

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 380 617**

51 Int. Cl.:  
**H02P 21/12** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **09777875 .7**  
96 Fecha de presentación: **07.08.2009**  
97 Número de publicación de la solicitud: **2319172**  
97 Fecha de publicación de la solicitud: **11.05.2011**

54 Título: **Control de un motor síncrono que tiene rotor con imanes permanentes**

30 Prioridad:  
**07.08.2008 EP 08014129**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**16.05.2012**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**16.05.2012**

73 Titular/es:  
**Bombardier Transportation GmbH  
Schöneberger Ufer 1  
10785 Berlin, DE**

72 Inventor/es:  
**GALIC, Johann**

74 Agente/Representante:  
**Isern Jara, Jorge**

ES 2 380 617 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**

Control de un motor síncrono que tiene rotor con imanes permanentes.

5 La invención se refiere a un método de control de un motor síncrono que tiene un estator que comprende un conjunto de electroimanes y que tiene rotor con imanes permanentes. Este motor es designado, frecuentemente, motor síncrono de imanes permanentes (PMSM). La invención se refiere, además, a una disposición para el control de dicho tipo de motor. Un campo de interés específico es el control de un PMSM que es un motor de propulsión para un vehículo ferroviario.

10 De manera típica, los motores asíncronos que tienen un rotor que tiene, como mínimo, un electroimán, se utilizan para la propulsión de vehículos ferroviarios. El término "vehículos ferroviarios" incluye cualquier vehículo guiado sobre vías. Estos motores asíncronos pueden ser controlados fácilmente, dado que no solamente los electroimanes del estator, sino también el electroimán o electroimanes del rotor pueden ser adaptados al modelo de funcionamiento deseado. No obstante, los motores PMSM tienen algunas ventajas. Especialmente, la densidad de potencia (la potencia por volumen que se puede alcanzar) es elevada y las pérdidas de energía son bajas. Por otra parte, tal como se ha mencionado, el control de un PMSM es más difícil, si se requiere una respuesta rápida del motor en situaciones dinámicas y si es importante la utilización eficaz de los recursos (en particular, el voltaje y energía eléctrica disponibles).

15 Usualmente, hay límites para los parámetros funcionales del motor. Algunos de los límites pueden depender de la situación de funcionamiento, otros límites son fijos para el motor. En particular, estos límites son: valor máximo del flujo del estator permitido en el motor, valor del voltaje eléctrico que es utilizado para hacer pasar las corrientes a través de los electroimanes del estator, valor máximo permitido para estas corrientes y par máximo permitido para el motor.

20 El documento US 2004/0257028 A1 describe el control de motores eléctricos. Un sistema de control comprende un controlador para controlar un motor de imán permanente. La entrada al sistema de control es un control de par generado por un controlador del vehículo. El control es procesado por un bloque de cálculo de amperaje para el par máximo para generar la instrucción de corriente de estator correspondiente y la instrucción del ángulo de la corriente. Un flujo de estator de debilitamiento de campo es generado en un bloque de debilitamiento de campo basado en el enlace del voltaje CC medido y la velocidad angular del rotor. La instrucción de corriente del estator y la instrucción del ángulo de corriente son pasados a un bloque de cálculo del ángulo de par y del flujo del estator que procesa esta información y descompone la misma en una instrucción de flujo del estator y una instrucción de ángulo de par para proporcionar el par máximo para la amplitud de corriente de estator determinada.

25 El documento US 2006/0055363 A1 describe un sistema de control para una máquina eléctrica que incluye un módulo de debilitamiento de flujo.

30 Es un objetivo de la presente invención dar a conocer un método y un funcionamiento del tipo que se han mencionado a efectos de controlar un PMSM de manera eficaz. En particular, se tienen que manejar diferentes sistemas operativos, tales como estados operativos en los que se alcanzan límites para los parámetros de funcionamiento del motor.

35 Es una idea básica de la presente invención utilizar un controlador de flujo directo del estator. Una ventaja de este controlador de flujo es que el voltaje máximo disponible puede ser utilizado para impulsar las corrientes del estator y que el motor muestra un buen comportamiento dinámico. Por ejemplo, un convertidor de CC a CA que es utilizado para impulsar las corrientes de estator del motor, puede ser controlado mediante un funcionamiento del tipo llamado de seis etapas (es decir, en modalidad hexagonal) para conseguir el voltaje disponible máximo. En este caso, cada una de las fases del inversor genera un voltaje que tiene el comportamiento de tiempo de una onda de forma cuadrada en el motor. En esta modalidad, la amplitud de voltaje en el motor es la máxima posible y solamente se pueden controlar la frecuencia y la fase del voltaje. Esta modalidad es utilizada para velocidades superiores a la velocidad de base. La velocidad base es la velocidad del rotor cuando el flujo máximo posible es igual al flujo máximo permitido.

40 De acuerdo con otra idea básica de la invención, el valor mínimo de la corriente eléctrica a través de los electroimanes del estator, que es necesaria para conseguir el par deseado, se utiliza para impulsar el motor. En especial, esto es aplicable a la aceleración del rotor, por ejemplo, mientras el vehículo ferroviario es acelerado desde el reposo hasta la velocidad permanente.

45 De acuerdo con la realización preferente de la invención, que se describirá a continuación, se puede introducir el par deseado en la estructura de control del motor. El par deseado del motor puede ser escogido, por ejemplo, por el conductor del vehículo ferroviario, o puede ser enviado por un sistema de control automático a la estructura de control. Otras variables de entrada a la estructura de control pueden ser: flujo de estator máximo permitido del motor, voltaje eléctrico disponible máximo para impulsar las corrientes a través de los electroimanes del estator, velocidad del motor determinada por la velocidad de rotación del rotor, ángulo máximo de carga, que es el ángulo entre el flujo del estator y el flujo del rotor con respecto al eje de rotación del rotor, y/o el valor máximo de las corrientes a través de los electroimanes del estator. La estructura de control puede producir una señal de voltaje

que puede ser introducida en un modulador, y el modulador puede controlar un dispositivo para controlar directamente los conmutadores de un inversor que invierte una corriente continua activada por el voltaje disponible, en corrientes alternas a través de los electroimanes del motor. El dispositivo de control que controla directamente el inversor puede funcionar en base a la modulación de un vector espacial (SVM). No obstante, son también posibles otros métodos para utilizar la salida de la estructura de control para activar el motor.

Un concepto básico de la invención es utilizar un controlador de flujo para controlar la magnitud del flujo del estator del motor y, en paralelo con el controlador de flujo, utilizar un controlador de ángulo de carga para controlar el ángulo de carga entre el flujo de estator y el flujo del rotor. El controlador de flujo puede enviar una medición de la magnitud de flujo que se debe producir. La medición de la magnitud de flujo puede ser, en el sistema de coordenadas estándar d-q del flujo del estator, un voltaje en la dirección de la magnitud de flujo del estator. Por otra parte, la magnitud del controlador del ángulo de carga, que es producida por el controlador de ángulo de carga para activar el ángulo de carga y, de esta manera, activar el par del motor, puede ser un voltaje ortogonal al voltaje en la dirección de la magnitud de flujo del estator. Se facilitarán ejemplos en la descripción de las figuras. La medición de la magnitud del flujo que es producida por el controlador de flujo y la medición del ángulo de carga que es producida por el controlador de ángulo de carga, se combinan preferentemente para producir la señal de referencia mencionada o, más particularmente, la referencia de voltaje.

De acuerdo con una característica de la presente invención, la información con respecto al par deseado es introducida en el controlador de flujo y en el controlador de ángulo de carga. No obstante, la información con respecto al par deseado no es utilizada directamente por el controlador de flujo y no es utilizada directamente por el controlador de ángulo de carga en todas las situaciones. El término "información con respecto al par deseado" comprende el caso en el que la señal de entrada al controlador corresponde a la diferencia entre el valor de referencia (el par deseado) y el valor real (el par real), es decir, la información puede ser la diferencia. Para simplificar las palabras, en lo que sigue, el "par deseado", puede ser utilizado en vez de "información con respecto al par deseado". Para producir una entrada para el controlador de flujo, que es utilizada directamente por el controlador de flujo, se pueden llevar a cabo dos operaciones. De acuerdo con una operación se aplica una función predeterminada. El par deseado es el introducido en la función predeterminada, y la función predeterminada emite un valor que corresponde a la magnitud del flujo del estator que resulta en el par motor deseado utilizando la corriente de estator mínima posible. En otras palabras, esta función predeterminada asegura que se utiliza la corriente mínima posible de estator para producir el par deseado.

