



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 314 314**

51 Int. Cl.:

H02P 6/10 (2006.01)

H02P 6/18 (2006.01)

H02P 6/14 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **04011481 .1**

96 Fecha de presentación : **14.05.2004**

97 Número de publicación de la solicitud: **1499008**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **19.01.2005**

54

Título: **Método y sistema de control para la conmutación electrónica de un motor de corriente continua sin escobillas.**

30

Prioridad: **17.07.2003 DE 103 32 381**

45

Fecha de publicación de la mención BOPI:
16.03.2009

45

Fecha de la publicación del folleto de la patente:
16.03.2009

73

Titular/es: **ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG.**
Bachmühle 2
74673 Mulfingen, DE

72

Inventor/es: **Lelkes, Andrés y**
Krotsch, Jens

74

Agente: **Isern Jara, Jorge**

ES 2 314 314 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

Método y sistema de control para la conmutación electrónica de un motor de corriente continua sin escobillas.

5 El presente invento hace referencia a un método para la conmutación de un motor de corriente continua sin escobillas conforme al concepto general de la reivindicación 1, así como al correspondiente sistema de control conforme al concepto general de la reivindicación 14. El presente invento también hace referencia a un motor de corriente continua sin escobillas, provisto del sistema de control mencionado para realizar la conmutación conforme al método del invento.

10 Los motores de corriente continua conmutados electrónicamente con excitación permanente (llamados motores EC, donde EC = electronically commutated) hoy en día poseen multitud de aplicaciones, puesto que en comparación con los motores con conmutadores mecánicos (escobillas), al eliminarse las piezas de desgaste (conmutador, escobillas, anillos colectores), poseen una alta durabilidad sin precisar medidas de mantenimiento especiales. Además, dichos
15 motores de excitación permanente se caracterizan por un alto rendimiento y una elevada densidad de energía. Un ámbito de aplicación importante de dichos motores EC son los ventiladores, donde el funcionamiento poco ruidoso es un tema cada vez más importante. A este respecto, las ejecuciones de motor y los métodos de conmutación conocidos aún son susceptibles de mejora.

20 Se conocen motores EC con diferentes modelos de bobinado. Los motores de uno, dos y tres ramales están ampliamente difundidos. Tanto los modelos de uno como los de dos ramales, en lugar de generar un campo giratorio, generan sólo un campo magnético pulsatorio, por lo que el motor presenta una elevada ondulación del par. A este respecto resulta crítico el arranque de dichos motores, ya que hay posiciones del rotor en las que no se puede generar un par de arranque suficiente. Para poder garantizar un arranque seguro a pesar de ello, dichos motores poseen un paquete de
25 chapa magnética conformado especialmente, el cual constituye con el rotor un entrehierro desigual. De esta manera se genera un par de reluctancia, el cual se encarga de que, una vez desconectado el suministro, el rotor no permanezca en posiciones críticas para el arranque. Sin embargo, el campo pulsatorio y el elevado par de reluctancia (el par de detención o par de empuje) generan oscilaciones más elevadas en el rotor. Por este motivo, en las aplicaciones sensibles a los ruidos, generalmente se toma en consideración un motor EC de tres ramales en lugar de las variantes de uno o
30 dos ramales.

Un motor EC de este tipo suele tener una inducción en el entrehierro aproximadamente trapezoidal. La electrónica de conmutación de un motor de tres ramales consiste en un puente semiconductor con seis elementos de conexión electrónica (transistores). En una conmutación en bloque habitual, éstos se conectan dos a dos de tal modo que se
35 genera un campo magnético giratorio del estator. A partir de ahí se generan seis estados de conmutación posibles que se alternan periódicamente. Las revoluciones del motor pueden controlarse mediante la tensión efectiva del motor. Asimismo se modifica la tensión de suministro, conocida como tensión de circuito intermedio, o bien se sincroniza uno de los dos transistores conductores con modulación de duración de impulsos.

40 En un motor EC, la electrónica de conmutación se controla en función de la posición del rotor (posición del par del rotor). Para ello, por tanto, debe registrarse la posición actual del rotor. A menudo se aplican también elementos sensores por separado, como por ejemplo, sensores de reverberación, que registran el campo magnético del rotor. En un motor de tres ramales, la mayoría de las veces se utilizan tres elementos sensores (especialmente circuitos integrados digitales de reverberación). Si en la ubicación de un elemento sensor se produce una alternancia debido al
45 rotor en giro, cambia el nivel de la señal de salida del sensor. En cada cambio de nivel se conmutan los elementos de conexión del circuito de control. Este tipo de registro de la posición del rotor resulta especialmente desventajoso en el caso de motores con electrónica de conmutación externa. Por un lado, los sensores dispuestos necesariamente dentro del motor lo hacen sensible a la temperatura y, por tanto, propenso a las averías. Por otro lado, el cableado y las conexiones (de enchufe) necesarios de los sensores son una fuente de errores. A parte de la elevada propensión a
50 averías, los costes adicionales también resultan desventajosos: los sensores, sus fijaciones mecánicas, los empalmes de cables con enchufes, etc. conllevan unos costes de fabricación elevados.

Una solución rentable la ofrece un modo de registro de la posición del rotor sin sensores que ya se conoce. "Sin sensores" significa en este caso que no dispone de sensores como componentes separados para registrar directamente las dimensiones mecánicas. Para el registro indirecto de la posición del rotor se utilizan más bien dimensiones
55 mensurables sólo eléctricamente.

De este modo no sólo se suprimen los propios sensores, sino que también sus fijaciones mecánicas y sus líneas de conexión eléctrica. Una ejecución económica muy empleada en aplicaciones de ventiladores utiliza sólo la polaridad de las tensiones de motor o de las tensiones de motor inducidas. Dado que en una conmutación en bloque fuera del proceso de conmutación real sólo se energizan dos ramales de bobinado, en una línea de motor sin corriente se puede registrar directamente la tensión de motor interna inducida por el rotor en el ramal de bobinado correspondiente. Para
60 ello se precisan principalmente circuitos diferenciadores.

65 Las desventajas de la conmutación en bloque conocida son una ondulación del par relativamente elevada y un cambio brusco de corriente en los tiempos de conmutación. Ambas cosas pueden generar inoportunas perturbaciones acústicas.

ES 2 314 314 T3

El documento DE-10.023.370-A1 describe lo que se conoce como conmutación de 12 pasos, donde mediante la introducción de seis pasos de conmutación adicionales puede mejorarse el comportamiento respecto al ruido.

5 Tanto en el caso de la conmutación tradicional de 6 pasos como en el de la mencionada conmutación de 12 pasos, las oscilaciones del par y la aparición de cambios bruscos de corriente durante la conmutación pueden producir efectos acústicos indeseados.

10 El documento EP-1.104.087-A2 describe medidas para el control de un motor de corriente continua, de modo que se especifica una curva de tensión / un recorrido de la corriente senoidal con vacíos. Los motores adecuados para ello deben presentar también una inducción en el entrehierro senoidal, es decir, tensiones de bobinado inducidas que discurren sinusoidalmente, por lo que en comparación con los motores EC habituales, poseen la desventaja de estar infrautilizados. Esto significa que para el mismo par motor se precisa un volumen constructivo superior. Para los motores EC con inducción en el entrehierro básicamente trapezoidal, el recorrido sinusoidal conocido no resulta apropiado. Además, los vacíos de corriente introducidos provocan el aumento de la oscilación del par en comparación con la forma sinusoidal ideal.

Para reducir la ondulación del par, el documento US-6.369.535 propone la determinación de las magnitudes directrices para las corrientes de ramal especificando un valor nominal para el par y la posición de rotor actual.

