



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 319 647**

51 Int. Cl.:
H02P 9/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **04020382 .0**

96 Fecha de presentación : **27.08.2004**

97 Número de publicación de la solicitud: **1630948**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **01.03.2006**

54 Título: **Regulación de potencia de máquinas de campo giratorio.**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
11.05.2009

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
11.05.2009

73 Titular/es: **Woodward SEG GmbH & Co. KG.**
Krefelder Weg 47
47906 Kempen, DE

72 Inventor/es: **Geniusz, Andrzej**

74 Agente: **Carpintero López, Mario**

ES 2 319 647 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

Regulación de potencia de máquinas de campo giratorio.

5 Campo de la invención

La presente invención se refiere a la regulación de la potencia activa y reactiva suministrada o absorbida por una máquina de campo giratorio.

10 Antecedentes de la invención

Máquinas de campo giratorio, como las máquinas síncronas y las máquinas asíncronas con rotor de jaula de ardilla o inducido de anillos colectores, se emplean en una pluralidad de aplicaciones técnicas, tanto en funcionamiento de motor como también de generador. Por ejemplo, se emplean en instalaciones para la generación descentralizada de energía eléctrica, como por ejemplo, instalaciones de energía eólica, generadores accionados por el árbol del buque, acumuladores de masa de inercia y plantas de cogeneración, generadores síncronos y asíncronos con inducido en cortocircuito.

En el caso de velocidad de rotación casi constante, los generadores síncronos y los generadores asíncronos con inducido en cortocircuito pueden suministrar principalmente la energía eléctrica generada con tensión y frecuencia constantes directamente a la red de corriente trifásica. Las ventajas de instalaciones semejantes son una estructura sencilla y robusta, un pequeño coste de mantenimiento y una elevada fiabilidad.

Las instalaciones de velocidad de rotación variable, como por ejemplo, la máquina asíncrona con inducido de anillos colectores, pueden suministrar una potencia eléctrica adaptada con velocidad de rotación variable del generador. El estator de la máquina está unido con la red, y la amplitud y frecuencia de su tensión se fijan por la red. Al rotor se le aplica una tensión variable con amplitud y frecuencia variables por un ondulator pulsado que es componente de un convertidor. Mediante el cambio de esta tensión de sistema trifásico aplicada al rotor con frecuencia de deslizamiento variable, en este caso pueden ajustarse todos los estados posibles de funcionamiento (por ejemplo, funcionamiento subsíncrono o supersíncrono, así como de motor y de generador).

Para la regulación de las máquinas de campo giratorio se emplea habitualmente la regulación orientada de campo, como se representa, por ejemplo, en el documento EP 0 043 973 A1. El objetivo de la regulación orientada de campo consiste en realizar el desacoplamiento de los componentes de la corriente que forman el campo y el momento, es decir, que el momento de rotación y la corriente de magnetización (o el flujo en el rotor) puedan ajustarse independientemente uno de otro. Este comportamiento se produce en máquinas asíncronas con inducido de anillos colectores cuando la corriente en el rotor se orienta al indicador espacial de flujo en el rotor. La regulación tiene lugar en este caso en un sistema rotativo de coordenadas de campo, debiéndose conocer el ángulo de posición del rotor y la posición del indicador de tensión en bornas del estator para la transformación de coordenadas. Las potencias activas y reactivas de la máquina de campo giratorio sólo pueden regularse indirectamente en este procedimiento, además, es necesario un bucle de regulación de la corriente subordinado al bucle de regulación de potencia en forma de una regulación en cascada.

Al contrario de la regulación orientada de campo, el documento "Sensoreless Multiscalar Control of Double Fed Machine for Wind Power Generators" de Z. Krezminski, publicado en la IEEE Conference Power Conversion en Osaka, Japón, 2002, da a conocer una regulación de potencia para una máquina asíncrona de doble alimentación en la que la regulación toma por base un modelo de sistema multiescalar. El modelo de sistema se basa en la definición de variables de estado de la máquina asíncrona y de las ecuaciones correspondientes de estado (ecuaciones diferenciales) de las variables de estado. Mediante el empleo de retroalimentaciones no lineales se linealizan las ecuaciones de estado, y convierte el sistema global en dos sistemas parciales lineales, un sistema mecánico y uno eléctrico. La regulación del sistema parcial mecánico se realiza mediante un regulador PI, que regula las desviaciones del valor de consigna de la variable de estado que se produce como producto vectorial del flujo en el estator y la corriente en el rotor, mientras que la regulación del sistema parcial electromagnético se realiza por un regulador PI que regula las desviaciones del valor de consigna de la variable de estado que se produce como producto escalar del flujo en el estator y la corriente en el estator. Para la regulación de las potencias activas y reactivas es necesario superponer a los bucles de regulación para la regulación del sistema parcial mecánico y electromecánico, respectivamente un bucle de regulación para la regulación de la potencia activa y reactiva en forma de una regulación en cascada. En este caso el valor de salida del regulador de potencia activa representa el valor de consigna para el bucle de regulación mecánica y el valor de salida del regulador de potencia reactiva representa el valor de consigna para el bucle de regulación electromagnética.

En la regulación de potencia según Krzeminski, la regulación no se realiza más en un sistema rotativo de coordenadas de campo, sino que puede realizarse en un sistema de coordenadas solidario con el devanado, es decir, en un sistema de coordenadas fijo con el estator o fijo con el rotor. Mediante el empleo de los productos vectoriales y escalares a partir del flujo en el estator y la corriente en el rotor se hace posible la regulación en sistemas de coordenadas solidarios con el devanado, dado que los productos contienen toda la información sobre la posición recíproca del vector de flujo en el estator y el vector de corriente en el rotor. La retroalimentación no lineal hace posible una linealización, y por consiguiente una simplificación del bucle de regulación mecánica y electromagnética.

No obstante, la regulación de potencia de Krzeminski presenta algunas desventajas. Los parámetros de la regulación dependen fuertemente del punto de trabajo empleado (por ejemplo, la velocidad de rotación), de forma que los reguladores empleados del bucle de regulación de potencia y de los bucles subordinados de regulación mecánica y electromagnética deben diseñarse nuevamente para diferentes puntos de trabajo. Además, está limitada la zona de deslizamiento de la regulación. Finalmente no se produce una dinámica y estabilidad satisfactorias de la regulación.

Resumen de la invención

Por ello el objetivo de la presente invención es hacer posible una regulación sencilla y al mismo tiempo estable de la potencia activa y reactiva de las máquinas de campo giratorio.

Para la solución de este objetivo se propone un procedimiento para la regulación de la potencia activa y reactiva suministrada o absorbida por una máquina de campo giratorio en un sistema de coordenadas solidario con el devanado, generándose un primer valor de salida de regulación con un primer regulador en función de una desviación del valor de consigna de la potencia activa, y generándose un segundo valor de salida de regulación con un segundo regulador en función de una desviación del valor de consigna de la potencia reactiva, y cargándose el primer y el segundo valor de salida de regulación con correspondientes valores de retroalimentación que son funciones de al menos un valor de sistema variable en el tiempo de la máquina de campo giratorio, caracterizado porque una tensión o una corriente de la máquina de campo giratorio se determina como valor de reglaje al menos a partir del primer y segundo valor de salida de regulación alimentados con los valores de retroalimentación sin otra regulación.

La máquina de campo giratorio puede ser una máquina asíncrona con rotor de jaula de ardilla o inducido de anillos colectores o una máquina síncrona, que cada vez pueden trabajar como motor o generador. En el caso de la máquina asíncrona es posible un funcionamiento tanto subsíncrono como supersíncrono.

Para el control de la potencia activa y de la potencia reactiva de la máquina de campo giratorio se propone cada vez un valor de consigna para la potencia activa y un valor de consigna para la potencia reactiva, y por la comparación con las potencias activas y reactivas medidas (potencias verdaderas) determina una desviación eventual del valor de consigna. En el caso de desviaciones del valor de consigna se cambia una tensión o una corriente de la máquina de campo giratorio como valor de reglaje de la regulación, hasta que desaparecen las desviaciones del valor de consigna o al menos quedan por debajo de un umbral predeterminado. Si la máquina de campo giratorio es una máquina asíncrona de doble alimentación, el valor de reglaje es, por ejemplo, la tensión aplicada en el rotor.

La regulación se realiza en un sistema de coordenadas solidario con el devanado (solidario con el estator o solidario con el rotor), lo que puede conseguirse, por ejemplo, por elección apropiada de los valores de retroalimentación. Al contrario que la regulación orientada de campo, en la regulación de la presente invención no es necesaria información sobre la posición del indicador espacial de las corrientes y tensiones de la máquina de campo giratorio (por ejemplo, indicador de tensión en bornas del estator) referido a un determinado sistema de coordinación.

Según la presente invención se emplea sólo un regulador para la regulación correspondiente de la desviación del valor de consigna de la potencia activa y de la desviación del valor de consigna de la potencia reactiva. En este caso puede tratarse de un regulador lineal, como por ejemplo, un regulador proporcional (regulador P), un regulador proporcional-integral (regulador PI) con algoritmos de integración lineales, un regulador proporcional-diferencial (regulador PD) o un regulador proporcional-integral-diferencial (regulador PID), o también un regulador no lineal, como por ejemplo, un regulador PI con algoritmos de integración no lineales; no obstante, también pueden instalarse todo tipo de reguladores. Esta estructura sencilla se consigue porque las potencias activa y reactiva se eligen directamente como variables de estado en las que se basa la regulación. Por ello puede prescindirse de otros bucles subordinados de regulación. Además, el primer y el segundo valor de salida de regulación se cargan con valores de retroalimentación que se eligen de forma que las variables de estado se desacoplan al menos parcialmente y se consigue una estabilización y simplificación de todo el sistema.

A partir del primer y segundo valor de salida de regulación alimentados con los valores de retroalimentación, y dado el caso, todavía otros valores, entonces se determina una tensión o una corriente de la máquina de campo giratorio como valor de reglaje mediante una función predefinida de forma ventajosa, sin que en este caso sea necesaria otra regulación de los valores de salida de regulación alimentados con los valores de retroalimentación. Así no es necesario en particular ajustar los valores de salida de regulación mediante el empleo de otros reguladores a los valores de consigna de cualquier tipo.

La base para la solución según la invención es la inserción de una regulación multiescalar, en la que a diferencia del estado de la técnica se define, no obstante, directamente la potencia activa y la potencia reactiva como variables de estado. Esto conduce en la síntesis de la regulación a prescindir de los bucles subordinados de regulación. Mediante la introducción de los valores de retroalimentación se transforman las ecuaciones originales de estado de la máquina de campo giratorio, de forma que se produce una estabilización y simplificación de las ecuaciones de estado. En este caso los valores de retroalimentación se determinan como funciones de al menos un valor de sistema variable en el tiempo de la máquina de campo giratorio, representándose los valores de sistema mencionados variables en el tiempo, por ejemplo, por tensiones, corrientes o flujos en el estator y/o rotor de la máquina de campo giratorio o la velocidad de rotación del rotor. Los valores de retroalimentación y los parámetros de los reguladores están ajustados ventajosamente entre sí y al sistema a regular.

ES 2 319 647 T3

Según una forma de realización preferida de la presente invención, los reguladores (46-1, 46-2) son reguladores lineales.

5 Los valores de retroalimentación, con los que se cargan el primer y el segundo valor de salida de regulación de los dos reguladores, pueden elegirse de forma que se linealiza el sistema global no lineal en sí por la elección de las potencias activas y reactivas como variables de estado.