No obstante, este primer funcionamiento no es llevado a cabo en todas las situaciones operativas del motor, o el resultado de este primer funcionamiento no es utilizado directamente por el controlador de flujo en todas las situaciones. En vez de ello, de acuerdo con una segunda forma de funcionamiento, se calcula de manera repetida un valor límite del flujo del estator y, si el flujo del estator ha alcanzado el valor límite del flujo, se introduce un valor en el controlador de flujo que es utilizado directamente por el controlador del flujo, correspondiente este valor al valor límite de flujo, manteniendo, por lo tanto, el flujo del estator en el valor límite.

De acuerdo con la segunda modalidad de funcionamiento, el par deseado es limitado a un valor reducido por una función limitadora. Esta función limitadora puede limitar el par deseado por una o ambas de las razones siguientes: la corriente máxima permitida a través de los electroimanes del estator puede ser alcanzada y/o se puede alcanzar el par máximo permitido del motor. La función limitadora garantiza que el valor máximo correspondiente no es superado al limitar el par deseado al par limitado introducido en el controlador de ángulo de carga. También, en este caso, la señal de entrada real puede representar la diferencia entre el valor de referencia y el valor real.

En particular, se propone lo siguiente:

Un método para el control del motor síncrono que tiene un estator que comprende un conjunto de electroimanes y que tiene un rotor con imán permanente (es decir, un imán permanente o un conjunto de imanes permanentes) se utiliza para producir el flujo magnético del rotor. El motor síncrono es controlado calculando, en un controlador de flujo, una medida de la magnitud del flujo, que es la magnitud del flujo del estator del motor, y calculando, en un controlador de ángulo de carga, una medida del ángulo de carga, que es el ángulo entre el flujo del estator y el flujo del rotor, referido al eje de rotación del rotor. Un par motor deseado o un par motor reducido, que es menor que el par menor deseado, es introducido en el controlador del ángulo de carga, de manera que el controlador de ángulo de carga calcula la medida del ángulo de carga dependiendo del par motor introducido. La medición de la magnitud de flujo y la medición del ángulo de carga se combinan para obtener una señal que se tiene que utilizar para obtener instrucciones para controlar corrientes eléctricas de electroimanes del estator, controlando, de esta manera, directamente el flujo del estator.

Además, como etapa opcional, se calcula de manera repetida un valor límite de flujo que depende de un valor máximo predeterminado del flujo del estator permitido para el motor (a continuación: "flujo máximo permitido" ó "flujo máximo permitido para el motor"), que depende del valor del voltaje eléctrico que es utilizado para impulsar las corrientes a través de los electroimanes del estator y que depende de la velocidad real del rotor. En particular, el valor límite de flujo corresponde al valor máximo permitido del flujo del estator a velocidades del motor por debajo de la velocidad base. Para velocidades más elevadas del motor, el valor límite de flujo corresponde al flujo máximo que se puede alcanzar (también llamado flujo máximo posible), que dependen del voltaje y de la velocidad.

Durante la aceleración del rotor, mientras el flujo del estator es más pequeño que el flujo máximo permitido para el motor, se lleva a cabo lo siguiente:

- 5 • cálculo de la magnitud de flujo dependiendo del resultado de una función predeterminada, de manera que el resultado de la función predeterminada depende del par motor deseado y corresponde a la magnitud del flujo del estator, que resulta en el par motor deseado utilizando la corriente mínima posible del estator, y
- cálculo del ángulo de carga dependiendo del par motor deseado

Durante la aceleración del rotor, cuando el flujo del estator ha alcanzado el flujo máximo permitido, se lleva a cabo lo siguiente:

- 10 • cálculo de la magnitud del flujo correspondiente al valor límite del flujo (que es, en este caso, el flujo máximo permitido), y
- cálculo del ángulo de carga dependiendo del par motor deseado.

15 Como resultado, el flujo del estator estará limitado al valor límite de flujo que es, en este caso, el flujo máximo permitido. Además, dado que el par máximo deseado aumenta, el ángulo del par incrementa también. No obstante, esta etapa puede no ser llevada a cabo si la magnitud de las corrientes eléctricas, a través de los electroimanes del estator, han alcanzado un valor máximo predeterminado cuando sea alcanzado el valor límite de flujo, o antes.

Una disposición correspondiente para el control del motor síncrono que tiene un estator que comprende un conjunto de electroimanes y un rotor con imán permanente, comprende:

- un controlador de flujo para controlar el motor calculando la magnitud del flujo, que es la magnitud del flujo del estator del motor,
- 20 - un controlador de ángulo de carga para controlar el motor calculando el ángulo de carga, que es el ángulo entre el flujo del estator y el flujo del rotor con respecto al eje de rotación del rotor,
- el controlador de ángulo de carga que comprende una entrada para recibir información con respecto al par motor, que es el par motor deseado o un par motor reducido, que es menor que el par motor deseado, y en el que el controlador de ángulo de carga está adaptado para calcular la magnitud del ángulo de carga dependiendo del par motor introducido,
- 25 - un dispositivo de combinación para combinar la magnitud de flujo y la magnitud de ángulo de carga para obtener una señal que se tiene que utilizar para obtener instrucciones para controlar corrientes eléctricas de los electroimanes del estator, controlando de esta manera directamente el flujo del estator,
- 30 - un dispositivo de cálculo del límite de flujo para calcular repetidamente un valor límite de flujo que depende de un valor máximo predeterminado del flujo del estator permitido para el motor, que depende del valor máximo de un voltaje eléctrico, que es utilizado para impulsar las corrientes a través de los electroimanes del estator y que depende de la velocidad real del rotor,
- en el que se adapta la disposición para acelerar el rotor mientras el flujo del estator es más pequeño que el límite de flujo:

- 35 • calculando la magnitud de flujo que depende del resultado de una función predeterminada, de manera que el resultado de la función predeterminada depende del par motor deseado y corresponde a la magnitud del

flujo del estator, que tiene como resultado el par motor deseado utilizando la corriente mínima posible del estator, y

- calculando el ángulo de carga dependiendo del par motor deseado.
- 40 Además, la disposición es adaptada, además, para acelerar el rotor cuando el flujo del estator ha alcanzado el valor límite máximo de flujo,
- calculando la magnitud de flujo correspondiente al valor límite de flujo, y
- calculando la magnitud del ángulo de carga dependiendo del par motor deseado, de manera que el flujo del estator está limitado al valor límite de flujo (que es, en este caso, el flujo máximo permitido) y,
- 45 además, dado que el par motor deseado aumenta, el ángulo de carga también aumenta. Esto corresponde a la etapa del método llevada a cabo que se ha descrito anteriormente.

Dado que la corriente de estator mínima posible es utilizada para producir el par motor deseado, mientras que el flujo del estator no ha alcanzado el valor máximo, el comportamiento dinámico del control del motor es excelente y la energía eléctrica disponible se utiliza de manera eficaz. Cuando el flujo del estator ha alcanzando su valor

máximo, la corriente del estator es todavía lo más reducida posible, dado que el flujo del estator se mantiene en su valor límite y el par deseado es producido aumentando el ángulo de carga.

5 Preferentemente, cuando la magnitud de las corrientes eléctricas a través de los electroimanes del estator han alcanzado un valor máximo predeterminado y cuando el motor tiene que ser acelerado adicionalmente, se lleva a cabo lo siguiente:

- se calcula el ángulo de carga dependiendo del par motor reducido, de manera que las corrientes eléctricas se corresponden de manera continuada al valor máximo predeterminado y de manera que el ángulo de carga aumenta mientras que el flujo del estator disminuye.

10 La fase en la que la magnitud de las corrientes eléctricas a través de los electroimanes del estator ha llegado a un valor máximo predeterminado y cuando el motor tiene que ser acelerado adicionalmente, se puede definir de manera alternativa por el concepto que el flujo del estator es mantenido en el flujo máximo posible (que depende del voltaje disponible y de la velocidad del rotor).

15 La limitación de corriente es llevada a cabo, preferentemente, por la función de limitación descrita anteriormente, que limita el par deseado al par limitado. También, en este caso, la utilización de energía es eficaz, y se consigue un comportamiento dinámico muy satisfactorio del control incrementando el ángulo de carga.

En algunas situaciones, el par motor puede alcanzar su valor máximo. En estas situaciones, preferentemente, se lleva a cabo, lo siguiente para acelerar adicionalmente el rotor. Se mide la magnitud del ángulo de carga dependiendo del par motor reducido, de manera que el par motor reducido es limitado al valor máximo predeterminado, de manera que las corrientes eléctricas disminuyen, de forma que el flujo del estator disminuye.