20 El presente invento tiene por objetivo obtener para el control de motores de corriente continua sin escobillas un método y un sistema de control del tipo descrito al principio, de modo que se consiga un funcionamiento especialmente silencioso, poco ruidoso, con un alto rendimiento, mediante la aplicación de un registro de posición del rotor sólido, es decir, no propenso a las averías, a la vez que económico, sin sensores de posición del rotor separados.

25 De conformidad con el invento también se prevé con el método conforme a la reivindicación 1 o con el sistema de control concebido para dicho método conforme a la reivindicación 14, que las corrientes de bobinado se especifiquen con un recorrido nominal determinado, dependiente del recorrido de las fuerzas electromotrices síncronas inducidas en los ramales de bobinado, de modo que generen un par de motor preestablecido por encima del giro del rotor, que transcurran por encima del giro del motor de forma continua sin saltos abruptos ni vacíos de corriente para el registro de la posición del rotor sin sensores.

30 Por lo tanto, de conformidad con el invento se controla tanto el motor como sus ramales de bobinado con las corrientes de bobinado producidas (generadas) especialmente en lo que respecta a su recorrido temporal, de modo que la forma del recorrido se selecciona y se establece de modo que origine un par determinado, preferentemente uniforme (constante). Mediante los vacíos de corriente generados es posible preferentemente un registro de la posición del rotor sin sensores mediante la valoración de las fuerzas electromotrices síncronas inducidas, mientras que éstas pueden registrarse en el ramal de bobinado que no se encuentre direccionado en este momento. Además, se evitan desventajosos saltos de corriente o determinados impulsos de desconexión puramente inductivos debido a una conmutación de corriente lenta o ralentizada. Eso significa que cada vez que se pasa a un vacío de corriente, la corriente no se desconecta fácilmente, si no que conforme al invento, tras un funcionamiento determinado, se ralentiza hasta reducirse a cero. Al evitar los cambios bruscos de corriente, prácticamente se eliminan los habituales ruidos de conmutación, o por lo menos se reducen considerablemente.

35 Para especificar las corrientes de bobinado puede aplicarse fundamentalmente el método adecuado que se desee. Así pues, puede emplearse ventajosamente un regulador de corriente, en el cual se especifica como valor nominal la forma de corriente determinada y, a continuación, se ajustan los valores reales de las corrientes en función de los valores nominales. Existe también la alternativa (sin medición de corriente) de fijar la curva de tensión necesaria para alcanzar un recorrido de corriente preestablecido y, por ejemplo, almacenarlo en una memoria. También es posible realizar un cálculo dinámico (en línea) de la curva de tensión necesaria durante el funcionamiento si, por ejemplo, se establece un modelo matemático del motor en la unidad de control. En función de la "curva de tensión de referencia" predeterminada, a continuación se determina la tensión del estator del motor, especialmente mediante modulación de duración de impulsos (PWM).

40 Conforme a la reivindicación 1, la anchura o la correspondiente duración temporal de los vacíos de corriente ajustada al estado de funcionamiento en cuestión (especialmente la aceleración o el funcionamiento estacionario con revoluciones uniformes (constantes)) varía para maximizar aún más el rendimiento. En caso de una aceleración relativamente alta, se prevé un vacío de corriente aún mayor, para poder garantizar el registro y la valoración segura de la fuerza electromotriz síncrona a pesar de posibles errores de interpolación. En ese caso se cuenta con una reducción del rendimiento en lo que respecta a un mejor comportamiento dinámico del motor. En el funcionamiento estacionario con revoluciones uniformes, el vacío de corriente, por el contrario, se reduce a una anchura o longitud inferior, pero suficiente para el registro de la posición del rotor, siendo el resultado un mayor rendimiento.

45 Cabe mencionar que el presente invento también incluye un motor de corriente continua sin escobillas, el cual mediante la aplicación del método conforme al invento está provisto de un sistema de control de conformidad con éste.

Otras características de acondicionamiento ventajosas del invento aparecen en las reivindicaciones adjuntas y en la siguiente descripción. Los dibujos detallan mediante ejemplos el presente invento. Se muestra lo siguiente:

ES 2 314 314 T3

La figura 1 muestra un esquema de conexiones de un sistema de control conforme al presente invento en una forma de ejecución para la conmutación de un motor de tres ramales;

5 Las figuras 2 y 3 muestran un diagrama que presenta el estado de la técnica, concretamente, la figura 2 muestra el par calculado y la figura 3 muestra la corriente de bobinado en una fase (un ramal de bobinado) de un motor EC de tres ramales de conmutación por bloque convencional;

10 La figura 4 muestra un diagrama con formas de corriente conforme al invento con vacíos de corriente, conmutación más lenta (aquí lineal) y par constante;

15 La figura 5 muestra otro diagrama con formas de corriente conforme al invento como en la figura 4, pero en este caso con una conmutación más suave, conforme a una "curva S";

20 Las figuras 6 a 10 muestran algunos diagramas de formas de corriente a modo de ejemplo (sólo para un ramal de bobinado de un motor EC de tres ramales) para un par constante m con conmutación de corriente lenta para diversos vacíos de corriente de diferente anchura con las correspondientes pérdidas de cobre relativas P_{Cu}/P_{Cu0} del motor.

25 En la figura 1 se muestra esquemáticamente a modo de ejemplo un motor de corriente continua 1 sin colector con tres ramales, con su estator 2 y un rotor magnético-permanente 4. El estator 2 presenta tres ramales de bobinado a, b y c, que en el ejemplo se muestran en conexión en estrella. Los ramales de bobinado a, b y c se controlan para el accionamiento de giro del rotor 4 desde un circuito de control 6 para generar un campo magnético del estator en función de la posición del rotor (posición del par) con las corrientes de bobinado i_a , i_b , i_c . Para ello, el circuito de control 6 presenta una conexión de puente 8 con elementos de conexión electrónicos T1 a T6, así como una unidad de mando 10 que los controla. Como elementos de conexión se emplean preferentemente semiconductores de potencia (transistores) adecuados, y la unidad de mando 10 pueden estar formada ventajosamente por un microcontrolador μC . En la ejecución representada para un motor de tres ramales, la conexión de puente 8 como puente integral consta de seis elementos de conexión electrónica T1 a T6. La conexión de puente 8 se carga por el lado de la entrada a través de un circuito intermedio de tensión continua U_{DC} y está unida por el lado de la salida a través de tres líneas de alimentación de bobinado A, B, C con los tres ramales de bobinado a, b, y c del motor 1. Los elementos de conexión T1 a T6 se controlan a través de la unidad de mando 10 mediante las señales de mando de G_1 a G_6 . Esto es lo que se conoce a este respecto.

30 Conectado a las salidas de la conexión de puente 8 que conducen las tensiones de bobinado del motor, se encuentra un filtro 12 para el registro de la posición del rotor sin sensores, el cual debe atenuar la frecuencia de conmutación debida a la modulación de duración de impulsos. Las tensiones que se filtran aquí se conducen por un lado directamente a un diferenciador K1, K2, K3 y, por el otro lado, a un dispositivo 14 para la reproducción del punto neutro del motor, el cual genera una tensión de referencia u_{ref} que también se conduce a los diferenciadores K1, K2, K3. Las tensiones de salida filtradas u'_a , u'_b y u'_c se comparan con la tensión de referencia u_{ref} mediante los diferenciadores K1 a K3, que suministran aquí señales de salida digitales P_a , P_b , P_c , las cuales indican la polaridad de las tensiones inducidas en los ramales de bobinado del motor. Dichas señales se llevan a la unidad de mando 10. La unidad de mando 10 puede presentar una entrada de señal de ajuste SS y una salida de señal de realimentación RM.