10 Mediante la introducción de tales valores elegidos de retroalimentación se transforman las ecuaciones originales de estado de la máquina de campo giratorio, de forma que se linealizan las ecuaciones de estado de la potencia activa y reactiva. Las ecuaciones de estado linealizadas pueden representarse entonces como miembros lineales en la matriz de estados que describe la conexión de las variables de estado. En un caso especialmente ventajoso, las ecuaciones de estado linealizadas para la potencia activa y reactiva se corresponden, por ejemplo, con un respectivo sistema pasabajos de primer orden. Las constantes de tiempo de estos sistemas pasabajos son función de la matriz de estados del sistema global transformado. Para la regulación de la potencia activa y reactiva del sistema transformado pueden emplearse entonces reguladores lineales, por lo que puede llevarse a efecto una regulación de la potencia activa y reactiva económica, pero ante todo también sencilla y estable en amplios límites.

20 Según otra forma de realización preferida de la presente invención, los reguladores son reguladores PI. El regulador PI consigue la rápida desaparición de una desviación estacionaria de la regulación. En este caso pueden emplearse tanto reguladores PI ideales como también no ideales. Las constantes de tiempo de los reguladores PI se eligen de forma ventajosa teniendo en cuenta la influencia de los valores de retroalimentación en el sistema global.

25 Según otra forma de realización preferida de la presente invención, como valor de reglaje se determina una tensión en bornas del rotor de la máquina de campo giratorio. La máquina de campo giratorio puede ser entonces, por ejemplo, una máquina asíncrona de doble alimentación.

30 Según otra forma de realización preferida de la presente invención, como valor de reglaje se determina una tensión en bornas del estator de la máquina de campo giratorio. La máquina de campo giratorio puede ser entonces, por ejemplo, una máquina asíncrona con rotor de jaula de ardilla.

35 Según otra forma de realización preferida de la presente invención, como valor de reglaje se determina una corriente de excitación de la máquina de campo giratorio. La máquina de campo giratorio puede ser entonces, por ejemplo, una máquina síncrona excitada exteriormente.

40 Según otra forma de realización preferida de la presente invención, durante el cálculo de los valores de retroalimentación se prescinde de la resistencia óhmica del estator de la máquina de campo giratorio. Por ello se simplifica fuertemente el cálculo de los valores de retroalimentación. Imprecisiones eventuales de la modelización del sistema por prescindir de la resistencia del estator se compensan ventajosamente por el bucle de regulación.

45 Según otra forma de realización preferida de la presente invención, durante el cálculo de los valores de retroalimentación se parte de un estado estacionario. También mediante esta medida se simplifica fuertemente el cálculo de los valores de retroalimentación. Imprecisiones eventuales de la modelización del sistema por tomar un estado estacionario se compensan ventajosamente por el bucle de regulación.

50 Según otra forma de realización preferida de la presente invención se regula la potencia activa y reactiva del estator de la máquina de campo giratorio.

55 Según otra forma de realización preferida de la presente invención se regula la potencia activa y reactiva de la red en la que está conectada la máquina de campo giratorio.

60 Según otra forma de realización preferida de la presente invención, el primer valor de salida de regulación se carga con un valor de retroalimentación que se corresponde con el producto vectorial de la tensión en bornas del rotor y el flujo en el estator de la máquina de campo giratorio, y el segundo valor de salida de regulación se carga con un valor de retroalimentación que se corresponde con el producto escalar de la tensión en bornas del rotor y el flujo en el estator. Los productos vectoriales y escalares no deben calcularse en este caso necesariamente directamente de la tensión en bornas del rotor y del flujo en el estator, también es posible un cálculo indirecto de los valores de retroalimentación mediante funciones de valores del sistema de la máquina de campo giratorio que se corresponden con los productos vectoriales y escalares. La elección de los valores de retroalimentación según esta forma de realización preferida de la presente invención es apropiada en particular para una máquina asíncrona de doble alimentación, en la que se emplea la tensión en bornas del rotor como valor de reglaje de la regulación.

65 Mediante el empleo del producto vectorial y del producto escalar de la tensión en bornas del rotor y el flujo en el estator en la regulación según la invención, se hace posible prescindir de la información sobre las posiciones del indicador espacial referidas a un determinado sistema de coordenadas, y facilitar una síntesis sencilla de regulación a pesar de la no linealidad del sistema original. El estado de la máquina depende físicamente de la posición recíproca del indicador espacial que ha sido elegido para la descripción de la dinámica. No obstante, las relaciones entre indicadores espaciales pueden describirse también sin información angular separada por producto vectorial y escalar. El diseño de

ES 2 319 647 T3

la regulación puede tener lugar en cualquier sistema de coordenadas solidario con el devanado (por ejemplo, solidario con el estator o solidario con el rotor).

5 Según otra forma de realización preferida de la presente invención, los valores de retroalimentación son funciones al menos de la tensión en bornas del estator, del flujo en el estator, de la corriente en el rotor y de la velocidad de rotación del rotor. Los valores de retroalimentación en general no pueden calcularse directamente mediante los productos vectoriales y escalares a partir de la tensión en bornas del rotor y el flujo en el estator, dado que la tensión en bornas del rotor sirve como valor de reglaje. No obstante, a partir de las ecuaciones de estado que describen las variables de estado de la máquina de campo giratorio pueden derivarse los valores de retroalimentación como funciones de al menos la tensión en bornas del estator, el flujo en el estator, la corriente en el rotor y la velocidad de rotación del rotor. Estas funciones pueden depender adicionalmente de las inductancias de la máquina de campo giratorio y de la resistencia del estator. La dependencia de los valores de retroalimentación de la tensión en bornas del estator, flujo en el estator, corriente en el rotor y velocidad de rotación del rotor se produce, por ejemplo, en el caso de la máquina asíncrona de doble alimentación al emplear la tensión en bornas del rotor como valor de reglaje de la regulación.

15 Según otra forma de realización preferida de la presente invención, la tensión en bornas del rotor de la máquina de campo giratorio se determina como valor de reglaje sin otra regulación a partir del primer y segundo valor de salida de regulación alimentados con el valor de retroalimentación y el flujo en el estator. Un modo de proceder semejante es ventajoso en particular en una máquina asíncrona de doble alimentación.

20 Según otra forma de realización preferida de la presente invención se mide al menos la tensión en bornas del estator y la corriente en el rotor de la máquina de campo giratorio. Un modo de proceder semejante es ventajoso en particular en una máquina asíncrona de doble alimentación. La medición puede realizarse en este caso, por ejemplo, en coordenadas trifásicas naturales y los valores medidos pueden transformarse a continuación en un sistema de coordenadas bifásico.

25 Según otra forma de realización preferida de la presente invención se mide la corriente en el estator de la máquina de campo giratorio. Si no existe un indicador de posición para la medición de la posición angular del rotor y la velocidad de rotación del rotor, puede ser necesaria la medición de la corriente en el estator para hacer posible un cálculo de la posición angular del rotor y la velocidad de rotación del rotor.

30 Según otra forma de realización preferida de la presente invención se mide la velocidad de rotación del rotor de la máquina de campo giratorio, o se determina a partir de la tensión en bornas del estator, la corriente en el estator y la corriente en el rotor de la máquina de campo giratorio. La medición de la velocidad de rotación del rotor puede realizarse, por ejemplo, mediante un indicador de posición.

35 Según otra forma de realización preferida de la presente invención se mide la posición angular del rotor de la máquina de campo giratorio, o se determina a partir de la tensión en bornas del estator, la corriente en el estator y la corriente en el rotor de la máquina de campo giratorio. La medición de la posición angular del rotor puede realizarse, por ejemplo, mediante un indicador de posición.

40 Según otra forma de realización preferida de la presente invención, el flujo en el estator de la máquina de campo giratorio se calcula a partir de la tensión en bornas del estator y la frecuencia angular de la tensión en bornas del estator de la máquina de campo giratorio.

45 Según otra forma de realización preferida de la presente invención se miden cada vez las tensiones y corrientes de la máquina de campo giratorio, y luego se transforman en un sistema de coordenadas bifásico, y el valor de reglaje se determina en un sistema de coordenadas bifásico y luego se transforma a un sistema de coordenadas trifásico. Las tensiones y corrientes de la máquina de campo giratorio se miden en este caso como valores trifásicos naturales.

50 Según otra forma de realización preferida de la presente invención, la máquina de campo giratorio es una máquina asíncrona de doble alimentación cuyo estator está unido directamente con una red, y cuyo rotor está unido con un convertidor. El convertidor puede comprender en este caso dos onduladores pulsados y un circuito intermedio, uno de los onduladores pulsados puede estar unido con el rotor, y el otro pulsador ondulado puede estar unido con la red. No obstante, la máquina de campo giratorio puede ser igualmente una máquina asíncrona con rotor de jaula de ardilla o una máquina síncrona.

55 Para la solución del objetivo de la invención se propone además un programa informático con comandos cuya ejecución induce a un procesador a realizar el procedimiento descrito arriba de regulación. El procedimiento de regulación adelantado es muy apropiado para la implementación en un procesador que consigue las desviaciones del valor de consigna y los valores de retroalimentación, por ejemplo, como valores de entrada, y emite el valor de reglaje como valor de salida. También el cálculo de los valores de retroalimentación puede estar implementado dentro del programa, si el procesador se alimenta con los valores medidos necesarios de corrientes, tensiones, flujos y velocidades angulares de la máquina de campo giratorio. El programa informático puede cargarse, por ejemplo, durante la puesta en marcha de la máquina de campo giratorio en la memoria principal del procesador, y luego puede ejecutarse. Es posible de forma ventajosa una adaptación posterior de los parámetros de los reguladores o dado el caso de los valores de retroalimentación.

ES 2 319 647 T3

Además, para la solución del objetivo de la invención se propone un producto de programa informático que comprende un programa informático con comandos cuya ejecución induce a un procesador a realizar el procedimiento descrito arriba de regulación. El producto de programa informático puede ser, por ejemplo, un soporte de datos intercambiable como por ejemplo, una tarjeta de memoria, un disquete o un CD, en el que se ha grabado un programa informático con los comandos para la ejecución del procedimiento de regulación.

Además, para la solución del objetivo de la invención se propone un dispositivo para la regulación de la potencia activa y reactiva suministrada o absorbida por una máquina de campo giratorio en un sistema de coordenadas solidario con el devanado, con un primer regulador para la generación de un primer valor de salida de regulación en caso de desviaciones del valor de consigna de la potencia activa, con un segundo regulador para la generación de un segundo valor de salida de regulación en caso de desviaciones del valor de consigna de la potencia reactiva, y con medios para la carga del primer y del segundo valor de salida de regulación con correspondientes valores de retroalimentación que se producen como funciones de al menos un valor de sistema variable en el tiempo de la máquina de campo giratorio, caracterizado porque el dispositivo comprende los medios para la determinación de una tensión o de una corriente de la máquina de campo giratorio como valor de reglaje a partir de al menos el primer y el segundo valor de salida de regulación alimentados con los valores de retroalimentación sin otra regulación.

El dispositivo según la presente invención puede ser, por ejemplo, una unidad modular de regulación con interfaces para la introducción de desviaciones del valor de consigna y valores medidos, y para la entrega de valores de reglaje. Alternativamente el dispositivo puede estar integrado de forma fija en la máquina de campo giratorio. El dispositivo sólo necesita un regulador para la regulación de la potencia activa y un regulador para la regulación de la potencia reactiva a causa de la elección apropiada de los valores de retroalimentación, combinándose los valores de salida de regulación después de la carga con los valores de retroalimentación correspondientes para la determinación del valor de reglaje de la regulación.

Según una forma de realización preferida de la presente invención, los reguladores son reguladores lineales.

Según otra forma de realización preferida de la presente invención, los reguladores son reguladores PI.