20 Cuando el flujo del estator ha sido reducido, tal como se ha descrito en lo anterior, mientras el rotor es acelerado, el par deseado puede disminuir, por ejemplo, a causa de que el conductor del vehículo ferroviario reduce el par deseado. No obstante, a pesar del par reducido, se puede requerir durante un cierto tiempo, una aceleración adicional del rotor. Para esta situación se propone lo siguiente:

- cálculo de la magnitud del flujo, de manera que sea igual al valor límite del flujo (por ejemplo, el flujo es casi constante, puede disminuir o aumentar ligeramente dependiendo las condiciones de activación), y
- se calcula la magnitud del ángulo de carga dependiendo del par motor deseado, de manera que el flujo del estator está limitado al valor límite de flujo, y el ángulo de carga disminuye.

Esta fase se puede caracterizar también por el concepto de que el flujo del estator se mantiene en el flujo máximo posible (que depende del voltaje disponible y de la velocidad del rotor).

30 Esto puede devolver el estado de funcionamiento a una situación en la que se puede calcular la magnitud de flujo en base a la función predeterminada mencionada anteriormente, que garantiza que se produce el par motor deseado utilizando la mínima corriente posible del estator, de manera que se puede calcular la magnitud del ángulo de carga directamente en base al par motor deseado.

35 Se describirán a continuación, ejemplos preferentes de la presente invención haciendo referencia a las figuras adjuntas, en las que se muestra:

Figura 1, una disposición que comprende una estructura de control preferente y dispositivos para recibir el resultado de la estructura de control y para controlar directamente el motor,

Figura 2, un diagrama que muestra la demanda de par y la velocidad del rotor como funciones dependientes del tiempo para una situación en la que se acelera el motor,

40 Figura 3, la trayectoria de flujo del estator en un sistema de coordenadas del flujo del estator  $q-d$  correspondiente a la situación mostrada en la figura 2,

Figura 4, otro diagrama similar al de la figura 2, para una situación distinta en la que el rotor se acelera,

Figura 5, la ruta de flujo del estator correspondiente a la situación mostrada en la figura 4,

45 Figura 6, un diagrama esquemático que muestra un rotor con imán permanente que gira dentro del estator de un motor y

Figura 7, un diagrama que muestra diferentes indicaciones de ángulos y ejes de coordenadas.

El siguiente ejemplo se aplica a un motor en el que la inductancia de los electroimanes del estator es independiente de la corriente por el electroimán. Las fórmulas indicadas son, por lo tanto, más simples que en otras situaciones de la práctica.

5 La figura 6 muestra esquemáticamente un motor síncrono 1 con imán permanente, que tiene un estator 3 y un rotor 5. El flujo magnético del estator 3 es producido, por ejemplo, por dos bobinas electromagnéticas 7, 9 que están orientadas perpendicularmente entre sí. La bobina 7 está orientada en la dirección del eje de coordenadas  $\alpha$  de un sistema de coordenadas no rotativo. La bobina 9 está orientada en la dirección del otro eje de coordenadas  $\beta$  del sistema de coordenadas no rotativo.

El imán permanente del rotor 5 produce un flujo magnético que está orientado en la dirección  $d$  de un sistema de coordenadas rotativas, siendo la velocidad de rotación del sistema de coordenadas rotativas, la velocidad de rotación del rotor 5. El otro eje de coordenadas (ortogonal a  $d$ ) del sistema de coordenadas rotativo se indica por "q".

10 La figura 7 muestra algunas notaciones, y se hará referencia a la misma, a continuación.

La figura 7 muestra la situación de los sistemas de coordenadas rotativos y no rotativos en un punto específico de tiempo, que corresponde a la situación mostrada en la figura 6. El flujo del rotor  $\Psi_M$  está siempre orientado en la dirección del eje de coordenadas  $d$  del sistema de coordenadas rotativo  $d-q$ . El ángulo entre el eje de coordenadas  $\alpha$  del sistema de coordenadas no rotativo  $\alpha - \beta$  y el eje de coordenadas  $d$  se designa por  $\Theta$ . Haciendo referencia al sistema de coordenadas no rotativo, la frecuencia del voltaje del estator (y lo mismo se puede aplicar para la frecuencia de la corriente del estator) es proporcional a la primera derivada del tiempo del ángulo  $\Theta$ . Si el número de polos del motor es 2, la frecuencia del voltaje del estator es igual a la primera derivada con respecto al tiempo, del ángulo  $\Theta$ .

20 El ángulo entre el eje  $d$  y el flujo magnético  $\bar{\Psi}_s$  del estator se indica por  $\gamma$ . El ángulo entre el eje de coordenadas  $d$  y la corriente del estator  $\bar{I}_s$  se indica por  $\nu$ . El eje de coordenadas  $ds$  ("ds" en la figura 7), se encuentra siempre alineado con el vector  $\bar{\Psi}_s$  de flujo del estator. El eje de coordenadas  $qs$  ("qs" en la figura 7), es ortogonal a  $ds$ , lo que significa que  $ds$  y  $qs$  definen un sistema de coordenadas relacionado con el flujo del estator. La corriente del estator se puede escribir en el sistema de coordenadas  $d - q$  como:

$$\bar{I}_s = i_d + j \cdot i_q \quad \text{Eq. 1}$$

25 en forma compleja. La correspondiente forma compleja del flujo  $\bar{\Psi}_s$  del estator es:

$$\bar{\Psi}_s = \Psi_M + L_d i_d + j \cdot L_q i_q \quad \text{Eq. 2}$$

30 en la que  $i_d$  es la componente de la corriente del estator en la dirección del eje de coordenadas  $d$ ,  $i_q$  es la componente de la corriente del estator en la dirección del eje de coordenadas  $q$ ,  $j$  es la unidad compleja  $j^2 = -1$ ,  $L_d$  es la inductividad magnética de los electroimanes del estator en la dirección del eje de coordenadas  $d$  y  $L_q$  es la inductividad magnética de los electroimanes del estator en la dirección del eje  $q$ . El par del motor viene indicado por:

$$T = \bar{\Psi} \times \bar{I}_s = \Psi_d i_q - \Psi_q i_d \quad \text{Eq. 3}$$

35 en la que  $\Psi_d$  y  $\Psi_q$  son las componentes del flujo del estator en el sistema de coordenadas rotativo  $d - q$ , y en el que el  $\bar{I}_s$  del flujo  $\bar{\Psi}$  del estator ha sido eliminado para una mayor simplicidad. En otra forma, el par se puede inscribir del modo siguiente:

$$T = \Psi_M I \sin(\nu) + \frac{1}{2} (L_d - L_q) I^2 \sin(2\nu) \quad \text{Eq. 4}$$

40 en la que  $I$  es la magnitud de la corriente  $\bar{I}_s$  del estator. La proporción del par máximo a la corriente se puede encontrar (suponiendo que la magnitud de la corriente, es decir, la cantidad de corriente  $I$  es constante) calculando la derivada del par con respecto al ángulo  $\nu$  y ajustando esta derivada a cero:  $dT / d\nu = 0$ . El valor correspondiente del ángulo  $\nu$  es indicado  $\nu_0$  a continuación. Los resultados del coseno del ángulo  $\nu_0$ , del flujo  $\bar{\Psi}_0$  del estator y del par  $T_0$  son los siguientes:

$$\cos(\nu_0) = \frac{-\Psi_M + \sqrt{\Psi_M^2 + 8(L_d - L_q)^2 I^2}}{4(L_d - L_q)I} \quad \text{Eq. 5}$$

$$\bar{\Psi}_0 = \Psi_M + L_d I \cos(\nu_0) + jL_q I \sin(\nu_0) \quad \text{Eq. 6}$$

$$T_0 = \Psi_M I \sin(\nu_0) + \frac{1}{2}(L_d - L_q)I^2 \sin(2\nu_0) \quad \text{Eq. 7}$$

Por lo tanto, el flujo máximo del estator, es decir, el flujo del estator que corresponde a la proporción máxima de par a corriente, es una función del par:

$$\Psi_0 = f(T_0, \Psi_M, L_d, L_q) \quad \text{Eq. 8,}$$

5 en la que  $f$  representa "función". Esta función, que puede ser calculada utilizando las ecuaciones que se han indicado anteriormente, se puede implementar en el dispositivo  $b$  que se ha mostrado en la figura 1 (que se describirá a continuación) y es una realización preferente de la función predeterminada mencionada anteriormente en la descripción general de la invención.