35 Además, en la ejecución representada y preferente se prevé un ajuste de corriente. Para ello se miden por lo menos dos de las tres corrientes de motor, en este caso i_a e i_b , y se conducen a través del amplificador 16 y 18 como valor real $i_{a\ ist}$ e $i_{b\ ist}$ de la unidad de mando 10. En la unidad de mando 10 hay integrado un regulador de corriente, el cual puede depositarse como algoritmo digital, por ejemplo. Este regulador de corriente compara los valores reales de corriente con los recorridos de los valores nominales de corriente $i_{a\ Soll}$, $i_{b\ Soll}$ almacenados, predeterminados conforme al invento. Para ajustar los valores reales a los nominales, gracias al correspondiente control de los elementos de conexión de la conexión en puente 8 es posible modificar ventajosamente la tensión en las conexiones de los ramales de bobinado del motor a, b y c a través de una modulación de duración de impulsos (PWM) adecuada, de tal modo que los valores nominales y los reales coincidan lo mejor posible. El registro de la posición del rotor se produce de un modo de por sí conocido, con la valoración de los ramales de bobinado del motor a, b y c a partir de la valoración de las tensiones (señales P_a , P_b , P_c) inducidas del rotor magnético-permanente 4 en rotación.

40 El presente invento hace referencia especialmente al modo en que discurren las corrientes para, por un lado, posibilitar el registro de la posición del rotor sin sensores y, por otro lado, cumplir también con los otros objetivos planteados de escasez de ruidos y alto rendimiento. Esto debe detallarse con mayor precisión a continuación: para ello es preciso recurrir a los diagramas de las figuras 2 y 3. En éstos se puede apreciar que en la aplicación de una conmutación en bloque convencional se genera una elevada ondulación del par (figura 2) y en los tiempos de conmutación aparecen cambios bruscos de corriente (véanse los impulsos de desconexión AF y también los impulsos de conexión GF en la figura 3). Ambos efectos producen ruidos desfavorables.

45 En el ajuste de corriente previsto preferente conforme al presente invento debe tenerse en cuenta que las corrientes se prevén de tal modo que alternan fases de tiempo, en las cuales se energizan los tres ramales, o bien tan sólo dos ramales de bobinado. Asimismo, en principio no tiene importancia si el motor 1 se conecta en estrella (tal como se muestra) o en triángulo. Para simplificar, los siguientes comentarios se refieren a la conexión en estrella representada en la figura 1, aunque el método conforme al invento también se puede aplicar de forma análoga en motores con conexión en triángulo.

ES 2 314 314 T3

En las fases en las que se da energía a dos ramales de bobinado o líneas de motor, fluye en dichas líneas una corriente de la misma amplitud pero diferente polaridad. Por tanto, el tramo de regulación contiene únicamente un grado de libertad. El regulador regula este único valor de corriente especificando la tensión del motor, lo cual puede llevarse a cabo mediante el método de modulación adecuado.

5 En las fases en las que se da energía a los tres ramales de bobinado o líneas de motor, el total de todas las corrientes de motor debe ser cero, puesto que no se ejecuta el punto neutro. Por tanto, el tramo de regulación contiene dos grados de libertad. Si se regulan también dos corrientes de motor, la tercera corriente se genera automáticamente. Para alcanzar una buena calidad de ajuste, resulta pertinente tener en cuenta el desacoplamiento de las fases, tal como es habitual en los accionamientos de corriente trifásica regulados por corriente.

15 Si se conoce la tensión interna del motor, denominada fuerza electromotriz síncrona u_p , por ejemplo, si puede determinarse midiendo los motores existentes o mediante un cálculo de campo numérico, es posible calcular el par a partir de las corrientes del motor. La potencia mecánica suministrada actual P_2 del motor, obviando la fricción y el par de reluctancia (par de detención m_r), se deduce de la ecuación siguiente:

$$P_2 = u_{pa} \cdot i_a + u_{pb} \cdot i_b + u_{pc} \cdot i_c \quad (1)$$

20 El registro de la posición del motor no es tan sólo necesario para determinar los tiempos de conmutación, sino que permite también el registro de las revoluciones. Si se conocen las revoluciones o la velocidad angular ω , también puede calcularse el par m .

$$m = P_2 / \omega \quad (2)$$

25 Tomando en consideración también el par de reluctancia o el par de detención $m_R(\alpha)$, el par m se deduce a partir de la siguiente ecuación:

$$m = P_2 / \omega + m_R(\alpha) = (u_{pa} \cdot i_a + u_{pb} \cdot i_b + u_{pc} \cdot i_c) / \omega + m_R(\alpha) \quad (3)$$

30 La posición del rotor se determina a partir del registro de la fuerza electromotriz síncrona. Para ello se analiza la tensión en la línea del motor que aún no ha sido energizada. En el caso más simple sólo se registra la polaridad de esta tensión, o bien sus pasajes por cero. Con ello se generan seis impulsos por cada giro eléctrico. Debido a que existen multitud de aplicaciones con grandes momentos de inercia relativos, como ocurre con frecuencia en aplicaciones de ventiladores, las revoluciones sólo pueden modificarse de forma relativamente lenta, con lo cual puede deducirse que la posición del rotor a entre dos impulsos con interpolación puede determinarse con suficiente exactitud. Si en el control se almacenan los valores de la fuerza electromotriz síncrona $u_{pa}(\alpha)$, $u_{pb}(\alpha)$ y $u_{pc}(\alpha)$ y se miden las corrientes del motor $i_a(t)$, $i_b(t)$ e $i_c(t)$, la unidad de mando 10 "en línea" puede calcular en cualquier momento el par m actual o las corrientes necesarias para un par determinado. Los mismos cálculos pueden efectuarse también "fuera de línea", es decir, los recorridos de la corriente necesarios para un recorrido del par se calculan previamente y, por ejemplo, se almacenan en forma de tabla en la unidad de mando.

45 De conformidad con el invento, las corrientes de motor se indican de tal modo que el par m calculado permanece uniforme, preferentemente constante. En las fases en las que sólo dos líneas (p. ej., a y b) conducen corriente, se aplican las siguientes ecuaciones:

$$i_a(t) + i_b(t) = 0 \quad (4)$$

$$50 [u_{pa}(\alpha) \cdot i_a(t) + u_{pb}(\alpha) \cdot i_b(t)] / \omega + m_R(\alpha) = m_{Soll} = \text{const.} \quad (5)$$

55 A partir de dichas ecuaciones se calculan las corrientes de motor deseadas (fuera de línea o en el ajuste en línea). Asimismo, en algunos casos puede obviarse el par de reluctancia, de modo que los cálculos se simplifican considerablemente.

En las fases temporales en las que las tres líneas de motor se energizan, se aplican las siguientes ecuaciones:

$$60 i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) = 0 \quad (6)$$

$$[u_{pa}(\alpha) \cdot i_a(t) + u_{pb}(\alpha) \cdot i_b(t) + u_{pc}(\alpha) \cdot i_c(t)] / \omega + m_R(\alpha) = m_{Soll} = \text{const.} \quad (7)$$

65 En este caso, las tres corrientes de motor sólo deben cumplir dos ecuaciones. Por eso es posible una condición adicional, según la cual habitualmente la energía disipada, mejor dicho, la pérdida en cobre P_{cu} , debe minimizarse (según la relación $P=I^2 \cdot R$, donde R es la resistencia de bobinado):

ES 2 314 314 T3

$$P_{Cu} = R \cdot [i_a^2(t) + i_b^2(t) + i_c^2(t)] = \min. \quad (8)$$

5 Para el presente invento es importante entonces saber que, en lugar de ello, se emplea el tercer grado de libertad para reducir la velocidad del cambio de corriente durante la conmutación. De este modo empeora el rendimiento, pero las perturbaciones acústicas se ven considerablemente reducidas y los ruidos de conmutación perturbadores desaparecen.

