

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 443 641**

51 Int. Cl.:

**H02P 21/06**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.01.2002** **E 02290143 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **18.09.2013** **EP 1233506**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo de control de regulación de una máquina eléctrica giratoria de corriente alterna, en particular síncrona**

30 Prioridad:

**14.02.2001 FR 0102012**

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

**20.02.2014**

73 Titular/es:

**ALSTOM TRANSPORT SA (100.0%)  
3, AVENUE ANDRÉ MALRAUX  
92300 LEVALLOIS-PERRET, FR**

72 Inventor/es:

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

74 Agente/Representante:

**PONTI SALES, Adelaida**

ES 2 443 641 T3

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

## DESCRIPCIÓN

Procedimiento y dispositivo de control de regulación de una máquina eléctrica giratoria de corriente alterna, en particular síncrona.

5 **[0001]** La presente invención se refiere a un procedimiento de regulación de una máquina eléctrica giratoria de corriente alterna, en particular un motor eléctrico del tipo síncrono de polos lisos. También se refiere a un dispositivo de alimentación de esta máquina.

**[0002]** Se aplica en especial, pero no exclusivamente a los motores utilizados en el ámbito ferroviario para la tracción y la suspensión activa.

10 **[0003]** Más concretamente, la invención se refiere a un procedimiento de regulación capaz de controlar el par electromagnético de la máquina según unos valores de consigna.

15 **[0004]** Efectivamente, la orden de la velocidad de una máquina síncrona se realiza generalmente regulando el par electromagnético de la máquina. Para ello, las máquinas giratorias están generalmente dotadas de un regulador que recibe en la entrada, un valor de consigna de par electromagnético y una o varias señales muestreadas representativas del par electromagnético de la máquina elaboradas a partir de una medida de la corriente estatórica, aplicando el regulador una tensión de control a un ondulator de alimentación de la máquina. Para establecer el par electromagnético de la máquina en el valor de consigna de par, el regulador procede, en cada instante de muestreo, a una predicción del valor del par en el instante de muestreo siguiente, y modifica consecuentemente la tensión de control del ondulator.

20 **[0005]** Una de las principales preocupaciones para la mayor parte de las aplicaciones industriales es la mejora de las prestaciones dinámicas de estas máquinas, y en particular el aumento de la dinámica de par. Una primera solución consiste en aumentar las capacidades de conmutación de los conmutadores de potencia de los que está provisto el ondulator para aumentar la frecuencia de conmutación. Sin embargo, esta solución implica la utilización de componentes de potencia muy costosos y conduce a aumentar las pérdidas de conmutación.

25 **[0006]** Se puede dotar al sistema de componentes electrónicos de pérdidas reducidas. Esta solución es sin embargo inaceptable en la medida en que contribuye a aumentar considerablemente el coste del dispositivo de alimentación de la máquina.

30 **[0007]** Para definir el funcionamiento del regulador, existen por otro lado, procedimientos que consisten en utilizar un modelo continuo en el tiempo para modelizar el funcionamiento de la máquina, en realizar a partir de este modelo continuo lo que se llama una síntesis para determinar siempre en tiempo continuo las ecuaciones que dan las órdenes correctivas a aplicar al sistema en función de parámetros de funcionamiento, para obtener el funcionamiento deseado, y luego en discretizar en el tiempo estas ecuaciones para obtener ecuaciones de diferencias que son ejecutables por un calculador numérico integrado en el regulador. Sin embargo, estos procedimientos ofrecen prestaciones limitadas en términos de dinámica de control y pueden aparecer fenómenos de inestabilidad si el periodo de muestreo impuesto por el ondulator es demasiado elevado. Además, estos procedimientos no permiten alcanzar un valor de consigna de par en un único periodo de muestreo.

40 **[0008]** De la solicitud de patente EP 1 045 514 presentada por el Solicitante, se conoce un procedimiento para controlar una máquina eléctrica giratoria a partir de un modelo discreto de la máquina y del ondulator de alimentación de la máquina, dando este modelo la tensión de control a aplicar por el ondulator a la máquina para alcanzar un valor de par de consigna y un valor de módulo de flujo magnético de consigna. Sin embargo, este modelo está adaptado a las máquinas giratorias de tipo asíncrono, y no se aplica a cualquier tipo de máquina giratoria. Además, la regulación del par y del módulo de flujo no permite tomar en consideración el conjunto de los parámetros de funcionamiento de la máquina. De ello resulta que las prestaciones dinámicas de la máquina pueden mejorarse aún más.

45 **[0009]** La invención tiene como objetivo dar remedio a los inconvenientes precitados. Este objetivo se alcanza mediante un procedimiento según la reivindicación 1 y un dispositivo según la reivindicación 11.

**[0010]** Ventajosamente, el valor de consigna de energía es un valor mínimo.

**[0011]** Según otra particularidad de la invención, la ley de control discreta se determina en una referencia  $(\tilde{d}, \tilde{q})$  ligada a la evolución libre en tiempo discreto del flujo rotórico en la máquina.

50 **[0012]** Cuando la máquina es de tipo síncrono de polos lisos, la ley de control discreta determinada en el transcurso de la etapa previa es de la forma siguiente:

$$\begin{bmatrix} v_{\tilde{d}} \\ v_{\tilde{q}} \end{bmatrix}_{k-1} = \frac{1}{a \|\tilde{\Phi}_k^0\|} \begin{bmatrix} \Delta W \\ \Delta \Gamma \end{bmatrix}_k$$

en la cual  $v_{\tilde{d},k-1}$  y  $v_{\tilde{q},k-1}$  representan los componentes del vector de tensión de control en el instante k-1, expresados en una referencia  $(\tilde{d}, \tilde{q})$  móvil en tiempo discreto y ligada a la evolución libre  $\tilde{\Phi}_k^0$  del flujo rotórico

5 en la máquina en el instante siguiente k,  $\|\tilde{\Phi}_k^0\|$  corresponde al módulo de la evolución libre del flujo rotórico en el instante siguiente k, representando  $\Delta \Gamma_k$  y  $\Delta W_k$  respectivamente la separación entre el par electromagnético de la máquina a alcanzar en el instante de muestreo k siguiente y la componente de evolución libre de este par en este instante, y la separación entre la energía magnética consumida por la máquina en el instante k y la componente de evolución libre de esta energía en este instante.

**[0013]** Ventajosamente, la máquina es de tipo síncrono de imanes permanentes montados en superficie.

10 **[0014]** Como alternativa, la máquina es de tipo síncrono de polos lisos arrollados.

**[0015]** Según una particularidad de la invención, este procedimiento comprende la realización de una estrategia de baja velocidad cuando la máquina gira a una velocidad inferior a un umbral predefinido, consistiendo esta estrategia en determinar la tensión de control a aplicar a la máquina para alcanzar en el instante de muestreo siguiente el par de consigna con una aportación de energía magnética nula.

15 **[0016]** Preferentemente, esta estrategia de baja velocidad consiste en aplicar la ley de control discreta siguiente:

$$\begin{bmatrix} v_{\tilde{d}} \\ v_{\tilde{q}} \end{bmatrix}_{k-1} = \begin{bmatrix} \frac{-I_{k,\tilde{d}}^0}{a} \\ \frac{\Delta \Gamma_k}{a \|\tilde{\Phi}_k^0\|} \end{bmatrix}$$

en la cual  $I_{k,\tilde{d}}^0$  es la componente de la evolución libre de la corriente estatórica, según el eje  $\tilde{d}$  de la referencia  $(\tilde{d}, \tilde{q})$  ligada a la evolución libre de la corriente estatórica durante el periodo de muestreo entre los instantes de muestreo k-1 y k.

20 **[0017]** Según otra particularidad de la invención, este procedimiento comprende la realización de una estrategia de alta velocidad cuando la máquina gira a una velocidad superior a un umbral predefinido, consistiendo esta estrategia en tener en cuenta limitaciones del ondulator, para determinar un valor de par de consigna intermedia que la máquina puede alcanzar en el instante de muestreo siguiente, con una energía magnética consumida determinada.