Según otra forma de realización preferida de la presente invención, el medio para la determinación de una tensión o de una corriente de la máquina de campo giratorio determina una tensión en bornas del rotor como valor de reglaje.

Según otra forma de realización preferida de la presente invención, el medio para la determinación de una tensión o de una corriente de la máquina de campo giratorio determina una tensión en el estator como valor de reglaje.

Según otra forma de realización preferida de la presente invención, el medio para la determinación de una tensión o de una corriente de la máquina de campo giratorio determina una corriente de excitación como valor de reglaje.

Según otra forma de realización preferida de la presente invención se regula la potencia activa y reactiva del estator de la máquina de campo giratorio.

Según otra forma de realización preferida de la presente invención se regula la potencia activa y reactiva de la red en la que está conectada la máquina de campo giratorio.

Según otra forma de realización preferida de la presente invención, el valor de salida de regulación del primer regulador se carga con un valor de retroalimentación que se corresponde con el producto vectorial de la tensión en bornas del rotor y el flujo en el estator de la máquina de campo giratorio, y el valor de salida de regulación del segundo regulador se carga con un valor de retroalimentación que se corresponde con el producto escalar de la tensión en bornas del rotor y el flujo en el estator.

Según otra forma de realización preferida de la presente invención, los valores de retroalimentación son funciones de la tensión en bornas del estator, del flujo en el estator, de la corriente en el rotor y de la velocidad angular del rotor.

Según otra forma de realización preferida de la presente invención, la tensión en bornas del rotor de la máquina de campo giratorio se determina como valor de reglaje a partir del primer y segundo valor de salida de regulación alimentados con valores de retroalimentación y del flujo en bornas del estator sin otra regulación.

Según otra forma de realización preferida de la presente invención, el dispositivo comprende medios para la medición de la tensión en bornas del estator y de la corriente en el rotor de la máquina de campo giratorio.

Según otra forma de realización preferida de la presente invención, el dispositivo comprende medios para la medición de la corriente en el estator.

Según otra forma de realización preferida de la presente invención, el dispositivo comprende medios para la medición de la velocidad de rotación del rotor de la máquina de campo giratorio o para su determinación a partir de la tensión en bornas del estator, la corriente en el estator y la corriente en el rotor de la máquina de campo giratorio.

ES 2 319 647 T3

Según otra forma de realización preferida de la presente invención, el dispositivo comprende medios para la medición de la posición angular del rotor de la máquina de campo giratorio o para su determinación a partir de la tensión en bornas del estator, la corriente en el estator y la corriente en el rotor de la máquina de campo giratorio.

5 Según otra forma de realización preferida de la presente invención, el dispositivo comprende medios para la medición de las tensiones y corrientes de la máquina de campo giratorio, y para su transformación en un sistema de coordenadas bifásico, y medios para la transformación del valor de reglaje determinado en un sistema de coordenadas bifásico en un sistema de coordenadas trifásico.

10 Según otra forma de realización preferida de la presente invención, la máquina de campo giratorio es una máquina asíncrona de doble alimentación cuyo estator está unido directamente con una red, y cuyo rotor está unido con un convertidor.

15 Además, para la solución de la invención se propone una máquina de campo giratorio con un dispositivo para la regulación de la potencia activa y reactiva suministrada o absorbida por la máquina de campo giratorio en un sistema de coordenadas solidario, según las características descritas ya arriba del dispositivo.

20 La máquina de campo giratorio puede ser en este caso tanto una máquina asíncrona con rotor de jaula de ardilla o inducido de anillos colectores, como también una máquina síncrona.

Éste y otros aspectos de la presente invención se clarifican mediante la descripción detallada siguiente de las formas de realización preferidas.

25 **Breve descripción de las figuras**

En las figuras muestran:

30 Fig. 1: una representación esquemática de una máquina asíncrona de doble alimentación en una red de corriente trifásica;

Fig. 2: una representación esquemática de la regulación según la invención de la potencia activa y reactiva de la máquina asíncrona de doble alimentación según la fig. 1; y

35 Fig. 3: una representación esquemática de la unidad de tratamientos de valores medidos 44 de la fig. 2.

Descripción detallada de la invención

40 La presente invención se refiere a la regulación de la potencia activa y reactiva de máquinas de campo giratorio. Esta regulación se explica a continuación con el ejemplo de una máquina asíncrona de doble alimentación con convertidor en el circuito del rotor. No obstante, la regulación según la invención es apropiada igualmente también para otras máquinas de campo giratorio, en particular para máquinas asíncronas con rotor de jaula de ardilla y convertidor total en el circuito del estator y para máquinas síncronas.

45 La fig. 1 muestra una máquina asíncrona 1 tal que se compone de un estator 10 y un rotor 11. El rotor se une directamente o a través de un engranaje con un árbol de accionamiento, y por ello a elección puede absorber (funcionamiento como generador) o suministrar (funcionamiento como motor) potencia mecánica.

50 El estator 10 de la máquina asíncrona 1 según la fig. 1 está unido directamente con una red trifásica 3, mientras que el rotor 11 está unido a la red trifásica 3 a través de un convertidor 2. El convertidor 2 se compone de un ondulator pulsado 22 en el lado de la red y un ondulator pulsado 20 en el lado de la máquina. Para el desacoplamiento de los dos onduladores pulsados 20 y 22 está previsto un condensador 21 en el circuito intermedio, de forma que la potencia de deslizamiento puede transmitirse en las dos direcciones a través del convertidor 2. A causa de la unión fija del estator 10 con la red trifásica 3, la tensión en bornas del estator está predeterminada en general por la red (según amplitud y frecuencia), las redes en isla conforman aquí una excepción. Al rotor 11 se le aplica una tensión variable con frecuencia variable por el ondulator pulsado 20, por lo que pueden ajustarse los diferentes estados de funcionamiento (funcionamiento subsíncrono/supersíncrono y funcionamiento como motor/como generador). Mediante la aplicación de la tensión en bornas del rotor puede controlarse correspondientemente también la absorción o suministro de potencia activa y potencia reactiva de la máquina asíncrona 1.

65

ES 2 319 647 T3

El modelo matemático de la máquina asíncrona 1 según la fig. 1 puede representarse de la forma general siguiente:

$$5 \quad u_s = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{d\tau} + j\omega_a \psi_s, \quad (1)$$

$$10 \quad u_r = R_r i_r + \frac{d\psi_r}{d\tau} + j(\omega_a - \omega_r) \psi_r, \quad (2)$$

$$15 \quad J \frac{d\omega_r}{d\tau} = \text{Im}[\psi_s i_s] - m_0. \quad (3)$$

20 En este caso ψ_r y ψ_s son los vectores de flujo del rotor y del estator, i_s e i_r los vectores de corriente del estator y del rotor, u_s y u_r los vectores de tensión en bornas del estator y del rotor, R_s y R_r las resistencias del devanado del estator y del rotor, m_0 el par, J el momento de inercia, ω_r la velocidad de rotación del rotor, ω_a la velocidad de rotación del sistema de coordenadas referido y τ es el tiempo relativo. Las vocales en negrita indican aquí y a continuación los valores vectoriales, mientras que las vocales en cursiva indican aquí y a continuación los valores escalares.

25 Entre las corrientes y acoplamientos inductivos existe la siguiente relación:

$$30 \quad i_s = \frac{1}{L_s} \psi_s - \frac{L_m}{L_r} i_r, \quad (4)$$

$$35 \quad i_r = \frac{1}{L_r} \psi_r - \frac{L_m}{L_s} i_s, \quad (5)$$

denominando L_s , L_r y L_m la inductancia del estator, la inductancia del rotor y la inductancia mutua.

40 La transformación de las ecuaciones (1) a (5) conduce a una forma favorable de la ecuación diferencial de la máquina asíncrona:

$$45 \quad \frac{d\psi_{s\alpha S}}{d\tau} = -\frac{R_s}{L_s} \psi_{s\alpha S} + R_s \frac{L_m}{L_s} i_{r\alpha S} + u_{s\alpha S}, \quad (6)$$

$$50 \quad \frac{d\psi_{s\beta S}}{d\tau} = -\frac{R_s}{L_s} \psi_{s\beta S} + R_s \frac{L_m}{L_s} i_{r\beta S} + u_{s\beta S}, \quad (7)$$

$$55 \quad \frac{di_{r\alpha S}}{d\tau} = \frac{L_s^2 R_r + L_m^2 R_s}{L_s w_\sigma} i_{r\alpha S} + \frac{R_s L_m}{L_s w_\sigma} \psi_{s\alpha S} - \frac{L_m}{w_\sigma} \omega_r \psi_{s\beta S} + \frac{L_s}{w_\sigma} u_{r\alpha S} - \frac{L_m}{w_\sigma} u_{s\alpha S}, \quad (8)$$

$$60 \quad \frac{di_{r\beta S}}{d\tau} = -\frac{L_s^2 R_r + L_m^2 R_s}{L_s w_\sigma} i_{r\beta S} + \frac{R_s L_m}{L_s w_\sigma} \psi_{s\beta S} + \frac{L_m}{w_\sigma} \omega_r \psi_{s\alpha S} + \frac{L_s}{w_\sigma} u_{r\beta S} - \frac{L_m}{w_\sigma} u_{s\beta S}, \quad (9)$$

$$65 \quad \frac{d\omega_r}{d\tau} = \frac{L_m}{J L_s} (\psi_{s\alpha S} i_{r\beta S} - \psi_{s\beta S} i_{r\alpha S}) - \frac{1}{J} m_0. \quad (10)$$

ES 2 319 647 T3

En este caso la variable w_σ está definida como

$$w_\sigma = L_s L_r - L_m^2. \quad (11)$$

En las ecuaciones (6) a (10) y a continuación, el primer índice designa respectivamente el lugar (r: rotor, s: estator), el segundo índice indica el componente correspondiente en un sistema coordenado bifásico (α, β), y el tercer índice designa el sistema de referencia empleado (S: solidario con el devanado del estator, R: solidario con el devanado del rotor).

La presente invención parte de la elección de las variables de estado para la descripción del estado de la máquina asíncrona a partir de:

- Velocidad de rotación del rotor ω_r ,
- Potencia activa del estator p_s ,
- Potencia reactiva del estator q_s y
- Cuadrado del flujo en el estator $\psi_{sS}^2 = |\psi_{sS}|^2$.