En el caso más sencillo (véase para ello la figura 4), la corriente de desconexión, es decir, la corriente de aquella línea de motor que en la siguiente fase temporal debe permanecer sin corriente, desciende linealmente:

$$10 \quad i_a(t) = i_a(t_1) \cdot (t_2 - t) / (t_2 - t_1), \quad \text{cuando } t_1 < t < t_2, \quad (9)$$

15 de modo que t_1 es el momento en el que se inicia la fase temporal con tres líneas de motor energizadas, y t_2 es el momento en el que empieza la siguiente fase temporal con dos líneas energizadas. Para ello, la figura 4 muestra, junto al recorrido de las fuerzas electromotrices síncronas y del par, las formas de corriente deseadas, resultantes de las ecuaciones (en un motor regulado por corriente, los valores nominales de corriente), cuando las longitudes de todas las fases temporales coinciden de forma uniforme, p. ej., 30° de giro eléctrico.

20 Como alternativa puede fijarse la forma de corriente para evitar los cambios bruscos di/dt conforme a la figura 3 en lugar de con un desarrollo lineal, también con otra función temporal. Conforme a la figura 5, puede tratarse de una curva en forma de S, por ejemplo, según una función de coseno:

$$25 \quad i_a(t) = i_a(t_1) \cdot [1 + \cos(\Pi \cdot (t - t_1) / (t_2 - t_1))] / 2, \quad \text{cuando } t_1 < t < t_2, \quad (10)$$

En el caso de una realización en línea, puede calcularse una curva de este tipo o similar (p. ej., un polinomio adecuado) de forma consecutiva. Por el contrario, en caso de una ejecución fuera de línea, el recorrido podría almacenarse, por ejemplo, normalizado en forma de una tabla, en la unidad de mando.

30 En la figura 5 pueden apreciarse los recorridos de la corriente conforme a la función de coseno. Los vacíos de corriente en el recorrido de la corriente en el ámbito del pasaje por cero de la fuerza electromotriz síncrona permiten un registro de la posición del motor económico y sólido. Debido a los vacíos de corriente, no es posible utilizar el área máxima posible para la generación de par. Para el mismo par de motor se precisa una corriente de bobinado efectiva superior. A través de los vacíos aumentan las pérdidas en cobre en el motor respecto al funcionamiento sin vacíos de corriente. Con la anchura creciente (longitud temporal) empeora el rendimiento del motor.

35 Mediante el mencionado registro de la posición del rotor mediante la detección de los pasajes por cero de la fuerza electromotriz síncrona, para cada giro eléctrico del motor en intervalos de 60° el. se registran seis informaciones sobre la posición del rotor en este momento. Entre los pasajes por cero debe interpolarse el ángulo de giro. Para ello se determinan las revoluciones del motor mediante el control cronométrico entre los pasajes por cero. Si el motor se acelera, entonces sí que se modifican las revoluciones entre dos pasajes por cero. Para la interpolación se empleará en realidad un valor de revoluciones demasiado pequeño, con lo cual el vacío de corriente se inserta en un momento demasiado tardío respecto al pasaje por cero de la fuerza electromotriz síncrona. De este modo, en el peor de los casos, el pasaje por cero podría aparecer cuando el ramal de bobinado aún no está sin corriente. Esto podría producir una pérdida de la información de la posición del rotor. Este estado debería evitarse, ya que imposibilitaría un funcionamiento óptimo del motor. Por este motivo, el vacío de corriente no puede seleccionarse todo lo pequeño que se desee, tal como sería necesario para alcanzar un alto rendimiento. La consecuencia de ello sería en realidad un rendimiento peor que en el caso del funcionamiento con sensores de posición de rotor.

40 En un acondicionamiento preferente del invento, esta desventaja se soluciona modificando la anchura o la longitud temporal de los vacíos de corriente en función del estado de funcionamiento del motor en ese momento. En caso de una velocidad relativamente elevada, se introduce un vacío de corriente más grande para garantizar una detección segura de los pasajes por cero a pesar del error de interpolación. En ese caso se tiene en cuenta una reducción del rendimiento en lo que respecta a un mejor comportamiento dinámico del motor. En funcionamiento estacionario, es decir, con unas revoluciones uniformes o constantes, el vacío de corriente, por el contrario, se reduce a una anchura inferior, pero suficiente para el registro de posición, de modo que se optimiza el rendimiento. También aquí para alcanzar un funcionamiento del motor suave se especifica el recorrido de la corriente de modo que conduzca a un par de motor uniforme y que a la vez no presente cambios bruscos de corriente.

45 La forma de corriente puede calcularse para la anchura de vacíos de corriente deseada, por ejemplo, bajo las siguientes condiciones.

En las zonas con vacíos de corriente, la corriente puede deducirse de las siguientes ecuaciones:

$$50 \quad i_a(\alpha) + i_b(\alpha) + i_c(\alpha) = 0 \quad (11)$$

ES 2 314 314 T3

$$[u_{pa}(\alpha) \cdot i_a(\alpha) + u_{pb}(\alpha) \cdot i_b(\alpha) + u_{pc}(\alpha) \cdot i_c(\alpha)]/\omega + m_R(\alpha) = m_{Soll} = \text{const.}, \quad (12)$$

donde $i_a(\alpha) = 0$, $i_b(\alpha) = 0$ o bien $i_c(\alpha) = 0$.

5 En las zonas en las que todos los ramales de bobinado del motor están bajo corriente, el cálculo de las corrientes nominales debe realizarse mediante:

$$i_a(\alpha) + i_b(\alpha) + i_c(\alpha) = 0 \quad (13)$$

10

$$[u_{pa}(\alpha) \cdot i_a(\alpha) + u_{pb}(\alpha) \cdot i_b(\alpha) + u_{pc}(\alpha) \cdot i_c(\alpha)]/\omega + m_R(\alpha) = m_{Soll} = \text{const} \quad (14)$$

15

$$|di_{a,b,c}/d\alpha| < \lambda \quad (15)$$

$$|d^2i_{a,b,c}/d\alpha^2| < \Lambda \quad (16)$$

20

$$P_{Cu} = R [i_a(\alpha)^2 + i_b(\alpha)^2 + i_c(\alpha)^2] = \min \quad (17)$$

25 Para conseguir con ello una conmutación suave, preferentemente se delimita la velocidad de subida de corriente y la modificación de la velocidad de subida de corriente (“empuje”). Se trata, por tanto de la primera y la segunda derivación de la corriente según el tiempo o según el ángulo de giro. Para la velocidad de subida de corriente se fija el límite λ , y para su modificación, el límite Λ .

30 Los sistemas de ecuaciones indicados para las áreas de corriente con y sin vacíos de corriente pueden solucionarse fuera de línea o en línea mediante el método numérico habitual para determinar los recorridos de corriente nominal. En el método fuera de línea, los recorridos se almacenan como función del ángulo de giro y la anchura de los vacíos de corriente en el ajuste o en la unidad de mando 10. En el método en línea, la solución se calcula de nuevo de forma consecutiva durante la ejecución del ajuste.