25 **[0018]** Preferentemente, esta estrategia de alta velocidad comprende la resolución del sistema de ecuaciones siguiente:

$$(I_{k,\tilde{d}} - I_{k,\tilde{d}}^0)^2 + (I_{k,\tilde{q}} - I_{k,\tilde{q}}^0)^2 = (a \|\tilde{V}_{smax}\|)^2$$

$$I_{k,\tilde{d}}^2 + I_{k,\tilde{q}}^2 = \|\tilde{I}_{smax}\|^2$$

donde  $I_{k,\tilde{d}}$  y  $I_{k,\tilde{q}}$  son los componentes de la corriente estatórica en la referencia  $(\tilde{d}, \tilde{q})$  en el instante k,

$I_{k,\tilde{d}}^0$  y  $I_{k,\tilde{q}}^0$  son los componentes de la evolución libre de la corriente estática en esta referencia en el mismo instante,  $\|\tilde{V}_{s\max}\|$  e  $\|\tilde{I}_{s\max}\|$  son respectivamente los módulos de la tensión máxima y de la corriente máxima en el estator, y a una constante, obteniéndose la tensión de control con ayuda de la ecuación siguiente:

$$\begin{bmatrix} v_{\tilde{d}} \\ v_{\tilde{q}} \end{bmatrix}_{k-1} = \begin{bmatrix} \frac{I_{k,\tilde{d}} - I_{k,\tilde{d}}^0}{a} \\ \frac{I_{k,\tilde{q}} - I_{k,\tilde{q}}^0}{a} \end{bmatrix}.$$

5 **[0019]** La invención también se refiere a un dispositivo de regulación de una máquina giratoria, que comprende un ondulator alimentado por una tensión de alimentación, un regulador que recibe en la entrada un valor de consigna de par electromagnético y al menos una señal muestreada representativa del par electromagnético de la máquina y que suministra al ondulator una tensión de control adaptada para establecer el par electromagnético de la máquina en el valor de consigna de par, por predicción, en cada instante de muestreo, del valor de par electromagnético en el  
10 instante de muestreo siguiente y modificación consecutiva de la tensión de control, caracterizado por el hecho de que el regulador comprende:

- una ley de control discreta de la máquina, almacenada en memoria, suministrando esta ley de control la tensión de control discreta a aplicar a un instante de muestreo corriente  $k$ , en la forma de un primer término correspondiente a la evolución libre del estado de la máquina en ausencia de control, entre el instante de muestreo precedente  $k-1$  y el  
15 instante de muestreo corriente  $k$ , y de un segundo término que depende de valor del par de consigna y de un valor de consigna de energía magnética consumida por la máquina, y

- medios para determinar en cada instante de muestreo, con ayuda de la ley de control discreta, la tensión de control a aplicar a la máquina para que el par electromagnético de la máquina alcance el par de consigna, y la energía magnética consumida por la máquina corresponda al valor de consigna de energía.

20 **[0020]** A continuación se describirá un modo de realización preferido de la invención, a título de ejemplo no limitativo, con referencia a los dibujos adjuntos en los cuales:

La figura 1 representa esquemáticamente un sinóptico de un dispositivo de alimentación de una máquina giratoria conforme a la invención;

25 La figura 2 representa las referencias giratorias utilizadas según la invención en la modelización del funcionamiento de la máquina giratoria;

La figura 3 ilustra una estrategia de control de la máquina a baja velocidad, según la invención;

La figura 4 muestra una curva en función del tiempo de la evolución del par electromagnético de la máquina;

La figura 5 muestra una vista ampliada de una parte de la curva representada en la figura 5 cuando la máquina funciona a baja velocidad;

30 Las figuras 6 y 7 ilustran una estrategia de control de la máquina de alta velocidad, según la invención;

La figura 8 muestra una vista ampliada de una parte de la curva representada en la figura 5 cuando la máquina funciona a alta velocidad.

35 **[0021]** En la figura 1, se ha representado una máquina giratoria 1 constituida por un motor eléctrico síncrono trifásico, por ejemplo, utilizado para la tracción de una máquina ferroviario eléctrica, de un robot o de una máquina herramienta. La máquina giratoria 1 se alimenta con un dispositivo de alimentación 2 que comprende, como es clásico, un ondulator de tensión que alimenta al motor 1 con tensión alternativa trifásica, ondulator que está conectado con una fuente de alimentación en tensión continua, por ejemplo una tensión del orden de 1500 a 3000 Voltios, para una aplicación en el ámbito ferroviario.

40 **[0022]** El ondulator 2 está pilotado por un dispositivo de regulación 3 concebido para suministrar una tensión  $V_{ref}$  de control, que determina la tensión a aplicar por el ondulator 2 a la máquina 1, estando generada esta tensión por

el dispositivo de regulación 3, para establecer el par electromagnético de la máquina 1, a partir de un valor de consigna de par electromagnético  $\Gamma^*$ .

**[0023]** Tal como se ve en la figura 1, el regulador 3 recibe también, a la entrada, una o varias señales muestreadas,

preferentemente las señales  $\bar{I}_k, \bar{\Phi}_k, \Omega_k$ , correspondiente respectivamente a los valores discretos del vector de corriente estatórica, del vector de flujo magnético y de la velocidad de rotación del rotor de la máquina 1, siendo estas señales, representativas del par electromagnético de la máquina, elaboradas por un observador muestreador 4 a partir de señales continuas  $IS1(t)$ ,  $IS2(t)$  y  $\omega(t)$ , medidas en la entrada y en la salida del motor y correspondientes respectivamente a dos fases de la corriente estatórica y a una señal de medida de la velocidad mecánica de rotación del rotor, suministradas por unos sensores apropiados de los que está dotada la máquina 1. Las dos fases medidas de la corriente estatórica permiten deducir el valor de la tercera fase, suponiendo que la máquina está equilibrada. Los valores de estas tres fases permiten determinar a continuación los componentes  $(I\alpha, I\beta)$  de un vector de corriente estatórica, expresadas en una referencia de dos dimensiones, ligada al estator de la máquina 1.

**[0024]** De manera clásica, para establecer el par electromagnético de la máquina 1 en valores de consigna de par  $\Gamma^*$  recibidos en la entrada, el regulador 3 procede, con ayuda de medios de programa almacenados en memoria, en cada instante de muestreo, a una predicción de los valores de par electromagnético en el instante de muestreo siguiente, y modifica consecuentemente la tensión de control  $V_{ref}$  a sintetizar por el ondulator 2 y que se aplica a la máquina, para obtener los valores de par impuestos por las consignas.

**[0025]** Se notará que, preferentemente, el regulador 3 es un regulador de tipo "de respuesta pila", es decir que modifica la tensión de control  $V_{ref}$ , para alcanzar los valores de consigna durante el instante de muestreo siguiente.

**[0026]** Para ello, el regulador 3 comprende una primera etapa 32 en la cual se almacena, en memoria, un modelo discreto de la máquina giratoria 1, que permite calcular la evolución del estado de la máquina entre dos instantes de muestreo, y una segunda etapa 31 de cálculo de la tensión de control  $V_{ref}$ , en función de la evolución predicha del estado de la máquina por la primera etapa, y de la señal de consigna  $\Gamma^*$  presentada a la entrada de la segunda etapa 31.

**[0027]** En lo que sigue de la descripción, se describirá ante el procedimiento de cálculo del modelo discreto de la máquina giratoria 1, y luego se describirá el procedimiento de cálculo de la tensión de control  $V_{ref}$ .

**[0028]** Tal como se ha mencionado anteriormente, el comportamiento dinámica de la máquina giratoria 1 se modeliza por un sistema algebro-diferencial definido en tiempo continuo.

**[0029]** La máquina puede ser modelizada por las ecuaciones de estado siguientes:

$$\dot{\bar{X}} = A(\Omega)\bar{X} + B\bar{V}_s \quad (1)$$

$$\bar{Y} = h(\bar{X}) \quad (2)$$

cuales:

$\bar{X}$  es un vector de estado que modeliza el funcionamiento de la máquina 1, y  $\dot{\bar{X}} = \frac{d\bar{X}}{dt}$ ,

$\bar{V}_s$  representa el vector de la tensión aplicada a la entrada de la máquina, que es igual a la tensión del estator de la máquina,  $A(\Omega)$  es una matriz de estado que depende de la velocidad mecánica  $\Omega$ ,

$B$  es una matriz de entrada del vector de tensión,

$\bar{Y}$  es un vector de salida que incluye el valor del par electromagnético  $\Gamma$ , y  $h$  es una función no-lineal.

