

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 927 814**

51 Int. Cl.:

H02P 21/22 (2006.01)

H02P 25/024 (2006.01)

H02P 21/00 (2006.01)

H02P 9/14 (2006.01)

H02P 25/22 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **18.07.2018 PCT/EP2018/069490**

87 Fecha y número de publicación internacional: **28.03.2019 WO19057361**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.07.2018 E 18742789 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.07.2022 EP 3685504**

54 Título: **Procedimiento de funcionamiento de una máquina eléctrica de excitación externa**

30 Prioridad:
22.09.2017 DE 102017216790

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
11.11.2022

73 Titular/es:
**SEG AUTOMOTIVE GERMANY GMBH (100.0%)
Lotterbergstrasse 30
70499 Stuttgart, DE**

72 Inventor/es:
SZEPANSKI, DANIEL

74 Agente/Representante:
ISERN JARA, Jorge

ES 2 927 814 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento de funcionamiento de una máquina eléctrica de excitación externa

5 La presente invención se refiere a un procedimiento para operar una máquina eléctrica de excitación externa, así como a una unidad de computación y a un programa informático para llevarlo a cabo.

Estado de la técnica

10 Las máquinas eléctricas, especialmente los generadores, pueden utilizarse para convertir la energía mecánica en energía eléctrica en el vehículo de motor. Normalmente se utilizan para ello generadores de polos de garra, que suelen estar dotados de excitación eléctrica. Dado que los generadores de polos de garra producen corriente trifásica, mayormente trifásica, se requiere rectificación para los sistemas eléctricos de corriente continua habituales en los vehículos de motor. Para ello pueden utilizarse rectificadores basados en diodos semiconductores o interruptores semiconductores.

15 Los generadores también pueden utilizarse para arrancar un motor de combustión interna. Estos generadores también se denominan generadores de arranque. Normalmente, un generador de arranque de este tipo solo se acciona por motor a velocidades muy bajas, ya que el par que se puede generar disminuye rápidamente por encima de la velocidad. Sin embargo, también son concebibles máquinas eléctricas de mayor tamaño, que también pueden utilizarse en un vehículo híbrido para conducir el vehículo, o al menos para apoyar el motor de combustión interna.

20 La eficiencia de la máquina eléctrica es relevante para el balance de CO₂ y el consumo de un vehículo. Esto depende en gran medida de la corriente de excitación. La corriente de excitación puede, por ejemplo, seleccionarse a partir de una medición y almacenarse en tablas de consulta o calcularse analíticamente.

25 Una forma de optimizar el par de una máquina eléctrica se describe, por ejemplo, en el documento US 7 723 933 B2.

30 PYRHONEN J ET AL.: "A DIRECT TORQUE CONTROLLED SYNCHRONOUS MOTOR DRIVE CONCEPT FOR DYNAMICALLY DEMANDING APPLICATIONS", 8TH EUROPEAN CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS AND APPLICATIONS. LAUSANA, CH, SEPT. 7- 9, 1999; [EPE. EUROPEAN CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS AND APPLICATIONS], EPE ASSOCIATION, BRUSSELS, BE, Vol. 8, No. CONF. 08, 7 de septiembre de 1999 (1999-09-07), páginas 1-10, describen una combinación (DTC) de un "modelo de tensión" basado en DFLL (Direct Flux Linkage Control) con un parámetro de inductancia y resistencia basado en dos ejes para conseguir el mejor rendimiento. El control de la corriente del devanado de campo es una parte esencial del accionamiento del motor síncrono DTC. Se requiere un procedimiento de limitación del ángulo de los polos para mantener la estabilidad, especialmente en la región de debilitamiento del campo.

35 YOONJAE KIM ET AL.: "Copper-Loss-Minimizing Field Current Control Scheme for Wound Synchronous Machines", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, Vol. 32, Nº 2, 1 de febrero de 2017 (2017-02-01), páginas 1335-1345, describen un procedimiento de control de par de minimización de pérdidas de cobre para máquinas síncronas bobinadas (WSM) en la región de debilitamiento de campo. El método de Ferrari se aplica repetidamente para cada corriente de campo para encontrar las intersecciones entre el límite de tensión y las curvas de par. A continuación, se encuentra un conjunto de corrientes que minimiza las pérdidas y que corresponde a al menos una función de segundo orden ajustada a tres soluciones de Ferrari. Los cambios de inductancia se reflejan en cada paso. La función de coste incluye la pérdida de cobre del devanado de campo junto con la pérdida de cobre del estator.