35 Las figuras 6 a 10 ilustran de modo ejemplar los recorridos de corriente calculados de este modo para vacíos de corriente de diferentes anchuras teniendo en cuenta la pérdida en cobre del motor relacionada con el recorrido óptimo sin vacíos de corriente (figura 6). Para simplificar, en este caso se obvia el par de reluctancia del motor. El vacío de corriente se amplía entonces de forma preferente cuando el motor se acelera, es decir, cuando el pasaje por cero de la fuerza electromotriz síncrona aparece en un momento anterior respecto al ángulo interpolado. Para ello se conduce hasta el regulador de corriente un recorrido de valor nominal de corriente, por ejemplo, conforme a la figura 9 o 10, con un vacío de corriente más ancho antes del pasaje por cero de la fuerza electromotriz síncrona. Esto sucede, por ejemplo, en el caso de una subida del valor nominal del par (amplitud del valor nominal de corriente) que en un par de la carga constante conlleva una aceleración del motor. Si se superpone un regulador de revoluciones, el vacío de corriente de un valor nominal de las revoluciones en ascenso aumentará. Sin embargo, el vacío de corriente también aumentará cuando el pasaje por cero de la fuerza electromotriz síncrona no aparezca dentro de una zona predefinida, referida a un ángulo de giro interpolado. Esto puede darse cuando en el mismo valor nominal del par deba darse una aceleración del motor como consecuencia de un par de carga decreciente. Entonces el vacío de corriente se reduce adecuadamente cuando la aceleración del ángulo del motor es pequeña, o cuando trabaja con revoluciones uniformes (estacionarias). Para ello se conduce hasta el regulador de corriente un recorrido de valor nominal de corriente, por ejemplo, conforme a la figura 7 u 8, con un vacío de corriente relativamente más pequeño antes del pasaje por cero de la fuerza electromotriz síncrona. La aceleración del ángulo puede determinarse a través de la modificación temporal de las revoluciones del motor, que ya se conocen por la interpolación del ángulo. Otra posibilidad ventajosa es la comparación del ángulo de giro interpolado con el ángulo de giro real del motor en el momento del pasaje por cero de la fuerza electromotriz síncrona. En caso de una pequeña divergencia (un pequeño error de interpolación), la aceleración del ángulo es reducida e inversa.

55 Si las revoluciones del motor se reducen, entonces aparece el pasaje por cero de la fuerza electromotriz síncrona en un momento posterior respecto al ángulo interpolado. La nueva energización conforme al vacío de corriente se realiza entonces preferentemente sólo cuando el pasaje por cero de la fuerza electromotriz síncrona se reconoce, para evitar una pérdida de la información de la posición del rotor.

60 El método conforme al invento descrito permite un funcionamiento del motor poco ruidoso a la vez que un alto rendimiento, así como un registro de la posición del rotor sin sensores que resulta rentable mediante el registro y la valoración de la fuerza electromotriz síncrona del motor. En un caso de funcionamiento de revoluciones estacionarias puede alcanzarse un rendimiento del motor comparable al de un funcionamiento mediante sensores de la posición del rotor. Esto resulta especialmente ventajoso en aplicaciones en las cuales las revoluciones del motor no se modifican a menudo, como por ejemplo, en el caso de ventiladores y bombas.

ES 2 314 314 T3

Con las formas de corriente anteriormente descritas se alcanzan los objetivos planteados. Como el par calculado se fija especialmente constante, puede alcanzarse un par real con sólo oscilaciones mínimas. La conmutación se realiza de un modo extraordinariamente suave, por lo que prácticamente desaparecen los ruidos de conmutación. Además, la corriente presenta vacíos de corriente que permiten una valoración sencilla de la fuerza electromotriz síncrona y, con ello, un registro de la posición del rotor sin sensores económico y fiable.

El presente invento no se limita a los ejemplos de ejecución presentados y descritos (motor de tres ramales, conexión en estrella, forma de magnetización, etc.), sino que también abarca todas las ejecuciones de efectos similares al sentido del invento. Así pues, el motor también puede presentar otro número de ramales y/o una conexión en triángulo. Asimismo cabe mencionar de nuevo que el presente invento no se limita a la aplicación de un regulador de corriente, sino que la forma de corriente deseada también puede alcanzarse sin medición de corriente, mediante una modulación de la tensión adecuada.

Por lo demás, el invento tampoco se encuentra limitado a la combinación de características que contienen las reivindicaciones subordinadas, sino que también puede definirse mediante cualquier otra combinación deseada de características individuales de entre todas las características divulgadas. En este sentido, las reivindicaciones deberán entenderse únicamente como un primer intento de formulación del presente invento.

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

REIVINDICACIONES

1. Método para la conmutación electrónica de un motor de corriente continua sin escobillas (1) con un rotor magnético-permanente (4) y un estator (2) con varios ramales de bobinado desplazados eléctricamente (a, b, c), de modo que los ramales de bobinado (a, b, c) se controlan para generar un campo magnético del estator para el accionamiento de giro del rotor (4) en función de la posición del rotor con corrientes de bobinado (i_a , i_b , i_c), siendo la posición del rotor registrable sin sensores mediante la valoración de una fuerza electromotriz síncrona (u_p) inducida desde el rotor (4) a los ramales de bobinado (a, b, c) por una línea de alimentación de bobinado (A, B, C) que no se halla bajo tensión, y donde las corrientes de bobinado (i_a , i_b , i_c) se predefinen mediante un recorrido nominal determinado, dependiente del recorrido de la fuerza electromotriz síncrona inducida (u_{pa} , u_{pb} , u_{pc}) en los ramales de bobinado (a, b, c) de tal modo que se genera un par de motor (m_{soll}) preestablecido por encima del giro del rotor, y aparece por encima del giro del motor de forma continua sin saltos abruptos debidos a la conexión ni vacíos de corriente para el registro de la posición del rotor sin sensores, **caracterizado** por el hecho de que los vacíos de corriente respecto a su duración temporal en función de cada estado de funcionamiento se modifican automáticamente de modo que se consigue minimizar la pérdida en los ramales de bobinado (a, b, c), por lo que al darse una aceleración del rotor determinada, relativamente grande, el vacío de corriente se amplía de tal modo que permite en cualquier caso un registro seguro de la posición del rotor mediante la valoración de la fuerza electromotriz síncrona inducida, mientras que en caso de una aceleración relativamente pequeña, o bien en un funcionamiento estacionario o de revoluciones constantes para aumentar el rendimiento, el vacío de corriente se reduce a una longitud más pequeña, pero aún así suficiente para el registro de la posición del rotor.

2. Método conforme al concepto general de la reivindicación 1, que se **caracteriza** por el hecho de que los vacíos de corriente, en lo que respecta a la duración temporal, se modifican automáticamente en función del correspondiente estado de funcionamiento, de tal modo que se consigue minimizar la pérdida en los ramales de bobinado (a, b, c), de modo que las corrientes de bobinado (i_a , i_b , i_c) en las transiciones se ven delimitadas respecto al tiempo por lo menos en su primera y segunda derivación.

3. Método conforme al concepto general de la reivindicación 1, que se **caracteriza** por el hecho de que los vacíos de corriente, en lo que respecta a la duración temporal, se modifican automáticamente en función del correspondiente estado de funcionamiento, de tal modo que se consigue minimizar la pérdida en los ramales de bobinado (a, b, c), de forma que las corrientes de bobinado (i_a , i_b , i_c) en las transiciones se ven delimitadas por lo menos en su primera y segunda derivación respecto al ángulo de giro (α).

4. Método conforme a una de las reivindicaciones 1 a 3, **caracterizado** por el hecho de que las corrientes de bobinado (i_a , i_b , i_c) se especifican de tal modo que generan un par (m_{soll}) uniforme, prácticamente constante por encima del giro del rotor.

5. Método conforme a una de las reivindicaciones 1 a 4, **caracterizado** por el hecho de que las corrientes de bobinado (i_a , i_b , i_c) se especifican de tal modo que, por encima del giro del motor, por un lado, las zonas del ángulo de giro en las cuales todos los ramales de bobinado (a, b, c) están bajo corriente, y las zonas del ángulo de giro en las cuales por lo menos uno de los ramales de bobinado (a, b, c) no está bajo tensión debido a un vacío de corriente, se alternan.