10 El vector de flujo se puede calcular a partir de una corriente determinada y magnitud de flujo, por ejemplo, utilizando las ecuaciones siguientes 9a y 9b:

$$\Psi_d = \frac{L_q^2 \Psi_M - L_d L_q \sqrt{(L_q^2 - L_d^2)I^2 + \left(\frac{L_d^2}{L_q^2} - 1\right)|\Psi|^2 + \Psi_M^2}}{L_q^2 - L_d^2} \quad \text{Eq. 9a}$$

$$\Psi_q = \sqrt{|\Psi|^2 - \Psi_d^2} \quad \text{Eq. 9b}$$

El par viene dado por la ecuación siguiente:

$$T = \left( \frac{\Psi_d}{L_q} - \frac{\Psi_d - \Psi_M}{L_d} \right) \Psi_q \quad \text{Eq. 10}$$

15 De las ecuaciones 9 y 10 se puede calcular un valor límite del par que corresponde al valor límite de la corriente, es decir, la corriente máxima a través de los electroimanes del estator, se puede almacenar, por ejemplo, en una tabla de consulta. De modo general, este límite de par es función de la magnitud de flujo del estator, de la corriente máxima, del flujo del rotor, y de la inductividad compleja en el sistema de coordenadas  $d - q$  de la inductividad magnética de los electroimanes del estator.

20 En muchos casos, existe un par permitido máximo para un motor específico que se puede llamar "par de corte" ("pull out") y el flujo magnético del estator en el sistema de coordenadas rotativo  $d - q$  puede ser calculado utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\Psi_{d_{pull}} = \frac{L_q \Psi_M - \sqrt{L_q^2 \Psi_M^2 + 8|\Psi|^2 (L_d - L_q)^2}}{4(L_q - L_d)} \quad \text{Eq. 11a}$$

$$\Psi_{q_{pull}} = \sqrt{|\Psi|^2 - \Psi_{d_{pull}}^2} \quad \text{Eq. 11b}$$

El correspondiente ángulo de carga de corte se puede calcular a partir de la ecuación siguiente:

$$\gamma_{pull} = f_{pull}(\Psi) = \alpha \tan\left(\frac{\Psi_{q_{pull}}}{\Psi_{d_{pull}}}\right) \quad \text{Eq. 12}$$

y el par de corte viene indicado por:

$$T_{pull} = \left( \frac{|\Psi| \cos(\gamma_{pull})}{L_q} - \frac{|\Psi| \cos(\gamma_{pull}) - \Psi_M}{L_d} \right) \cdot |\Psi| \sin(\gamma_{pull}) \quad \text{Eq. 13}$$

5

Por lo tanto, el par de corte es una función de la magnitud del flujo del estator, de la magnitud del flujo del rotor y de la inductividad magnética de los electroimanes del estator en forma compleja escrito en el sistema de coordenadas rotativo  $d - q$ . El dispositivo *c*, según la figura 1, que es una realización preferente del dispositivo limitador para calcular el par motor reducido mencionado en la descripción general de la invención, se puede adaptar al par de corte, según la ecuación 13, o al par que corresponde al límite de corriente, según la ecuación 10, el que sea más pequeño.

10

El dispositivo *c* puede ser omitido y se puede impedir por otros medios que el par deseado no supere el par máximo permitido. Por ejemplo, se pueden limitar otros parámetros y/o cantidades que influyen en el control del motor, con el efecto de que el par motor máximo permitido no se exceda nunca. Por lo tanto, no se requiere un dispositivo limitador específico de manera necesaria.

15

Cuando se alcanza el flujo máximo de estator permitido del motor, el par es controlado ajustando el ángulo de carga, es decir, controlando el ángulo de carga por el controlador de ángulo de carga, de acuerdo con la presente invención. Cuando la velocidad del rotor aumenta, es decir, el rotor es acelerado, el voltaje eléctrico máximo que se puede utilizar para impulsar la corriente del electroimán del estator limita el flujo y, por lo tanto, el flujo del estator disminuirá. También, en esta situación, en la que flujo está limitado por el voltaje máximo disponible, el par es controlado utilizando el ángulo de carga como variable controlada. El dispositivo *a* de la figura 1 (ver a continuación) que calcula el valor límite del flujo del estator, puede ser adaptado para llevar a cabo las dos funciones limitadoras distintas en estas situaciones. El dispositivo *a* puede enviar el valor mínimo del flujo del estator máximo permitido o el voltaje máximo disponible, dividido por la velocidad del rotor y multiplicado por una constante *K*, el valor que sea más reducido:

20

25

$$f_{\Psi_{lim}} = \min\left(\Psi_{max}, K \frac{u_{max}}{\omega}\right) \quad \text{Eq. 14}$$

La figura 1 muestra una estructura de control 21 para controlar un motor síncrono con imán permanente PMSM, que puede ser un motor de corriente alterna trifásico, tal como se ha indicado por las tres líneas 23. El motor PMSM está directamente controlado por la utilización de la modulación del vector espacial SVM, de acuerdo con este ejemplo específico de la invención. El SVM es llevado a cabo por el dispositivo VSI utilizando un convertidor de corriente continua o alterna estándar, es decir, un inversor, que puede tener tres ramales dotados, en cada caso, con dos

30



conmutadores de semiconductor que están conectados en serie entre sí. Los controles para conmutar los conmutadores de semiconductor son producidos en el dispositivo VSI. No obstante, el dispositivo VSI es controlado por la salida de un modulador 25 que puede funcionar de una manera que es básicamente conocida en esta técnica.

No obstante, el método según el que se calcula la señal a la entrada del modulador 25, es objeto de la invención.

5 Por ejemplo, la estructura de control 21 envía un voltaje de referencia  $\bar{V}_{ref}$  que es recibido por combinación (en el dispositivo de combinación *h*) de las señales de salida de un controlador de flujo *f* y de un controlador de ángulo de carga *g* que están conectados paralelamente entre sí. La salida del dispositivo de combinación *h* ( $\bar{V}_{ref}$ ) es una referencia de voltaje facilitada en el sistema de coordenadas no rotativo fijo  $\alpha - \beta$ . Se puede calcular de la manera siguiente:

$$\bar{V}_{ref} = (V_d + jV_q) \cdot e^{j(\theta + \gamma)}$$

10 Los voltajes de entrada  $V_d$  y  $V_q$  están indicados en las coordenadas de flujo del estator rotativo (*ds - qs*, ver referencia anterior Figura 7).

De acuerdo con la realización que se ha descrito, el controlador de flujo *f* recibe un valor de referencia  $\Psi_{ref}^*$  como valor de entrada, y opera en base a este valor de entrada. Tal como se ha mencionado, el valor de referencia  $\Psi_{ref}^*$  puede ser introducido en el controlador de flujo *f* en forma de diferencia entre el valor de referencia y el valor real del flujo. El controlador de flujo puede ser, por ejemplo, un controlador PI (proporcional, integral) y puede emitir un voltaje  $V_d$  que representa un voltaje de referencia en la dirección del flujo del estator, es decir, en la dirección del eje de coordenadas *ds* (ver la definición de *ds* en la figura 7) del sistema de coordenadas rotativo. Preferentemente, el método de control es llevado a cabo utilizando las coordenadas del sistema *ds* y *qs* (ver descripción anterior de la figura 7).

El controlador del ángulo de carga *g* recibe una señal  $T_{ref}^*$  como valor de entrada, y calcula sobre esta base, un voltaje de referencia  $V_q$  como salida, de manera que este voltaje de referencia  $V_q$  corresponde a un voltaje que controla la componente del flujo del estator perpendicular al eje de coordenadas *qs* (que es perpendicular a la dirección del flujo del estator). Por lo tanto, el voltaje de referencia  $V_q$  controla el ángulo de carga entre el flujo del estator y el flujo del rotor. También, en este caso, la información respecto al valor de referencia del par  $T_{ref}^*$  se puede introducir en el ángulo de carga *g* en forma de la diferencia entre el valor de referencia  $T_{ref}^*$  y el valor real del par.

El valor de referencia de flujo  $\Psi_{ref}^*$ , que es introducido en el controlador de flujo *f*, es enviado desde un dispositivo de combinación *d*. Si el flujo del estator está limitado por un dispositivo limitador *a* (la función de este dispositivo *a* ha sido descrito en lo anterior), el valor de salida limitado  $\Psi_{lim}$  es emitido por el dispositivo de combinación *d* como valor de referencia  $\Psi_{ref}^*$ . En todas las demás situaciones, el dispositivo de combinación *d* envía el valor funcional del dispositivo *b* (cuya función ha sido descrita en lo anterior) como valor de referencia  $\Psi_{ref}^*$ . El dispositivo *b* recibe el par deseado  $T_{ref}$  como valor de entrada, y calcula su valor de salida en base a la ecuación 8 y a las anteriores ecuaciones 5 - 7, por ejemplo.

