

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 695 733**

51 Int. Cl.:

H02P 21/05 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **01.06.2004** **E 04291365 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **15.08.2018** **EP 1484836**

54 Título: **Proceso y sistema de regulación del par electromagnético medio de una máquina eléctrica rotativa**

30 Prioridad:

02.06.2003 FR 0306633

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

10.01.2019

73 Titular/es:

**ALSTOM TRANSPORT TECHNOLOGIES (100.0%)
48, rue Albert Dhalenne
93400 Saint-Ouen, FR**

72 Inventor/es:

**BENCHAIB, ABDELKRIM;
THOMAS, JEAN-LUC;
POULLAIN, SERGE;
ALACOQUE, JEAN-CLAUDE y
BONIN, ERIC**

74 Agente/Representante:

SALVÀ FERRER, Joan

ES 2 695 733 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

Proceso y sistema de regulación del par electromagnético medio de una máquina eléctrica rotativa

- 5 **[0001]** La invención se refiere a un proceso y sistema de control del par electromagnético medio de una máquina eléctrica rotativa polifásica equipada de bobinados estatóricos y/o rotóricos. La invención se refiere también a soportes del registro y una estructura de datos para la puesta en marcha de este proceso.
- [0002]** Más precisamente, la invención se refiere a un proceso de regulación de una máquina en la que los
10 bobinados estatóricos y/o rotóricos se alimentan mediante una tensión y una corriente polifásicas generadas por un ondulator, que está formado por interruptores cuya conmutación se puede controlar. Este proceso incluye:
- una etapa de control de la conmutación de los interruptores en función de una orden de par instantáneo, poniendo en marcha con ese fin un proceso de control de sistemas basado en pilas de forma que la orden de par instantáneo se alcance a partir del siguiente momento de regulación, y
15 - cada momento de regulación, una etapa de cálculo, a partir de una orden de par medio, de la orden de par instantáneo que haya que aplicar para que la media del par electromagnético instantáneo de la máquina converja hacia esta orden de par medio.
- [0003]** Siguiendo la descripción, se utilizará el término "motor" para designar una máquina eléctrica rotativa
20 polifásica y el término "par" para designar el par electromagnético de dicha máquina.
- [0004]** Los procesos descritos más arriba presentan una gran dinámica de regulación ya que la orden de par instantáneo puede modificarse en cada momento de regulación y se alcanza a partir del siguiente momento de regulación.
25
- [0005]** Así, dichos procesos de control son particularmente útiles cuando la orden de par cambia repentinamente. Por ejemplo, estos procesos se utilizan para controlar motores de accionamiento de un laminador.
- [0006]** No obstante, cuando la orden de par instantáneo se obtiene mediante una sencilla igualación asimilando,
30 por ejemplo, la orden de par medio a la orden de par instantáneo, existe una diferencia entre el valor de la orden de par medio y la media del par instantáneo entre dos momentos de regulación sucesivos. Por consiguiente, la orden de par medio no se alcanza nunca perfectamente, o se alcanza haciendo la media del par instantáneo con un gran número de momentos de regulación de forma que el proceso ya no presente una gran dinámica de regulación.
- 35 **[0007]** El documento EP 1 211 798 A2 o el documento EP 1 292 011 A1 divulgan un sistema de control de un motor que incluye una primera cadena de custodia de los fundamentos de la corriente de control y una segunda cadena de custodia de un armónico de la corriente de control.
- [0008]** La invención pretende corregir este inconveniente proponiendo un proceso de regulación del par
40 electromagnético medio que presenta una gran dinámica de regulación.
- [0009]** La invención tiene, por lo tanto, como objeto un proceso de regulación del par electromagnético medio tal y como se describe más arriba, que se caracteriza porque incluye una etapa de determinación del valor de armónico de la corriente y/o de la tensión generadas por el ondulator, y en que, durante la etapa de cálculo, la orden de par
45 instantáneo también se establece en función de este valor de los armónicos para producir una orden de par instantáneo propia para limitar la diferencia entre la media del par electromagnético instantáneo entre dos momentos de regulación sucesivos, y dicha orden de par medio.
- [0010]** Se constató que la diferencia entre la orden del par medio y la media del par instantáneo entre dos
50 momentos de regulación sucesivos se debe a que el ondulator no puede generar tensiones o corrientes perfectamente sinusoidales a partir de una tensión continua. En realidad, la tensión y la corriente generadas se desglosan en un componente sinusoidal con una frecuencia fundamental y en componentes sinusoidales de frecuencias más elevadas que se corresponden a los armónicos de nivel superior o igual a dos. Aquí, el componente sinusoidal de frecuencia fundamental se llama sencillamente el fundamental mientras que a los componentes sinusoidales de frecuencias más
55 elevadas se les llama armónicos.
- [0011]** El fundamental crea un par constante Γ_m durante un periodo del fundamental. Los armónicos generan un par pulsatorio parásito de frecuencia más elevada. El par instantáneo Γ_s del motor es el resultado de la superposición del par Γ_m y del par pulsatorio. El par pulsatorio y el par Γ_m son independientes el uno del otro. Por

consiguiente, los procesos, que se conocen, que calculan una orden de par instantáneo únicamente en función de la orden de par medio no tienen en cuenta el par pulsatorio. Así, aunque por ejemplo, el par instantáneo en cada momento de regulación es rigurosamente idéntico a la orden de par medio, la media del par instantáneo Γ_s entre dos momentos de regulación sucesivos no es igual a esta orden de par medio ya que el par instantáneo varía entre estos dos momentos por culpa del par pulsatorio. El par pulsatorio es, por lo tanto, responsable de la diferencia entre la orden de par medio y la media del par instantáneo. Esta diferencia es especialmente importante porque la amplitud del par pulsatorio es importante. Por lo tanto, ya que el par pulsatorio se crea mediante los armónicos de tensión y/o de corriente, el valor de esta diferencia es una función del valor de los armónicos.

10 **[0012]** El proceso indicado más arriba corrige el defecto de los procesos conocidos teniendo en cuenta para el cálculo de la orden de par instantáneo, no solo la orden de par medio, sino también el valor de los armónicos de corriente y/o de tensión.

[0013] Siguiendo otras características del proceso conforme a la invención, este se caracteriza porque:

15 - el proceso de control de sistemas basados en pilas establece una orden de control de interruptores por modulación de anchura entre impulsos, y la etapa de control incluye también, entre cada momento de regulación, una operación de control de la conmutación de los interruptores que ponen en marcha un proceso de modulación de anchura entre impulsos configurado en función de dicha orden de control establecida por el proceso de control de sistemas basados en pilas;

20 - el proceso de modulación de anchura entre impulsos es un proceso de modulación de anchura entre impulsos síncrono con la frecuencia del fundamental de la tensión generada por el ondulator, y los momentos de regulación se espacian los unos de los otros mediante un intervalo temporal igual a $T'/2p$, donde p es el número de fases de la máquina y T' es el periodo del fundamental de la tensión generada por el ondulator;

25 - el proceso de control de sistemas basados en pilas se adapta para que, en los momentos de regulación, la fase del

$$\frac{k\pi}{p},$$

fundamental de la tensión generada por el ondulator sea igual a $\frac{k\pi}{p}$, siendo k un número entero;

- el valor de los armónicos se establece, durante la etapa de determinación, a partir del valor de la orden de control establecida por el proceso de control de sistemas basados en pilas en el momento de regulación anterior;

30 - el proceso de modulación de anchura entre impulsos utiliza sucesivamente en el tiempo varias modulaciones diferentes de anchura entre impulsos; el valor de los armónicos se establece a partir de al menos un parámetro de cálculo, tras ser calculados los diferentes valores del α de cada parámetro de antemano y registrados anteriormente para cada modulación diferente de anchura entre impulsos, susceptible de ser utilizada; y el valor del α de cada parámetro para utilizar durante la etapa de determinación se selecciona en función del valor de la orden de control establecida por el proceso de control de sistemas basados en pilas en el momento de regulación anterior;

35 - se define un parámetro de cálculo mediante la siguiente relación:

$$\varepsilon(\theta) = \left(\sum_{n=2}^{\infty} \frac{V_n}{n} \right)_0$$

donde:

40 - V_n es la amplitud del armónico de tensión de nivel n ;
 - n es un número entero que se corresponde con el nivel del armónico;
 - la orden de control es un vector de tensión definido, en una referencia ortonormal α, β fija en comparación con los bobinados estáticos, por su módulo y un ángulo y el valor de armónicos de corriente se establece a partir de la
 45 siguiente relación:

$$\Delta I_q = - \frac{\varepsilon(\theta)}{L \cdot \omega} \cdot \cos(\beta_0 - \rho_0)$$

donde:

50 - L es la inductancia estática de la máquina eléctrica rotativa,
 - ω es la velocidad angular del rotor de la máquina eléctrica rotativa,