6. Método conforme a la reivindicación 5, **caracterizado** por el hecho de que las corrientes de bobinado (i_a , i_b , i_c) se especifican de tal modo que en la transición entre zonas del ángulo de giro, mediante una conmutación de corriente retardada lenta, en comparación con una conmutación simple, se obtiene un recorrido de la corriente de bobinado sin saltos.

7. Método conforme a las reivindicaciones 5 o 6, que se **caracteriza** por el hecho de que las corrientes de bobinado (i_a , i_b , i_c) en el paso de una zona de ángulo de giro bajo corriente a una zona de ángulo de giro con vacío de corriente con recorrido lineal se encuentran predeterminadas conforme a una función lineal determinada.

8. Método conforme a las reivindicaciones 5 o 6, que se **caracteriza** por el hecho de que las corrientes de bobinado (i_a , i_b , i_c) en el paso de una zona de ángulo de giro bajo corriente a una zona de ángulo de giro con vacío de corriente con una forma de curva determinada, concretamente, como curva S, por ejemplo, se encuentran predeterminadas conforme a una función de coseno.

9. Método conforme a una de las reivindicaciones 1 a 8, que se **caracteriza** por el hecho de que en cada zona del ángulo de giro sin vacío de corriente, las corrientes de bobinado (i_a , i_b , i_c) se predeterminan considerando su valor efectivo conforme a la ecuación $i_a^2(\alpha) + i_b^2(\alpha) + i_c^2(\alpha) = \min$, de modo que se minimizan las pérdidas de bobinado.

10. Método conforme a una de las reivindicaciones 1 a 9, **caracterizado** por el hecho de que las corrientes de bobinado (i_a , i_b , i_c) se predeterminan mediante la aplicación de un regulador de corriente, donde los valores reales de corriente ($i_{a\ ist}$, $i_{b\ ist}$) se comparan con el recorrido nominal predeterminado y en función de dicha comparación, los ramales de bobinado (a, b, c) se controlan con una tensión con modulación de duración de impulsos especial, de forma que las corrientes de bobinado y sus valores reales coinciden por lo menos aproximadamente con el recorrido nominal.

ES 2 314 314 T3

11. Método conforme a una de las reivindicaciones 1 a 9, **caracterizado** por el hecho de que las corrientes de bobinado (i_a , i_b , i_c) sin medición de corriente se predeterminan solas indirectamente mediante la especificación de un recorrido de tensión preestablecido, necesario para alcanzar el recorrido de corriente deseado.
- 5 12. Método conforme a la reivindicación 10 o 11, **caracterizado** por el hecho de que el recorrido preestablecido de las corrientes de bobinado o el recorrido de tensión preestablecido se almacena en una memoria y/o se calcula durante el funcionamiento.
- 10 13. Método conforme a una de las reivindicaciones 1 a 12, **caracterizado** por el hecho de que el recorrido de las corrientes de bobinado (i_a , i_b , i_c) también se predetermina en función de un par de detención (m_R (α)) del motor.
14. Sistema de control para la conmutación electrónica de un motor de corriente continua sin escobillas (1) con un rotor magnético-permanente (4) y un estator (2) con varios ramales de bobinado desplazados eléctricamente (a, b, c), de modo que éstos se controlan para generar un campo magnético del estator para el accionamiento de giro del rotor (4) de un circuito de control (6) en función de la posición del rotor con corrientes de bobinado (i_a , i_b , i_c), estando el circuito de control (6) compuesto por varios elementos de conexión (T1 a T6) dispuestos eléctricamente en una conexión de puente (8) y una unidad de mando (10) que los controla, presentando a su vez un medio para el registro de la posición del rotor sin sensores mediante la valoración de una fuerza electromotriz síncrona inducida desde el rotor a los ramales de bobinado (a, b, c) por una línea de alimentación de bobinado que no se halla bajo tensión, y donde las corrientes de bobinado (i_a , i_b , i_c) se predefinen mediante un recorrido nominal determinado, dependiente del recorrido de la fuerza electromotriz síncrona inducida en los ramales de bobinado (a, b, c), de tal modo que se genera un par de motor (m_{Soll}) preestablecido por encima del giro del rotor, y aparece por encima del giro del motor de forma continua sin saltos abruptos debidos a la conexión y presenta vacíos de corriente para el registro de la posición del rotor sin sensores, que se **caracteriza** por medios para la modificación automática de los vacíos de corriente respecto a su duración temporal en función de cada estado de funcionamiento, de modo que se consigue una minimización de la pérdida en los ramales de bobinado (a, b, c), por lo que al darse una aceleración del rotor determinada, relativamente grande, el vacío de corriente se amplía de tal modo que permite en cualquier caso un registro seguro de la posición del rotor mediante la valoración de la fuerza electromotriz síncrona inducida, mientras que en caso de una aceleración relativamente pequeña, o bien en un funcionamiento estacionario o de revoluciones constantes, para aumentar el rendimiento, el vacío de corriente se reduce a una longitud más pequeña, pero aún así suficiente para el registro de la posición del rotor.
15. Sistema de control conforme al concepto general de la reivindicación 14, que se **caracteriza** por medios para la modificación automática de los vacíos de corriente respecto a su longitud temporal en función del correspondiente estado de funcionamiento, de tal modo que se consigue minimizar la pérdida en los ramales de bobinado (a, b, c), de modo que las corrientes de bobinado (i_a , i_b , i_c) en las transiciones se ven delimitadas respecto al tiempo por lo menos en su primera y segunda derivación.
16. Sistema de control conforme al concepto general de la reivindicación 14, que se **caracteriza** por medios para la modificación automática de los vacíos de corriente respecto a su longitud temporal en función del correspondiente estado de funcionamiento, de tal modo que se consigue minimizar la pérdida en los ramales de bobinado (a, b, c), por lo que las corrientes de bobinado (i_a , i_b , i_c) en las transiciones se ven delimitadas por lo menos en su primera y segunda derivación respecto al ángulo de giro (α).
17. Sistema de control conforme a una de las reivindicaciones 14 a 16, **caracterizado** por el hecho de que la unidad de mando (10) está formada por un microcontrolador (μC).
18. Sistema de control conforme a una de las reivindicaciones 14 a 17, **caracterizado** por un medio para el registro de la posición del rotor sin sensores mediante la valoración de una fuerza electromotriz asíncrona inducida por el rotor (4) en los ramales de bobinado (a, b, c) a través de una línea de alimentación de bobinado (A, B, C) que no se encuentra bajo corriente.
19. Motor de corriente continua sin escobillas (1) con un sistema de control conforme a una de las reivindicaciones 14 a 18.