35 El par deseado  $T_{ref}$  es introducido también en otro dispositivo de combinación *e* que emite el valor de par deseado como valor de par de referencia  $T_{ref}^*$  o la salida  $T_{lim}$  del dispositivo *c*, cuya función ha sido descrita anteriormente. El dispositivo *c* recibe el valor actual del flujo del estator y el valor máximo de la corriente del estator. El dispositivo *c* puede funcionar de acuerdo con las ecuaciones 9 a 13 que se han descrito anteriormente.

40 El dispositivo *a* recibe el flujo del estator máximo permitido, el voltaje disponible máximo para impulsar las corrientes del estator, y la velocidad real del rotor.

Para describir las fugas de la estructura de control 21: El dispositivo limitador *a* comprende una entrada para recibir el flujo de estator máximo permitido, el voltaje máximo disponible y la velocidad real del rotor. Una salida del dispositivo limitador *a* está conectada al dispositivo de combinación *d*. El dispositivo *b*, para calcular el valor

funcional de la función predeterminada mencionada anteriormente, comprende una entrada para recibir el par deseado y comprende una salida que es conectada a una entrada del dispositivo de combinación *d*. Una salida del dispositivo de combinación *d* está conectada al controlador de flujo *f* a efectos de transferir el valor de flujo de

referencia  $\Psi_{ref}^*$ . Una salida del controlador de flujo está conectada al dispositivo de combinación *h*.

- 5 El dispositivo de combinación *e* comprende una entrada para recibir el par deseado  $T_{ref}$  y comprende una entrada para recibir el valor límite del par  $T_{lim}$ . Esta entrada está conectada a una salida del dispositivo *c* que tiene una entrada para recibir la magnitud de flujo del estator real y para recibir la corriente máxima permitida del estator.

Una salida del dispositivo de combinación *e* para enviar el valor de par de referencia  $T_{ref}^*$  está conectada a una entrada del controlador de ángulo de carga *g*. Una salida del controlador de ángulo de carga *g*. Una salida del controlador de ángulo de carga *g* está conectada al dispositivo de combinación *h*.

- 10

Con referencia a las figuras 2 y 3, se describe un primer ejemplo del funcionamiento de un motor durante la aceleración del rotor. La figura 2 muestra el eje de tiempo como eje horizontal del diagrama. Por ejemplo, la unidad del eje de tiempo puede ser un segundo, es decir, el eje de tiempo empieza en cero y termina en 30 segundos.

El eje vertical corresponde al valor de par deseada  $T_{ref}$  y a la velocidad del rotor  $\omega$ .

- 15 La figura 3 muestra el flujo del estator en el sistema de coordenadas *d* - *q*. Durante el proceso de aceleración del rotor, el flujo del estator se desarrolla tal como se ha mostrado con una línea continua, y tal como se ha indicado por seis flechas. Ciertos puntos de tiempo y el correspondiente flujo del estator están indicados por las flechas A-E en la figura 3. Tiempos y valores correspondientes del par deseado  $T_{ref}$  están también indicados en la figura 2. El curso del par deseado  $T_{ref}$  en la figura 2, tiene forma trapezoidal.

- 20 El proceso de aceleración empieza en reposo, por ejemplo, cuando el rotor del motor no gira o cuando el motor no produce par. Esto está indicado por la letra A. En la primera fase del proceso de aceleración que empieza en el momento cero, par deseado  $T_{ref}$  aumenta linealmente. En la primera parte de esta fase, el flujo del estator sigue un diagrama casi lineal pero ligeramente curvado, mostrado en la figura 3 desde el punto A al B. Siguiendo esta ruta la componente *q* del flujo del estator aumenta desde cero a un valor de aproximadamente 1,2. Esto significa que el ángulo de carga aumenta de manera continua según el incremento continuo del par deseado  $T_{ref}$ . La peculiaridad característica de la ruta A-B es que la localización de esta ruta en el diagrama de flujo del estator mostrado en la figura 3 está proporcionada por la condición de que el par del motor es reducido por las corrientes mínimas posibles a través de los electroimanes del estator, de manera que todas estas corrientes son activadas por el mismo voltaje. Este es, usualmente, el caso en sistemas estándar para conseguir motores eléctricos con energía de un circuito intermedio de corriente continua utilizando un inversor que invierte la corriente continua en las tres fases de un sistema de corriente alterna trifásico, que está conectado a las tres fases del motor. No obstante, la invención no está restringida a sistemas trifásicos.

Haciendo referencia nuevamente a la figura 1, la ruta A-B de la figura 3 está controlada por el dispositivo *b*, que envía su valor funcional, y este valor funcional es enviado por el dispositivo de combinación *d* como valor de

- 35 referencia  $\Psi_{ref}^*$  al controlador de flujo. El controlador de ángulo de carga recibe, como valor de entrada, el par deseado  $T_{ref}$ . Los dispositivos limitadores *a* y *c* no influyen en la salida de la estructura de control durante esta fase de funcionamiento.

En el punto B de la figura 2 y de la figura 3, se alcanza el flujo máximo permitido del estator. Esto ocurre en el tiempo  $t=1$  de la figura 2. En la figura 3, el flujo de estator máximo permitido corresponde a la línea circular de trazos indicada por  $|\Psi| = \Psi_{max}$ .

- 40

De forma alternativa, de acuerdo con otro ejemplo de la invención, los puntos B y C pueden ser idénticos, es decir, la ruta A-B de la figura 3 sería seguida directamente por la ruta C-D. Esto ocurre, por ejemplo, si la magnitud de las corrientes eléctricas, a través de los electroimanes del estator, han alcanzado un valor máximo predeterminado cuando alcanza el estado de flujo máximo permitido, o antes de alcanzarlo.

- 45 Dado que el par deseado  $T_{ref}$  aumenta todavía hasta  $t=2$  (ver figura 2), el par incrementado no puede ser conseguido

al aumentar adicionalmente el valor de referencia  $\Psi_{ref}^*$ , que es el valor de entrada del controlador de flujo en la figura 1. En vez de ello, el dispositivo limitador *a* limita ese valor de referencia al valor máximo posible, de manera que el flujo de estator máximo permitido  $\Psi_{max}$  no es superado. A efectos de producir un par motor, que corresponde

- 50 al par deseado, el controlador de ángulo de carga *g*, que recibe el par deseado como su valor de referencia  $T_{ref}^*$ , emite una señal de control a efectos de aumentar el ángulo de carga. De manera correspondiente, la ruta B-C, en la figura 3, sigue la línea circular del flujo de estator máximo permitido, incrementando, por lo tanto, el ángulo de carga que es indicado como  $\gamma$  en la figura 7. Por lo tanto, en la figura 7, el funcionamiento realizado siguiendo la ruta B-C

se consigue haciendo girar el indicador designado por  $\bar{\Psi}_s$  en dirección contraria a las agujas del reloj, de manera que el ángulo de carga  $\gamma$ , aumenta. Haciendo referencia nuevamente a la figura 1, el valor de referencia  $\Psi_{ref}^*$ , que es el valor de entrada del controlador de flujo  $f$ , es proporcionado, tal como se ha mencionado, por el valor límite

5  $\Psi_{lim}$ . Por otra parte, el valor de entrada  $T_{ref}^*$ , que es el valor de entrada del controlador de ángulo de carga  $g$  es igual al valor de par deseado  $T_{ref}$ . Dado que el controlador de flujo  $f$  no puede contribuir al aumento deseado del par motor, el controlador  $g$  de ángulo de carga suministrará la señal de salida requerida. Por ejemplo, el controlador  $g$  del ángulo de cargar es también un controlador PI. Esto significa que el dispositivo limitador  $a$  pasiva la función del controlador de flujo  $f$ . Por otra parte, el dispositivo limitador  $c$  no tiene influencia en la salida de la estructura del control 21 en la fase que corresponde a la ruta B-C.

10 En el punto C, el par deseado  $T_{ref}$  alcanza su valor máximo y es mantenido constante en la siguiente fase de funcionamiento. Por lo tanto, se alcanza la corriente máxima permitida a través de los electroimanes del estator. La línea correspondiente del flujo del estator en la figura 3, que corresponde a una corriente de estator constante, se ha indicado  $|i| = 2$  y es una sección de una elipse. No obstante, en primer lugar, durante la fases de  $t=2$  a  $t=10$  en la figura 2, el flujo del estator no disminuye, sino que es constante. En vez de ello, dado que el par no se incrementa, el  
15 flujo del estator puede permanecer en el punto C, pero el par puede acelerar el rotor con un flujo constante y con un ángulo de carga constante.