40 Descripción de la invención

50 Según la invención, se propone un procedimiento para operar una máquina eléctrica de excitación externa, así como una unidad de computación y un programa informático para llevarlo a cabo con las características de las reivindicaciones independientes de la patente. Las formas de realización ventajosas son el objeto de las subreivindicaciones y de la siguiente descripción.

55 Un procedimiento según la invención se utiliza para operar una máquina eléctrica excitada externamente, por ejemplo, una máquina de polos de garra. En este caso, se ajusta una corriente de excitación en el ámbito de un control. Para ello, la corriente de excitación aumenta si un ángulo entre una tensión y el eje d en el sistema de coordenadas d-q es mayor que un ángulo entre una corriente y el eje d o que el ángulo entre la corriente y el eje d desplazado en 180°, y la corriente de excitación disminuye si el ángulo entre la tensión y el eje d es menor que el ángulo entre la corriente y el eje d o que el ángulo entre la corriente y el eje d desplazado en 180°. En particular, la diferencia entre el ángulo entre la tensión y el eje d y el ángulo entre la corriente y el eje d en el sistema de coordenadas d-q se controla a un valor de 0° o 180° utilizando la corriente de excitación como variable manipulada. En este contexto, la corriente y la tensión deben entenderse en particular como las cantidades de corriente de fase y de tensión de fase de la máquina eléctrica. El control puede llevarse a cabo con un componente proporcional y/o

integral, por ejemplo en el sentido de un denominado controlador PI. Preferentemente, la diferencia se controla a 0° en el funcionamiento del motor y a 180° en el funcionamiento del generador.

5 Para conseguir un rendimiento óptimo, es necesario encontrar una combinación de corriente de fase en coordenadas d-q y corriente de excitación que minimice las pérdidas totales del circuito de excitación y las pérdidas de la máquina (pérdidas óhmicas en los ramales, pérdidas por corrientes parásitas, pérdidas en el hierro). Las llamadas coordenadas d-q, también conocidas como representación vectorial espacial, pueden obtenerse a partir de las fases individuales mediante las llamadas transformaciones de Clarke y/o Park.

10 A bajas velocidades, las pérdidas en la corriente de excitación son dominantes debido a la mayor resistencia. En este caso, normalmente solo es posible determinar la corriente de excitación óptima mediante la variación por medición. A este respecto, es conveniente que el presente procedimiento, es decir, la regulación de la mencionada diferencia o el aumento o disminución de la corriente de excitación, se lleve a cabo cuando o solo cuando una velocidad de la máquina eléctrica esté por encima de un límite de velocidad preestablecido, que normalmente va de la mano de un llamado límite de tensión, ya que entonces la máquina eléctrica también se opera con el llamado control de bloque. En este caso, las amplitudes de las tensiones de fase generalmente no se modifican, sino que se encuentran en un máximo (es decir, en el límite de tensión). A este respecto, también está de acuerdo con la invención hacer funcionar la máquina eléctrica con control de bloque dentro del ámbito del presente procedimiento si la velocidad está por encima del límite de velocidad mencionado. Por debajo de este límite de velocidad, en cambio, se puede utilizar un control PWM convencional.

15 En cuanto se alcanza el límite de tensión (es decir, cuando se utiliza el funcionamiento en bloque o el control en bloque), el rendimiento óptimo de la máquina eléctrica se encuentra en un ángulo de diferencia entre la tensión y la corriente en el sistema de coordenadas d-q para el que el coseno es la unidad, es decir, en una diferencia de 0° o 180° , ya que la corriente de fase se hace mínima en ese punto.

20 Un punto de funcionamiento real de la máquina eléctrica en modo de bloque suele estar situado en el llamado círculo de tensión de la curva del lugar de la corriente, como se explicará con más detalle más adelante en relación con las figuras, y también solo puede desplazarse sobre él. Teniendo en cuenta el llamado punto de inclinación o momento de inclinación, solo hay un punto de intersección del círculo de tensión con una línea de par constante. El centro del círculo de tensión viene determinado por el flujo de excitación y la inductancia d y, por tanto, puede desplazarse variando la corriente de excitación, ya que en este caso se trata de una máquina de excitación externa.

25 Si se aumenta la corriente de excitación, el círculo de tensión en el sistema de coordenadas d-q se desplaza hacia la izquierda. Esto también desplaza el puntero actual del punto de funcionamiento actual. La fase de la corriente aumenta y la de la tensión disminuye. Variando la corriente de excitación, los punteros de corriente y tensión pueden desplazarse de forma que se consiga la condición mencionada y se optimice el rendimiento. La corriente de excitación sirve así de variable manipulable para controlar la diferencia. Sin embargo, la propia corriente de excitación también puede ajustarse al valor deseado, entonces en el ámbito de un control subordinado. Preferentemente, se especifica un valor inicial para esto, de modo que solo la diferencia con este valor inicial debe incluirse en este control.