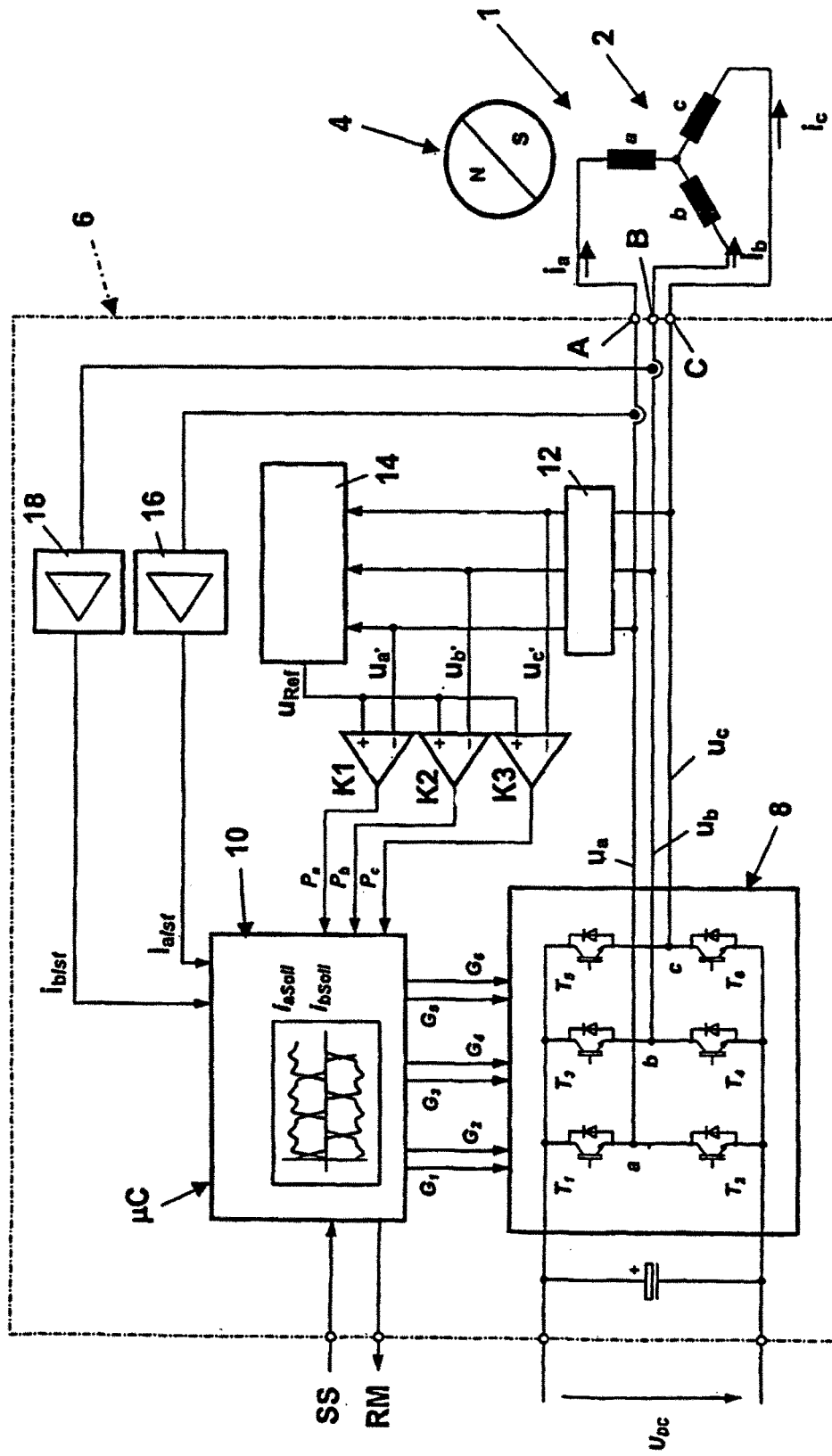


Fig. 1

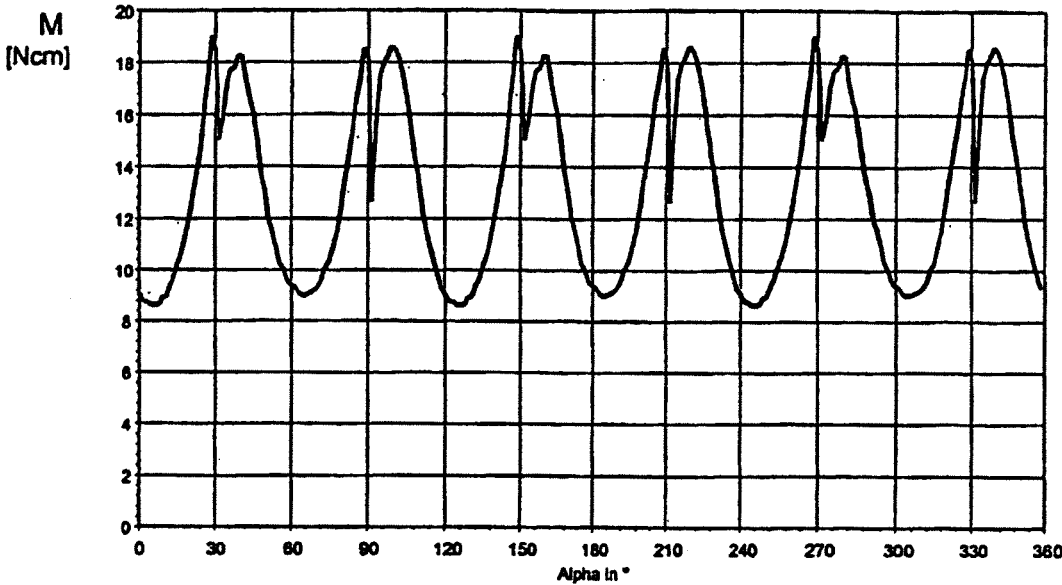


Fig. 2

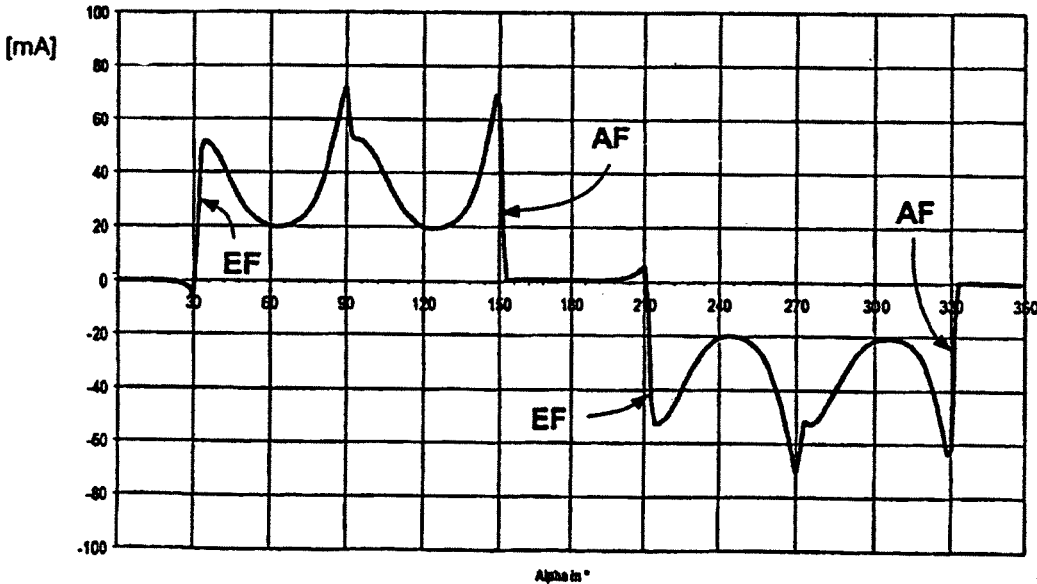


Fig. 3

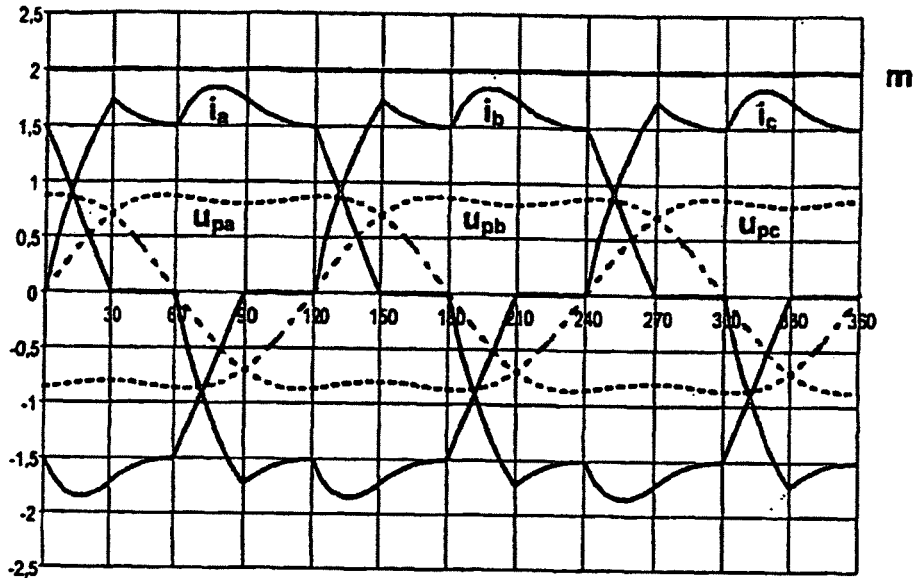


Fig. 4

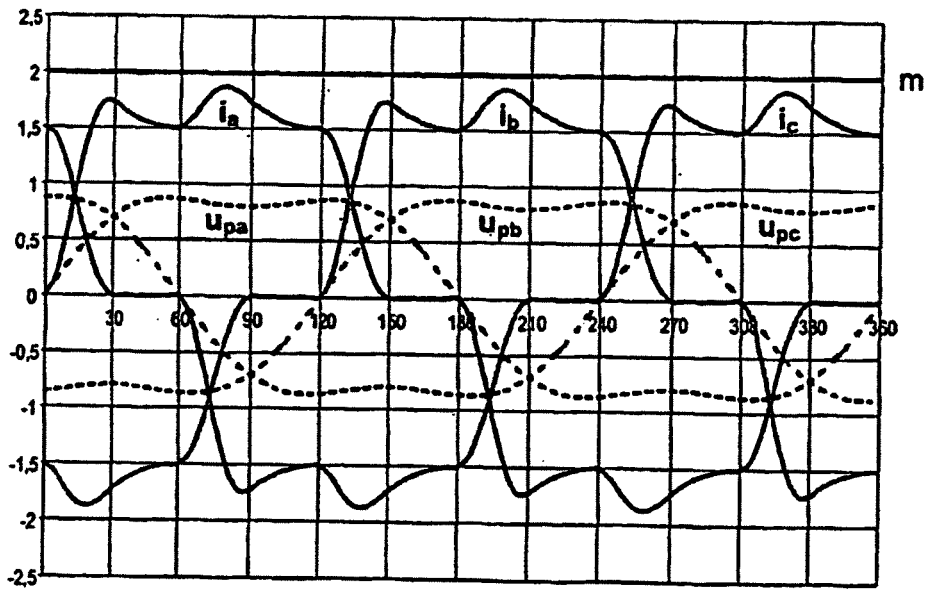


Fig. 5

a) Sin espacios de corriente, pérdidas en cobre P_{Cu0}

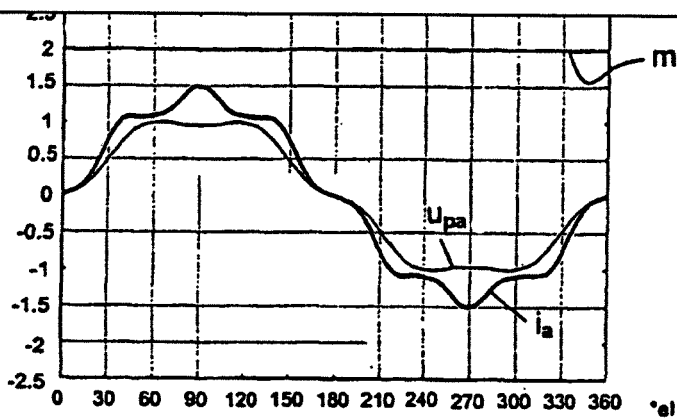


Fig. 6

b) Espacios de corriente 10° el., $P_{Cu}/P_{Cu0} = 1,004$