Haciendo referencia a la estructura de control 21 mostrada en la figura 1, no hay diferencia operativa entre la fase precedente (ruta B-C) y la fase en la que el flujo del estator permanece en el punto C, excepto que el dispositivo limitador  $c$  limita el par al valor real. No obstante, esta limitación no tiene efecto siempre que el par deseado permanezca también constante. En otras palabras, la salida  $T_{lim}$  del dispositivo limitador  $c$  y el valor de par deseado  
20  $T_{ref}$  son iguales. Como consecuencia, el dispositivo de combinación  $e$  envía  $T_{ref}^*$ , que es también igual a estos valores.

En el momento  $t=10$ , se alcanza el voltaje máximo disponible para impulsar las corrientes a través de los electroimanes del estator, y el flujo del estator disminuye pero es mantenido en un flujo máximo posible (que depende de la velocidad y del voltaje). La ruta correspondiente de la figura 3 se extiende de C-D. De manera correspondiente, la velocidad del rotor no puede ser incrementada en la misma velocidad que antes de  $t=10$ . Como consecuencia, el dispositivo limitador  $c$  empieza disminuyendo el par limitado  $T_{lim}$  y el dispositivo de combinación  $e$   
25 envía este par limitado como par de referencia  $T_{ref}^*$ . Como resultado, el flujo del estator disminuye con el incremento de la velocidad del rotor, de manera que el dispositivo limitador  $c$  garantiza que el flujo del estator se mantiene en la línea de la corriente máxima del estator. Tal como se puede apreciar en la figura 3, tiene lugar un ligero incremento del ángulo de carga en la ruta C-D.

En el punto D, que corresponde a  $t=20$ , en la figura 2, el par deseado empieza a disminuir. Por lo tanto, el dispositivo de combinación  $e$  envía el valor de par reducido  $T_{ref}$  en vez del valor de par limitado  $T_{lim}$ , y el controlador  $d$  del ángulo de carga reacciona disminuyendo el ángulo de carga, mientras que el flujo del estator se mantiene (por la función  $a$ ) en el límite (en el flujo máximo permitido o en el flujo máximo posible, el valor que sea más pequeño) por el controlador de flujo  $f$ .  
35

Las fases de C-D y de D-C pueden ser definidas por el concepto de que el flujo del estator se mantiene en el flujo máximo posible (que depende del voltaje disponible a la velocidad del rotor), es decir, el flujo es lo más elevado posible durante estas fases.

40 En el punto E, que corresponde a  $t=21,5$  en la figura 2, el flujo del estator alcanza la ruta que se caracteriza por la condición de que el par puede ser producido por la corriente mínima posible a través de los electroimanes del estator. En este punto, la estructura de control 21 empieza a funcionar del mismo modo que se ha descrito anteriormente para la ruta A – B, en la que los dispositivos limitadores  $a$  y  $c$  no influyen en la salida de estructura de control 21. En vez de ello, el dispositivo  $b$  influye en el controlador de flujo  $f$ , de manera que el controlador de flujo  $f$   
45 reduce el flujo del estator en la ruta E – A.

Las figuras 4 y 5 muestran un proceso de aceleración similar. No obstante, el par deseado  $T_{ref}$  se mantiene constante en su valor máximo durante un periodo de tiempo más prolongado  $t=40$ . Por lo tanto, empezando en el punto C de la figura 5 (que es el mismo punto que el punto C de la figura 3) el flujo del estator disminuye en la ruta C – F de la figura 5 en vez de terminar en el punto D de la figura 3. En el punto F, el flujo del estator alcanza la línea O – P, que indica el ángulo de carga máximo permitido del motor. Como resultado, el dispositivo limitador  $c$  empieza limitando adicionalmente el valor de salida  $T_{lim}$  en el punto F, lo que corresponde a  $t=30$  de la figura 4. La proporción de aceleración disminuye adicionalmente tal como se puede apreciar en la figura 4 en  $t=30$ .  
50

En el punto G, la demanda de par (es decir, el par deseado) se reduce, de manera que el flujo del estator sigue una

línea desde el punto G – H. En este punto, el flujo del estator se mantiene en el flujo máximo posible (dependiendo de la velocidad y del voltaje). La función de la estructura de control 21 en la ruta G – H es la misma que para la ruta D – E de la figura 3, pero a un nivel menor de la magnitud de flujo del estator.

- 5 En el punto H, el flujo del estator ha alcanzado nuevamente la línea de A – B que se caracteriza por la relación óptima de par a corriente. La ruta de H – A es controlada de la misma manera que se ha descrito con referencia a la figura 2 y a la figura 3 para la ruta E – A.

**REIVINDICACIONES**

1. Método de control de un motor síncrono (1) que tiene un estator que comprende un conjunto de electroimanes (7, 9) y que tiene un rotor (5) con imanes permanentes, de manera que el motor síncrono (1) está controlado por
- 5 - cálculo en un controlador de flujo ( $f$ ) de la medida ( $V_d$ ) de la magnitud de flujo, que es la magnitud del flujo del stator del motor (1),
- cálculo en un controlador ( $g$ ) del ángulo de carga de la magnitud ( $V_q$ ) del ángulo de carga, que es el ángulo entre el flujo del estator y el flujo del rotor con referencia al eje de rotación del rotor (5), de manera que la información con respecto a un par motor deseado ( $T_{ref}$ ) o con respecto a un par motor reducido ( $T_{lim}$ ), que es menor que el par motor deseado, es introducida en el controlador ( $g$ ) de ángulo de carga y, de manera que el controlador ( $g$ ) de ángulo de carga calcula la magnitud del ángulo de carga dependiendo del par motor introducido,
- 10 - combinar la magnitud del flujo ( $V_d$ ) y la magnitud del ángulo de carga ( $V_q$ ) para obtener una señal ( $\bar{V}_{ref}$ ) que tiene que ser utilizada para obtener instrucciones para controlar corrientes eléctricas de los electroimanes del estator, comprobando de esta manera directamente el flujo del estator,
- calcular repetidamente un valor límite de flujo ( $\Psi_{lim}$ ) que depende del valor máximo de un voltaje eléctrico, que se utiliza para impulsar las corrientes a través de los electroimanes (7, 9) del estator, y que depende de la velocidad real del rotor,
- 15 - durante la aceleración del rotor (5), mientras el flujo del estator es más reducido que el flujo máximo ( $\Psi_{max}$ ) permitido para el rotor:
- calcular la magnitud del flujo ( $V_d$ ) dependiendo del resultado de una función predeterminada ( $f_o(T)$ ), de manera que el resultado de la función predeterminada depende del par motor deseado ( $T_{ref}$ ) y corresponde a la magnitud de flujo del estator, que resulta en el par motor deseado utilizando la corriente de estator mínima posible, y
  - calcular la magnitud del ángulo de carga ( $V_q$ ) dependiendo del par motor deseado.
- caracterizado porque
- el valor límite de flujo ( $\Psi_{lim}$ ) calculado repetidamente depende de un valor máximo predeterminado ( $\Psi_{max}$ ) del flujo del estator permitido para el motor (1),
- 25 - el motor síncrono (1) es controlado durante la aceleración adicional del rotor (5) cuando el flujo del estator ha alcanzado el flujo máximo permitido para el motor,
- calculando la magnitud de flujo correspondiente al valor límite de flujo, y
  - calculando la magnitud del ángulo de carga dependiendo del par motor deseado,
- 30 de manera que el flujo del estator se mantiene constante en el flujo máximo permitido para el motor y, mientras aumenta el par motor deseado, el ángulo de carga aumenta también.
2. Método, según la reivindicación anterior, en el que el motor síncrono (1) es controlado durante la aceleración adicional del rotor (5) cuando la magnitud de las corrientes eléctricas a través de los electroimanes del estator han alcanzado un valor máximo predeterminado,
- 35 • calculando la magnitud del ángulo de carga dependiendo del par motor reducido, de manera que las corrientes eléctricas se ajustan de manera continuada al valor máximo predeterminado, y de manera que el ángulo de carga aumenta mientras el flujo del estator disminuye.
3. Método, según la reivindicación anterior, en el que el motor síncrono (1) es controlado durante la aceleración adicional del rotor (5) cuando el par motor ha alcanzado un valor máximo predeterminado,
- 40 • calculando la magnitud del ángulo de carga dependiendo del par motor reducido, de manera que el par motor reducido es limitado al valor máximo predeterminado, de manera que las corrientes eléctricas disminuyen, y de manera que el flujo del estator disminuye.
4. Método, según una de las dos reivindicaciones anteriores, en el que el motor síncrono (1) es controlado durante la aceleración adicional del rotor (5), mientras el par motor deseado disminuye,
- 45 • calculando la magnitud de flujo correspondiente al valor de flujo constante, y
- calculando la magnitud del ángulo de carga dependiendo del par motor deseado, de manera que el flujo del estator es limitado al valor límite de flujo y el ángulo de carga disminuye.