30 Durante el funcionamiento de la máquina eléctrica, la tensión en coordenadas d-q también puede determinarse preferentemente en función de un ángulo de preconmutación que debe fijarse y/o ajustarse. En este caso, el ángulo de preconmutación también puede fijarse y/o ajustarse en función de un par requerido por la máquina eléctrica y un par determinado en último lugar.

35 Para un funcionamiento óptimo de la máquina eléctrica, suele ser necesario que se establezca una corriente mínima posible en la máquina eléctrica. Para ello, la tensión (interna) de la máquina eléctrica y la corriente de onda fundamental del motor asociada deben estar en fase. Debido a la inductividad de la máquina eléctrica, para ello suele ser necesaria una activación retardada de las líneas de bobinado. Esta corrección, que compensa el comportamiento de retardo de la corriente de onda básica del motor, se describe mediante el llamado ángulo de preconmutación.

40 Una unidad informática según la invención, por ejemplo, una unidad de control de un vehículo de motor o una unidad de control para una máquina eléctrica, está configurada, en particular en términos de programación, para llevar a cabo un procedimiento según la invención.

45 La implementación del procedimiento en forma de programa informático también es ventajosa, ya que esto provoca unos costos especialmente bajos, especialmente si una unidad de control de ejecución se sigue utilizando para otras tareas y, por lo tanto, está presente de todos modos. Los soportes de datos adecuados para proporcionar el programa informático son, en particular, las memorias magnéticas, ópticas y eléctricas, como los discos duros, las memorias flash, las EEPROM, los DVD, etc. También es posible descargar un programa a través de redes informáticas (Internet, intranet, etc.). Otras ventajas y realizaciones de la invención se desprenden de la descripción y del dibujo adjunto.

50

55

60

65

La invención se ilustra esquemáticamente mediante un ejemplo de una forma de realización en el dibujo y se describe a continuación con referencia al dibujo.

Breve descripción de los dibujos

5 La figura 1 muestra esquemáticamente una máquina eléctrica en la que puede llevarse a cabo un procedimiento según la invención.

La figura 2 muestra de forma esquemática una posibilidad de controlar una máquina eléctrica.

10 La figura 3 muestra de forma esquemática las características de la corriente de una máquina eléctrica.

La figura 4 muestra esquemáticamente un punto de funcionamiento actual de una máquina eléctrica en un sistema de coordenadas d-q.

15 La figura 5 muestra esquemáticamente una secuencia de un proceso según la invención en una forma de realización preferida.

La figura 6 muestra esquemáticamente una secuencia de un proceso según la invención en otra realización preferida.

20 Formas de realización de la invención

25 La figura 1 muestra un diagrama de circuito esquemático de una máquina eléctrica en la que se puede llevar a cabo un procedimiento según la invención. La máquina eléctrica 100 se diseña aquí como un ejemplo de máquina eléctrica de cinco fases con excitación externa. Se entenderá que también puede utilizarse otro número de fases, por ejemplo, tres. La máquina eléctrica 100 puede, por ejemplo, estar diseñada como una máquina de garras.

30 La máquina eléctrica 100 tiene aquí cinco devanados de estator 120 y un devanado de excitación o rotor 110. Una corriente de excitación I_{ex} en el devanado de excitación 110 puede ajustarse a través de una unidad informática diseñada como unidad de control 140. Además, está prevista una disposición de circuitos 130 con interruptores 131, aquí ejemplarmente MOSFETS, de los cuales solo uno está provisto de un signo de referencia, por medio de los cuales se puede aplicar o tomar una tensión U de los devanados del estator 120, dependiendo de si la máquina eléctrica se utiliza en funcionamiento de motor o de generador.

35 La disposición de interruptores 130 y la unidad de control 140 también pueden formar parte de una unidad de control común o de un inversor o convertidor para la máquina eléctrica.

40 La figura 2 muestra un diagrama esquemático de una forma de controlar una máquina eléctrica, como la mostrada en la figura 1. El diagrama superior muestra una tensión U sobre el tiempo t, y el diagrama inferior muestra un ciclo de trabajo T sobre el tiempo t.

