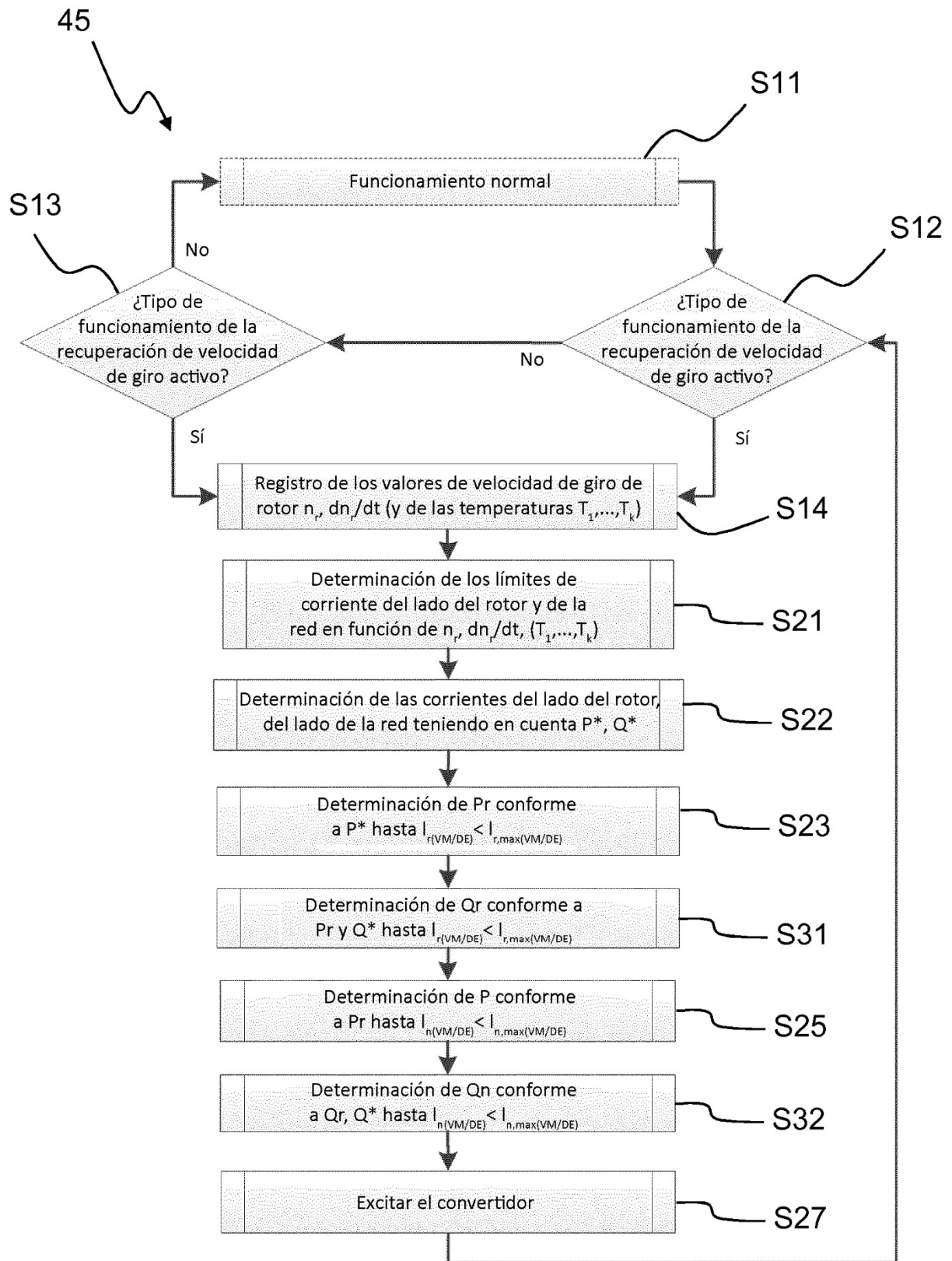


Fig. 10