- β_0 es el ángulo del vector de tensión establecido (en 96) en el momento de regulación anterior por el proceso de control de sistemas basados en pilas,
 - ΔI_q es el valor de los armónicos de corriente a lo largo del eje q en una referencia giratoria d, q relacionado con el flujo rotórico, estando el flujo rotórico alineado sobre el eje d, y
- 5 - ρ_0 es el ángulo de la referencia d, q en comparación con la referencia fija α, β relacionada con las bobinas estáticas.
 - se define un parámetro de cálculo mediante la siguiente relación:

$$\delta(0) = \left(\sum_{n=2}^{\infty} V_n \right)$$

- 10 - donde V_n es la amplitud del armónico de tensión de nivel n;
 - el ondulator se alimenta a partir de al menos una tensión continua de alimentación limitada en amplitud, y, durante la etapa de cálculo, la orden de par instantáneo también se establece en función del valor instantáneo de la tensión continua disponible en el momento de regulación, de forma que la orden de par instantáneo se corresponde a una tensión continua disponible.
- 15 - la orden de par instantáneo se establece bajo forma de una orden de corriente instantáneo con la ayuda de las siguientes relaciones:

$$\left[\hat{I}_d - \hat{I}_{dc} \right]^2 + \left[\hat{I}_q - \hat{I}_{qc} \right]^2 \leq \frac{\hat{V}_M^2}{Z^2}$$

$$\hat{I}_d^2 + \hat{I}_q^2 \leq \hat{I}_M^2$$

20 donde:

- \hat{V}_M es el valor instantáneo de la tensión máxima continua disponible para alimentar el ondulator,
 - \hat{I}_M es el valor instantáneo de la corriente máxima que puede generarse mediante el ondulator,
 - \hat{I}_q y \hat{I}_d son los componentes de la orden del vector de corriente instantáneo a lo largo respectivamente de los ejes q y d de la referencia d, q
- 25 - Z se define mediante la siguiente relación:

$$Z = \sqrt{R^2 + L^2 \cdot \omega^2}, \text{ donde } R \text{ es la resistencia estática de la máquina, } L \text{ es la inductancia estática de la máquina, y } \omega \text{ es la velocidad angular del rotor de la máquina,}$$

30 - \hat{I}_{dc} y \hat{I}_{qc} se definen mediante las siguientes relaciones:

$$\hat{I}_{dc} = -\frac{L \cdot \omega}{Z^2} \cdot \left\{ R \cdot (\Delta I_q - \Delta J_q) - L \cdot \omega \cdot (\Delta I_d - \Delta J_d) + \omega \cdot \Phi_a \right\}$$

$$\hat{I}_{qc} = -\frac{1}{Z^2} \cdot \left\{ R \cdot \omega \cdot \phi_a - R \cdot L \cdot \omega \cdot (\Delta I_d - \Delta J_d) - L^2 \cdot \omega^2 \cdot (\Delta I_q - \Delta J_q) \right\}$$

donde:

- 35 - ΔI_d y ΔI_q son los componentes del vector de corriente armónico generado mediante el ondulator, a lo largo respectivamente de los ejes d y q de la referencia d, q, y ΔJ_q y ΔJ_d son componentes proporcionales al vector de tensión armónica generada por el ondulator, respectivamente a lo largo de los ejes q y d de la referencia d, q, al estar definidos los componentes ΔI_d , ΔI_q y ΔJ_d por las siguientes relaciones:

40

$$\Delta I_d = + \frac{\varepsilon(0)}{L \cdot \omega} \cdot \sin(\beta_0 - \rho_0)$$

$$\Delta J_d = \frac{\delta(0)}{L \cdot \omega} \cdot \sin(\beta_0 - \rho_0)$$

$$\Delta J_q = - \frac{\delta(0)}{L \cdot \omega} \cdot \cos(\beta_0 - \rho_0)$$

[0014] La invención también tiene como objeto un soporte de registro de información, que se caracteriza porque incluye instrucciones para ejecutar un proceso de regulación conforme a la invención, cuando estas instrucciones se ejecutan mediante un calculador electrónico.

[0015] La invención también tiene como objeto una estructura de datos, que se caracteriza por que esta estructura de datos asocia a cada valor particular de una orden de control establecida por el proceso de control de sistemas basados en pilas con varios ángulos y el valor de al menos un parámetro de regulación, el conjunto de ángulos asociados con un mismo valor de dicha orden de control definen una modulación particular de anchura entre impulsos síncrona con la frecuencia del fundamental de la tensión generada por el ondulator, y del valor de este al menos un parámetro de regulación es una función del valor de armónicos de corriente y/o de tensión generadas mediante el ondulator dirigido con la ayuda de la modulación de anchura entre impulsos definida por los ángulos asociados con el mismo valor de la orden de control.

[0016] La invención también tiene como objeto un sistema de regulación del par electromagnético medio de una máquina eléctrica rotativa polifásica equipada de bobinados estatóricos y/o rotóricos alimentados mediante una tensión y una corriente polifásicas generadas por un ondulator, que está formado por interruptores cuya conmutación se puede controlar. Este proceso incluye:

- una unidad de etapa de control de la conmutación de los interruptores en función de una orden de par instantáneo, siendo apta esta unidad de control para poner en marcha con ese fin un proceso de control de sistemas basados en pilas de forma que la orden de par instantáneo se alcance a partir del siguiente momento de regulación;
- una unidad de cálculo, a partir de una orden de par medio, de la orden de par instantáneo para que se aplique para que la media del par electromagnético instantáneo de la máquina converja hacia dicha orden de par medio; que se caracteriza porque una unidad de determinación del valor de los armónicos de la corriente y/o de la tensión generadas por el ondulator, y en que la unidad de cálculo calcula la orden de par instantáneo también en función de este valor de los armónicos para producir una orden de par instantáneo propia para limitar la diferencia entre la media del par electromagnético instantáneo entre dos momentos de regulación sucesivos, y dicha orden de par medio.

[0017] Se entenderá mejor la invención tras leer la descripción que sigue, dada únicamente a título de ejemplo y hecha refiriéndose a los dibujos anexos en los que:

- la figura 1 es una ilustración esquemática de un sistema de control conforme a la invención,
- la figura 2 es un gráfico que representa la evolución a lo largo del tiempo de una señal de control generada por el sistema de la figura 1,
- la figura 3 es un organigrama de un sistema de control conforme a la invención,
- la figura 4 es un gráfico que representa la evolución del par instantáneo a lo largo del tiempo en el caso del proceso de regulación de la figura 3,

[0018] La figura 1 representa un sistema 2 de regulación del par electromagnético medio de un motor 4 equipado de un estator y de un rotor.

[0019] La descripción a continuación se hará en el caso particular en el que este motor 4 es un motor trifásico síncrono de polos lisos con imanes permanentes montados sobre la superficie del rotor. El estator está equipado de bobinados estatóricos.

[0020] Particularmente, las relaciones matemáticas dadas después de esta descripción son las establecidas a partir de las ecuaciones de estado de dicho motor.

[0021] El sistema 2 permite recibir en entrada una orden de par medio Γ_{cm} y emitir en salida señales de control

de un ondulator trifásico convencional 8. Este ondulator 8 se alimenta mediante una fuente 10 de tensión continua.

[0022] De manera clásica, este ondulator 8 incluye tres brazos o "leg" en inglés, formados cada uno por dos interruptores conectados en serie mediante un punto medio. El punto medio de cada brazo se conecta a los bobinados 5 estáticos del motor 4 para alimentar en tensión y en corriente cada fase de este motor.

[0023] El sistema 2 incluye una unidad de control 20 del ondulator 8 en función de una orden de par instantáneo y una unidad de cálculo 22 de esta orden de par instantáneo en función de la orden Γ_{cm}

10 **[0024]** La unidad de control 20 incluye un módulo 24 de control de sistemas basados en pilas y un módulo 26 de control de la conmutación de los interruptores del ondulator 8 por modulación de anchura entre impulsos.

[0025] El módulo 24 recibe en entrada la orden de par instantáneo bajo forma de vector de corriente instantáneo (\hat{i}_d, \hat{i}_q) y emite en salida un vector de tensión \vec{v} .

15

[0026] El vector de corriente instantáneo (\hat{i}_d, \hat{i}_q) se define en una referencia ortonormal giratoria d, q relacionado con el flujo del rotor del motor 4 y cuyo eje d se alinea con el flujo rotórico del motor y cuyo eje q se deduce

$$\frac{\pi}{2}$$

del eje d por una rotación de $\frac{\pi}{2}$ en el sentido trigonométrico directo. El vector de tensión \vec{v} se define, en una referencia ortonormal fija α, β relacionada con el estator del motor 4, por su módulo $\|\vec{v}\|$ y un ángulo β_0 en relación con el eje α . Las referencias d, q y α, β son clásicas en el campo técnico y la transformación de coordenadas expresadas en una referencia en las expresadas en la otra referencia se realiza por rotación de los ejes de referencia.

20

[0027] Más precisamente, el módulo 24 emite en salida el ángulo β_0 y la media del módulo del vector de tensión \vec{v} entre dos momentos de regulación.

