

(12) FASCÍCULO DE PATENTE DE INVENÇÃO

(22) Data de pedido: 2000.03.30	(73) Titular(es): ALSTOM	
(30) Prioridade(s): 1999.04.13 FR 9904602	3 AVENUE ANDRÉ MALRAUX 92300	
(43) Data de publicação do pedido: 2000.10.18	LEVALLOIS-PERRET	FR
(45) Data e BPI da concessão: 2008.04.23 148/2008	(72) Inventor(es): JEAN-LUC THOMAS SERGE POUILLAIN	FR FR
	(74) Mandatário: LUÍS MANUEL DE ALMADA DA SILVA CARVALHO RUA VÍCTOR CORDON, 14 1249-103 LISBOA	PT

(54) Epígrafe: **PROCEDIMENTO PARA REGULAÇÃO DUMA MÁQUINA ROTATIVA E DISPOSITIVO PARA ALIMENTAÇÃO DUMA MÁQUINA DESTAS**

(57) Resumo:

RESUMO**"PROCEDIMENTO PARA REGULAÇÃO DUMA MÁQUINA ROTATIVA E
DISPOSITIVO PARA ALIMENTAÇÃO DUMA MÁQUINA DESTAS"**

Neste procedimento para regulação duma máquina rotativa (12) alimentada por um ondulador de tensão (14) que recebe, como entrada, uma tensão de comando (V_{ref}) enviada por um regulador (16) de maneira a submeter o binário electromagnético a um valor de consigne (C^*), o regulador recebe, como entrada, o valor de consigne e pelo menos um sinal aferido

$$(\vec{I}_k, \vec{\phi}_k, \omega_k)$$

representativo do binário da máquina e realiza, em cada momento de aferição, uma previsão do valor do binário para um momento de aferição seguinte e uma consequente modificação da tensão de comando (V_{ref}). A submissão do binário integra as etapas de cálculo preliminar dum modelo discreto da máquina (12) e do ondulador (14) estabelecendo a variação do binário entre dois momentos de aferição, sob a forma dum primeiro termo correspondente à evolução livre do sistema na ausência de tensão de comando, e dum termo que corresponde à evolução do sistema sob a acção do sinal de comando, e modificação da tensão de comando (V_{ref}) de maneira a fazer variar o

binário electromagnético segundo um valor que corresponde à evolução livre do binário em direcção ao valor de consigne (C^*).

DESCRIÇÃO**"PROCEDIMENTO PARA REGULAÇÃO DUMA MÁQUINA ROTATIVA E
DISPOSITIVO PARA ALIMENTAÇÃO DUMA MÁQUINA DESTAS"**

A presente invenção diz respeito a um procedimento para regulação duma máquina rotativa, em particular uma máquina rotativa assíncrona. A invenção refere-se igualmente a um dispositivo de alimentação duma máquina destas.

Mais precisamente, a invenção diz respeito a um procedimento para regulação capaz de submeter o binário electromagnético da máquina, e eventualmente o fluxo magnético (do rotor ou do estator) desta última, a correspondentes valores de consigne.

De facto, o comando da velocidade duma máquina assíncrona é geralmente realizado pela regulação do comando do binário electromagnético da máquina.

Com esta finalidade, as máquinas rotativas assíncronas estão geralmente equipadas com um regulador que recebe, como entrada, um determinado valor de consigne de binário electromagnético e um ou mais sinais aferidos representativos do binário electromagnético da máquina, elaborados a partir duma medição da corrente do estator.

Para submeter o binário electromagnético da máquina ao valor de consigne de binário, o regulador procede, em cada momento da aferição, a uma previsão do valor do binário para o momento da aferição seguinte, e modifica consequentemente a tensão de comando.

Uma das principais preocupações para a maior parte das aplicações industriais consiste em aumentar as performances dinâmicas desses reguladores, e em particular aumentar a dinâmica de binário.

Para que o sistema possua uma boa dinâmica de binário, torna-se necessário dispor duma elevada frequência de corte do ondulator perante a dinâmica que se deseja obter, sem o que a compensação será mal efectuada e as performances pioram. Em particular, diminui-se o rendimento do ondulator e do motor e aumentam as perdas a dissipar.

Uma solução para este problema consiste em dotar o sistema com componentes electrónicos de baixa perda. Uma tal solução é contudo inaceitável, na medida em que ela contribui para aumentar consideravelmente o custo do dispositivo para alimentação da máquina.

O objectivo da invenção consiste em atenuar os atrás citados inconvenientes.

Ela tem portanto por objecto um procedimento para regulação duma máquina rotativa alimentada por um ondulator

de tensão que recebe, como entrada, uma tensão discreta de comando enviada por um regulador de maneira a submeter o binário electromagnético da máquina a um determinado valor de consigne de binário, e em que o regulador recebe, como entrada, o dito valor de consigne e pelo menos um sinal aferido, representativo do binário electromagnético da máquina, e realiza, em cada momento de aferição, uma previsão do valor do binário para um momento de aferição seguinte e uma consequente modificação da tensão de comando; o procedimento é caracterizado por a submissão do binário electromagnético integrar as etapas seguintes:

- cálculo preliminar dum modelo discreto do conjunto constituído pela máquina e pelo ondulator, estabelecendo a variação do binário electromagnético entre dois momentos de aferição, sob a forma dum primeiro termo correspondente à evolução livre do sistema a partir dum estado que corresponde ao momento de aferição, e na ausência tensão de comando, e dum termo que corresponde à evolução do sistema sob a acção do sinal de comando; e
- modificação da tensão de comando de maneira a fazer variar o binário electromagnético da máquina segundo um valor que corresponde à evolução livre do binário em direcção ao valor consignado para o binário.