Para la velocidad de rotación del rotor ω_r es válida la relación:

$$\frac{d\omega_r}{d\tau} = \frac{L_m}{JL_s} (\psi_{s\alpha S} i_{r\beta S} - \psi_{s\beta S} i_{r\alpha S}) - \frac{1}{J} m_0. \quad (12)$$

Los valores de momento de la potencia del generador pueden describirse mediante las ecuaciones (13) y (14):

$$p_s = u_{s\alpha S} i_{s\alpha S} + u_{s\beta S} i_{s\beta S}, \quad (13)$$

$$q_s = -u_{s\alpha S} i_{s\beta S} + u_{s\beta S} i_{s\alpha S}. \quad (14)$$

Bajo la adopción de un estado estacionario pueden representarse como sigue las potencias del generador:

$$P_s = \frac{1}{L_s} (u_{s\alpha S} \psi_{s\alpha S} + u_{s\beta S} \psi_{s\beta S}) - \frac{L_m}{L_s} \frac{(u_{s\beta S} \psi_{s\alpha S} - u_{s\alpha S} \psi_{s\beta S}) (\psi_{s\alpha S} i_{r\beta S} - \psi_{s\beta S} i_{r\alpha S})}{\psi_{sS}^2} + \frac{L_m}{L_s} \frac{(u_{s\alpha S} \psi_{s\alpha S} - u_{s\beta S} \psi_{s\beta S}) (\psi_{s\alpha S} i_{r\alpha S} - \psi_{s\beta S} i_{r\beta S})}{\psi_{sS}^2} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
 Q_s = & -\frac{1}{L_s} (u_{s\beta S} \Psi_{s\alpha S} - u_{s\alpha S} \Psi_{s\beta S}) - \\
 & \frac{L_m (u_{s\beta S} \Psi_{s\alpha S} - u_{s\alpha S} \Psi_{s\beta S}) (\Psi_{s\alpha S} i_{r\alpha S} + \Psi_{s\beta S} i_{r\beta S})}{L_s \Psi_{sS}^2} + \\
 & + \frac{L_m (u_{s\alpha S} \Psi_{s\alpha S} + u_{s\beta S} \Psi_{s\beta S}) (\Psi_{s\alpha S} i_{r\beta S} - \Psi_{s\beta S} i_{r\alpha S})}{L_s \Psi_{sS}^2}
 \end{aligned} \tag{16}$$

Mediante la diferenciación de las ecuaciones (15) y (16) y por sustitución de las ecuaciones (6), (7), (8) y (9) se consiguen después de la simplificación las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\begin{aligned}
 \frac{dp_s}{d\tau} = & -\frac{1}{T_v} p_s - \frac{L_s}{L_m} \frac{\Psi_{sS}^2}{(u_{s\beta S} \Psi_{s\alpha S} - u_{s\alpha S} \Psi_{s\beta S})} \left[-\frac{1}{T_v} \frac{(u_{s\alpha S} \Psi_{s\alpha S} + u_{s\beta S} \Psi_{s\beta S})}{L_m (u_{s\beta S} \Psi_{s\alpha S} - u_{s\alpha S} \Psi_{s\beta S})} \Psi_{sS}^2 + \right. \\
 & + \frac{1}{T_v} \frac{u_{s\alpha S} \Psi_{s\alpha S} + u_{s\beta S} \Psi_{s\beta S}}{u_{s\beta S} \Psi_{s\alpha S} - u_{s\alpha S} \Psi_{s\beta S}} (\Psi_{s\alpha S} i_{r\alpha S} + \Psi_{s\beta S} i_{r\beta S}) + \omega_r (\Psi_{s\alpha S} i_{r\alpha S} + \Psi_{s\beta S} i_{r\beta S}) + \\
 & + \omega_r \frac{L_m}{w_\sigma} \Psi_{sS}^2 + \frac{L_s}{w_\sigma} (u_{r\beta S} \Psi_{s\alpha S} - u_{r\alpha S} \Psi_{s\beta S}) - \frac{L_m}{w_\sigma} (u_{s\beta S} \Psi_{s\alpha S} - u_{s\alpha S} \Psi_{s\beta S}) + \\
 & \left. + u_{s\alpha S} i_{r\beta S} - u_{s\beta S} i_{r\alpha S} \right]
 \end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{dq_s}{d\tau} = & -\frac{1}{T_v} q_s - \frac{L_s}{L_m} \frac{\Psi_{sS}^2}{(u_{s\beta S} \Psi_{s\alpha S} - u_{s\alpha S} \Psi_{s\beta S})} \left[-\frac{1}{T_v} \frac{\Psi_{sS}^2}{L_m} + \right. \\
 & + \frac{1}{T_v} \frac{u_{s\alpha S} \Psi_{s\alpha S} + u_{s\beta S} \Psi_{s\beta S}}{u_{s\beta S} \Psi_{s\alpha S} - u_{s\alpha S} \Psi_{s\beta S}} (\Psi_{s\alpha S} i_{r\alpha S} - \Psi_{s\beta S} i_{r\alpha S}) + \frac{R_s L_m}{L_s w_\sigma} \Psi_{sS}^2 + \frac{R_s L_m}{L_s} i_{sS}^2 - \\
 & - \omega_r (\Psi_{s\alpha S} i_{r\beta S} + \Psi_{s\beta S} i_{r\alpha S}) + \frac{L_s}{w_\sigma} (u_{s\alpha S} \Psi_{r\alpha S} + u_{s\beta S} \Psi_{r\beta S}) - \\
 & \left. - \frac{L_s}{w_\sigma} (u_{s\alpha S} \Psi_{s\alpha S} + u_{s\beta S} \Psi_{s\beta S}) + u_{s\alpha S} i_{r\alpha S} + u_{s\beta S} i_{r\beta S} \right]
 \end{aligned} \tag{18}$$

En este caso es

$$T_v = \frac{w_\sigma}{R_s L_s + R_s L_r} \tag{18a}$$

ES 2 319 647 T3

El cuadrado del valor del flujo en el estator puede calcularse como sigue:

$$\psi_{sS}^2 = \psi_{s\alpha S}^2 + \psi_{s\beta S}^2 \quad (19)$$

Mediante la derivación de la ecuación (19) y mediante la sustitución de las ecuaciones (6) y (7) se consigue la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{d(\psi_{sS}^2)}{d\tau} = -2\frac{R_s}{L_s}\psi_{sS}^2 + 2\frac{R_s L_m}{L_s}(\psi_{s\alpha S} i_{r\alpha S} + \psi_{s\beta S} i_{r\beta S}) + 2(u_{s\alpha S}\psi_{s\alpha S} + u_{s\beta S}\psi_{s\beta S}) \quad (20)$$

Las cuatro ecuaciones de estado del sistema, basándose en la elección de las cuatro variables de estado según la presente invención, pueden resumirse como sigue:

$$\frac{d\omega_r}{d\tau} = \frac{L_m}{JL_s}(\psi_{s\alpha S} i_{r\beta S} - \psi_{s\beta S} i_{r\alpha S}) - \frac{1}{J}m_0 \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \frac{dp_s}{d\tau} = & -\frac{1}{T_v}p_s - \frac{L_s}{L_m} \frac{\psi_{sS}^2}{(u_{s\beta S}\psi_{s\alpha S} - u_{s\alpha S}\psi_{s\beta S})} \left[-\frac{1}{T_v} \frac{(u_{s\alpha S}\psi_{s\alpha S} + u_{s\beta S}\psi_{s\beta S})}{(u_{s\beta S}\psi_{s\alpha S} - u_{s\alpha S}\psi_{s\beta S})} \psi_{sS}^2 + \right. \\ & + \frac{1}{T_v} \frac{u_{s\alpha S}\psi_{s\alpha S} + u_{s\beta S}\psi_{s\beta S}}{u_{s\beta S}\psi_{s\alpha S} - u_{s\alpha S}\psi_{s\beta S}} (\psi_{s\alpha S} i_{r\alpha S} + \psi_{s\beta S} i_{r\beta S}) + \omega_r (\psi_{s\alpha S} i_{r\alpha S} + \psi_{s\beta S} i_{r\beta S}) + \\ & + \omega_r \frac{L_m}{w_\sigma} \psi_{sS}^2 + \frac{L_s}{w_\sigma} (u_{r\beta S}\psi_{s\alpha S} - u_{r\alpha S}\psi_{s\beta S}) - \frac{L_m}{w_\sigma} (u_{s\beta S}\psi_{s\alpha S} - u_{s\alpha S}\psi_{s\beta S}) + \\ & \left. + u_{s\alpha S} i_{r\beta S} - u_{s\beta S} i_{r\alpha S} \right] \quad (22) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dq_s}{d\tau} = & -\frac{1}{T_v}q_s - \frac{L_s}{L_m} \frac{\psi_{sS}^2}{(u_{s\beta S}\psi_{s\alpha S} - u_{s\alpha S}\psi_{s\beta S})} \left[-\frac{1}{T_v} \frac{\psi_{sS}^2}{L_m} + \right. \\ & + \frac{1}{T_v} \frac{u_{s\alpha S}\psi_{s\alpha S} + u_{s\beta S}\psi_{s\beta S}}{u_{s\beta S}\psi_{s\alpha S} - u_{s\alpha S}\psi_{s\beta S}} (\psi_{s\alpha S} i_{r\alpha S} - \psi_{s\beta S} i_{r\alpha S}) + \frac{R_s L_m}{L_s w_\sigma} \psi_{sS}^2 + \frac{R_s L_m}{L_s} i_{sS}^2 - \\ & - \omega_r (\psi_{s\alpha S} i_{r\beta S} + \psi_{s\beta S} i_{r\alpha S}) + \frac{L_s}{w_\sigma} (u_{s\alpha S}\psi_{r\alpha S} + u_{s\beta S}\psi_{r\beta S}) - \\ & \left. - \frac{L_s}{w_\sigma} (u_{s\alpha S}\psi_{s\alpha S} + u_{s\beta S}\psi_{s\beta S}) + u_{s\alpha S} i_{r\alpha S} + u_{s\beta S} i_{r\beta S} \right] \quad (23) \end{aligned}$$

$$\frac{d(\psi_{sS}^2)}{d\tau} = -2\frac{R_s}{L_s}\psi_{sS}^2 + 2\frac{R_s L_m}{L_s}(\psi_{s\alpha S} i_{r\alpha S} + \psi_{s\beta S} i_{r\beta S}) + 2(u_{s\alpha S}\psi_{s\alpha S} + u_{s\beta S}\psi_{s\beta S}) \quad (24)$$

ES 2 319 647 T3

Mediante la elección según la invención de la velocidad de rotación del rotor ω_r , potencia activa del estator p_s , potencia reactiva del estator q_s y cuadrado del flujo en el estator ψ_{sS}^2 como variables de estado, la regulación según la invención de la potencia activa y reactiva se realiza con sólo dos reguladores, uno para la potencia activa y uno para la potencia reactiva, dado que la potencia activa y reactiva son variables de estado inmediatas. Por ello puede prescindirse de los bucles subordinados de regulación, y se hace posible una estructura especialmente sencilla de la regulación. Además, desaparece la necesidad de una transformación angular en el bucle de regulación, de forma que el diseño de la regulación puede realizarse en un sistema de coordenadas cualesquiera.

No obstante, las ecuaciones diferenciales (22) y (23) no son apropiadas por motivos de la fuerte no linealidad para el diseño de regulación. Por ello la presente invención prevé transformar el sistema de las ecuaciones de estado, de forma que la potencia activa y reactiva formen un miembro lineal en la matriz del sistema. No obstante, mediante la transformación de la representación del estado del sistema el sistema tiene un carácter fuertemente no lineal. Este comportamiento no lineal se compensa de nuevo por miembros no lineales de retroalimentación. En el caso óptimo el sistema definido nuevamente para la respectiva potencia activa y la potencia reactiva debe desarrollar un comportamiento pasabajos de primer orden. Las constantes de tiempo de estos filtros pasabajos dependen de la matriz de estados del sistema definido nuevamente. Para el sistema definido nuevamente pueden emplearse entonces dos reguladores lineales, por ejemplo, dos reguladores PI.