25

[0028] El ángulo β_0 se transmite directamente a una entrada del módulo 26 de control mientras que el módulo $\|\vec{v}\|$ se transmite a un módulo 28 de selección del tipo de modulación de anchura entre impulsos.

[0029] El módulo 24 permite calcular el valor del vector de tensión \vec{v} para que se alcance, en el siguiente

30 momento de regulación, la orden de par instantáneo que se corresponde a la orden (\hat{i}_d, \hat{i}_q) . A estos efectos, el módulo 24 pone en marcha un proceso de control de sistemas basados en pilas también conocido en inglés como "deadbeat control". Por ejemplo, aquí, el proceso puesto en marcha se describe en la solicitud de patente EP-A- 123 35 06. Nos limitaremos por lo tanto recordar que la relación utilizada para calcular el valor del vector de tensión \vec{v} en función de

la orden (\hat{i}_d, \hat{i}_q) de entrada es la siguiente:

35

$$V_{dq} = \begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix} = \frac{1}{a(T)} \cdot \begin{pmatrix} \hat{i}_d - I_d^0(T) \\ \hat{i}_q - I_q^0(T) \end{pmatrix} \quad (1)$$

en la que:

$$a(T) = \frac{1}{R} \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}} \right)$$

40

y:

$$\begin{pmatrix} I_d^0(T) \\ I_q^0(T) \end{pmatrix}$$

es la evolución natural de las corrientes instantáneas del estator del motor en cortocircuito después de un intervalo de regulación T a partir del estado inicial de la corriente estatórica en el momento de medición y de regulación anterior de las corrientes.

[0030] T es el intervalo de tiempo entre el momento de regulación actual y el siguiente momento de regulación, R es la resistencia estatórica del motor, L es la inductancia estatórica del motor y τ es la constante de

$$\left(\tau = \frac{L}{R} \right)$$

tiempo estatórica

10

[0031] El módulo 26 sirve para controlar la conmutación de los interruptores del ondulator 8 en función del valor del ángulo β_0 calculado por el módulo 24 y del valor de los ángulos α_i seleccionados por el módulo 28. A estos efectos, el módulo 26 pone en marcha un proceso convencional de modulación de anchura entre impulsos síncrona con la frecuencia del fundamental de la tensión generada por el ondulator 8. Un ejemplo de señal de control generada por este módulo 26 se representa en la figura 2.

15

[0032] La figura 2 representa la evolución de la señal de control de un interruptor superior de un brazo del ondulator 8 a lo largo del tiempo. Aquí, por ejemplo, el valor 0 de la señal indica que se controla la abertura del interruptor mientras que el valor 1 indica que se controla el cierre del interruptor. La figura 2 representa los momentos de regulación en función de la fase del fundamental de tensión generado por el ondulator 8. El intervalo $[0, 2\pi]$ se divide en cuatro subintervalos iguales π_1, π_2, π_3 y π_4 . En el intervalo π_1 , los momentos de conmutación del interruptor se definen en función de los ángulos α_i . Aquí, se necesitan siete ángulos α_i para definir las conmutaciones del interruptor durante el intervalo π_1 y la modulación de anchura entre impulsos representada aquí es por lo tanto la de "siete ángulos". Los momentos de conmutación en los intervalos π_2 a π_4 se deducen de los definidos por el intervalo π_1 por transformaciones clásicas. Las señales de control de otros interruptores se deducen del de la figura 2

20

25

$$\frac{2\pi}{p}$$

desplazando de $\frac{P}{p}$ la señal de la figura 2, donde p es el número de fases del motor 4.

[0033] Para eliminar los armónicos de rango par y los armónicos de rango múltiple de tres, la señal de control

$$\frac{\pi}{2} \quad \frac{3\pi}{2}$$

presenta aquí dos ejes de simetría con abscisas $\frac{\pi}{2}$ y $\frac{3\pi}{2}$ y un punto de simetría P con la abscisa π .

30

[0034] Así, un tipo de modulación se define, una vez que se conoce el valor de los ángulos α_i . El valor de los ángulos α_i fija el módulo del fundamental de la tensión generada por el ondulator.

[0035] El módulo 28 permite seleccionar el valor de los ángulos α_i que se corresponde con los módulos de tensión $\|\vec{v}\|$. A estos efectos, el módulo 28 se asocia a una memoria 32 que contiene una tabla TP de la siguiente forma:

35

$\ \vec{v}\ _i$	$\varepsilon(0)_i$	$\delta(0)_i$	α_{1i}	α_{2i}	α_{3i}	α_{4i}	α_{5i}	α_{6i}	α_{7i}
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
$\ \vec{v}\ _k$	$\varepsilon(0)_k$	$\delta(0)_k$	α_{1k}	α_{2k}	α_{3k}	α_{4k}	α_{5k}	α_{6k}	α_{7k}
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
$\ \vec{v}\ _m$	$\varepsilon(0)_m$	$\delta(0)_m$	α_{1m}	α_{2m}	α_{3m}	α_{4m}	α_{5m}	α_{6m}	α_{7m}

[0036] Esta tabla sirve para asociar a cada valor normalizado $\|\vec{v}\|_i$ del módulo de tensión $\|\vec{v}\|$, el valor de los ángulos α_{ik} que permiten al ondulator 8 generar una tensión cuyo módulo del fundamental es igual al módulo $\|\vec{v}\|$. La relación que permite pasar del valor normalizado del módulo $\|\vec{v}\|$ al valor producido por el módulo 24 es la siguiente:

$$\|\vec{v}\| = \|\vec{v}\| \cdot \hat{V}_M$$

donde:

10

- \hat{V}_M es el valor instantáneo de la tensión en los bornes de la fuente 10.

[0037] Además, esta tabla asocia también a cada valor normalizado del módulo $\|\vec{v}\|$, el valor de dos parámetros $\varepsilon(0)$ y $\delta(0)$. El cálculo del valor de estos parámetros además de su interés se mostrará tras leer la descripción a continuación. El módulo 28 también sirve, por lo tanto, para seleccionar y emitir en salida el valor de los parámetros $\varepsilon(0)$ y $\delta(0)$ que se corresponden al valor del módulo $\|\vec{v}\|$.

15

[0038] Si el valor normalizado $\|\vec{v}\|$ se encuentra entre dos valores grabados anteriormente en la tabla TP, el módulo de selección 28 permite calcular por interpolación lineal los valores correspondientes de los parámetros $\varepsilon(0)$ y $\delta(0)$ y de los ángulos α_i .

20

[0039] La unidad de control 20 incluye también un módulo 30 de determinación de los momentos de regulación. Este módulo 30 permite determinar el intervalo T entre dos momentos de regulación sucesivos para que éste sea igual

$$\frac{T}{2p},$$

a donde T es el periodo del fundamental de la tensión generada por el ondulator 8 y p el número de fases del motor 4. Efectivamente, se ha constatado que esta elección del valor del intervalo T elimina algunos niveles de armónicos de tensión generados por el ondulator 8. Además, aquí, para simplificar algunas de las relaciones descritas más abajo, estos momentos de regulación se determinan para corresponder a momentos en los que la fase del vector

25

de tensión \vec{v} es un múltiplo entero de $\frac{\pi}{p}$.

A estos efectos, por ejemplo, el módulo 30 permite resolver por iteraciones sucesivas la siguiente relación para determinar el valor del intervalo de tiempo T:

30

$$\sin\left[k \cdot \frac{\pi}{3} - (\rho_0 + \omega \cdot T + \varphi_D)\right] = e^{-\frac{T}{\tau}} \cdot \frac{\|\vec{I}_{dq}^D(0)\|}{\|\vec{I}_{dq}^D(T)\|} \cdot \sin\left(k \cdot \frac{\pi}{3} - (\rho_0 + \varphi_0)\right) \quad (2)$$

donde:

- los ángulos φ_D y φ_0 se definen según las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} \cos(\varphi_D) &= \frac{I_d^D(T)}{\|\vec{I}_{dq}^D(T)\|} & \cos(\varphi_0) &= \frac{I_d^D(0)}{\|\vec{I}_{dq}^D(0)\|} \\ \sin(\varphi_D) &= \frac{I_q^D(T)}{\|\vec{I}_{dq}^D(T)\|} & \sin(\varphi_0) &= \frac{I_q^D(0)}{\|\vec{I}_{dq}^D(0)\|} \end{aligned} \quad (3)$$

5

$I_d^D(T)$, $I_q^D(T)$, $I_d^D(0)$ y $I_q^D(0)$ se definen según las siguientes relaciones:

$$\vec{I}_{dq}^D(T) = \begin{pmatrix} I_d^D(T) \\ I_q^D(T) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{I}_d + \frac{X^2}{L \cdot Z^2} \cdot \Phi_a \\ \hat{I}_q + \frac{R \cdot X}{L \cdot Z^2} \cdot \Phi_a \end{pmatrix} \quad \vec{I}_{dq}^D(0) = \begin{pmatrix} I_d^D(0) \\ I_q^D(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{I}_d(0) + \frac{X^2}{L \cdot Z^2} \cdot \Phi_a \\ \hat{I}_q(0) + \frac{R \cdot X}{L \cdot Z^2} \cdot \Phi_a \end{pmatrix} \quad (4)$$

10

donde:

- Φ_a es el flujo rotórico de imanes,

- L es la inductancia estática del motor,

15 - ω se define según la relación $X = L \cdot \omega$, o ω es la velocidad angular del rotor,

- Z se define según la siguiente relación $Z^2 = R^2 + L^2 \cdot \omega^2$

- $\hat{I}_d(0)$ y $\hat{I}_q(0)$ son los componentes en la referencia d, q del vector de corriente instantáneo medido en el momento de regulación corriente,

- \hat{I}_d y \hat{I}_q es el orden de corriente recibida en entrada del módulo 24.