**[0030]** En la fórmula precedente, se supone conocida la relación entre la tensión de control  $V_{ref}$  y la tensión del

estator  $\bar{V}_s$ , dependiendo esta relación únicamente de las características del ondulator.

**[0031]** En el caso de un motor síncrono, el vector de estado  $\vec{X}$  puede definirse por los componentes de la corriente estatórica y por los componentes del flujo rotórico tal como sigue:

$$\vec{X} = \begin{bmatrix} \vec{I}_s \\ \vec{\Phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \\ \Phi_\alpha \\ \Phi_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

5 en el cual los componentes de la corriente estatórica y del flujo rotórico están por ejemplo expresados en una referencia  $(\alpha, \beta)$  ligada al estator de la máquina 1.

**[0032]** Según la invención, el vector de salida  $\vec{Y}$  definido por la relación (2), tiene por componentes el par electromagnético del motor y la energía magnética. Se escribe de la manera siguiente:

$$\vec{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W \\ \Gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{\Phi} \cdot \vec{I}_s \\ n_p \vec{\Phi} \times \vec{I}_s \end{bmatrix} \quad (4)$$

donde el operador "X" representa el producto vectorial y el operador "." representa el producto escalar. Se notará por

10 lo que precede que la tensión del estator  $\vec{V}_s$  puede ser considerada como una constante entre dos periodos de muestreo sucesivos.

**[0033]** La ecuación de estado (1) puede ser discretizada de la manera siguiente:

$$\vec{X}_k = F(\Omega_{k-1}) \vec{X}_{k-1} + G(\Omega_{k-1}) \vec{V}_{s,k-1} \quad (5)$$

con  $F(\Omega) = e^{A(\Omega)\delta}$  y  $G(\Omega) = A^{-1}(\Omega) [e^{A(\Omega)\delta} - 1] B$ ,

15 representando  $\vec{X}_k$ ,  $\vec{V}_{s,k}$  y  $\Omega_k$  respectivamente los valores discretos del vector de estado  $\vec{X}$  de la tensión estatórica  $\vec{V}_s$  y de la velocidad mecánica del motor en los instantes de muestreo k, y siendo  $\delta$  el periodo de muestreo. Se supondrá a continuación que la velocidad mecánica  $\Omega_k$  del motor es constante durante cada periodo de muestreo.

**[0034]** Las matrices F y G pueden ser representadas de la manera siguiente:

$$F = \begin{bmatrix} F_1 & F_2 \\ F_3 & F_4 \end{bmatrix} \text{ et } G = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

20 **[0035]** Por lo tanto, la ecuación (5) se escribe de la manera siguiente:

$$\vec{X}_k = \begin{bmatrix} \vec{I} \\ \vec{\Phi} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} F_1 & F_2 \\ F_3 & F_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{I} \\ \vec{\Phi} \end{bmatrix}_{k-1} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}_{k-1} \quad (7)$$

**[0036]** Por lo tanto, el vector de estado  $\vec{X}_k$  puede descomponerse en una parte de evolución libre, es decir en ausencia de cualquier orden de tensión, y una parte debida a la orden de tensión  $\vec{V}_{s,k}$  aplicada a la máquina:

$$\vec{X}_k = \vec{X}_k^0 + G\vec{V}_{s,k-1} \quad (8)$$

o bien:

$$\begin{bmatrix} \vec{I} \\ \vec{\Phi} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \vec{I}^0 \\ \vec{\Phi}^0 \end{bmatrix}_k + G \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}_{k-1} \quad (9)$$

**[0037]** Consecuentemente, las evoluciones libres de la corriente estática y del flujo rotórico,  $\vec{I}_k^0$  y  $\vec{\Phi}_k^0$  se escriben de la manera siguiente:

$$\begin{aligned} \vec{I}_k^0 &= \begin{bmatrix} F_1 & F_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{I} \\ \vec{\Phi} \end{bmatrix}_{k-1} \text{ et} \\ \vec{\Phi}_k^0 &= \begin{bmatrix} F_3 & F_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{I} \\ \vec{\Phi} \end{bmatrix}_{k-1} \end{aligned} \quad (10)$$

**[0038]** El procedimiento según la invención consiste a continuación, con ayuda de las ecuaciones anteriormente introducidas, en determinar una función  $f$  que da la tensión de control  $V_{ref}$  o la tensión del estator a aplicar en cada instante de muestreo  $k$  en función de las variables  $\Delta\Gamma_k$  y  $\Delta W_k$  que representan respectivamente la separación entre el par electromagnético de la máquina a alcanzar en el instante de muestreo  $k$  y la componente de evolución libre de este par en este instante, y la separación entre la energía magnética de la máquina en el instante  $k$  y la componente de evolución libre de esta energía en este instante. Esta función puede expresarse de la manera siguiente:

$$\vec{V}_{s,k-1} = \vec{f}(\Delta\Gamma_k, \Delta W_k) \quad (11)$$

**[0039]** En el caso de un motor de tipo síncrono de polos lisos, por ejemplo de imanes permanentes montados en la superficie del rotor o cuyos polos están constituidos por un devanado en la superficie del rotor, las matrices  $A(\Omega)$ ,  $B$  y

el vector  $\vec{V}_s$  tienen las formas siguientes en la referencia  $(\alpha, \beta)$ :

$$A(\Omega) = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & 0 & 0 & n_p \frac{\Omega}{L_s} \\ 0 & -\frac{R_s}{L_s} & -n_p \frac{\Omega}{L_s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -n_p \Omega \\ 0 & 0 & n_p \Omega & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \vec{V}_s = \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (12)$$

en las cuales  $R_s$  es la resistencia del estator del motor 1,  $L_s$  es la inductancia del estator, y  $n_p$  es el número de pares de polos del motor.

**[0040]** De ello resulta que las matrices  $F_i$  y  $G_i$  introducidas en las ecuaciones (6) tienen los valores siguientes:

$$F_1 = \begin{bmatrix} e^{-\frac{\delta}{\tau_s}} & 0 \\ 0 & e^{-\frac{\delta}{\tau_s}} \end{bmatrix}, F_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, F_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix},$$

$$F_2 = \frac{Z_1}{L_s Z_2^2} \begin{bmatrix} -Z_1 \cos \theta + R_s \sin \theta + Z_1 e^{-\frac{\delta}{\tau_s}} & Z_1 \sin \theta + R_s \cos \theta - R_s e^{-\frac{\delta}{\tau_s}} \\ -Z_1 \sin \theta - R_s \cos \theta + R_s e^{-\frac{\delta}{\tau_s}} & -Z_1 \cos \theta + R_s \sin \theta + Z_1 e^{-\frac{\delta}{\tau_s}} \end{bmatrix}$$

$$G_1 = \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & a \end{bmatrix}, G_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

5 en las cuales

$$Z_1 = L_s n_p \Omega, \quad Z_2^2 = R_s^2 + Z_1^2, \quad \tau_s = \frac{L_s}{R_s}, \quad \theta = \delta n_p \Omega \quad y \quad a = \frac{1}{R_s} \left( 1 - e^{-\frac{\delta}{\tau_s}} \right).$$

**[0041]** Hay que destacar que estas expresiones no hacen intervenir la posición del rotor.

**[0042]** Por otro lado, para este tipo de motor, la ecuación (5) se escribe de la manera siguiente:

$$\vec{X}_k = \begin{bmatrix} \vec{I} \\ \vec{\Phi} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} F_1 & F_2 \\ F_3 & F_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{I} \\ \vec{\Phi} \end{bmatrix}_{k-1} + a \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}_{k-1} = \begin{bmatrix} \vec{I}^0 \\ \vec{\Phi}^0 \end{bmatrix}_{k-1} + a \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}_{k-1} \quad (13)$$