La linealización pretendida de las ecuaciones de estado se consigue por la definición de las variables:

$$\begin{aligned}
 v_1 &= u_{r\beta S} \psi_{s\alpha S} - u_{r\alpha S} \psi_{s\beta S} \\
 &= -\frac{\psi_{sS}^2}{(u_{s\beta S} \psi_{s\alpha S} - u_{s\alpha S} \psi_{s\beta S})} \frac{w_\sigma}{L_s} \left[-\frac{1}{T_v} \frac{(u_{s\alpha S} \psi_{s\alpha S} + u_{s\beta S} \psi_{s\beta S})}{L_m (u_{s\beta S} \psi_{s\alpha S} - u_{s\alpha S} \psi_{s\beta S})} \psi_{sS}^2 + \right. \\
 &+ \frac{1}{T_v} \frac{u_{s\alpha S} \psi_{s\alpha S} + u_{s\beta S} \psi_{s\beta S}}{u_{s\beta S} \psi_{s\alpha S} - u_{s\alpha S} \psi_{s\beta S}} (\psi_{s\alpha S} i_{r\alpha S} + \psi_{s\beta S} i_{r\beta S}) + \\
 &+ \omega_r \left((\psi_{s\alpha S} i_{r\alpha S} + \psi_{s\beta S} i_{r\beta S}) + \frac{L_m}{w_\sigma} \psi_{sS}^2 \right) - \\
 &\left. - \frac{L_m}{w_\sigma} (u_{s\beta S} \psi_{s\alpha S} - u_{s\alpha S} \psi_{s\beta S}) + u_{s\alpha S} i_{r\beta S} - u_{s\beta S} i_{r\alpha S} + s_1 \right)
 \end{aligned} \tag{25}$$

y

$$\begin{aligned}
 v_2 &= u_{r\alpha S} \psi_{s\alpha S} + u_{r\beta S} \psi_{s\beta S} \\
 &= -\frac{w_\sigma}{L_m} \frac{\psi_{sS}^2}{(u_{s\beta S} \psi_{s\alpha S} - u_{s\alpha S} \psi_{s\beta S})} \left[-\frac{1}{T_v} \frac{\psi_{sS}^2}{L_m} + \right. \\
 &+ \frac{1}{T_v} \frac{u_{s\alpha S} \psi_{s\alpha S} + u_{s\beta S} \psi_{s\beta S}}{u_{s\beta S} \psi_{s\alpha S} - u_{s\alpha S} \psi_{s\beta S}} (\psi_{s\alpha S} i_{r\alpha S} - \psi_{s\beta S} i_{r\alpha S}) + \\
 &\left. - \frac{R_s L_m}{L_s w_\sigma} \psi_{sS}^2 + \frac{R_s L_m}{L_s} i_{sS}^2 - \omega_r (\psi_{s\alpha S} i_{r\beta S} - \psi_{s\beta S} i_{r\alpha S}) - \right. \\
 &\left. - \frac{L_m}{w_\sigma} (u_{s\alpha S} \psi_{s\alpha S} + u_{s\beta S} \psi_{s\beta S}) + u_{s\alpha S} i_{r\alpha S} + u_{s\beta S} i_{r\beta S} + s_2 \right)
 \end{aligned} \tag{26}$$

introduciéndose nuevamente los valores s_1 y s_2 para hacer posible la regulación del sistema.

Evidentemente en este caso v_1 de la ecuación (25) se corresponde con el producto vectorial de tensión en bornas del rotor y flujo en el estator, y v_2 de la ecuación (26) se corresponde con el producto escalar de la tensión en bornas del rotor y el flujo en el estator. La elección de las variables de estado y estas variables v_1 y v_2 permite prescindir de la información sobre la posición del indicador de posición en la regulación según la invención, por lo que se hace posible una regulación en un sistema de coordenadas solidario con el devanado, y a pesar de la no linealidad hacer posible una síntesis sencilla de la regulación. El estado de la máquina asíncrona 1 depende físicamente de la posición mutua de los indicadores de posición que han sido elegidos para la descripción de la dinámica. No obstante, las relaciones entre indicadores espaciales pueden describirse también sin la información angular separada mediante productos vectoriales y escalares. Los vectores de estado según la presente invención han sido elegidos por ello de forma que es posible una descripción mediante los productos vectoriales y escalares.

Puesto que la tensión en bornas del rotor u_{rs} (descrita por las componentes $u_{r\alpha s}$ y $u_{r\beta s}$) en las ecuaciones (25) y (26) es el valor de reglaje de la regulación, un cálculo de las variables v_1 y v_2 no puede realizarse directamente mediante la definición del producto vectorial y escalar de la tensión en bornas del rotor y el flujo en el estator (compárese respectivamente la primer línea de las ecuaciones (25) y (26)). Los productos vectoriales y escalares pueden formularse, no obstante, según las segundas filas de las ecuaciones (25) y (26) mediante valores del sistema, y por ello calcularse indirectamente.

Mediante la sustitución de las variables v_1 y v_2 según las ecuaciones (25) y (26) en las ecuaciones (22) y (23) se consigue la linealización pretendida de las ecuaciones de estado que se pueden resumir como sigue:

$$\frac{d\omega_r}{d\tau} = \frac{L_m}{JL_s} (\psi_{s\alpha s} i_{r\beta s} - \psi_{s\beta s} i_{r\alpha s}) - \frac{1}{J} m_0, \quad (27)$$

$$\frac{dp_s}{d\tau} = -\frac{1}{T_v} p_s + s_1, \quad (28)$$

$$\frac{dq_s}{d\tau} = -\frac{1}{T_v} q_s + s_2, \quad (29)$$

$$\frac{d(\psi_{sS}^2)}{d\tau} = -2 \frac{R_s}{L_s} \psi_{sS}^2 + 2 \frac{R_s L_m}{L_s} (\psi_{s\alpha s} i_{r\alpha s} + \psi_{s\beta s} i_{r\beta s}) + 2 (u_{s\alpha s} \psi_{s\alpha s} + u_{s\beta s} \psi_{s\beta s}). \quad (30)$$

Las ecuaciones (27) a (30) se emplean según la presente invención directamente para la síntesis de la regulación.

La fig. 2 muestra una representación esquemática de esta regulación. Están representadas de nuevo la máquina asíncrona 1 de doble alimentación con estator 10 y rotor 11, la red 3 de alimentación y el convertidor 2.

En este sistema se miden ahora diferentes tensiones y corrientes para la propuesta de la regulación según la invención de la potencia activa y reactiva, y se emplean para la regulación. Éstas son por separado la tensión de red u_N , la corriente de red i_N , la tensión en bornas del estator u_{sS} y la corriente en el rotor i_{rR} . Estas tensiones y corrientes se miden en coordenadas trifásicas naturales, y a continuación se convierten en un sistema de coordenadas bifásico solidario al estator o solidario al rotor mediante las unidades de transformación 40-1, 40-2, 40-3, y 40-5. Por ejemplo, existe entonces así la tensión en bornas del estator u_{sS} solidaria con el estator en dos componentes $u_{r\alpha s}$ y $u_{r\beta s}$ (correspondientemente para las tensiones y corrientes restantes).

Además, opcionalmente puede medirse la corriente en el estator i_{sS} y convertirse en un sistema de coordenadas bifásico solidario con el estator mediante una unidad de transformación 40-4, para hacer posible un cálculo de la velocidad de rotación del rotor ω_r y de la posición angular del rotor φ_{rS} entre el rotor y el estator.

Alternativamente a esta forma de proceder puede medirse también la velocidad de rotación del rotor ω_r y la posición angular del rotor φ_{rS} entre el rotor y el estator mediante un indicador opcional de posición 41 y un receptor opcional de posición 42, una medición de la corriente en el estator no es luego necesaria.

A partir de la tensión de red u_N y la corriente en la red i_N se calcula la potencia activa verdadera P y la potencia reactiva verdadera Q en una unidad de cálculo de potencia 43, y se suministra a los sumadores 45-1 y 45-2 con signo negativo para generar respectivamente una desviación del valor de consigna de la potencia activa y una desviación del valor de consigna de la potencia reactiva a las salidas de los sumadores 45-1 y 45-2 mediante sustracción de las potencias activas de consigna P_{soll} y las potencias reactivas de consigna Q_{soll} predeterminadas. En la fig. 2 está

ES 2 319 647 T3

representada la regulación partiendo de las potencias de red como valores verdaderos. No obstante, es posible sin más transformar como valores verdaderos en lugar de las potencias de red a potencias del estator.

Los valores u_{sS} e i_{rR} medidos y transformados a continuación en un sistema de coordenadas bifásico, y a elección los valores medidos ω_r y φ_{RS} , o el valor i_{sS} medido y transformado a continuación en un sistema de coordenadas bifásico, que es necesario para el cálculo de ω_r y φ_{RS} , se suministran a la unidad de tratamiento de los valores medidos 44 que, en función al menos parcial de estos valores, entrega los valores de salida posición angular del rotor φ_{RS} , flujo en el estator ψ_{sS} solidario con el estator y los valores de retroalimentación v_{1-s_1} y v_{2-s_2} según las ecuaciones (25) y (26). En relación con la descripción de la fig. 3 se ocupa todavía de forma todavía más exacta al cálculo de estos valores de salida.

La regulación según la invención representada en la fig. 2 emplea los dos reguladores PI 46-1 y 46-2 para generar los valores de salida de regulación s_1 y s_2 en función de las desviaciones del valor de consigna de la potencia activa y de la potencia reactiva. Los valores de salida de regulación s_1 y s_2 se alimentan de forma separada a los sumadores 45-3 y 45-4, dónde se cargan por adición con los valores de retroalimentación v_{1-s_1} y v_{2-s_2} que se determinan por la unidad de tratamiento de los valores medidos 44 a partir del estado momentáneo del sistema de la máquina asíncrona 1. A la salida de los sumadores 45-3 y 45-4 se encuentran entonces los valores v_1 y v_2 que se suministran a la unidad 47 para el cálculo de la tensión del rotor.

La unidad 47 consigue como valor de salida adicional el flujo en el estator ψ_{sS} solidario con el estator y determina la tensión en bornas del rotor u_{rS} solidaria con el estator, necesaria para la obtención de la potencia activa P_{soll} predeterminada y la potencia reactiva Q_{soll} predeterminada (en un sistema de coordenadas bifásico) según las ecuaciones siguientes:

$$u_{r\alpha S} = \frac{-v_1 \psi_{s\beta S} + v_2 \psi_{s\alpha S}}{\psi_{sS}^2}, \quad (31)$$

$$u_{r\beta S} = \frac{-v_2 \psi_{s\beta S} + v_1 \psi_{s\alpha S}}{\psi_{sS}^2}. \quad (32)$$

La transformación de la tensión en bornas del rotor a partir del sistema de coordenadas solidario con el estator en el sistema de coordenadas solidario con el rotor se propone según la disposición siguiente en la unidad de transformación 48 que consigue la posición angular del rotor φ_{RS} como valor de entrada adicional de la unidad de tratamiento de los valores medidos 44:

$$u_{r\alpha R} = u_{r\alpha S} \cos \varphi_{RS} - u_{r\beta S} \sin \varphi_{RS}, \quad (33)$$

$$u_{r\beta R} = u_{r\alpha S} \sin \varphi_{RS} + u_{r\beta S} \cos \varphi_{RS}. \quad (34)$$

Finalmente la tensión en bornas del rotor solidaria con el rotor se transforma del sistema de coordenadas bifásico por la unidad de transformación 40-6 en el sistema de coordenadas trifásico, y se aplica a través del ondulator pulsante 20 del convertidor 2 al rotor 11 de la máquina asíncrona 1.

La regulación según la invención necesita solo los dos reguladores PI 46-1 y 46-2 para regular la desviación del valor de consigna de la potencia activa y de la potencia reactiva con velocidad suficiente. Para ello los parámetros de los reguladores PI, en particular las constantes de tiempo de los reguladores PI, están adaptados a los parámetros adimensionales de la máquina asíncrona 1, que encuentran su caída en las ecuaciones de estado.

En la fig. 3 está representada la estructura esquemática de la unidad de tratamiento de los valores medidos 44 de la fig. 2. La unidad de tratamiento de los valores medidos 44 recibe como valores de entrada los valores medidos y transformados a continuación en el sistema de coordenadas bifásico correspondiente, tensión en bornas del estator u_{sS} solidaria con el estator, corriente en el rotor i_{rR} solidaria con el rotor y a elección la corriente en el estator i_{sS} solidaria con el estator o la velocidad de rotación del rotor ω_r y la posición angular del rotor φ_{RS} y entrega en función de estos valores de entrada la posición angular del rotor φ_{RS} , el flujo en el estator solidario en el estator y los valores de retroalimentación v_{1-s_1} y v_{2-s_2} .