20

[0040] La relación (2) se obtiene resolviendo el sistema de ecuaciones (1) al que se adjunta una ecuación

adicional para expresar la obligación según la cual la fase del vector de tensión tiene que ser igual a $\frac{k\pi}{p}$, donde k es un entero comprendido entre [1,...,6] y p es el número de fases del motor 4. En trifásico, esta ecuación adicional es, por ejemplo, la siguiente:

25

$$V_\alpha \cdot \sin\left(k \cdot \frac{\pi}{3}\right) - V_\beta \cdot \cos\left(k \cdot \frac{\pi}{3}\right) = 0 \quad (4)$$

donde V_α , V_β son los componentes del vector de tensión en la referencia α , β .

30 **[0041]**

Se podrán encontrar más detalles sobre la determinación del intervalo de tiempo T en la solicitud de patente francesa depositada en Francia el mismo día por la solicitante bajo el título de "Proceso de regulación del par electromagnético instantáneo de una máquina eléctrica rotativa polifásica".

35 **[0042]**

La unidad de cálculo 22 convierte la orden de par medio Γ_{cm} en una orden de par instantáneo expresada bajo forma de orden de vector de corriente instantáneo (\hat{I}_d, \hat{I}_q) . A estos efectos, incluye un módulo 40 de cálculo de una orden de corriente fundamental I_q un módulo 42 de corrección de esta orden de corriente fundamental y un módulo 44 de establecimiento de la orden (\hat{I}_d, \hat{I}_q) teniendo en cuenta límites de funcionamiento del ondulator 8.

[0043]

El módulo 40 establece la orden de corriente fundamental I_q a partir de la orden Γ_{cm} con la ayuda de la

siguiente relación:

$$\tilde{I}_q = \frac{\Gamma_{cm}}{N_p \cdot \Phi_a}$$

5 donde:

- N_p es el número de pares de polos del motor,
- Φ_a es el flujo rotórico de los imanes.

10 **[0044]** Estos dos parámetros N_p y Φ_a son parámetros conocidos funciones de las características del motor 4.

[0045] El módulo 42 sirve para corregir la orden \tilde{I}_q en función del valor de los armónicos de la corriente generada por el ondulator 8, con la ayuda de la siguiente relación:

$$\hat{I}_q = \tilde{I}_q + \Delta I_q \quad (5)$$

15

donde:

- \hat{I}_q es el componente a lo largo del eje q, en la referencia d, q, de la orden (\hat{I}_d, \hat{I}_q) , y
- 20 - ΔI_q es el componente del vector de corriente armónico a lo largo del eje q de la referencia d, q.

[0046] El vector de corriente armónico es el que se corresponde únicamente a los armónicos de la corriente generada por el ondulator 8 sin tener en cuenta el fundamental.

[0047] El módulo 44 permite establecer la orden (\hat{I}_d, \hat{I}_q) destinada al módulo 24 que respeta los límites en tensión
25 y en corriente del ondulator 8. A estos efectos, el módulo 44 sirve para resolver el sistema de inecuaciones siguiente:

$$\left[\hat{I}_d - \hat{I}_{dc} \right]^2 + \left[\hat{I}_q - \hat{I}_{qc} \right]^2 \leq \frac{\hat{V}_M^2}{Z^2} \quad (6)$$

$$\hat{I}_d^2 + \hat{I}_q^2 \leq \hat{I}_M^2 \quad (7)$$

donde:

30

- \hat{V}_M es el valor instantáneo de la tensión máxima continua disponible en los bornes de la fuente 10.
- \hat{I}_M es el valor instantáneo de la corriente máxima que puede generarse mediante el ondulator 8,
- \hat{I}_d es el componente del vector de corriente instantáneo a lo largo del eje d de la referencia d, q.

35 **[0048]** Z se define según la siguiente relación:

$$Z = \sqrt{R^2 + L^2 \cdot \omega^2}$$

donde R es la resistencia estática, L, la inductancia estática y ω la velocidad angular.

40

[0049] \hat{I}_{dc} y \hat{I}_{qc} se definen mediante las siguientes relaciones:

$$\hat{I}_{dc} = -\frac{L\omega}{Z^2} \left\{ R(\Delta I_q - \Delta J_q) - L\omega(\Delta I_d - \Delta J_d) + \omega \Phi_a \right\} \quad (8)$$

$$\hat{I}_{qc} = -\frac{1}{Z^2} \left\{ R\omega \phi_a - R L \omega (\Delta I_d - \Delta J_d) - L^2 \omega^2 (\Delta I_q - \Delta J_q) \right\} \quad (9)$$

donde:

- 5 - ΔI_d es el componente del vector de corriente armónico según el eje d de la referencia d, q, y
- ΔI_q y ΔI_d son componentes proporcionales de los vectores de tensión armónica respectivamente a lo largo de los ejes q y d de la referencia d, q.

[0050] Aquí, se miden la tensión máxima instantánea \hat{V}_M y la velocidad angular ω . La intensidad máxima instantánea \hat{I}_M es constante y se conoce a partir de las características eléctricas del ondulator 8. El cálculo del valor de los componentes ΔI_d , ΔJ_q y ΔJ_d se define más abajo.

[0051] El sistema 2 incluye también una unidad 50 de determinación de los vectores de tensión y de corriente armónicos según los ejes d y q de la referencia d, q. A estos efectos, la unidad 50 incluye un primer módulo 52 de determinación del vector de corriente armónico y un segundo módulo 54 de determinación del vector de tensión armónico. Más precisamente, el módulo 52 permite emitir el valor de los componentes ΔI_q y ΔI_d a los módulos 42 y 44 y el módulo 54 permite emitir el valor de los componentes ΔJ_q y ΔJ_d al módulo 44.

[0052] A estos efectos, el módulo 52 establece el valor de los componentes ΔI_q y ΔI_d con la ayuda de las siguientes relaciones:

$$\Delta I_d = \frac{\varepsilon(0)}{L\omega} \cdot \sin(\beta_0 - \rho_0) \quad (10)$$

$$\Delta I_q = -\frac{\varepsilon(0)}{L\omega} \cdot \cos(\beta_0 - \rho_0) \quad (11)$$

donde:

- 25 - ρ_0 es el ángulo de la referencia d,q en comparación con la referencia α, β fija al estator, y
- β_0 es el ángulo del vector \vec{v} .

[0053] El módulo 54 establece los componentes ΔJ_q y ΔJ_d con la ayuda de las siguientes fórmulas:

$$\Delta J_d = \frac{\delta(0)}{L\omega} \cdot \sin(\beta_0 - \rho_0) \quad (12)$$

$$\Delta J_q = -\frac{\delta(0)}{L\omega} \cdot \cos(\beta_0 - \rho_0) \quad (13)$$

[0054] Los módulos 52 y 54 también se conectan a las salidas del módulo 24 y del módulo 28, para obtener el valor del ángulo β_0 y el valor de los parámetros $\delta(0)$ y $\varepsilon(0)$.

[0055] ΔJ_q y ΔJ_d están relacionados con los valores de los armónicos de tensión mediante las siguientes relaciones:

$$\begin{cases} \Delta V_d = L\omega \Delta J_d \\ \Delta V_q = L\omega \Delta J_q \end{cases}$$

Donde:

5 - ΔV_q y ΔV_d son los componentes del vector de tensión armónico respectivamente a lo largo de los ejes q y d de la referencia d, q

[0056] No obstante, sólo se utilizan aquí los componentes ΔJ_d y ΔJ_q .

10 **[0057]** Finalmente, el sistema 2 incluye un sensor 56 de la posición angular ρ_0 del rotor del motor 4, un sensor 58 de la velocidad angular ω del rotor del motor 4, un sensor 60 de la tensión continua instantánea \hat{V}_M emitida por la fuente 10 al ondulator 8, y un sensor 62 de la corriente instantánea en los bobinados estáticos.

15 **[0058]** El sensor 62 está formado por varios sensores de corriente elemental propios cada uno para medir la corriente en los bobinados estáticos de una fase del motor 4, para medir el vector de corriente instantáneo. Además este sensor 62 sirve para transformar el vector de corriente instantáneo medido por la transformación de Concordia generalizada con un sistema polifásico, para emitir en salida directamente los dos componentes del vector de corriente instantáneo $\hat{I}_d(0)$ y $\hat{I}_q(0)$.