10

**[0043]** Consecuentemente, las evoluciones libres de la corriente estatórica y del flujo rotórico,  $\vec{I}_k^0$  y  $\vec{\Phi}_k^0$  se escriben de la manera siguiente:

$$\vec{I}_k^0 = \begin{bmatrix} F_1 & F_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{I} \\ \vec{\Phi} \end{bmatrix}_{k-1}$$

y

$$\vec{\Phi}_k^0 = \vec{\Phi}_k = \begin{bmatrix} F_3 & F_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{I} \\ \vec{\Phi} \end{bmatrix}_{k-1} = F_4 \vec{\Phi}_{k-1} \quad (14)$$

**[0044]** Por otro lado, a partir de la ecuación (4), el valor del par electromagnético se define por la ecuación siguiente:

$$\Gamma_k = n_p \vec{\Phi}_k \times \vec{I}_k \quad (15)$$

- 5 **[0045]** Si se sustituyen los valores de la corriente estática y del flujo rotórico obtenidos por la ecuación (13) en la expresión de más arriba que define el par, se llega a una fórmula en la cual el par se descompone también en una parte de evolución libre y una parte debida a la orden de tensión:

$$\Gamma_k = \Gamma_k^0 + a n_p \vec{\Phi}_k^0 \times \vec{V}_{s,k-1} \quad (16)$$

siendo la parte del par de evolución libre igual a:

$$\Gamma_k^0 = n_p \vec{\Phi}_k^0 \times \vec{I}_k^0 \quad (17)$$

- 10 **[0046]** Si se considera ahora la cantidad:

$$\Delta \Gamma_k = \frac{\Gamma_k - \Gamma_k^0}{n_p} \quad (18)$$

$$\frac{\Delta \Gamma_k}{a} = \vec{\Phi}_k^0 \times \vec{V}_{ref,k-1} = \Phi_{k,\alpha}^0 v_{\beta,k-1} - \Phi_{k,\beta}^0 v_{\alpha,k-1} \quad (19)$$

**[0047]** Sin embargo, según la ecuación (14),

$$\vec{\Phi}_k^0 = \vec{\Phi}_k = F_4 \vec{\Phi}_{k-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \vec{\Phi}_{k-1} \quad (20)$$

- 15 **[0048]** Consecuentemente, en el caso de un motor síncrono de imanes permanentes montados en superficie, el flujo rotórico presenta un módulo constante que es igual al módulo del flujo magnético  $\|\dot{\vec{\Phi}}_m\|$  y gira en cada instante de muestreo de un ángulo  $\theta = \delta n_p \Omega$ . No es por lo tanto posible realizar una regulación a partir de un valor de consigna de módulo de flujo magnético, tal como se expone en la solicitud de patente EP 1 045 514.

[0049] Como no hay interferencia entre la tensión del estator en la evolución del flujo rotórico, puede considerarse

$$\vec{V}_s$$

solamente la ecuación de par en la cual las dos componentes de la tensión del estator en la referencia ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) aparecen, lo cual deja un grado de libertad (una ecuación con dos incógnitas). De ello resulta que se puede añadir el control de otro parámetro de funcionamiento del motor con vistas a maximizar el par para una corriente estatórica determinada teniendo en cuenta limitaciones en tensión y en corriente en el estator. Por otro lado, como se ha mencionado anteriormente, el objetivo de la presente invención es realizar una orden de par del tipo "con respuesta pila", es decir  $\Gamma^* = \Gamma_k$  y controlar la energía magnética en la máquina, lo cual equivale a controlar también la proyección de la corriente estatórica en el flujo rotórico. Efectivamente, según la ecuación (4), la energía magnética en una máquina es de la forma:

$$W_k = \vec{\Phi}_k \cdot \vec{I}_k = \vec{\Phi}_k^0 \cdot \vec{I}_k \quad (21)$$

[0050] Según la ecuación (13), la corriente del estator se determina por la ecuación siguiente:

$$\vec{I}_k = \vec{I}_k^0 + a \vec{V}_{s,k-1} \quad (22)$$

[0051] De ello resulta que la cantidad:

$$\frac{\Delta W_k}{a} = \frac{W_k - W_k^0}{a} = \frac{\vec{\Phi}_k^0 (\vec{I}_k - \vec{I}_k^0)}{a} = \vec{\Phi}_k^0 \vec{V}_{s,k-1} = \Phi_{k,\alpha}^0 v_{\alpha,k-1} + \Phi_{k,\beta}^0 v_{\beta,k-1} \quad (23)$$

[0052] La ley de control de la tensión  $\vec{V}_s$  puede entonces deducirse de las ecuaciones (19) y (23):

$$\begin{cases} v_{\alpha,k-1} = \frac{\Phi_{k,\alpha}^0 (\Phi_{k,\alpha}^0 (I_{k,\alpha} - I_{k,\alpha}^0) + \Phi_{k,\beta}^0 (I_{k,\beta} - I_{k,\beta}^0)) - \Delta \Gamma \Phi_{k,\beta}^0}{a \|\vec{\Phi}_m\|^2} \\ v_{\beta,k-1} = \frac{\Phi_{k,\beta}^0 (\Phi_{k,\alpha}^0 (I_{k,\alpha} - I_{k,\alpha}^0) + \Phi_{k,\beta}^0 (I_{k,\beta} - I_{k,\beta}^0)) + \Delta \Gamma \Phi_{k,\alpha}^0}{a \|\vec{\Phi}_m\|^2} \end{cases} \quad (24)$$

[0053] Esta ley de control también puede expresarse de la manera siguiente en la referencia ( $\alpha$ ,  $\beta$ ):

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}_{k-1} = \frac{1}{\|\vec{\Phi}_m\|^2} \begin{bmatrix} \Phi_\alpha^0 & -\Phi_\beta^0 \\ \Phi_\beta^0 & \Phi_\alpha^0 \end{bmatrix}_k \frac{1}{a} \begin{bmatrix} \Delta W_k \\ \Delta \Gamma_k \end{bmatrix} \quad (25)$$

[0054] Si se considera ahora la matriz de rotación R siguiente:

$$R(\rho_k^0) = \begin{bmatrix} \frac{\Phi_\alpha^0}{\|\vec{\Phi}_m\|} & \frac{\Phi_\beta^0}{\|\vec{\Phi}_m\|} \\ -\frac{\Phi_\beta^0}{\|\vec{\Phi}_m\|} & \frac{\Phi_\alpha^0}{\|\vec{\Phi}_m\|} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \cos(\rho^0) & \sin(\rho^0) \\ -\sin(\rho^0) & \cos(\rho^0) \end{bmatrix}_k \quad (26)$$

entonces la ley de control puede escribirse así:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}_{k-1} = \frac{1}{\|\vec{\Phi}_m\|} R^{-1}(\rho_k^0) \frac{1}{a} \begin{bmatrix} \Delta W \\ \Delta \Gamma \end{bmatrix}_k \quad (27)$$

- 5 La estructura del regulador 3 presenta entonces la particularidad de basarse en la evolución libre de la dirección del flujo rotórico, tal como se ha representado en la figura 2. Si ahora, se cambia de referencia, para situarse en una referencia (d, q) ligada a la evolución libre del flujo rotórico, la ecuación precedente se escribe de una manera muy simple, tal como se indica a continuación:

$$\begin{bmatrix} v_{\tilde{d}} \\ v_{\tilde{q}} \end{bmatrix}_{k-1} = \frac{1}{a \|\vec{\Phi}_k^0\|} \begin{bmatrix} \Delta W \\ \Delta \Gamma \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \frac{I_{k,\tilde{d}} - I_{k,\tilde{d}}^0}{a} \\ \frac{I_{k,\tilde{q}} - I_{k,\tilde{q}}^0}{a} \end{bmatrix} \quad (28)$$

- 10 esta ecuación expresa el valor de la tensión que hay que aplicar a la entrada del ondulator 3 en el instante de muestreo k-1 para obtener la variación de par deseada en el siguiente instante de muestreo k. Se puede constatar que hay un desacoplamiento perfecto entre el control del par y el control de la energía magnética (ángulo entre los vectores de flujo rotórico y de corriente estatórica y el módulo del vector de corriente estatórica), dependiendo

$v_{\tilde{q}}$

- 15 solamente de la variación del par electromagnético de la máquina 1. También hay que destacar que la referencia  $(\tilde{d}, \tilde{q})$  que está ligada al flujo rotórico discretizado gira por saltos en cada instante de muestreo y es equivalente a la referencia (d, q) del modelo continuo clásico.