45 Se trata de patrones de control según un procedimiento estándar de la llamada modulación sinusoidal triangular. A la tensión objetivo deseada, es decir, la onda sinusoidal del diagrama superior, se superpone aquí una señal triangular (también mostrada en el diagrama superior), que tiene una frecuencia significativamente mayor que la de la onda fundamental eléctrica (normalmente más de 10 kHz). Cada intersección marca una conmutación de la señal PWM.

50 El patrón de control del diagrama inferior puede generarse ahora con una unidad de control PWM. Para una máquina de polos de garra, este control PWM se suele utilizar hasta el límite de tensión mencionado. A partir del límite de tensión o por encima de él, la máquina eléctrica se controla con un patrón de bloques en modo de bloque o con el llamado control de bloques.

Este control en bloque se caracteriza por el hecho de que las tensiones de fase tienen la máxima amplitud posible y esta amplitud no puede ser modificada (teóricamente esto es posible controlando con anchos de bloque inferiores a 180°, pero esto no se suele utilizar).

55 Además de la corriente de excitación, la posición de fase del vector de tensión, el llamado ángulo de precomutación, sirve ahora como variable manipulada para un par objetivo deseado de la máquina eléctrica.

60 Dado que la amplitud no puede modificarse (o al menos no se modifica) en el modo de bloque, este modo de control solo se utiliza por encima del límite de tensión (es decir, cuando la tensión de la rueda polar es mayor que la tensión de enlace de CC aplicada), en este caso normalmente a velocidades superiores a 3.000/min.

65 La figura 3 muestra las curvas de corriente, aquí las corrientes de fase, que se generan cuando la máquina eléctrica

está girando y la tensión de fase es sinusoidal. Para ello, se traza una corriente I sobre el tiempo t .

Con una distribución simétrica, las corrientes de fase individuales I_A , I_B , I_C , I_D e I_E pueden combinarse en un vector espacial. Para ello se utilizan las conocidas transformaciones de Clark y Park. En primer lugar, las corrientes I_α e I_β se obtienen con la transformación de Clarke según las fórmulas:

5

$$I_\alpha = \left(I_A + I_B \cos\left(\frac{2\pi}{5}\right) + I_C \cos\left(\frac{4\pi}{5}\right) + I_D \cos\left(\frac{6\pi}{5}\right) + I_E \cos\left(\frac{8\pi}{5}\right) \right)$$

y

10

$$I_\beta = \left(I_B \sin\left(\frac{2\pi}{5}\right) + I_C \sin\left(\frac{4\pi}{5}\right) + I_D \sin\left(\frac{6\pi}{5}\right) + I_E \sin\left(\frac{8\pi}{5}\right) \right).$$

De ello, resultan las corrientes I_d e I_q con la transformación de Park según las fórmulas:

$$I_d = I_\alpha \cos\theta + I_\beta \sin\theta \quad I_q = -I_\alpha \sin\theta + I_\beta \cos\theta,$$

en donde θ es el ángulo del rotor de la máquina eléctrica. La tensión también se puede transformar en coordinación d-q de la misma manera.

15 Para conseguir el rendimiento óptimo de la máquina eléctrica, es necesario ahora encontrar una combinación de la magnitud de la corriente de fase I_{dq} en coordinación d-q y la corriente de excitación I_{ex} que minimice las pérdidas totales del circuito de excitación y las pérdidas de la máquina (pérdidas óhmicas en los ramales, pérdidas por corrientes parásitas, pérdidas en el hierro). A bajas velocidades, las pérdidas en la corriente de excitación son dominantes debido a la mayor resistencia. En este caso, la corriente de excitación óptima puede determinarse metrológicamente por variación. En este sentido, el presente procedimiento se utiliza preferentemente solo para el funcionamiento en el límite de tensión. En cuanto se alcanza el límite de tensión (es decir, cuando se utiliza el funcionamiento en bloque), el rendimiento óptimo se sitúa en $\cos(\varphi)=1$, ya que la corriente de fase pasa a ser mínima en ese punto. El ángulo φ indica aquí la diferencia angular entre los punteros de corriente y tensión, como se explicará con más detalle a continuación.

20

25

La figura 4 muestra de forma esquemática un punto de funcionamiento de la corriente de una máquina eléctrica en un sistema de coordenadas d-q, concretamente mediante la llamada curva de lugar de la corriente. Para ello, se trazan las corrientes I_d e I_q . Con la ayuda de esta curva del lugar de la corriente, se puede explicar la estrategia para regular esta diferencia angular según el presente procedimiento.