5. Motor, según una de las reivindicaciones anteriores, en el que el motor síncrono (1) es un motor de propulsión de un vehículo ferroviario, y en el que el método es realizado dentro del vehículo ferroviario.

6. Disposición para el control del motor síncrono (1) que tiene un estator (3) que comprende un conjunto de electroimanes (7, 9) y que tiene un rotor (5) con imán permanente, en la que la disposición comprende:

5 - un controlador de flujo ( $f$ ) para controlar el motor (1) calculando la magnitud ( $V_d$ ) de flujo, que es la magnitud del flujo del estator del motor (1),

- un controlador ( $g$ ) del ángulo de carga para controlar el motor (1) calculando la magnitud ( $V_q$ ) del ángulo de carga, que es el ángulo entre el flujo del estator y el flujo del rotor con diferencia al eje de rotación del rotor (5),

10 - comprendiendo el controlador ( $g$ ) de ángulo de carga una entrada para recibir información con respecto al par motor, que es el par motor deseado ( $T_{ref}$ ) o un par motor reducido ( $T_{lim}$ ) que es menor que el par motor deseado, y en el que el controlador ( $g$ ) de ángulo de carga está dotado para calcular la magnitud del ángulo de carga dependiendo del par motor introducido,

15 - un dispositivo de control ( $h$ ) para combinar la magnitud del flujo ( $V_d$ ) y la magnitud del ángulo de carga ( $V_q$ ) para obtener una señal ( $V_{ref}$ ) que tiene que ser utilizada para obtener instrucciones para controlar corrientes eléctricas de los electroimanes (7, 9) del estator (3), controlando de esta manera directamente el flujo del estator,

- un dispositivo ( $a$ ) para el cálculo del límite de flujo para calcular repetidamente el valor límite de flujo ( $\psi_{lim}$ ) que depende del valor máximo de un voltaje eléctrico, que se utiliza para impulsar las corrientes a través de los electroimanes (7, 9) del estator y que depende de la velocidad real del rotor,

20 - de manera que la disposición está adaptada para acelerar el rotor (5), mientras el flujo del estator es más reducido que el flujo máximo permitido para el motor:

- calculando ( $b$ ) la magnitud del flujo ( $V_d$ ) dependiendo del resultado de una función predeterminada ( $f_d(T)$ ), de manera que el resultado de la función predeterminada depende del par motor deseado ( $T_{ref}$ ) y corresponde a la magnitud del flujo del estator, que resulta en el par motor deseado utilizando la corriente de estator mínima posible, y

- calculando la magnitud del ángulo de carga ( $V_q$ ) dependiendo del par motor deseado ( $T_{ref}$ ).

25 caracterizada porque

- el dispositivo ( $a$ ) de cálculo del límite de flujo está adaptado para calcular repetidamente el valor límite de flujo ( $\psi_{lim}$ ) que depende de un valor máximo predeterminado ( $\psi_{max}$ ) del flujo del estator permitido para el motor (1),

- la disposición está adaptada para acelerar adicionalmente el rotor (5) cuando el flujo del estator ha alcanzado el flujo máximo permitido para el motor,

30 • calculando la magnitud de flujo correspondiente al valor límite de flujo, y

- calculando la magnitud del ángulo de carga dependiendo del par motor deseado,

de manera que el flujo del estator se mantiene constante en el flujo máximo permitido para el motor y, mientras aumenta el par motor deseado, el ángulo de carga aumenta también.

35 7. Disposición, según la reivindicación 6, en la que la disposición está adaptada para acelerar adicionalmente el rotor (5) del motor síncrono (1) cuando la magnitud de las corrientes eléctricas que pasan a través de los electroimanes del estator han alcanzado un valor máximo predeterminado,

- calculando la magnitud del ángulo de carga dependiendo del par motor reducido, de manera que las corrientes eléctricas se ajustan de manera continuada al valor máximo predeterminado, y de manera que el ángulo de carga aumenta mientras el flujo del estator disminuye.

40 8. Disposición, según la reivindicación anterior, en la que la disposición está adaptada a efectos de acelerar adicionalmente el rotor (5) del motor síncrono (1) cuando el par motor ha alcanzado un valor máximo predeterminado,

45 • calculando la magnitud del ángulo de carga dependiendo del par motor reducido, de manera que el par motor reducido es limitado al valor máximo predeterminado, de manera que las corrientes eléctricas disminuyen, y de manera que el flujo del estator disminuye.

9. Disposición, según una de las dos reivindicaciones anteriores, en la que la disposición está adaptada a efectos de acelerar adicionalmente el rotor (5), mientras el par motor deseado disminuye,

- calculando la magnitud de flujo correspondiente al valor de flujo constante, y

- calculando la magnitud del ángulo de carga dependiendo del par motor deseado, de manera que el flujo del estator es limitado al valor límite de flujo y el ángulo de carga disminuye.

10. Sistema de propulsión de un vehículo ferroviario, en el que la disposición de una de las reivindicaciones anteriores forma parte del sistema de propulsión y está adaptada para controlar un motor síncrono (1), que es un motor de propulsión del vehículo ferroviario.