**[0055]** En definitiva, gracias a que se pasa en tiempo discreto a partir de la modelización del estado de la máquina y mediante una elección apropiada de la referencia, se llega de manera sorprendente a un modelo muy simple para los motores de tipo síncrono de polos lisos. En el caso de un motor cuyos polos lisos del rotor están constituidos por devanados, el flujo magnético o rotórico puede además ser controlado en amplitud.

- 20 **[0056]** Se pueden aplicar varias estrategias de control según la velocidad  $\Omega$  del motor. A baja velocidad  $\Omega$ , el par es máximo para una corriente determinada, cuando la energía magnética W es nula. Ello significa que la corriente del estator está en cuadratura con el flujo rotórico o magnético. En cambio, cuando el motor gira a una velocidad más allá de un determinado límite, el par disponible disminuye progresivamente, mientras que la potencia suministrada por la máquina es máxima. Entonces, la energía magnética consumida ya no puede ser nula. Esta limitación en
- 25 velocidad para un par determinado es debida en especial a las limitaciones de tensión y de corriente del ondulator.

**[0057]** A baja velocidad, la estrategia a aplicar se ilustra mediante la figura 3. Esta figura representa los diferentes vectores implicados en la ecuación de estado (1), a saber:

$$\frac{d\bar{I}_s}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} \bar{I}_s + n_p \frac{\Omega}{L_s} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \bar{\Phi} + \frac{1}{L_s} \bar{V}_s \quad (29)$$

de donde:

$$\begin{aligned} \bar{V}_s &= L_s \frac{d\bar{I}_s}{dt} + R_s \bar{I}_s + n_p \underbrace{\Omega \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \bar{\Phi}}_{\bar{V}_f} \\ &= L_s \frac{d\bar{I}_s}{dt} + R_s \bar{I}_s + \bar{V}_f \end{aligned} \quad (30)$$

**[0058]** Hay que destacar que el vector  $\bar{V}_f$  es perpendicular al vector de flujo  $\bar{\Phi}$  y por lo tanto paralelo al vector de corriente  $\bar{I}_s$ .

**[0059]** Para una velocidad y un par de consigna determinados, si el módulo de la tensión del estator calculada por el regulador 3 es inferior a la tensión suministrada por el ondulador  $\bar{V}_s$ , la estrategia de control puede consistir en forzar la componente  $I_{k,\tilde{d}}$  a cero para que la corriente estatórica y el flujo rotórico estén en cuadratura. Lo cual conduce a la ley de control siguiente:

$$\begin{bmatrix} v_{\tilde{d}} \\ v_{\tilde{q}} \end{bmatrix}_{k-1} = \begin{bmatrix} -I_{k,\tilde{d}}^0 \\ \frac{a}{\Delta\Gamma_k} \\ a \|\bar{\Phi}_k^0\| \end{bmatrix} \quad (31)$$

determinándose el valor de  $I_{k,\tilde{d}}^0$  por las fórmulas (14). En la figura 4, se ha representado un ejemplo de curva de evolución del par solicitado al motor, en función del tiempo. Esta curva muestra en especial que en el instante  $t = 1,5$  s, el par ha pasado de -35 Nm a +25 Nm. Haciendo referencia ahora a la curva mostrada en la figura 5 que muestra con más detalle la evolución del par en la vecindad de este instante, cuando el motor gira a baja velocidad, se puede constatar que el par ha pasado del primer valor al segundo en un periodo de muestreo, es decir 1 ms.

**[0060]** A alta velocidad, para un par de consigna determinado y cuando el valor de tensión de control correspondiente es mayor que la  $\bar{V}_s$  que puede suministrar el ondulador 2, la estrategia precedente no se puede aplicar. Es por lo tanto necesario limitar la tensión del estator disminuyendo el flujo estatórico que se determina mediante la ecuación siguiente:

$$\bar{\Phi}_s = \bar{\Phi}_k + L_s \bar{I}_k \quad (32)$$

**[0061]** Puesto que el flujo rotórico es constante, el flujo estatórico puede disminuirse modificando el módulo de la corriente estatórica y el ángulo entre el vector de corriente estatórica y el flujo magnético, tal como se ha representado en la figura 6.

5 **[0062]** La estrategia de control a velocidad elevada se ilustra mediante la figura 6 en la cual la corriente estatórica y el flujo rotórico ya no pueden estar en cuadratura, pudiendo entonces el flujo estatórico en parte compensarse por la componente de la corriente estatórica  $I_{k,\tilde{d}}$ .

En esta estrategia, se supone que la tensión del estator es máxima, es decir:

$$v_{\tilde{d}}^2 + v_{\tilde{q}}^2 = \|\bar{V}_{smax}\|^2 \quad (33)$$

**[0063]** A partir de la ecuación precedente y de la ecuación (28), se obtiene la ecuación siguiente:

$$(I_{k,\tilde{d}} - I_{k,\tilde{d}}^0)^2 + (I_{k,\tilde{q}} - I_{k,\tilde{q}}^0)^2 = (a\|\bar{V}_{smax}\|)^2 \quad (34)$$

10 **[0064]** También se supone que la intensidad de la corriente estatórica es máxima, es decir:

$$I_{k,\tilde{d}}^2 + I_{k,\tilde{q}}^2 = \|\bar{I}_{smax}\|^2 \quad (35)$$

**[0065]** Estos dos últimas ecuaciones representan las ecuaciones de dos círculos, estando el primer círculo 21 (figura

7) centrado en el extremo del vector  $\bar{I}_k^0$  y que tiene un radio igual a  $a\|\bar{V}_{smax}\|$ , y estando el segundo 22 centrado en el origen de la referencia  $(\tilde{d}, \tilde{q})$  y que tiene un radio igual a  $\|\bar{I}_{smax}\|^2$ .

Por lo tanto, las dos ecuaciones (34) y (35) se satisfacen en los puntos de intersección 23 y 24 de estos dos círculos. De hecho, un único de estos dos puntos (punto 23) es óptimo para el control de la máquina, que es el que

corresponde una componente de corriente estatórica  $I_{k,\tilde{d}}$  en el eje  $\tilde{d}$ , negativa para reducir el flujo estatórico. El valor de esta componente puede obtenerse con ayuda de la ecuación (35):

$$I_{k,\tilde{d}} = -\sqrt{\|\bar{I}_{smax}\|^2 - I_{k,\tilde{q}}^2} \quad (36)$$

20 **[0066]** Además, la zona delimitada por la intersección de los dos círculos 21 y 22 corresponde a los valores posibles de tensión y de corriente estatórica. Consecuentemente, puede obtenerse una consigna de par de "un solo golpe" (un único periodo de muestreo) si se cumple la condición siguiente resultante de las ecuaciones (28) y (34):

$$\left( \frac{\Delta \Gamma_k}{\|\vec{\Phi}_m\|} \right)^2 \leq a^2 \|\vec{V}_{smax}\|^2 - (I_{k,\tilde{d}} - I_{k,\tilde{d}}^0)^2 \quad (37)$$

o bien:

$$I_{k,\tilde{d}}^2 \leq \|\vec{I}_{smax}\|^2 - \left( \frac{\Delta \Gamma}{\|\vec{\Phi}_p^0\|} + I_{k,\tilde{q}}^0 \right)^2 \quad (38)$$

**[0067]** Resultando esta segunda condición de las ecuaciones (28) y (35).

- 5 **[0068]** En la vista ampliada representada en la figura 8, se puede constatar que el valor de par 25 Nm se ha alcanzado en 7 periodos de muestreo es decir 7 ms, aplicando a cada periodo de muestreo valores de consigna de par intermedios.