30

La curva del lugar de la corriente muestra el punto de funcionamiento B de la máquina eléctrica. Este punto de funcionamiento resulta del puntero de corriente o de la corriente I_{dq} y del puntero de tensión, que indica la tensión U_{dq} y el flujo encadenado ψ_{dq} . El punto de funcionamiento es el extremo común de los punteros para la corriente I_{dq} y el flujo encadenado ψ_{dq} .

35

En el modo de bloque, el punto de funcionamiento B solo puede desplazarse en el llamado circuito de tensión, aquí designado 410. El circuito de tensión 410 representa una tensión máxima posible (o, tras la conversión, el máximo flujo interconectado posible), que se utiliza permanentemente en el modo de bloque. Para un par requerido o deseado, más allá del llamado punto de inflexión o momento de inflexión, solo hay un punto de intersección del círculo de tensión 410 con la línea de par constante, aquí designada 421. Además, se designa un par máximo o mínimo posible mediante 420.

40

El momento de inclinación representa dicho par, que, si se supera, daría lugar a un par menor cuando la curva de tensión recorre el puntero de corriente I_{dq} , a pesar de un aumento de la corriente, lo que iría en detrimento del rendimiento.

45

Con 400, también se muestra un circuito de corriente máxima, es decir, para un valor máximo de la corriente I_{dq} , ya que resulta del hecho de que las líneas utilizadas en la máquina eléctrica o en un inversor no pueden transportar una corriente infinitamente alta. Esto significa que el rango mostrado en sombreado es el más posible para el punto de operación B. Debido al funcionamiento en bloque, este rango está además restringido a la línea límite de este rango

50

sombreado, en la medida en que se encuentra en el circuito de tensión 410.

El punto central 411 del circuito de tensión 410 (o elipse de tensión) está determinado por el flujo de excitación en el devanado de excitación y la inductancia d y, por tanto, puede desplazarse variando la corriente de excitación, ya que en el presente caso se trata de una máquina de excitación externa. Si se aumenta la corriente de excitación, el circuito de tensión 410 se desplaza hacia la izquierda. Esto también desplaza el puntero de corriente I_{dq} del punto de operación de corriente B. El ángulo φ_i entre la corriente y el eje d aumenta y el ángulo φ_U entre la tensión y el eje d disminuye.

Variando la corriente de excitación, los punteros de corriente y tensión pueden desplazarse de tal manera que se consiga $\cos(\varphi) = 1$ en el funcionamiento del motor y $\cos(\varphi) = -1$ en el funcionamiento del generador.

A partir de esta conexión, se puede derivar el cambio de la corriente de excitación en función de la posición de fase, es decir, el ángulo de fase, de la corriente y la tensión: Si el ángulo φ_U entre la tensión y el eje d es mayor que el ángulo φ_i , entre la corriente y el eje d , la corriente de excitación aumenta; si es menor, la corriente de excitación disminuye. Según esta relación, se puede desarrollar un controlador que optimice la corriente de excitación en línea.

En la figura 5, se muestra esquemáticamente una secuencia de un procedimiento según la invención en una forma de realización preferida. La desviación de control se determina a partir de la diferencia $\Delta\varphi$ entre el ángulo φ_U entre la tensión y el eje d y el ángulo φ_i , entre la corriente y el eje d y se determina la desviación de control y se convierte en un valor de consigna para la corriente de excitación I_{ex} usando el componente proporcional 501 y el componente integral 502 (con el integrador 503).

Para aumentar la dinámica del control, se puede añadir preferentemente un valor inicial de corriente de excitación $I_{ex,init}$ a la salida del controlador. De esta manera, el controlador solo tiene que compensar una desviación resultante de la temperatura, la dispersión de la máquina y/o los efectos del envejecimiento, por ejemplo. El valor inicial puede medirse, por ejemplo. Para el funcionamiento regenerativo, la desviación de control debe ajustarse en consecuencia por los 180° o debe controlarse a 180° en lugar de 0° .

En la figura 6, se muestra esquemáticamente una secuencia de un procedimiento según la invención en otra realización preferida. En base a un par requerido M_{soll} y al último par determinado M_{ist} , se controla el ángulo de precomutación α .

Junto con la tensión actual U_L , se puede calcular la tensión U_{dq} con el ángulo de precomutación α . Esta se convierte en el patrón de impulsos de bloque necesario en un bloque separado. Esto se convierte en el patrón de pulsos de bloque requerido en un bloque separado y se generan las señales asociadas para la máquina eléctrica, aquí indicadas por $U_{A...E}$, con el fin de operar la máquina eléctrica 100.