20 **[0059]** Estos sensores están conectados con los diferentes módulos que necesitan una medición de estos valores. Particularmente, el sensor 56 emite el valor del ángulo ρ_0 a los módulos 52 y 54. No se han representado todas las conexiones entre los sensores 56 a 62 y los diferentes módulos del sistema 2 para simplificar la ilustración.

25 **[0060]** el sistema 2 Se realiza generalmente con la ayuda de computadoras electrónicas convencionales programables. A estos efectos, se asocia el sistema 2 a una memoria 61 que contiene instrucciones para ejecutar el proceso de la figura 3, cuando el sistema 2 las ejecuta.

[0061] Se va a describir ahora el funcionamiento del sistema 2 en comparación con el proceso de la figura 3.

30 **[0062]** El proceso de la figura 3 se desglosa en dos fases principales, una fase 80 de inicio de diferentes parámetros constantes utilizados por los módulos del sistema 2, y una fase 82 de regulación del par del motor 4.

35 **[0063]** Durante la fase 80, se determina el valor de parámetros N_p , Φ_a , \hat{I}_M , R, L y Z a partir de las características eléctricas y mecánicas del motor y del ondulator 8. Una vez determinadas, se graba el valor de estos parámetros, por ejemplo, en la memoria 61.

[0064] Durante la fase 80, el valor de los parámetros $\varepsilon(0)$ y $\delta(0)$ para cada valor del módulo $\|\vec{v}\|$, se determina con la ayuda de las siguientes relaciones:

$$\varepsilon(0) = \left(\sum_{n=2}^{\infty} \frac{V_n}{n} \right)_0 \quad (14)$$

$$\delta(0) = \left(\sum_{n=2}^{\infty} V_n \right) \quad (15)$$

40

donde:

- V_n es la amplitud del armónico de nivel n, y

- n es un número entero que se corresponde con el nivel del armónico;

45

[0065] La amplitud de los armónicos varía en función del tipo de modulación, es decir, en función del valor de los ángulos α y del valor instantáneo de la tensión continua.

[0066] Se establecen las relaciones en el caso que se elijan los momentos de regulación para que se correspondan exactamente a los momentos donde la fase del fundamental de la tensión generada por el ondulator

$$\frac{k\pi}{p},$$

sea igual a $\frac{k\pi}{p}$, siendo k un número entero. Efectivamente, se ha constatado que, en estos momentos precisos de regulación, los relaciones (14) y (15) son más sencillas de expresar y, por lo tanto, de calcular. Particularmente, el valor de los parámetros $\epsilon(0)$ y $\delta(0)$ es independiente del tiempo en esos momentos.

[0067] Aquí, a título de ejemplo, el valor de esos parámetros $\epsilon(0)$ y $\delta(0)$ se calcula por simulación de un modelo digital del motor 4 y del ondulator 8. Más precisamente, durante una operación 84, se simula la alimentación del motor 4 con la ayuda de la modulación de anchura entre impulsos definida por los ángulos α_1 grabadas en la memoria 32. Se analiza entonces la tensión trifásica generada por el modelo y se mide el valor de la amplitud, por ejemplo, de los 2000 primeros armónicos de tensión de nivel superior a dos. Con la ayuda de estos 2000 valores y de las relaciones (14) y (15) anteriores, se calcula el valor de los parámetros $\epsilon(0)$ y $\delta(0)$ para la modulación de anchura entre impulsos definida por los ángulos α_1 . Al final de la operación 84, se registra un valor normalizado de los parámetros $\delta(0)$ y $\epsilon(0)$ así calculado en la tabla TP de la memoria 32 en la línea que se corresponde con los ángulos α_1 . El valor normalizado de $\epsilon(0)$ y $\delta(0)$ se obtiene dividiéndolos entre el valor \hat{V}_M .

[0068] Luego, se repite la operación 84 para cada tipo de modulación definida en la tabla TP de la memoria 32. Así, al final de la fase 80, el valor de los parámetros $\epsilon(0)$ y $\delta(0)$ definido para cada valor del módulo se graba en la memoria 32.

[0069] Una vez que el valor del conjunto de los parámetros necesarios para ejecutar el sistema 2 se graba, puede arrancar la fase 82 de regulación.

[0070] Durante la fase de regulación, el sistema 2 recibe, durante una operación 90 el valor de la orden Γ_{cm} . Esta orden Γ_{cm} es, por ejemplo, emitida por un operador o por un sistema de seguimiento no representado. El valor de esta orden Γ_{cm} varía, en general, lentamente en comparación con la frecuencia en la que se emite una nueva orden de corriente instantáneo (\hat{I}_d, \hat{I}_q) al módulo 24.

[0071] En cada momento de regulación, la unidad 22 calcula, durante una etapa 92, una nueva orden de corriente instantánea (\hat{I}_d, \hat{I}_q). Esta nueva orden (\hat{I}_d, \hat{I}_q) se aplica en entrada de la unidad de control 20.

[0072] Del momento de regulación actual hasta el próximo momento de regulación, la unidad 20 calcula, durante una etapa 94, el ondulator 8 en función de esta orden de corriente instantánea. La orden de corriente instantánea sigue constante entre dos momentos de regulación.

[0073] Más precisamente, el módulo 24 establece, durante una operación 96, en el momento de regulación corriente, el valor del ángulo β_0 y del módulo $\|\vec{V}\|$ que permite obtener, a partir del siguiente momento de regulación, el par instantáneo que se corresponde a la orden de corriente instantáneo (\hat{I}_d, \hat{I}_q).

[0074] El ángulo β_0 del vector de tensión \vec{V} establecido por el módulo 24 se transmite directamente al módulo 26, mientras que el módulo $\|\vec{V}\|$ de este mismo vector se transmite al módulo 28 de selección.

[0075] El módulo 28 selecciona, durante una operación 98, el valor de los ángulos α_i y el valor de los parámetros $\epsilon(0)$ y $\delta(0)$ que se corresponden al valor del módulo. El valor grabado de los parámetros de $\epsilon(0)$ y $\delta(0)$ se multiplica por el valor V_M medido en ese momento.

[0076] El valor seleccionado de los ángulos α_i se transmite al módulo 26 mientras que el valor no normalizado de los parámetros $\epsilon(0)$ y $\delta(0)$ se transmite respectivamente a los módulos 52 y 54.

[0077] Con la ayuda del ángulo β_0 y de los valores de los ángulos α_i , el módulo 26 controla, durante una operación 100, la conmutación de interruptores del ondulator 8 poniendo en marcha un proceso de modulación de anchura de impulsión síncrona.

[0078] Bajo el control del módulo 26, el ondulator 8 genera una tensión y una corriente que se corresponde

con el módulo $\|\vec{v}\|$ y el ángulo β_0 . Con la construcción de este módulo $\|\vec{v}\|$ y del ángulo β_0 , el par instantáneo del motor alcanza exactamente en el siguiente momento de regulación a la orden de par instantáneo que se corresponde a la orden de entrada (\hat{I}_d, \hat{I}_q) . Es lo que se representa en el gráfico de la figura 4. Sobre este gráfico, se han representado los seis primeros momentos de regulación T1 a T6. La línea con trazo fino horizontal representa la orden de par instantáneo que se corresponde a la orden (\hat{I}_d, \hat{I}_q) . La línea con trazo grueso representa la evolución a lo largo del tiempo del par instantáneo Γ_s . Se observa que, en cada momento de regulación, gracias a la operación 96, el par instantáneo es igual a la orden de par instantáneo. Se observa también que la media del par instantáneo, representada por una línea horizontal de puntos, entre dos momentos de regulación es, por ejemplo, en este gráfico, inferior al valor de la orden de par instantáneo que se corresponde a la orden (\hat{I}_d, \hat{I}_q) . Esto permite entender que si, como en los procesos conocidos, la orden de entrada del módulo 24 está únicamente establecida a partir de la orden de par medio Γ_{cm} , la diferencia entre la media del par instantáneo entre dos momentos de regulación y la orden de par medio ya que esta diferencia no es únicamente una función de la orden de par medio.

[0079] Para resolver este problema, el proceso de la figura 2 incluye una etapa 110 de determinación del valor de los armónicos de corriente y de tensión y la etapa 92 incluye operaciones específicas de cálculo que se van a describir a continuación.

[0080] Durante la etapa 110, durante cada momento de regulación, el módulo 52 determina, durante una operación 112, el valor de componentes ΔI_q y ΔI_d a partir:

- del valor del ángulo β_0 emitido por el módulo 24,
- del valor del ángulo parámetro $\varepsilon(0)$ emitido por el módulo 28,
- del valor del ángulo ρ_0 medido por el sensor 56, y
- del valor de la velocidad angular ω medida por el sensor 58.

[0081] Los valores determinados durante esta operación 112 se transmiten entonces a los módulos 42 y 44 de la unidad de cálculo 22.

[0082] Simultáneamente a la operación 112, el módulo 54 determina, durante una operación 114, el valor de los componentes ΔI_q y ΔI_d . Los valores de ΔJ_q y ΔJ_d se transmiten al módulo 44.