5

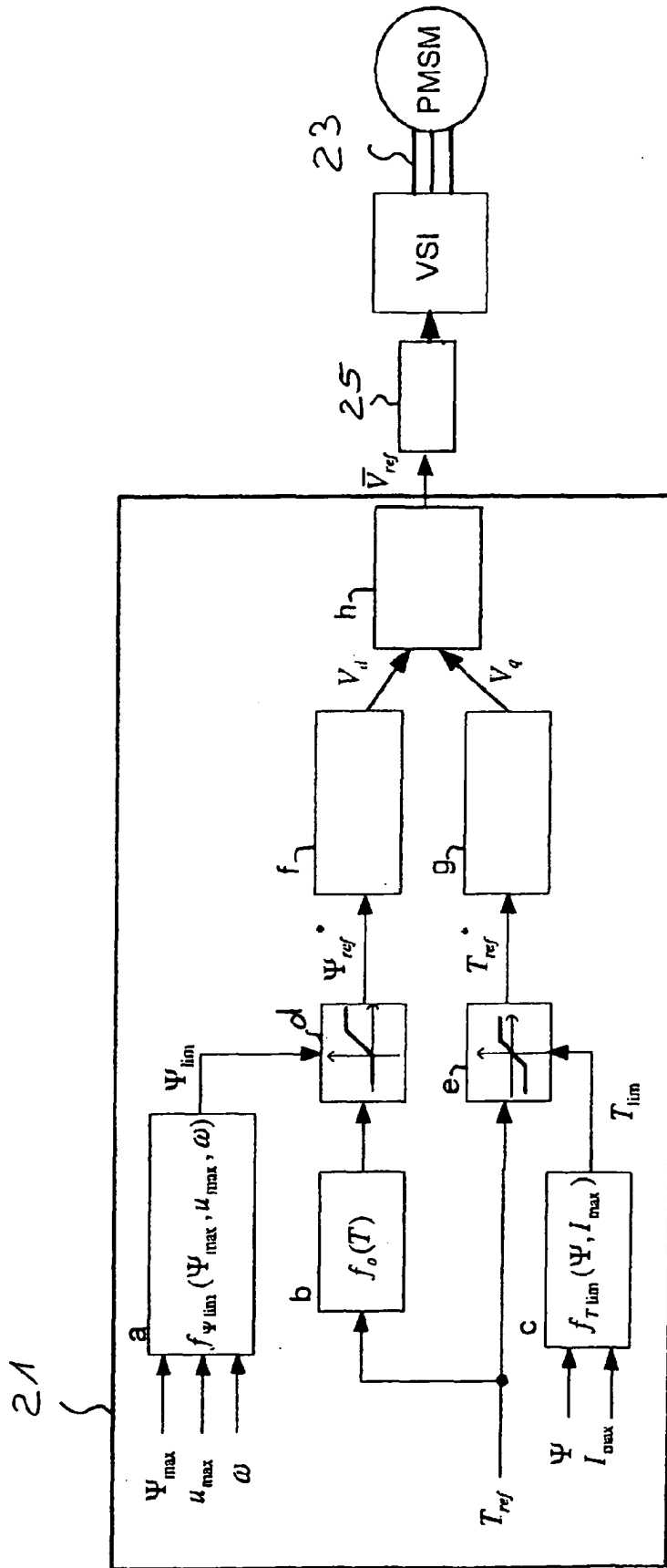


Fig. 1



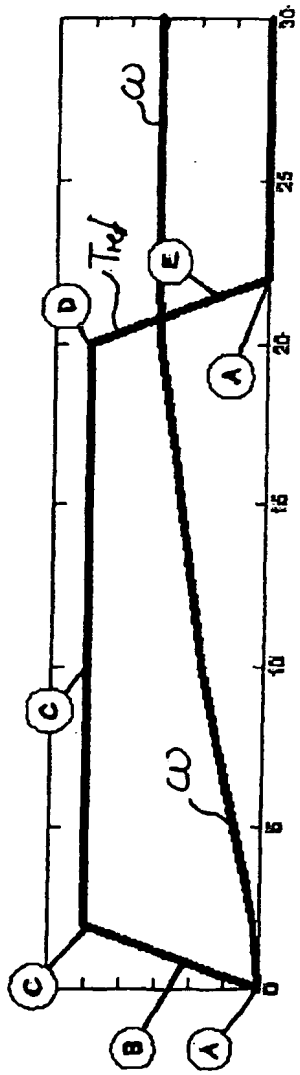


Fig. 2



Fig. 3

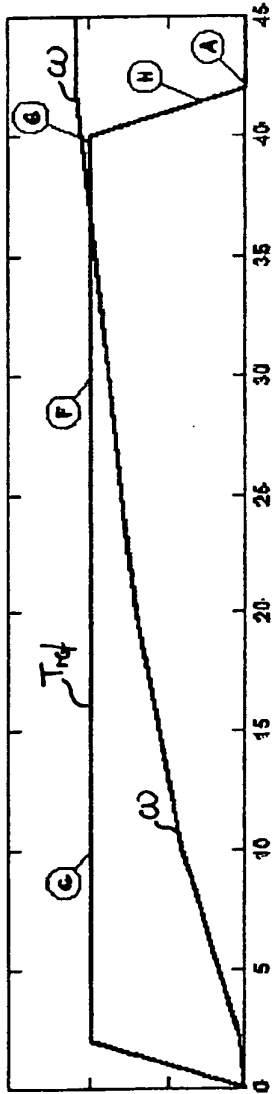


Fig. 4

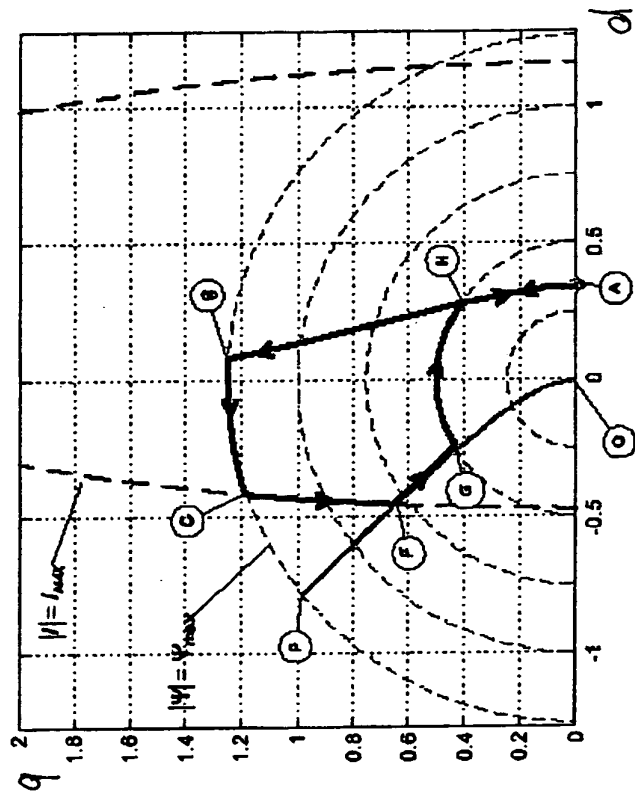


Fig. 5

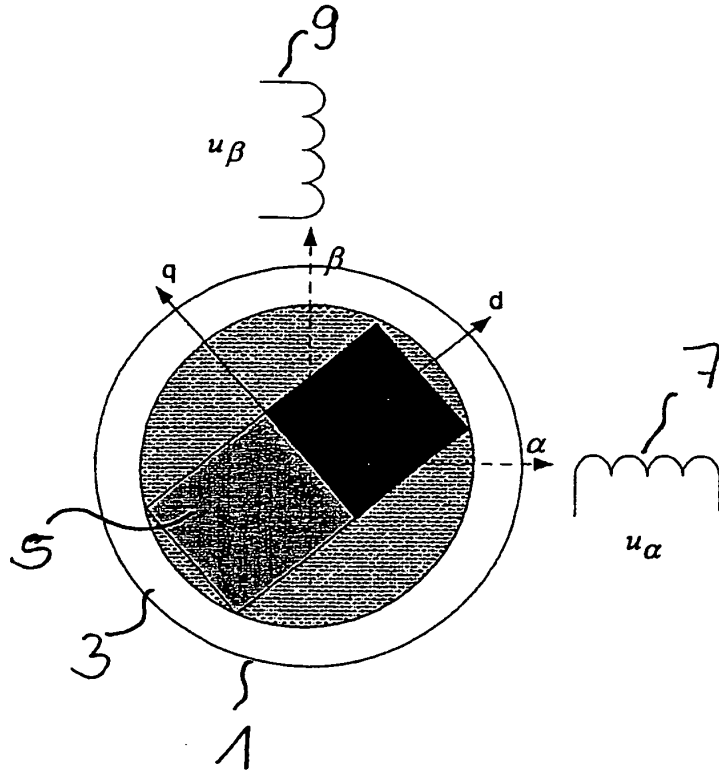


Fig. 6

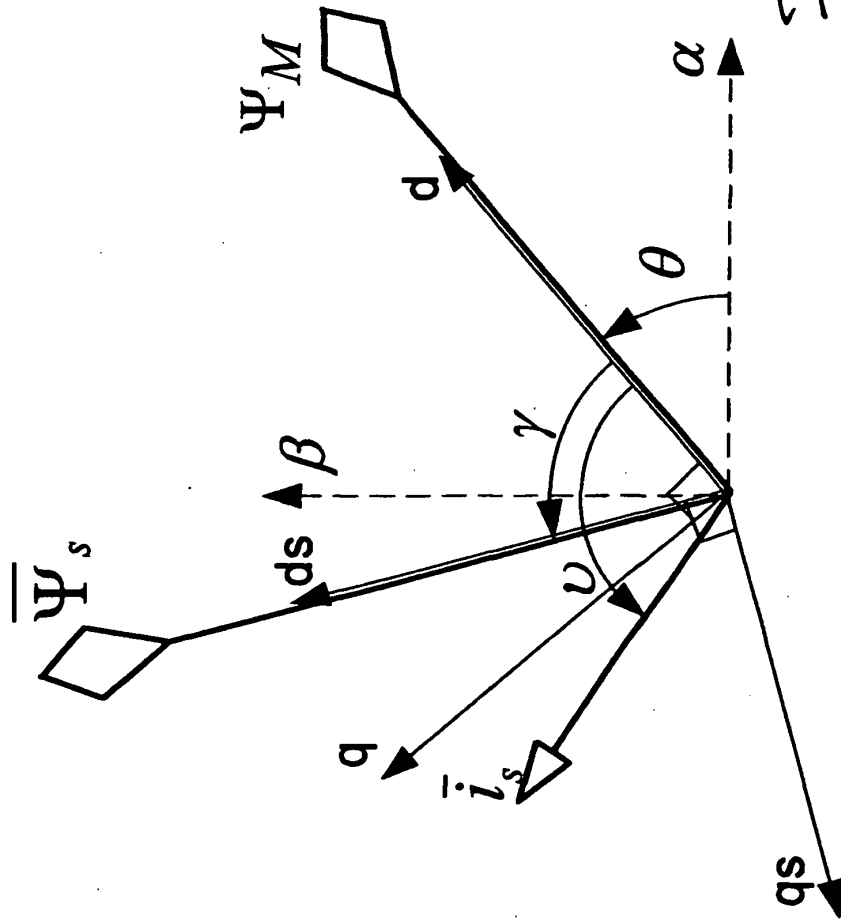


Fig. 7