Las corrientes de fase $I_{A...E}$ de la máquina eléctrica 100 se miden y se convierten en valores I_{dq} , utilizando las transformadas de Clarke y Park. Estos valores de I_{dq} se utilizan, por un lado, para calcular el par actual y, por otro, junto con los valores de tensión U_{dq} , para determinar la desviación de control o la diferencia $\Delta\varphi$. El valor inicial de la corriente de excitación $I_{ex,init}$, puede leerse en una tabla de consulta en función de la tensión U , el par requerido M_{soll} y la velocidad del rotor n . El valor de la corriente $I_{ex,init}$ se utiliza entonces para calcular la desviación o diferencia de control $\Delta\varphi$. La corriente de excitación final I_{ex} se determina entonces a partir de estos valores según el procedimiento explicado anteriormente. A continuación, la corriente de excitación puede ajustarse, por ejemplo, mediante un proceso PWM utilizando una tensión de excitación correspondiente U_{ex} .

REIVINDICACIONES

- 5 1. Procedimiento para el funcionamiento de una máquina eléctrica de excitación externa (100), en el que una corriente de excitación (I_{ex}) se establece como una variable manipulada en el ámbito de un control de bucle cerrado, caracterizado porque la máquina eléctrica (100) se opera con control de bloque,
- 10 en donde, si la velocidad (n) de la máquina eléctrica está por encima de un límite de velocidad prescribible, la corriente de excitación (I_{ex}) se incrementa si, en el sistema de coordenadas d-q, un ángulo (φ_U) entre una tensión y el eje d es mayor que un ángulo (φ_I) entre una corriente y el eje d o que el ángulo entre la corriente y el eje d desplazado en 180° , y la corriente de excitación (I_{ex}) se reduce cuando, en el sistema de coordenadas d-q, el ángulo (φ_U) entre la tensión y el eje d es menor que el ángulo (φ_I) entre la corriente y el eje d o que el ángulo entre la corriente y el eje d desplazado en 180° .
- 15 2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, en donde una diferencia ($\Delta\varphi$) entre el ángulo (φ_U) entre la tensión y el eje d y el ángulo (φ_I) entre la corriente y el eje d en el sistema de coordenadas d-q se controla a un valor de 0° o 180° utilizando la corriente de excitación (I_{ex}) como variable manipulada.
- 20 3. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 2, en donde la diferencia ($\Delta\varphi$) se controla a 0° en un funcionamiento del motor y a 180° en un funcionamiento del generador.
- 25 4. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, en donde la máquina eléctrica (100) funciona por encima del límite de velocidad con control de bloque y por debajo del límite de velocidad con control PWM.
5. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, en donde la corriente de excitación (I_{ex}) se ajusta como una variable manipulada en el ámbito de un control subordinado, en particular especificando un valor inicial ($I_{ex,init}$).
- 30 6. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, con referencia a la reivindicación 2, en donde el control comprende un componente proporcional y/o integral (501, 502).
7. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, en donde la tensión (U_{dq}) se determina en coordenadas d-q en función de un ángulo de precomutación (α) que debe ajustarse y/o controlarse.
- 35 8. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 7, en donde, a partir de un par (M_{soll}) demandado por la máquina eléctrica (100) y de un último par determinado (M_{ist}), se fija y/o se ajusta el ángulo de precomutación (α).
9. Unidad de cálculo (140) adaptada para realizar un procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores.
- 40 10. Programa informático que hace que una unidad de cálculo (140) realice un procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 8 cuando se ejecuta en la unidad de cálculo (140).
11. Medio de almacenamiento legible por máquina con un programa informático almacenado en él de acuerdo con la reivindicación 10.