[0083] Para obtener a partir de la orden de par medio Γ_{cm} una orden de par instantáneo que permita alcanzar, en unos momentos de regulación, la orden de par medio Γ_{cm} , la etapa 92 incluye las siguientes operaciones:

- una operación 120 de cálculo de la orden \tilde{I}_q por el módulo 40, y
- una operación 122 de corrección de esta orden \tilde{I}_q para obtener el componente \hat{I}_q de la orden de corriente instantáneo que permita hacer converger la media del par instantáneo entre dos momentos de regulación hacia la orden Γ_{cm} .

[0084] Para tener en cuenta límites de tensión instantáneo \hat{V}_M y de corriente instantánea \hat{I}_M del ondulator 8, el módulo 44 establece, durante una operación 124, el valor del componente \hat{I}_d que permite respetar estos límites.

[0085] Por ejemplo, si la orden Γ_{cm} aumenta, la orden de corriente fundamental \tilde{I}_q y la orden de corriente instantánea (\hat{I}_d, \hat{I}_q) aumenta, lo que, después de las operaciones 122, 124 y 96, conduce a un aumento del módulo $\|\vec{v}\|$. Este aumento del módulo $\|\vec{v}\|$ conduce, por ejemplo, al módulo 28 a seleccionar un nuevo tipo de modulación de anchura entre impulsos que se corresponde a de nuevos valores para los ángulos α_i . La selección de un nuevo tipo de modulación de anchura entre impulsos conduce también a generar valores diferentes para los parámetros $\varepsilon(0)$ y $\delta(0)$. A partir del nuevo valor de estos parámetros $\varepsilon(0)$ y $\delta(0)$, los módulos 52 y 54 determina, cuando se ejecuta la siguiente operación 120, los nuevos valores de componentes ΔI_q , ΔI_d , ΔJ_q y ΔJ_d que permiten corregir la orden de corriente instantánea (\hat{I}_d, \hat{I}_q) , por ejemplo, aumentándola, para que la media entre dos momentos de regulación del par instantáneo sea igual a la orden Γ_{cm} .

[0086] Así, el proceso de la figura 3 permite regular el par medio del motor poniendo en marcha un proceso de control de sistemas basados en pilas. Presenta, por lo tanto, una grande dinámica. Además, aquí, el proceso de control de sistemas basados en pilas se combina con un proceso de modulación de anchura entre impulsos síncrona, de forma que se eliminan algunos niveles de armónicos específicos.

[0087] Como variante, si la potencia de cálculo es suficiente, en cada momento de regulación, las operaciones 122, 124, 96 y 98 se repiten varias veces antes de ejecutar la operación 100. El hecho de repetir varias veces las

operaciones 122, 124, 96 y 98 permite obtener un valor para la orden de corriente (\hat{I}_d, \hat{I}_q) más preciso. Así, si el número de iteraciones es suficientemente grande, la orden (\hat{I}_d, \hat{I}_q) es suficientemente precisa para permitir alcanzar después de un único momento de regulación todo nuevo valor de la orden de par medio Γ_{cm} , ella misma en variación rápida.

- 5 **[0088]** Se ha descrito el sistema 2, aquí, en el caso particular en el que se realiza la operación de control de sistemas basados en pilas según la información de la solicitud EP-A-123 35 06. No obstante, como variante, se pone en marcha otro proceso de control de sistemas basados en pilas, como, por ejemplo, un proceso basado en modos deslizantes, también conocido en inglés como "sliding mode".

REIVINDICACIONES

1. Proceso de regulación del par electromagnético medio de una máquina eléctrica rotativa polifásica equipada de bobinados estáticos y/o rotóricos alimentados mediante una tensión y una corriente polifásicas generadas por un ondulator, que está formado por interruptores cuya conmutación se puede controlar. Este proceso incluye:

- una etapa (94) de control de la conmutación de los interruptores en función de una orden de par instantáneo, poniendo en marcha con ese fin un proceso de control de sistemas basados en pilas de forma que la orden de par instantáneo se alcance a partir del siguiente momento de regulación, y
- en cada momento de regulación, una etapa (92) de cálculo, a partir de una orden de par medio, de la orden de par instantáneo para que se aplique a fin de que la media del par electromagnético instantáneo de la máquina converja hacia dicha orden de par medio, **que se caracteriza porque** tiene una etapa (110) de determinación del valor de los armónicos de la corriente y/o de la tensión generadas por el ondulator, y **porque**, durante la etapa de cálculo, se establece también (en 122, 124) la orden de par instantáneo en función de este valor de los armónicos para producir una orden de par instantáneo propia para limitar la diferencia entre la media del par electromagnético instantáneo entre dos momentos de regulación sucesivos, y dicha orden de par medio.

2. Proceso según la reivindicación 1, **que se caracteriza porque** el proceso de control de sistemas basados en pilas establece (en 96) una orden de control de interruptores por modulación de anchura entre impulsos, y **porque** la etapa de control (94) incluye también, entre cada momento de regulación, una operación (100) de control de la conmutación de los interruptores poniendo en marcha un proceso de modulación de anchura entre impulsos configurado en función de dicha orden de control establecida por el proceso de control de sistemas basados en pilas.

3. Proceso según la reivindicación 1 o 2, **que se caracteriza porque** el proceso de modulación de anchura entre impulsos es un proceso de modulación de anchura entre impulsos síncrono con la frecuencia del fundamental de la tensión generada por el ondulator, y **porque** los momentos de regulación se espacian los unos de los otros mediante un intervalo temporal igual a $T'/2p$, donde p es el número de fases de la máquina y T' es el periodo del fundamental de la tensión generada por el ondulator.

4. Proceso según la reivindicación 3, **que se caracteriza porque** el proceso de control de sistemas basados en pilas se adapta para que en los momentos de regulación la fase del fundamental de la tensión generada

$$\frac{k\pi}{p},$$

por el ondulator sea igual a $\frac{k\pi}{p}$ siendo k un número entero.

5. Proceso según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **que se caracteriza porque** el valor de los armónicos se establece, durante la etapa de determinación (110), a partir del valor de la orden de control establecida por el proceso de control de sistemas basados en pilas en el momento de regulación anterior.

6. Proceso según cualquiera de las reivindicaciones de 2 a 5 **que se caracteriza:**

- **porque** el proceso de modulación de anchura entre impulsos utiliza sucesivamente a lo largo de un tiempo varias modulaciones diferentes de anchura entre impulsos,
- **porque** el valor de los armónicos se establece a partir de al menos un parámetro de cálculo $\epsilon(0)$ y $\delta(0)$, los diferentes valores del ϵ o de cada parámetro se calculan de antemano y se registran antes (en 80) para cada modulación diferente de anchura entre impulsos susceptible de ser utilizada; y
- **porque** el valor del ϵ o de cada parámetro que se utiliza durante la etapa de determinación (110), se selecciona (en 98) en función del valor de la orden de control establecida por el proceso (en 96) de control de sistemas basados en pilas en el momento de regulación anterior.

7. Proceso según la reivindicación 6, **que se caracteriza porque** se define un parámetro de cálculo mediante la siguiente relación:

$$\varepsilon(0) = \left(\sum_{n=2}^{\infty} \frac{V_n}{n} \right)_0$$

donde:

- V_n es la amplitud del armónico de tensión de nivel n ,
- 5 - n es un número entero que se corresponde con el nivel del armónico.

8. Proceso de la reivindicación 7, **que se caracteriza porque** la orden de control es un vector de tensión definido, en una referencia ortonormal α, β fija en comparación con los bobinados estáticos, por su módulo ($|\vec{V}|$) y un ángulo (β_0) **porque** el valor de armónicos de corriente se establece a partir de la siguiente relación:

10

$$\Delta I_q = - \frac{\varepsilon(0)}{L \cdot \omega} \cdot \cos(\beta_0 - \rho_0)$$

donde:

- 15 - L es la inductancia estática de la máquina eléctrica rotativa,
- ω es la velocidad angular del rotor de la máquina eléctrica rotativa,
- β_0 es el ángulo del vector de tensión establecido (en 96) en el momento de regulación anterior por el proceso de control de sistemas basados en pilas,
- ΔI_q es el valor de los armónicos de corriente a lo largo del eje q en una referencia giratoria d, q relacionada con el flujo rotórico, al estar alineado sobre el eje d , y
- 20 - ρ_0 es el ángulo de la referencia d, q en comparación con la referencia fija α, β relacionada con las bobinas estáticas.

9. Proceso según cualquiera de las reivindicaciones 6 a 8, **que se caracteriza porque** se define un parámetro de cálculo mediante la siguiente relación:

25

$$\delta(0) = \left(\sum_{n=2}^{\infty} V_n \right)$$

donde V_n es la amplitud del armónico de tensión de nivel n .

30 10. Proceso según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **que se caracteriza porque** el ondulator se alimenta a partir de al menos una tensión continua de alimentación limitada en amplitud, y **porque** durante la etapa de cálculo (92), la orden de par instantáneo también se establece (en 124) en función del valor instantáneo (\hat{V}_M) de la tensión continua disponible en el momento de regulación, para que la orden de par instantáneo se corresponda a una tensión continua disponible.