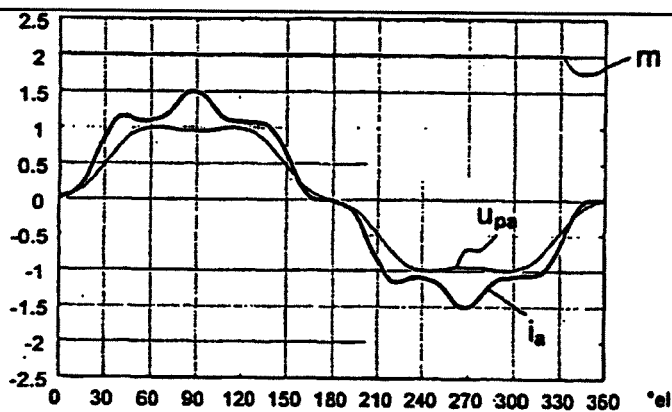


Fig. 7

c) Espacios de corriente 20° el., $P_{Cu}/P_{Cu0} = 1,03$

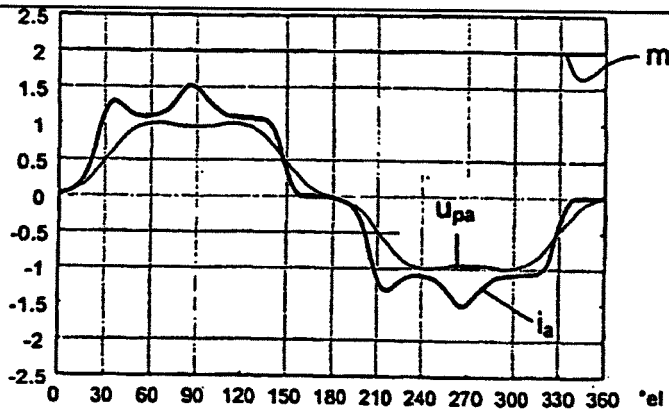


Fig. 8

d) Espacios de corriente 30° el., $P_{Cu}/P_{Cu0} = 1,1$

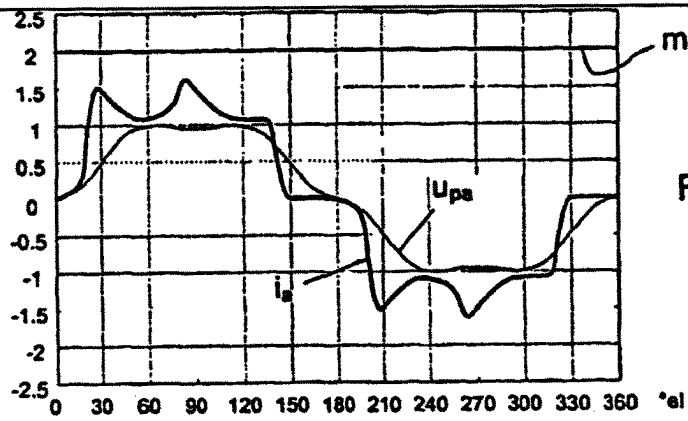


Fig. 9

e) Espacios de corriente 40° el., $P_{Cu}/P_{Cu0} = 1,26$

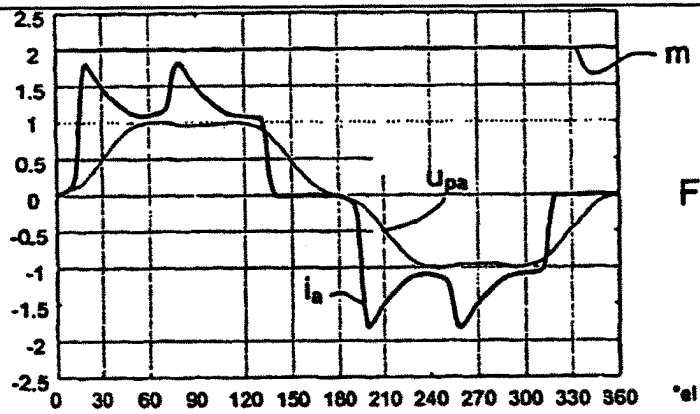


Fig. 10