Fig. 1

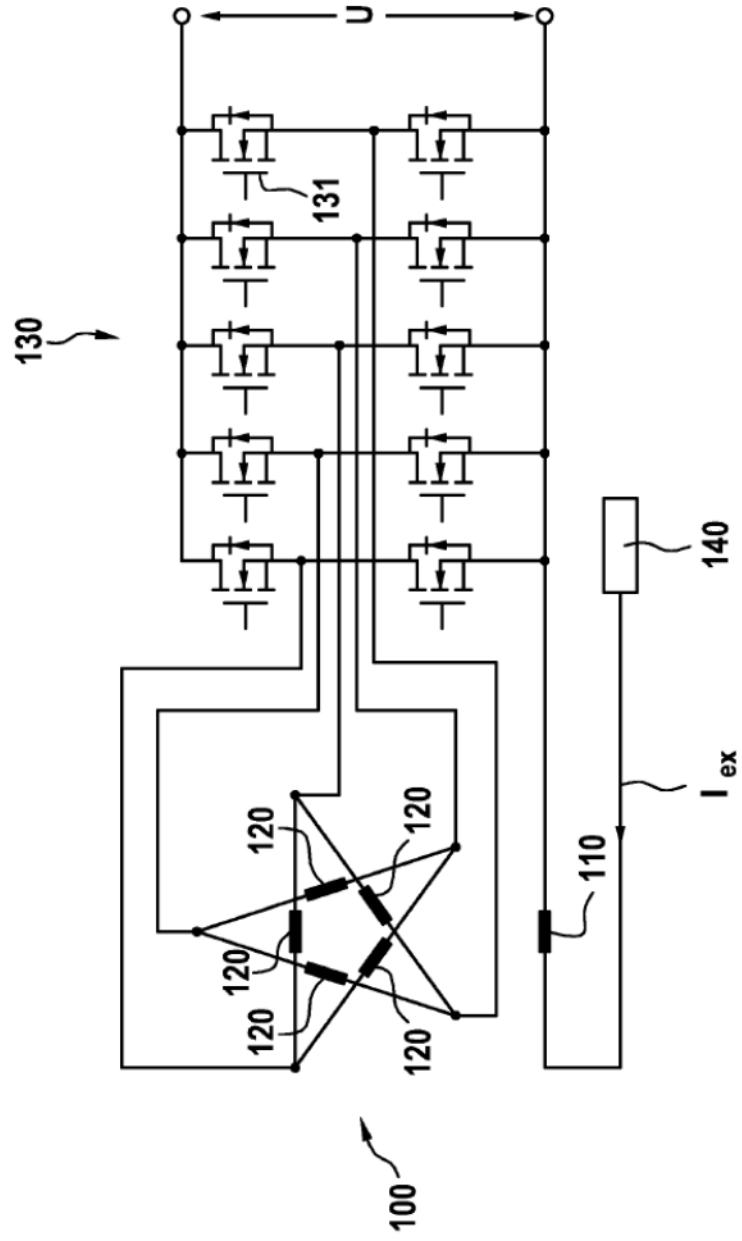


Fig. 2

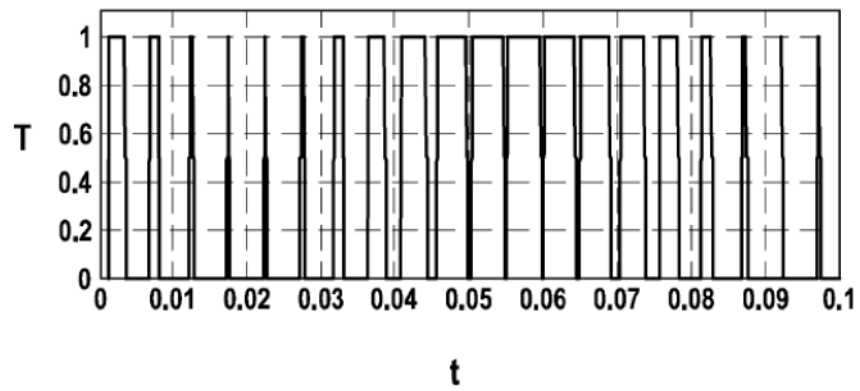
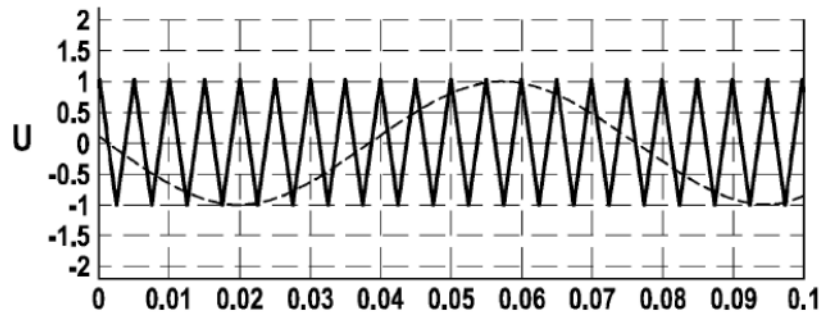