35

11. Proceso según las reivindicaciones 8, 9 y 10, **que se caracteriza porque** la orden de par instantáneo se establece bajo forma de una orden de corriente instantáneo (\hat{I}_d, \hat{I}_q) con la ayuda de las siguientes relaciones:

$$\left[\hat{I}_d - \hat{I}_{dc} \right]^2 + \left[\hat{I}_q - \hat{I}_{qc} \right]^2 \leq \frac{\hat{V}_M^2}{Z^2}$$

$$\hat{I}_d^2 + \hat{I}_q^2 \leq \hat{I}_M^2$$

40

donde:

- \hat{V}_M es el valor instantáneo de la tensión máxima continua disponible para alimentar el ondulator (8),
- \hat{I}_M es el valor instantáneo de la corriente máxima que puede generarse mediante el ondulator (8),
- 5 - \hat{I}_q y \hat{I}_d son los componentes de la orden del vector de corriente instantáneo a lo largo respectivamente de los ejes q y d de la referencia d, q
- Z se define según la siguiente relación:

$$Z = \sqrt{R^2 + L^2 \cdot \omega^2},$$

10

- donde R es la resistencia estática de la máquina, L es la inductancia estática de la máquina, y ω es la velocidad angular del rotor de la máquina,
- \hat{I}_{dc} y \hat{I}_{qc} se definen mediante las siguientes relaciones:

$$\hat{I}_{dc} = -\frac{L \cdot \omega}{Z^2} \cdot \left\{ R \cdot (\Delta I_q - \Delta J_q) - L \cdot \omega \cdot (\Delta I_d - \Delta J_d) + \omega \cdot \Phi_a \right\}$$

$$\hat{I}_{qc} = -\frac{1}{Z^2} \cdot \left\{ R \cdot \omega \cdot \phi_a - R \cdot L \cdot \omega \cdot (\Delta I_d - \Delta J_d) - L^2 \cdot \omega^2 \cdot (\Delta I_q - \Delta J_q) \right\}$$

15

donde:

- ΔI_d y ΔI_q son los componentes del vector de corriente armónico generado mediante el ondulator (8), a lo largo respectivamente de los ejes d y q de la referencia d,q, y ΔI_q y ΔI_d son componentes proporcionales al vector de tensión armónica generada por el ondulator, respectivamente a lo largo de los ejes q y d de la referencia d, q, al estar definidos los componentes ΔI_d , ΔJ_q y ΔJ_d que se definen según las siguientes relaciones:

$$\Delta I_d = +\frac{\varepsilon(0)}{L \cdot \omega} \cdot \sin(\beta_0 - \rho_0)$$

$$\Delta J_d = \frac{\delta(0)}{L \cdot \omega} \cdot \sin(\beta_0 - \rho_0)$$

$$\Delta J_q = -\frac{\delta(0)}{L \cdot \omega} \cdot \cos(\beta_0 - \rho_0)$$

25

12. Soporte de registro de información (60), **que se caracteriza porque** incluye instrucciones para ejecutar un proceso de regulación conforme a cualquiera de las reivindicaciones anteriores, cuando estas instrucciones se ejecutan mediante un calculador electrónico.

30 13.

Estructura de datos, grabada en una memoria (32), que permite regular el par electromagnético medio de una máquina eléctrica rotativa polifásica (4) cuando se utiliza según un proceso conforme a cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, **que se caracteriza porque** esta estructura de datos asocia a cada valor particular con una orden de control ($\|\vec{v}\|$) establecida por el proceso de control de sistemas basados en pilas, varios ángulos (α_i) y el valor de al menos un parámetro de regulación $\varepsilon(0)$ y $\delta(0)$, el conjunto de ángulos α_i asociados con un mismo valor de dicha orden de control, que define una modulación particular de anchura entre impulsos síncrona con la frecuencia fundamental de la tensión generada por el ondulator (8), y el valor de este al menos un parámetro de regulación $\varepsilon(0)$ y $\delta(0)$ siendo una función del valor de armónicos de corriente y/o de tensión generadas mediante el ondulator dirigido

con la ayuda de la modulación de anchura entre impulsos definida por los ángulo asociados (α_i) con el mismo valor de la orden de control ($\|\vec{v}\|$).

14. Proceso de regulación del par electromagnético medio de una máquina eléctrica rotativa polifásica
 5 equipada de bobinados estatóricos y/o rotóricos alimentados mediante una tensión y una corriente polifásicas generadas por un ondulator (8), que está formado por interruptores cuya conmutación se puede controlar. Este proceso incluye:
- una unidad (20) de control de la conmutación de los interruptores en función de una orden de par instantáneo, siendo
 10 apta esta unidad de control para poner en marcha con ese fin un proceso de control de sistemas basados en pilas de forma que la orden de par instantáneo se alcance a partir del siguiente momento de regulación, y
 - una unidad (22) de cálculo, a partir de una orden de par medio, de la orden de par instantáneo para que se aplique para que la media del par electromagnético instantáneo de la máquina (4) converja hacia dicha orden de par medio;
que se caracteriza porque incluye una unidad (50) de determinación del valor de los armónicos de la corriente y/o
 15 de la tensión generadas por el ondulator (8), y **porque** la unidad de cálculo (22) calcula la orden de par instantáneo también en función de este valor de los armónicos para producir una orden de par instantáneo propia para limitar la diferencia entre la media del par electromagnético instantáneo entre dos momentos de regulación sucesivos, y dicha orden de par medio.