- 10 **[0069]** Hay que destacar que las ecuaciones que modelizan el funcionamiento del motor 1 y del ondulator 2 según la invención son muy simples y no resultan de aproximaciones. Por lo tanto, pueden resolverse con ayuda de medios de cálculo relativamente modestos. Además, estas ecuaciones no precisan del conocimiento de la posición del rotor con respecto al estator, en cada periodo de muestreo.

## REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de regulación de una máquina eléctrica giratoria (1) que recibe en la entrada una tensión de control discreta determinada para establecer el par electromagnético ( $\Gamma_k$ ) suministrado por la máquina (1), sobre un valor de consigna ( $\Gamma^*$ ) de par, consistiendo este procedimiento en determinar en cada instante de muestreo (k-1), la tensión de control discreta ( $V_{s,k-1}$ ) a aplicar a la máquina (1) en función de al menos una señal muestreada ( $I_k, \Phi_k, \Omega_k$ ) representativa del par electromagnético ( $\Gamma_k$ ) de la máquina, para alcanzar el valor de consigna de par ( $\Gamma^*$ ) en el instante de muestreo (k) siguiente,

**caracterizado por el hecho de que** comprende:

- una etapa previa de determinación de una ley de control en tensión discreta de la máquina (1), en la cual la tensión de control discreta ( $V_{s,k-1}$ ) a aplicar en cada instante de muestreo (k), se determina en la forma:

$$\vec{V}_{s,k-1} = \vec{f}(\Delta\Gamma_k, \Delta W_k)$$

donde f es una función que da la tensión de control a aplicar en el instante de muestreo k-1 para alcanzar los valores de consigna de par y energía, en función de las variables  $\Delta\Gamma_k$  y  $\Delta W_k$  que representan respectivamente la separación entre el par electromagnético de la máquina a alcanzar ( $\Gamma^*$ ) en el instante de

- muestreo k siguiente y la componente de evolución libre ( $\Gamma_k^0$ ) de este par en ausencia de control en este instante, y la separación entre la energía magnética ( $W_k$ ) consumida por la máquina en el instante k y la componente de evolución libre ( $W_k$ ) de esta energía en ausencia de control en este instante,

- en cada instante de muestreo, una etapa de determinación, con ayuda de la ley de control discreta, de la tensión de control ( $V_{s,k-1}$ ) a aplicar a la máquina para que el par de la máquina alcance el par de consigna ( $\Gamma^*$ ), y la energía magnética consumida por la máquina corresponda a un valor de consigna de energía magnética ( $W^*$ ).

2. Procedimiento de regulación según la reivindicación 1,

**caracterizado por el hecho de que** el valor de consigna de energía ( $W^*$ ) es un valor mínimo.

3. Procedimiento de regulación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 2,

- caracterizado por el hecho de que** la ley de control discreta se determina en una referencia ( $\vec{d}, \vec{q}$ ) ligada a la evolución libre en tiempo discreto del flujo rotórico en la máquina.

4. Procedimiento de regulación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3,

**caracterizado por el hecho de que** la máquina (1) es de tipo síncrono de polos lisos, y por el hecho de que la ley de control discreta determinada en el transcurso de la etapa previa es de la forma siguiente:

$$\begin{bmatrix} v_{\vec{d}} \\ v_{\vec{q}} \end{bmatrix}_{k-1} = \frac{1}{a \|\vec{\Phi}_k^0\|} \begin{bmatrix} \Delta W \\ \Delta \Gamma \end{bmatrix}_k$$

en la cual  $v_{d,k-1}$  y  $v_{q,k-1}$  representan los componentes del vector de tensión de control en el instante k-1, expresadas

en una referencia ( $\vec{d}, \vec{q}$ ) móvil en tiempo discreto y ligada a la evolución libre  $\vec{\Phi}_k^0$  del flujo rotórico en la

máquina en el instante siguiente k, "a" es una constante,  $\|\vec{\Phi}_k^0\|$  corresponde al módulo de la evolución libre del flujo rotórico en el instante siguiente k,  $\Delta\Gamma_k$  y  $\Delta W_k$  representan respectivamente la separación entre el par electromagnético de la máquina a alcanzar en el instante de muestreo k siguiente y la componente de evolución libre de este par en este instante, y la separación entre la energía magnética consumida por la máquina en el instante k y la componente de evolución libre de esta energía en este instante.

5. Procedimiento de regulación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, **caracterizado por el hecho de que** la máquina (1) es de tipo síncrono de imanes permanentes montados en superficie.

6. Procedimiento de regulación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a, **caracterizado por el hecho de que** la máquina (1) es de tipo síncrono de polos lisos arrollados.

5 7. Procedimiento de regulación según la reivindicación 5 o la 6,

**caracterizado por el hecho de que** comprende la realización de una estrategia de baja velocidad cuando la máquina (1) gira a una velocidad inferior a un umbral predefinido, consistiendo esta estrategia en determinar la tensión de control a aplicar a la máquina para alcanzar en el instante de muestreo siguiente el par de consigna con una aportación de energía magnética nula.

10 8. Procedimiento de regulación según la reivindicación 7, **caracterizado por el hecho de que** la estrategia de baja velocidad consiste en aplicar la ley de control discreta siguiente:

$$\begin{bmatrix} v_{\tilde{d}} \\ v_{\tilde{q}} \end{bmatrix}_{k-1} = \begin{bmatrix} \frac{-I_{k,\tilde{d}}^0}{a} \\ \frac{\Delta\Gamma_k}{a\|\tilde{\Phi}_k^0\|} \end{bmatrix}$$

en la cual  $I_{k,\tilde{d}}^0$  es la componente de la evolución libre de la corriente estatórica, según el eje  $\tilde{d}$  de la referencia  $(\tilde{d}, \tilde{q})$  ligada a la evolución libre del flujo rotórico durante el periodo de muestreo entre los instantes de muestreo

15  $k-1$  y  $k$ , "a" es una constante,  $\|\tilde{\Phi}_k^0\|$  corresponde al módulo de la evolución libre del flujo rotórico en el instante siguiente  $k$ , y  $\Delta\Gamma_k$  representa la separación entre el par electromagnético de la máquina a alcanzar en el instante de muestreo  $k$  siguiente y la componente de evolución libre de este par en este instante.

9. Procedimiento de regulación según cualquiera de las reivindicaciones 5 a 8, **caracterizado por el hecho de que** comprende la realización de una estrategia de alta velocidad cuando la máquina (1) gira a una velocidad superior a un umbral predefinido, consistiendo esta estrategia en tener en cuenta limitaciones del ondulator (2), para determinar un valor de par de consigna intermedia que la máquina puede alcanzar en el instante de muestreo siguiente, con una energía magnética consumida determinada.

10. Procedimiento de regulación según la reivindicación 9,

25 **caracterizado por el hecho de que** la estrategia de alta velocidad comprende la resolución del sistema de ecuaciones siguiente:

$$\begin{aligned} (I_{k,\tilde{d}} - I_{k,\tilde{d}}^0)^2 + (I_{k,\tilde{q}} - I_{k,\tilde{q}}^0)^2 &= (a\|\tilde{V}_{s\max}\|)^2 \\ I_{k,\tilde{d}}^2 + I_{k,\tilde{q}}^2 &= \|\tilde{I}_{s\max}\|^2 \end{aligned}$$

en el cual  $I_{k,d}$  y  $I_{k,q}$  son los componentes de la corriente estatórica en la referencia  $(\tilde{d}, \tilde{q})$  en el instante  $k$ ,  $I_{k,\tilde{d}}^0$  y  $I_{k,\tilde{q}}^0$  son los componentes de la evolución libre de la corriente estatórica en esta referencia en el mismo instante,  $\|\tilde{V}_{s\max}\|$  y  $\|\tilde{I}_{s\max}\|$  son respectivamente los módulos de la tensión máxima y de la corriente máxima en el estator, y "a" una constante, obteniéndose la tensión de control con ayuda de la ecuación siguiente:

$$\begin{bmatrix} v_{\tilde{d}} \\ v_{\tilde{q}} \end{bmatrix}_{k-1} = \begin{bmatrix} \frac{I_{k,\tilde{d}} - I_{k,\tilde{d}}^0}{a} \\ \frac{I_{k,\tilde{q}} - I_{k,\tilde{q}}^0}{a} \end{bmatrix}.$$