Fig. 3

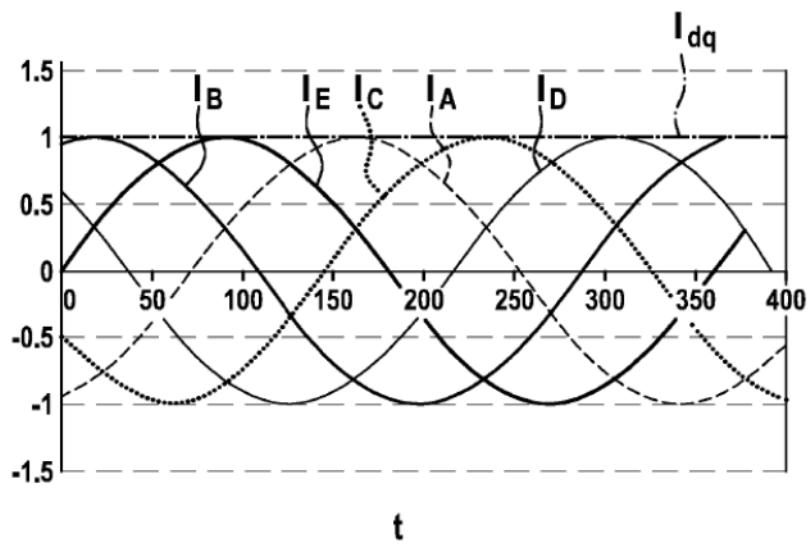


Fig. 4

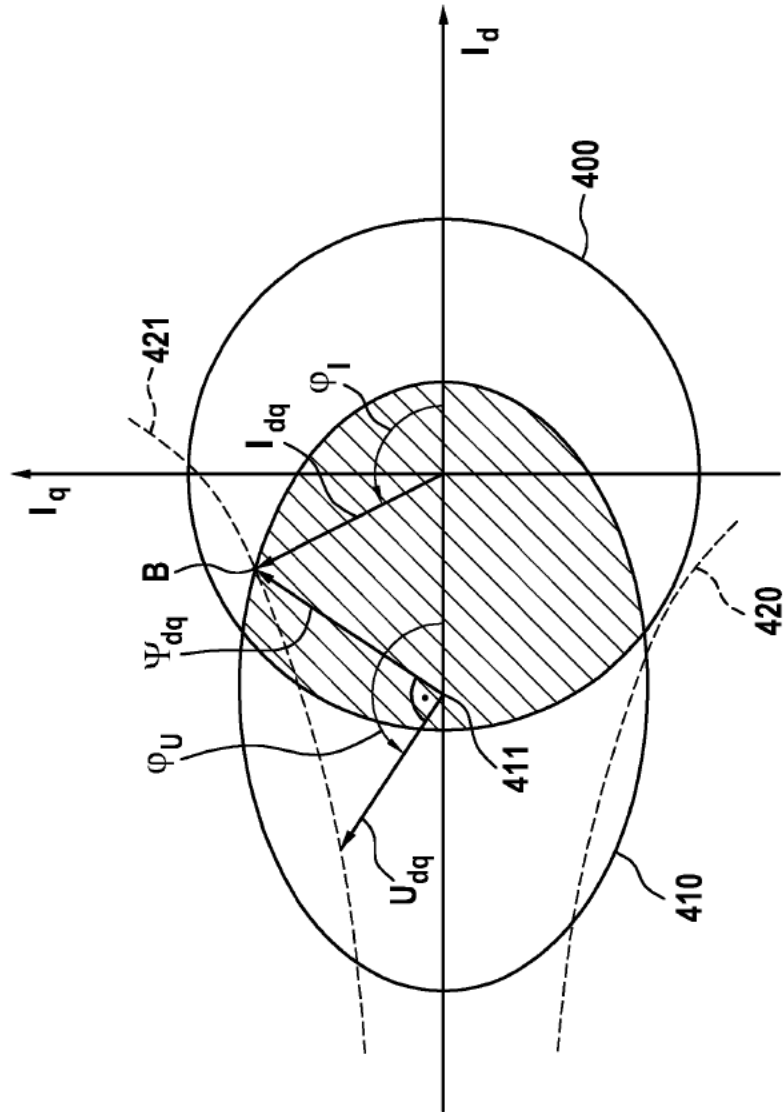


Fig. 5

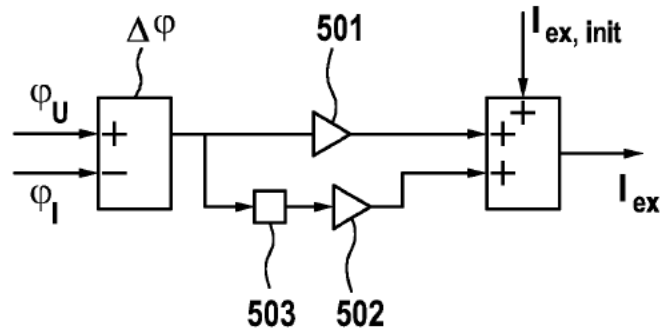


Fig. 6