Como ya se ha indicado, la velocidad de rotación del rotor ω_r y la posición angular del rotor φ_{RS} se miden opcionalmente mediante el indicador de posición y el receptor de posición 42 de la fig. 2. Alternativamente en la unidad de tratamiento de los valores medidos 44 puede realizarse también una estimación de la velocidad de rotación del rotor y

ES 2 319 647 T3

la posición angular del rotor a partir de la tensión en bornas del estator u_{sS} solidaria con el estator, la corriente en el estator i_{sS} solidaria en el estator y la corriente en el rotor i_{rR} solidaria en el rotor, que luego se implementa en la unidad 441. Mediante los interruptores 442 y 443 puede elegirse entonces respectivamente entre la velocidad de rotación del rotor ω_r medida/estimada y la posición angular del rotor φ_{rS} medida/estimada. Naturalmente puede suprimirse por motivos de costes también una de las dos opciones medición/estimación.

La posición angular del rotor φ_{rS} se emplea luego por un lado para la transformación de la corriente en el rotor i_{rR} solidaria con el rotor en la corriente en el rotor i_{rS} solidaria en el estator en la unidad de transformación 445, y por otro lado, se entrega de la unidad de tratamiento de los datos medidos 44 a la unidad de transformación 48 de la fig. 2.

La unidad de tratamiento de los valores medidos 44 comprende además una unidad 444 para el cálculo del flujo en el estator ψ_{sS} solidario con el estator. El cálculo puede realizarse en este caso según un método cualesquiera. Por ejemplo, el flujo en el estator puede representarse según la conversión de la ecuación (4) de la siguiente forma:

$$\psi_{s\alpha S} = i_{s\alpha S} L_s + i_{r\alpha S} L_m, \quad (35)$$

$$\psi_{s\beta S} = i_{s\beta S} L_s + i_{r\beta S} L_m. \quad (36)$$

Debido a los efectos de saturación de la máquina o por el tipo del convertidor de medida, el método representado arriba para el cálculo del flujo en el estator puede ocasionar problemas. Por ese motivo es ventajoso emplear otro método. En máquinas de campo giratorio con gran potencia puede prescindirse de la resistencia del estator R_s . La ecuación (1) toma por consiguiente la siguiente forma:

$$\frac{d\psi_s}{d\tau} = u_s. \quad (37)$$

De la ecuación (37) se deduce en el caso estacionario para las componentes del flujo en el estator la siguiente relación:

$$\psi_{s\alpha S} = -\frac{u_{s\beta S}}{\omega_r}, \quad (38)$$

$$\psi_{s\beta S} = -\frac{u_{s\alpha S}}{\omega_s}. \quad (39)$$

En este caso ω_s es la frecuencia angular de la tensión en el estator.

El cálculo de los valores de retroalimentación v_{1-S_1} y v_{2-S_2} se realiza finalmente en la unidad 446 en función de u_{sS} , ψ_{sS} , i_{rS} y ω_r .

En una primera forma de realización preferida de la presente invención se realiza el cálculo de los valores de retroalimentación según las ecuaciones (25) y (26).

En una segunda forma de realización se induce para la derivación de las ecuaciones para los valores de retroalimentación de la resistencia del estator R_s . Esta asunción está justificada, por ejemplo, en máquinas grandes. En este caso puede partirse de que la tensión en bornas del estator y el flujo en el estator se encuentran perpendicularmente uno de otro. Si se parte además de un estado estacionario y se tiene en cuenta que se calculan valores referidos con ello, se produce la relación siguiente:

$$\psi_{sS}^2 \cong 1, \quad (40)$$

$$u_{s\alpha S} \psi_{s\alpha S} + u_{s\beta S} \psi_{s\beta S} \cong 0, \quad (41)$$

$$u_{s\beta S} \psi_{s\alpha S} - u_{s\alpha S} \psi_{s\beta S} \cong 1. \quad (42)$$

ES 2 319 647 T3

Tener en cuenta las ecuaciones (40), (41) y (42) conduce a la simplificación de las ecuaciones (22) y (23). Éstas pueden representarse luego de la forma siguiente:

$$\begin{aligned} \frac{dp_s}{d\tau} = & -\frac{1}{T_v} p_s - \frac{L_s}{L_m} \left[\omega_r \left(\psi_{s\alpha S} i_{r\alpha S} + \psi_{s\beta S} i_{r\beta S} \right) + \frac{L_m}{w_\sigma} \psi_{sS}^2 \right] + \\ & + \frac{L_s}{w_\sigma} \left(u_{r\beta S} \psi_{s\alpha S} - u_{r\alpha S} \psi_{s\beta S} \right) - \frac{L_m}{w_\sigma} \left(u_{s\beta S} \psi_{s\alpha S} - u_{s\alpha S} \psi_{s\beta S} \right) + \\ & + u_{s\alpha S} i_{r\beta S} - u_{s\beta S} i_{r\alpha S} \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \frac{dq_s}{d\tau} = & -\frac{1}{T_v} q_s - \frac{L_s}{L_m} \left[-\frac{1}{T_v L_m} + \frac{R_s L_m}{L_s w_\sigma} \psi_{sS}^2 + \frac{R_s L_m}{L_s} i_{sS}^2 - \right. \\ & - \omega_r \left(\psi_{s\alpha S} i_{r\beta S} - \psi_{s\beta S} i_{r\alpha S} \right) + \frac{L_s}{w_\sigma} \left(u_{r\alpha S} \psi_{s\alpha S} + u_{r\beta S} \psi_{s\beta S} \right) - \\ & \left. + u_{s\alpha S} i_{r\alpha S} + u_{s\beta S} i_{r\beta S} \right] \end{aligned} \quad (44)$$

Si, como en la primera forma de realización preferida, se introducen las retroacciones también aquí para la linealización de las ecuaciones diferenciales (43) y (44), se consiguen de nuevo las ecuaciones de estado según las ecuaciones (27) a (30), no obstante, con las variables cambiadas

$$\begin{aligned} v_1^* &= u_{r\beta S} \psi_{s\alpha S} - u_{r\alpha S} \psi_{s\beta S} \\ &= -\frac{w_\sigma}{L_s} \left(\omega_r \left(\psi_{s\alpha S} i_{r\alpha S} + \psi_{s\beta S} i_{r\beta S} \right) + \frac{L_m}{w_\sigma} \psi_{sS}^2 \right) - \\ & - \frac{L_m}{w_\sigma} \left(u_{s\beta S} \psi_{s\alpha S} - u_{s\alpha S} \psi_{s\beta S} \right) + u_{s\alpha S} i_{r\beta S} - u_{s\beta S} i_{r\alpha S} + s_1 \end{aligned} \quad (45)$$

y

$$\begin{aligned} v_2^* &= u_{r\alpha S} \psi_{s\alpha S} + u_{r\beta S} \psi_{s\beta S} \\ &= -\frac{w_\sigma}{L_m} \left(-\frac{1}{T_v L_m} - \omega_r \left(\psi_{s\alpha S} i_{r\beta S} - \psi_{s\beta S} i_{r\alpha S} \right) + u_{s\alpha S} i_{r\alpha S} + u_{s\beta S} i_{r\beta S} + s_2 \right) \end{aligned} \quad (46)$$

La única diferencia con la primera forma de realización preferida consiste así en un cálculo diferente de las retroacciones en la unidad 446 de la unidad de tratamiento de los valores medidos 44. Se mantiene el resto de la estructura de la regulación según la invención según la fig. 2 y 3.

ES 2 319 647 T3

Mediante la simplificación de los valores de retroalimentación de las ecuaciones (45) y (46) según la segunda forma de realización preferida de la presente invención puede calcularse la retroalimentación de forma económica en comparación con la primera forma de realización preferida, y la regulación puede realizarse por consiguiente de forma menos compleja y más rápidamente. Las desviaciones del modelo por la asunción de una resistencia del estator prescindible se compensan en este caso por la regulación, como todos los otros valores de perturbación del sistema, de forma que con la segunda forma de realización no se produce una pérdida en la calidad o estabilidad de la regulación.

En una tercera forma de realización preferida, en la derivación de las retroacciones, se parte finalmente de un estado estacionario. Las ecuaciones (6) y (7) pueden simplificarse entonces como sigue:

$$0 = -\frac{R_s}{L_s}\psi_{s\alpha S} + R_s \frac{L_m}{L_s} i_{r\alpha S} + u_{s\alpha S}, \quad (47)$$

$$0 = -\frac{R_s}{L_s}\psi_{s\beta S} + R_s \frac{L_m}{L_s} i_{r\beta S} + u_{s\beta S}. \quad (48)$$

En primer lugar se multiplican las ecuaciones (47) y (48) con $\psi_{s\alpha S}$ y $\psi_{s\beta S}$. Las ecuaciones originadas por ello se sustraen una vez y se suman una vez. Así se obtienen las ecuaciones:

$$u_{s\beta S}\psi_{s\alpha S} - u_{s\alpha S}\psi_{s\beta S} = \psi_{sS}^2 + \frac{R_s L_m}{L_s} (\psi_{s\alpha S} i_{r\beta S} + \psi_{s\beta S} i_{r\alpha S}), \quad (49)$$

$$u_{s\alpha S}\psi_{s\alpha S} - u_{s\beta S}\psi_{s\beta S} = \frac{R_s}{L_s} \psi_{sS}^2 - \frac{R_s L_m}{L_s} (\psi_{s\alpha S} i_{r\alpha S} + \psi_{s\beta S} i_{r\beta S}). \quad (50)$$

Mediante la sustitución de las ecuaciones (49) y (50) en las ecuaciones (15) y (16) se producen las siguientes ecuaciones de potencia de la máquina de campo giratorio:

$$P_s = \frac{U_s^2}{R_s} - \frac{\psi_{sS}^2}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} (\psi_{s\alpha S} i_{r\beta S} + \psi_{s\beta S} i_{r\alpha S}), \quad (51)$$

$$Q_s = \frac{\psi_{sS}^2}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} (\psi_{s\alpha S} i_{r\alpha S} + \psi_{s\beta S} i_{r\beta S}). \quad (52)$$

Mediante la derivación de las ecuaciones (51) y (52) y por sustitución de las ecuaciones (6) a (9) se obtienen después de la simplificación las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\begin{aligned} \frac{dp_s}{d\tau} = & -\frac{1}{T_v} p_s - \frac{L_m}{L_s} \left[\omega_r \left((\psi_{s\alpha S} i_{r\alpha S} + \psi_{s\beta S} i_{r\beta S}) + \frac{L_m}{w_\sigma} \psi_{sS}^2 \right) + \right. \\ & + \frac{L_s}{w_\sigma} (u_{r\beta S} \psi_{s\alpha S} - u_{r\alpha S} \psi_{s\beta S}) - \frac{L_m}{w_\sigma} (u_{s\beta S} \psi_{s\alpha S} - u_{s\alpha S} \psi_{s\beta S}) + \\ & \left. + u_{s\alpha S} i_{r\beta S} - u_{s\beta S} i_{r\alpha S} \right] \end{aligned} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} \frac{dq_s}{d\tau} = & -\frac{1}{T_v} q_s - \frac{L_s}{L_m} \left[\frac{R_s L_m}{L_s w_\sigma} \psi_{sS}^2 + \frac{R_s L_m}{L_s} i_{rS}^2 - \right. \\ & \left. - \omega_r (\psi_{s\alpha S} i_{r\alpha S} + \psi_{s\beta S} i_{r\alpha S}) + \frac{L_s}{w_\sigma} (u_{r\alpha S} \psi_{s\alpha S} - u_{r\beta S} \psi_{s\beta S}) - \right. \\ & \left. - \frac{L_m}{w_\sigma} (u_{s\alpha S} \psi_{s\alpha S} + u_{s\beta S} \psi_{s\beta S}) + u_{s\alpha S} i_{r\alpha S} + u_{s\beta S} i_{r\beta S} \right] \end{aligned} \quad (54)$$