- 5 **11.** Dispositivo de regulación de una máquina giratoria, que comprende un ondulator, un regulador que recibe en la entrada un valor de consigna de par electromagnético y al menos una señal muestreada representativa del par electromagnético de la máquina y que suministra al ondulator una orden adaptada para establecer el par electromagnético de la máquina en el valor de consigna de par ( $\Gamma^*$ ), por predicción, en cada instante de muestreo, del valor de par electromagnético en el instante de muestreo siguiente y modificación consecutiva de la orden, **caracterizado por el hecho de que** el regulador comprende:

- una ley de control discreta de la máquina, almacenada en memoria, suministrando esta ley de control la tensión de control discreta ( $V_{s,k-1}$ ) a aplicar en cada instante de muestreo (k), que se determina en la forma:

$$\vec{V}_{s,k-1} = \vec{f}(\Delta\Gamma_k, \Delta W_k)$$

- 10 en la cual f es una función que da la tensión de control a aplicar en el instante de muestreo k-1 para alcanzar los valores de consigna de par y energía, en función de las variables  $\Delta\Gamma_k$  y  $\Delta W_k$  que representan respectivamente la separación entre el par electromagnético de la máquina a alcanzar ( $\Gamma_k^0$ ) en el
- 15 instante de muestreo k siguiente y la componente de evolución libre ( $\Gamma_k^*$ ) de este par en ausencia de control en este instante, y la separación entre la energía magnética ( $W_k$ ) consumida por la máquina en el
- instante k y la componente de evolución libre de ( $W_k^0$ ) esta energía en ausencia de control en este instante, y
- 20 - medios para determinar en cada instante de muestreo, con ayuda de la ley de control discreta, la tensión de control ( $V_{s,k-1}$ ) a aplicar a la máquina para que el par electromagnético de la máquina alcance el par de consigna ( $\Gamma^*$ ), y la energía magnética consumida por la máquina corresponde a un valor de consigna de energía ( $W^*$ ).

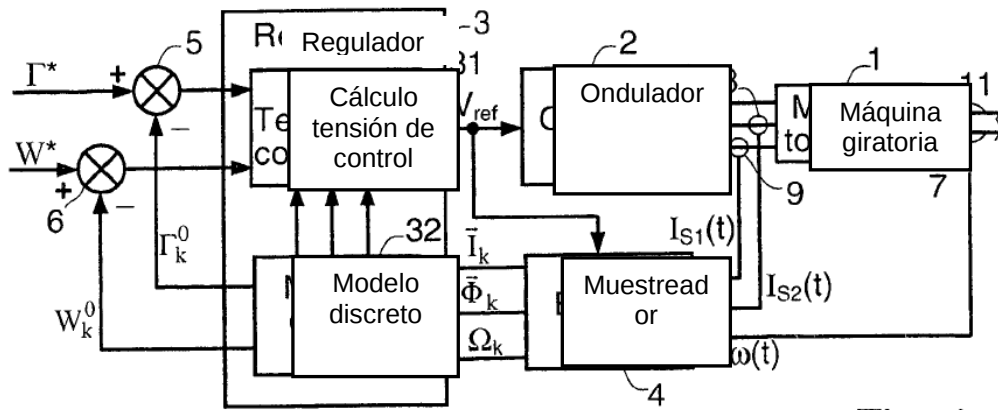


Fig. 1

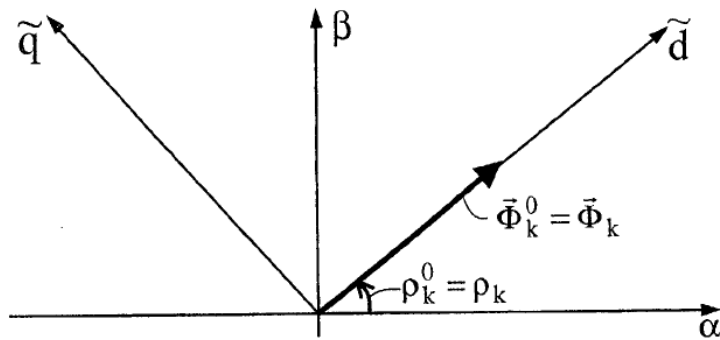


Fig. 2

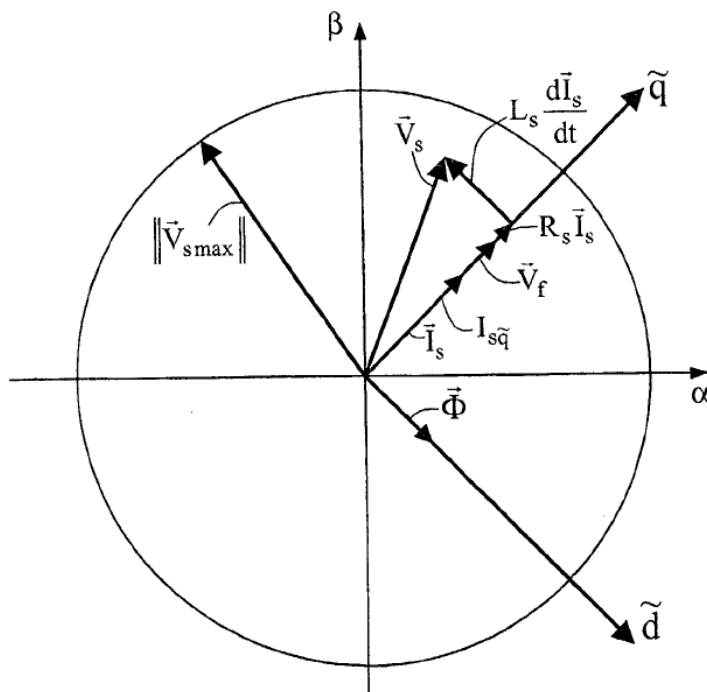


Fig. 3

( Par (Nm)

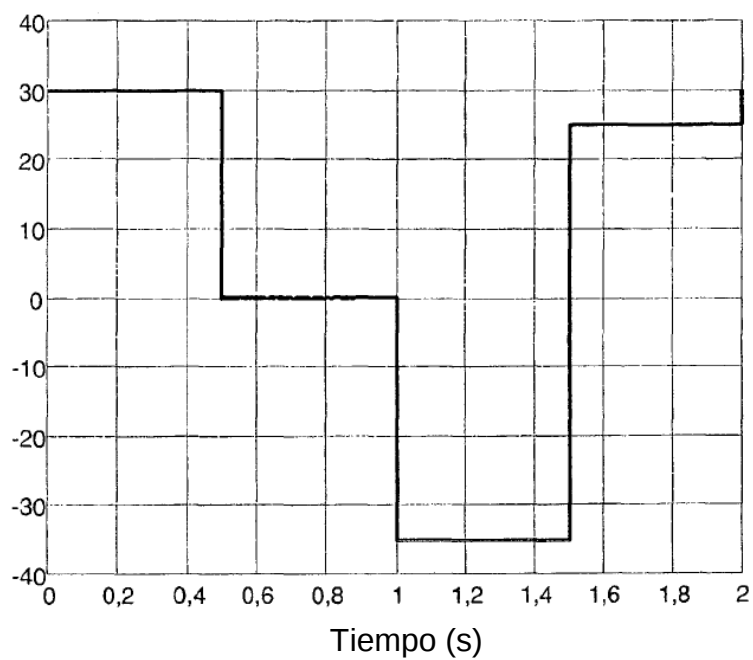


Fig. 4

Par (Nm)