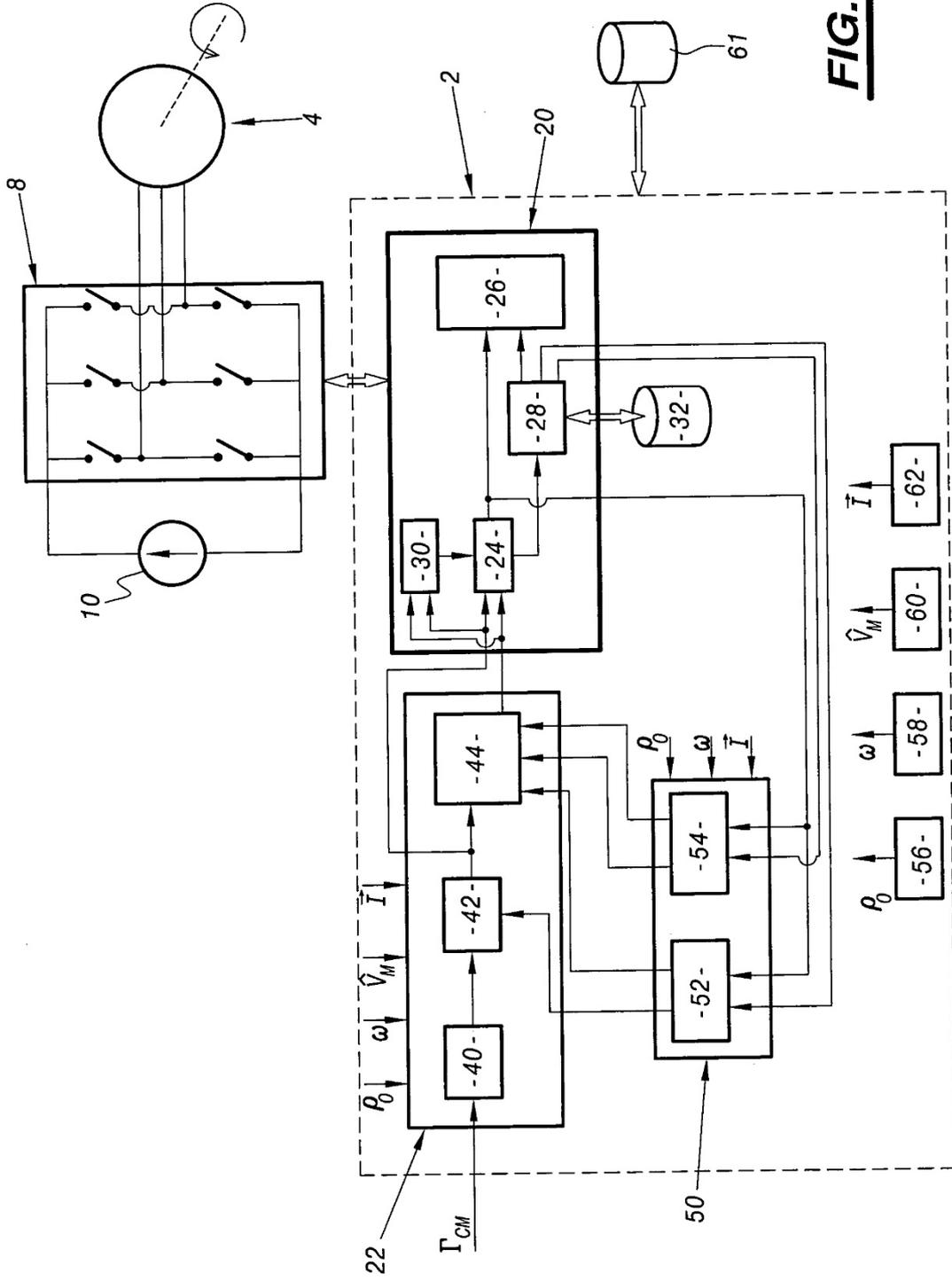


FIG. 1

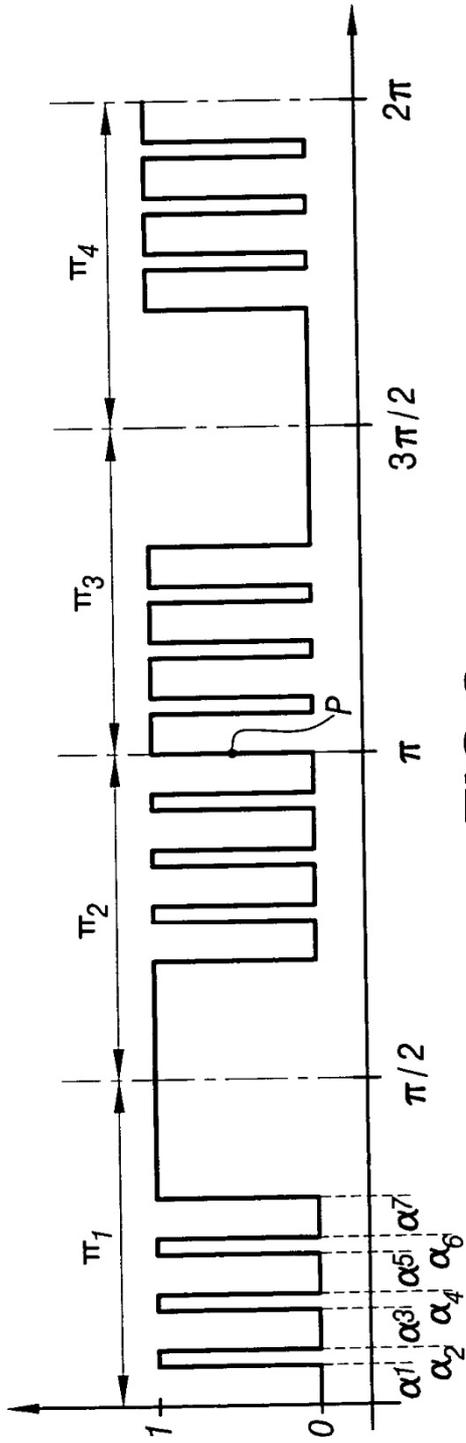


FIG. 2

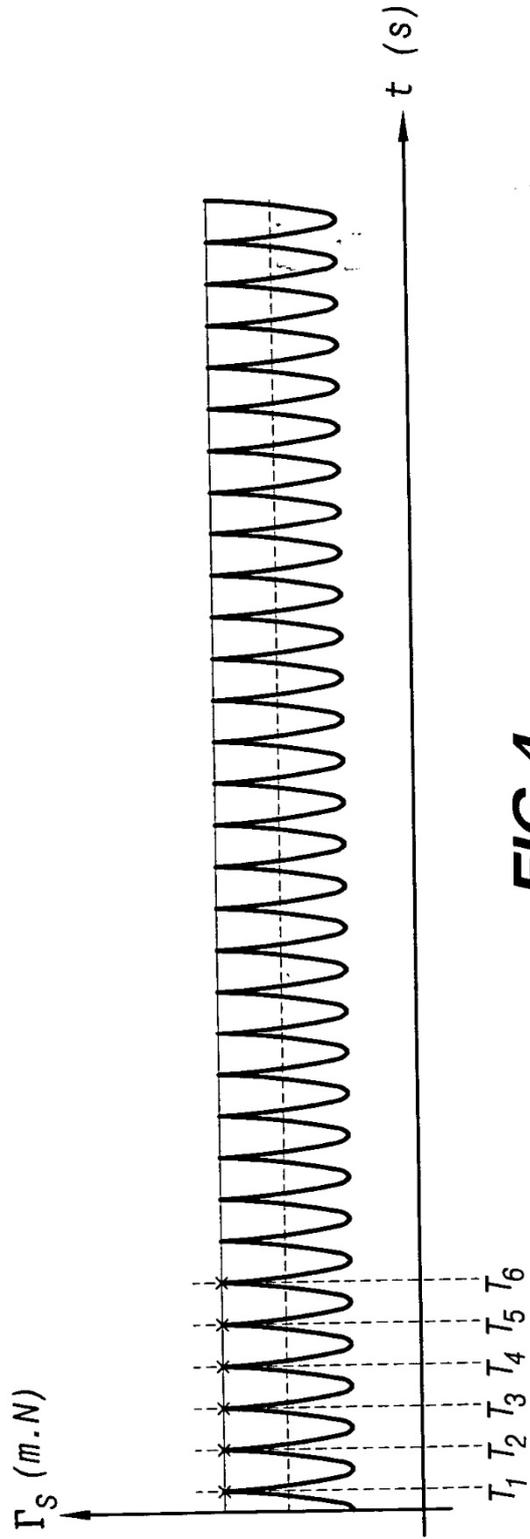


FIG. 4

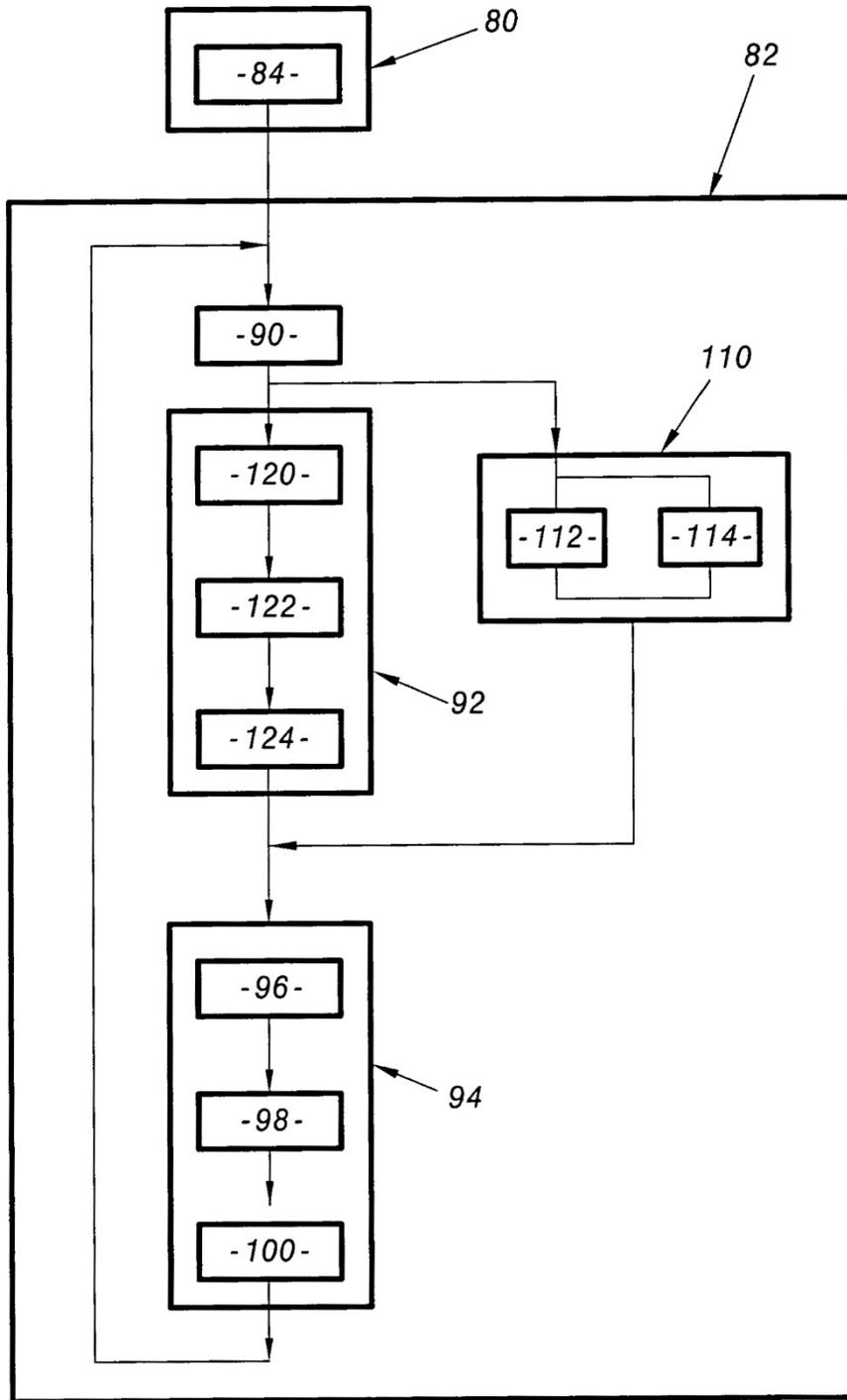


FIG.3