Si, como en la primera forma de realización preferida, se introducen las retroacciones también aquí para la linealización de las ecuaciones diferenciales (53) y (54), se consiguen de nuevo las ecuaciones de estado según las ecuaciones (27) a (30), no obstante, con las variables cambiadas

$$\begin{aligned} v_1^{**} = & u_{r\beta S} \psi_{s\alpha S} - u_{r\alpha S} \psi_{s\beta S} \\ = & -\frac{w_\sigma}{L_s} \left(\omega_r \left(\psi_{s\alpha S} i_{r\alpha S} + \psi_{s\beta S} i_{r\beta S} \right) + \frac{L_m}{w_\sigma} \psi_{sS}^2 \right) - \\ & - \frac{L_m}{w_\sigma} \left(u_{s\beta S} \psi_{s\alpha S} - u_{s\alpha S} \psi_{s\beta S} \right) + u_{s\alpha S} i_{r\beta S} - u_{s\beta S} i_{r\alpha S} + s_1 \end{aligned} \quad (55)$$

y

$$\begin{aligned} v_2^{**} = & u_{r\alpha S} \psi_{s\alpha S} + u_{r\beta S} \psi_{s\beta S} \\ = & -\frac{w_\sigma}{L_m} \left(\frac{R_s L_m}{L_s w_\sigma} \psi_{sS}^2 + \frac{R_s L_m}{L_s} i_{sS}^2 - \omega_r (\psi_{s\alpha S} i_{r\beta S} - \psi_{s\beta S} i_{r\alpha S}) - \right. \\ & \left. - \frac{L_m}{w_\sigma} (u_{s\alpha S} \psi_{s\alpha S} + u_{s\beta S} \psi_{s\beta S}) + u_{s\alpha S} i_{r\alpha S} + u_{s\beta S} i_{r\beta S} + s_2 \right) \end{aligned} \quad (56)$$

La única diferencia con la primera y segunda forma de realización preferida consiste así de nuevo en un cálculo diferente de las retroacciones en la unidad 446 de la unidad de tratamiento de los valores medidos 44. Se mantiene el resto de la estructura de la regulación según la invención según la fig. 2 y 3.

Mediante la simplificación de los valores de retroalimentación de las ecuaciones (55) y (56) según la tercera forma de realización preferida de la presente invención puede calcularse la retroalimentación de forma económica en comparación con la primera forma de realización preferida, y la regulación puede realizarse por consiguiente de forma menos compleja y más rápida. Las desviaciones del modelo por la asunción de un estado de sistema estacionario se compensan en este caso por la regulación, como todos los otros valores de perturbación del sistema, de forma que con la tercera forma de realización no se produce una pérdida en la calidad o estabilidad de la regulación.

La presente invención ha sido descrita mediante formas de realización preferidas. Mediante el empleo de simplificaciones diferentes en la derivación de las ecuaciones de estado se obtienen diferentes variantes de la regulación según la invención. Una regulación semejante se destaca por su gran exactitud y dinámica. Para el control del convertidor no es necesaria una transformación de los valores medidos en un sistema de referencia determinado. El sistema de coordenadas puede elegirse así libremente. Por la simplicidad puede elegirse, por ejemplo, un sistema de coordenadas solidario con el estator.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Procedimiento para la regulación de la potencia activa y reactiva suministrada o absorbida por una máquina de campo giratorio (1) en un sistema de coordenadas solidario con el devanado, generándose un primer valor de salida de regulación con un primer regulador (46-1) en función de una desviación del valor de consigna de la potencia activa, y generándose un segundo valor de salida de regulación con un segundo regulador (46-2) en función de una desviación del valor de consigna de la potencia reactiva, y alimentándose el primer y el segundo valor de salida de regulación con correspondientes valores de retroalimentación que son función de al menos un valor de sistema variable en el tiempo de la máquina de campo giratorio, **caracterizado** porque la potencia activa y reactiva se eligen directamente como variables de estado en las que se basa la regulación, determinándose una tensión o una corriente de la máquina de campo giratorio como valor de reglaje al menos a partir del primer y segundo valor de salida de regulación, alimentados con los valores de retroalimentación, sin un bucle subordinado adicional de regulación, los valores de retroalimentación se eligen de forma que la potencia activa y reactiva están desacopladas al menos parcialmente.
- 15 2. Procedimiento según la reivindicación 1, **caracterizado** porque los reguladores (46-1, 46-2) son reguladores lineales.
- 20 3. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1-2, **caracterizado** porque los reguladores (46-1, 46-2) son reguladores PI.
- 25 4. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1-3, **caracterizado** porque una tensión en bornas del rotor de la máquina de campo giratorio (1) se determina como valor de reglaje.
5. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1-3, **caracterizado** porque una tensión en bornas del estator de la máquina se determina como valor de reglaje.
6. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1-3, **caracterizado** porque una corriente de excitación de la máquina de campo giratorio (1) se determina como valor de reglaje.
- 30 7. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1-6, **caracterizado** porque durante el cálculo de los valores de retroalimentación se prescinde de la resistencia óhmica del estator de la máquina de campo giratorio (1).
- 35 8. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1-6, **caracterizado** porque durante el cálculo de los valores de retroalimentación se parte de un estado estacionario.
9. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1-8, **caracterizado** porque se regulan la potencia activa y reactiva del estator (10) de la máquina de campo giratorio (1).
- 40 10. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1-8, **caracterizado** porque se regulan la potencia activa y reactiva de la red (3) en la que está conectada la máquina de campo giratorio (1).
- 45 11. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1-10, **caracterizado** porque el primer valor de salida de regulación se carga con un valor de retroalimentación que se corresponde con el producto vectorial de la tensión en bornas del rotor y el flujo en el estator de la máquina de campo giratorio, y porque el segundo valor de salida de regulación se carga con un valor de retroalimentación que se corresponde con el producto escalar de la tensión en bornas del rotor y el flujo en el estator.
- 50 12. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1-11, **caracterizado** porque los valores de retroalimentación son funciones al menos de la tensión en bornas del estator, del flujo en el estator, de la corriente en el rotor y de la velocidad de rotación del rotor.
- 55 13. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1-12, **caracterizado** porque la tensión en bornas del rotor de la máquina de campo giratorio se determina como valor de reglaje sin otra regulación a partir del flujo en el estator y del primer y segundo valor de salida de regulación alimentados con los valores de retroalimentación.
- 60 14. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1-13, **caracterizado** porque se miden al menos la tensión en bornas del estator y la corriente en el rotor de la máquina de campo giratorio (1).
- 65 15. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1-14, **caracterizado** porque se mide la corriente en el estator de la máquina de campo giratorio (1).
16. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1-15, **caracterizado** porque la velocidad de rotación del rotor de la máquina de campo giratorio (1) se mide o determina a partir de la tensión en bornas del estator, de la corriente en el estator y de la corriente en el rotor de la máquina de campo giratorio.

ES 2 319 647 T3

17. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1-16, **caracterizado** porque la posición angular del rotor de la máquina de campo giratorio (1) se mide o determina a partir de la tensión en bornas del estator, de la corriente en el estator y de la corriente en el rotor de la máquina de campo giratorio.
- 5 18. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1-17, **caracterizado** porque el flujo en el estator de la máquina de campo giratorio (1) se calcula a partir de la tensión en bornas del estator y de la frecuencia angular de la tensión en bornas del estator de la máquina de campo giratorio.
- 10 19. Procedimiento según una de las reivindicaciones 14-18, **caracterizado** porque las tensiones y corrientes de la máquina de campo giratorio (1) se miden cada vez y luego se transforman en un sistema de coordenadas bifásico, y porque el valor de reglaje se determina en un sistema de coordenadas bifásico y luego se transforma en un sistema de coordenadas de tres fases.
- 15 20. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1-19, **caracterizado** porque la máquina de campo giratorio (1) es una máquina asíncrona de doble alimentación cuyo estator (10) está unido directamente con una red (3) y cuyo rotor (11) está unido con un convertidor (2).
- 20 21. Programa informático con comandos cuya ejecución induce a un procesador a realizar el procedimiento según una de las reivindicaciones 1-20.
22. Producto de programa informático que comprende un programa informático con comandos cuya ejecución induce a un procesador a realizar el procedimiento según una de las reivindicaciones 1-20.
- 25 23. Dispositivo para la regulación de la potencia activa y reactiva suministrada o absorbida por una máquina de campo giratorio (1) en un sistema de coordenadas solidario con el devanado, con un primer regulador (46-1) para la generación de un primer valor de salida de regulación en caso de desviaciones del valor de consigna de la potencia activa, con un segundo regulador (46-2) para la generación de un segundo valor de salida de regulación en caso de desviaciones del valor de consigna de la potencia reactiva, y con medios (44, 45-3, 45-4) para la carga del primer y del segundo valor de salida de regulación con correspondientes valores de retroalimentación, que se producen como
30 funciones de al menos un valor de sistema variable en el tiempo de la máquina de campo giratorio, **caracterizado** porque el dispositivo comprende los medios (47) para la determinación de una tensión o de una corriente de la máquina de campo giratorio como valor de reglaje a partir de al menos el primer y el segundo valor de salida de regulación alimentados con los valores de retroalimentación, eligiéndose directamente la potencia activa y reactiva como variables de estado en las que se basa la regulación, cuyos medios (47) no presentan otro bucle subordinado de regulación, y la
35 potencia activa y reactiva pueden desacoplarse al menos parcialmente mediante los medios para la carga del primer y segundo valor de salida de regulación con valores de retroalimentación a través de la elección de los valores de retroalimentación.
- 40 24. Dispositivo según la reivindicación 23, **caracterizado** porque los reguladores (46-1, 46-2) son reguladores lineales.
25. Dispositivo según una de las reivindicaciones 23-24, **caracterizado** porque los reguladores (46-1, 46-2) son reguladores PI.
- 45 26. Dispositivo según una de las reivindicaciones 23-25, **caracterizado** porque el medio (47) para la determinación de una tensión o de una corriente de la máquina de campo giratorio (1) determina una tensión en bornas del rotor como valor de reglaje.
- 50 27. Dispositivo según una de las reivindicaciones 23-25, **caracterizado** porque el medio (47) para la determinación de una tensión o de una corriente de la máquina de campo giratorio (1) determina una tensión en bornas del estator como valor de reglaje.
- 55 28. Dispositivo según una de las reivindicaciones 23-25, **caracterizado** porque el medio (47) para la determinación de una tensión o de una corriente de la máquina de campo giratorio (1) determina una corriente de excitación como valor de reglaje.
29. Dispositivo según una de las reivindicaciones 23-28, **caracterizado** porque se regulan la potencia activa y reactiva del estator (10) de la máquina de campo giratorio (1).
- 60 30. Dispositivo según una de las reivindicaciones 23-28, **caracterizado** porque se regulan la potencia activa y reactiva de la red (3) en la que está conectada la máquina de campo giratorio (1).
- 65 31. Dispositivo según una de las reivindicaciones 23-30, **caracterizado** porque el valor de salida de regulación del primer regulador (46-1) se carga con un valor de retroalimentación que se corresponde con el producto vectorial de la tensión en bornas del rotor y del flujo en el estator de la máquina de campo giratorio (1), y porque el valor de salida de regulación del segundo regulador (46-2) se carga con un valor de retroalimentación que se corresponde con el producto escalar de la tensión en bornas del rotor y del flujo en el estator.