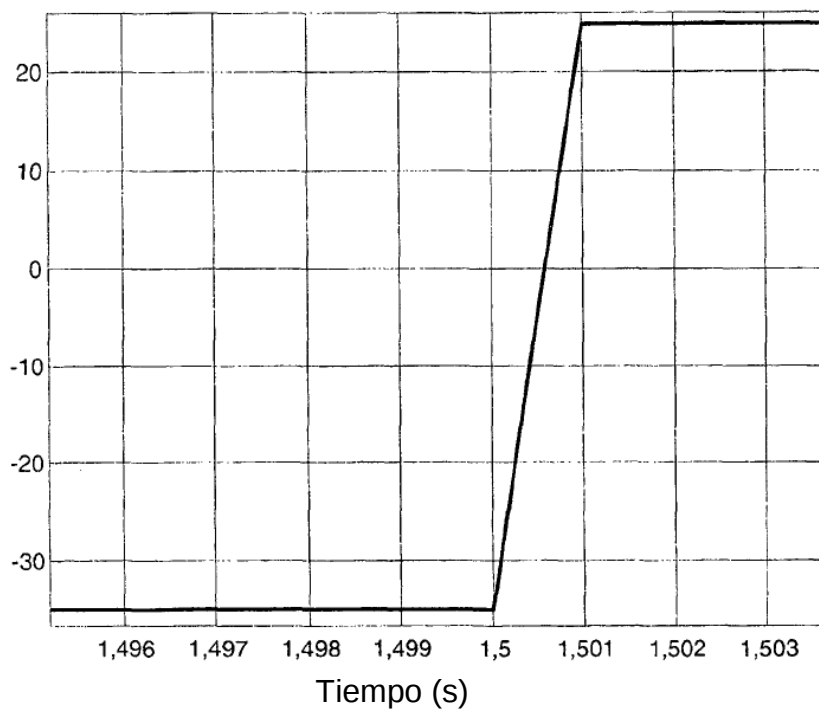


Fig. 5

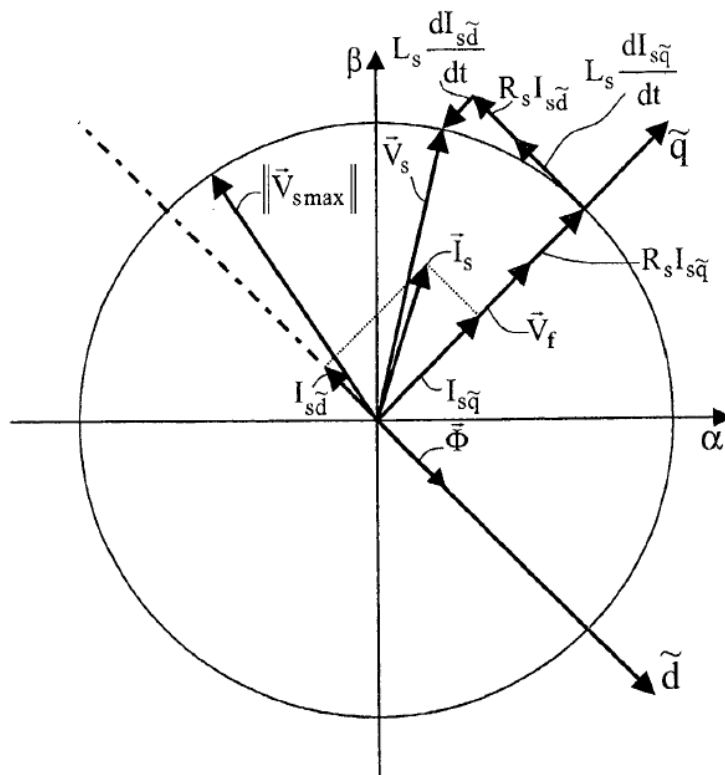


Fig. 6

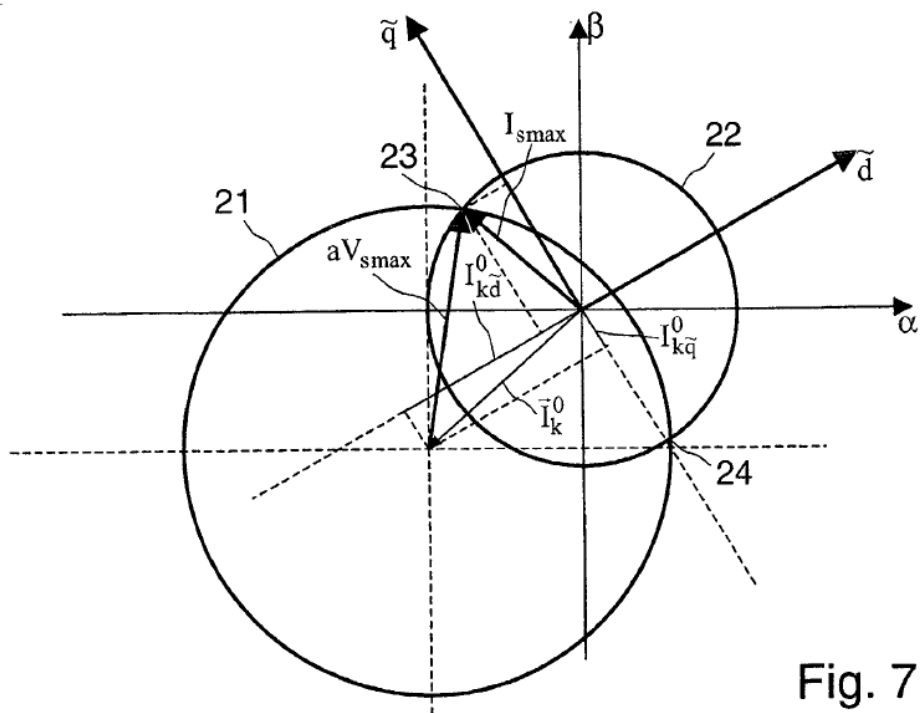
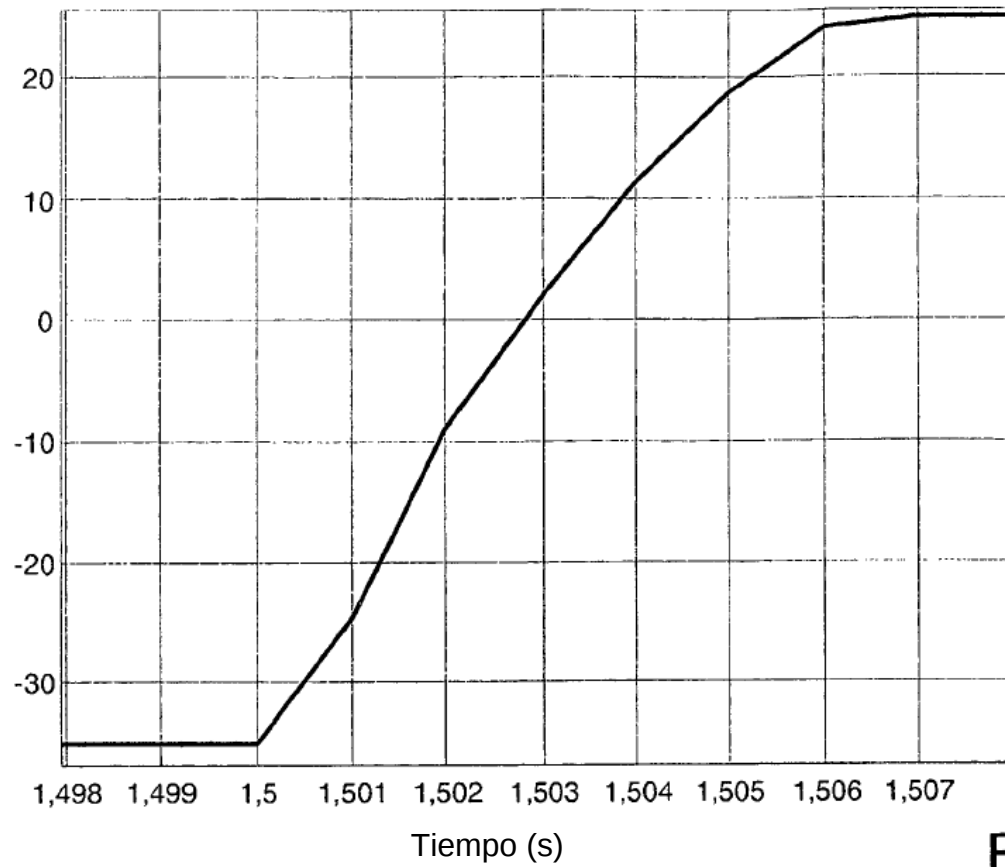


Fig. 7

**Par (Nm)**



**Fig. 8**