ES 2 319 647 T3

32. Dispositivo según una de las reivindicaciones 23-31, **caracterizado** porque los valores de retroalimentación son funciones al menos de la tensión en bornas del estator, del flujo en el estator, de la corriente en el rotor y de la velocidad de rotación del rotor.

5 33. Dispositivo según una de las reivindicaciones 23-32, **caracterizado** porque la tensión en bornas del rotor de la máquina de campo giratorio (1) se determina como valor de reglaje sin otra regulación a partir del primer y segundo valor de salida de regulación alimentados con los valores de retroalimentación y del flujo en el estator.

10 34. Dispositivo según una de las reivindicaciones 23-33, **caracterizado** porque el dispositivo comprende medios para la medición de la tensión en bornas del estator y de la corriente en el rotor de la máquina de campo giratorio (1).

35. Dispositivo según una de las reivindicaciones 23-34, **caracterizado** porque el dispositivo comprende medios para la medición de la corriente en el estator.

15 36. Dispositivo según una de las reivindicaciones 23-35, **caracterizado** porque el dispositivo comprende medios para la medición (41, 42) de la velocidad de rotación del rotor de la máquina de campo giratorio (1) o para su determinación (441) a partir de la tensión en bornas del estator, de la corriente en el estator y de la corriente en el rotor de la máquina de campo giratorio.

20 37. Dispositivo según una de las reivindicaciones 23-26, **caracterizado** porque el dispositivo comprende medios para la medición (41, 42) de la posición angular del rotor de la máquina de campo giratorio (1) o para su determinación (441) a partir de la tensión en bornas del estator, de la corriente en el estator y de la corriente en el rotor de la máquina de campo giratorio.

25 38. Dispositivo según una de las reivindicaciones 34-37, **caracterizado** porque el dispositivo comprende medios para la medición de las tensiones y corrientes de la máquina de campo giratorio (1) y para su transformación (40-1, 40-2, 40-3, 40-4, 40-5) en un sistema de coordenadas bifásico, y porque el dispositivo comprende medios (40-6) para la transformación del valor de reglaje determinado en un sistema de coordenadas bifásico en un sistema de coordenadas trifásico.

30 39. Dispositivo según una de las reivindicaciones 23-28, **caracterizado** porque la máquina de campo giratorio (1) es una máquina asíncrona de doble alimentación cuyo estator (10) está unido directamente con una red (3), y cuyo rotor (11) está unido con un convertidor (2).

35 40. Máquina de campo giratorio (1) con un dispositivo para la regulación de la potencia activa y reactiva suministrada o absorbida por la máquina de campo giratorio en un sistema de coordenadas solidario con el devanado según una de las reivindicaciones 23-39.

40

45

50

55

60

65

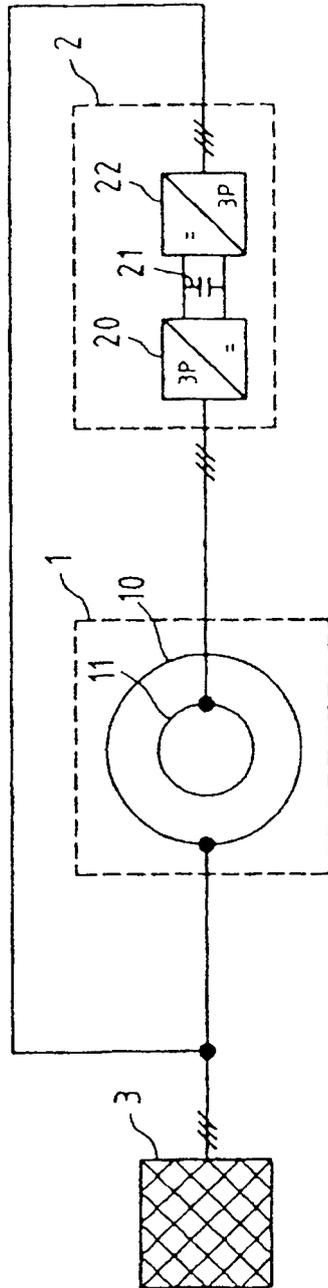


Figura 1. Estado de la técnica

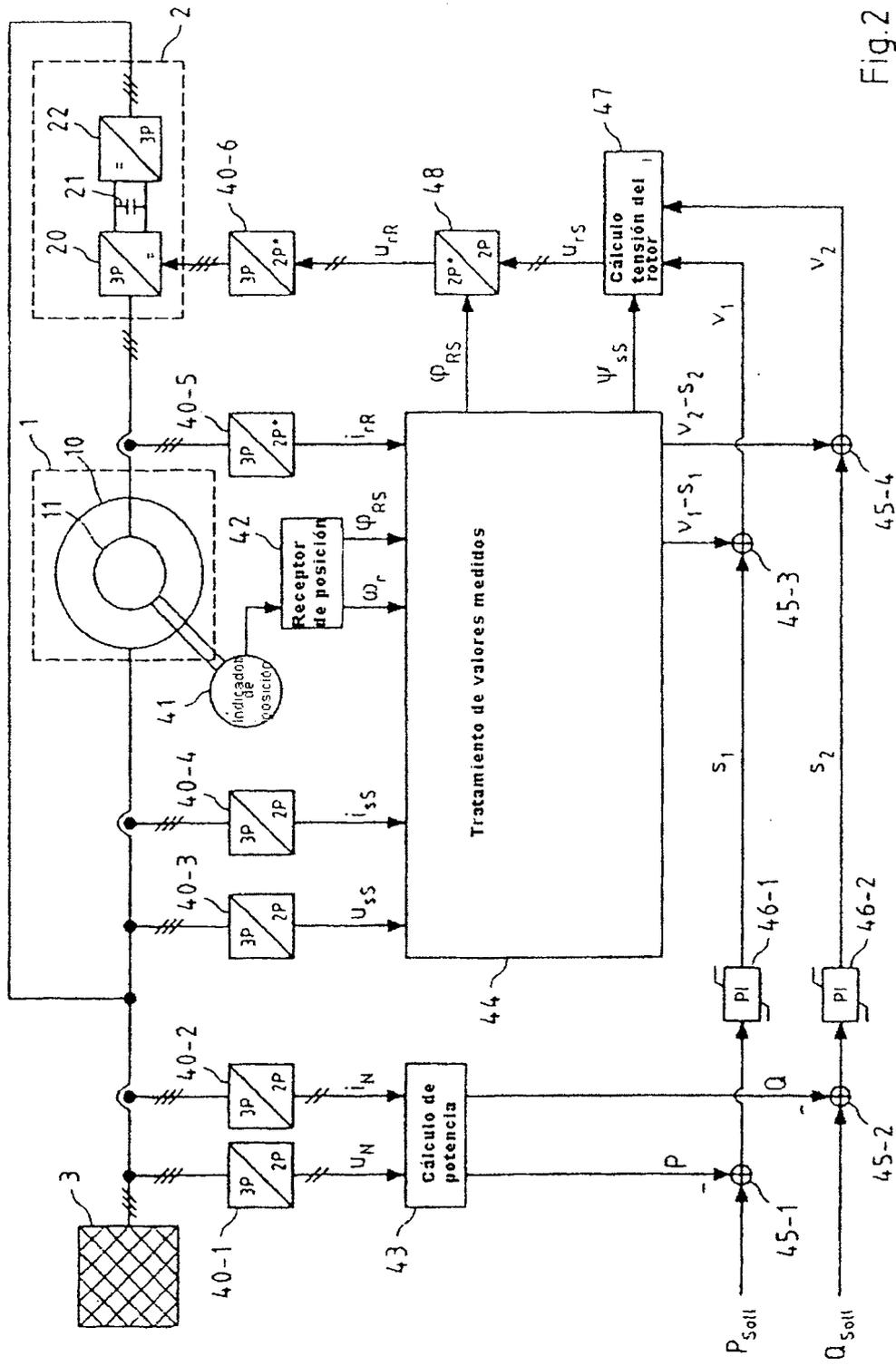


Fig.2

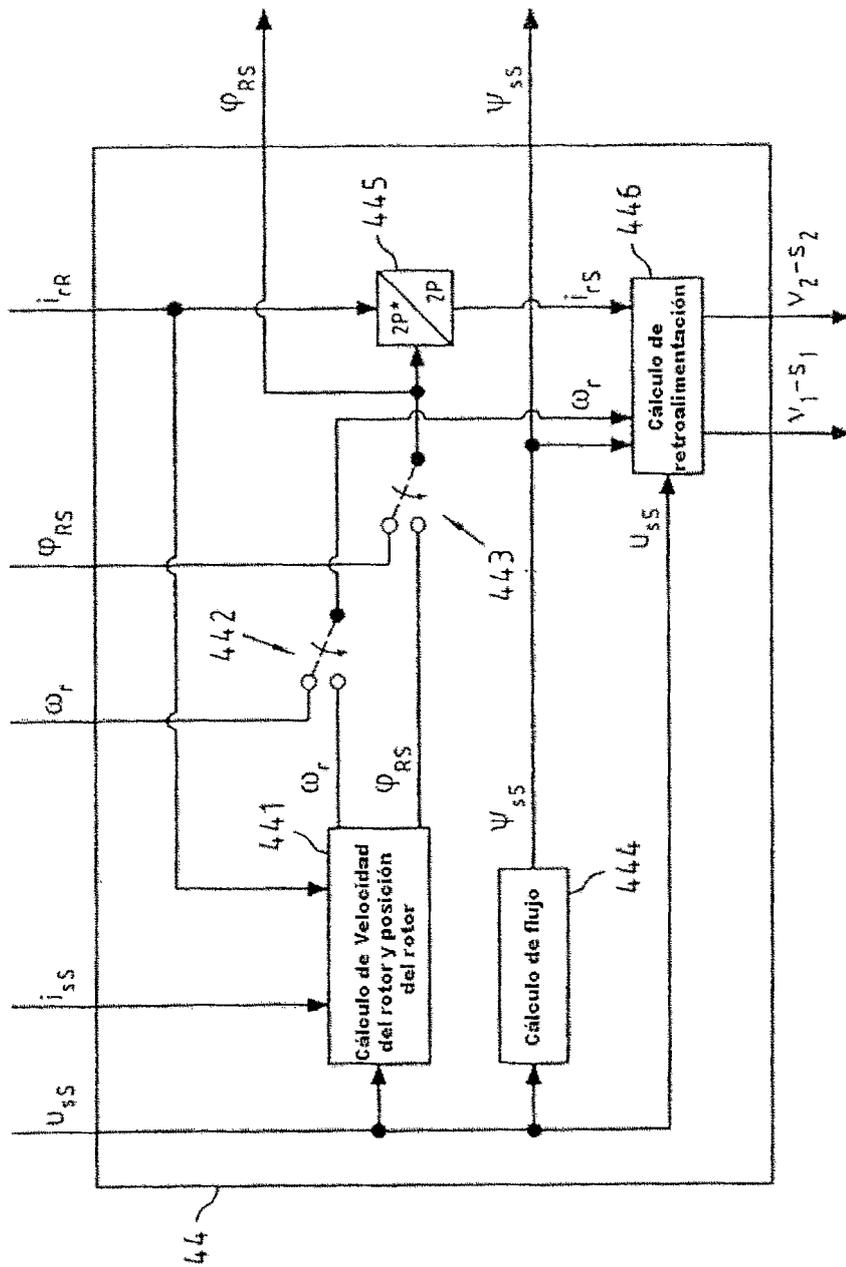


Fig.3