Nestas circunstâncias, as melhorias das performances dinâmicas são devidas à utilização dum regulador aperfeiçoado, o que é menos dispendioso do que

prever a existência de componentes electrotécnicos com melhores performances.

Por outro lado, o procedimento para regulação de acordo com a invenção pode integrar uma ou mais das seguintes características, que tanto podem ser consideradas isoladamente como em conformidade com todas as combinações tecnicamente possíveis:

- durante a submissão do binário ao valor de consigne, o fluxo magnético da máquina é submetido a um valor de consigne de fluxo recebido à entrada do regulador, ao fazer variar a tensão de comando de maneira a modificar o fluxo magnético segundo um valor que corresponde à evolução livre do fluxo magnético em direcção ao valor de consigne de fluxo;
- a modificação da tensão de comando é realizada, em cada momento de aferição, de maneira a obter os valores de consigne de binário e de consigne de fluxo no momento de aferição seguinte;
- a etapa de modelização do sistema consiste em discretizar as equações de estado do sistema seguinte:

$$\dot{X} = [A(\omega)]X + [B]V_{ref} ,$$

$$Y = h(X)$$

para as quais:

$\mathbf{X}$ e $\mathbf{Y}$ representam respectivamente vectores de estado e de saída da máquina,

$[\mathbf{A}(\omega)]$ representa uma matriz de estado da máquina, que vai evoluindo em função da velocidade ω da máquina,

$[\mathbf{B}]$ representa uma matriz de entrada do sistema,

h representa uma função de saída do sistema, e

V_{ref} representa a tensão de comando;

e em elaborar as características ΔC e $\Delta \phi$ representativas da variação do binário e do fluxo que se irá obter entre, por um lado, a evolução livre durante o período de aferição e, por outro lado, o momento de aferição seguinte, a partir da modelização discretizada do sistema, definida segundo as equações seguintes,

$$\Delta C = \left(\bar{\Psi}_{k+1}^{\circ} \Lambda \bar{V}_{ref} \right) - (ad + bc) \left\| \bar{V}_{ref} \right\|^2$$

e

$$\Delta \phi = 2b \langle \bar{\phi}_{k+1}^{\circ}, \bar{V}_{ref} \rangle - 2d \left(\bar{\phi}_{k+1}^{\circ} \Lambda \bar{V}_{ref} \right) + (b^2 + d^2) \left\| \bar{V}_{ref} \right\|^2,$$

nas quais,

$$\bar{\Psi}_{k+1}^{\circ} = \begin{bmatrix} a & -c \\ +c & a \end{bmatrix} \bar{\phi}_{k+1}^{\circ} - \begin{bmatrix} b & d \\ -d & b \end{bmatrix} \bar{I}_{k+1}^{\circ}$$

a , b , c , d representam coeficientes da matriz de entrada discretizada do sistema,

$\bar{I}_{k+1}^{\circ}$ designa a evolução livre prevista para o vector de corrente magnética da máquina, durante o período de aferição,

$\bar{\phi}_{k+1}^{\circ}$ designa a evolução livre prevista para o

vector de fluxo magnético da máquina durante o período de aferição, e $\|\vec{V}_{ref}\|^2$ designa o módulo da tensão de comando elevado ao quadrado;

sendo o regulador elaborado de maneira a determinar o valor da tensão de comando a ser aplicada na entrada do ondulador, de modo a obter as variações de fluxo e de binário ΔC e $\Delta \phi$.

- a tensão de comando aplicada na entrada do ondulador é constituída pela tensão que corresponde a uma energia eléctrica mínima entre as tensões de referência, satisfazendo às equações que definem as ditas características representativas da variação do binário e do fluxo.

A invenção tem igualmente por objecto um dispositivo para alimentação duma máquina rotativa, constituído por um ondulador de tensão alimentado por uma determinada tensão de alimentação, um regulador recebendo, como entrada, um certo valor de consigne de binário electromagnético e pelo menos um sinal aferido que seja representativo do binário electromagnético da máquina e que envia, para o ondulador, uma tensão de comando adaptada para submeter o binário electromagnético da máquina segundo um valor de consigne de binário, mediante a previsão, realizada em cada momento de aferição, do valor de binário electromagnético no momento de aferição seguinte, e consequente modificação da tensão de comando; o dispositivo é caracterizado por o regulador comportar, armazenado em

memória, um modelo discreto do sistema constituído pela máquina e pelo ondulator, sob a forma dum termo que corresponde à evolução livre do sistema na ausência de tensão de comando, e dum termo que corresponde à evolução do sistema sob a acção do sinal de comando, entre dois momentos de aferição; o dispositivo é caracterizado por ele ainda comportar meios para geração duma tensão de comando adaptada para fazer variar o binário electromagnético segundo um valor que corresponde à evolução livre do binário em direcção ao valor de consigne de binário.

Haverá vantagem em que o regulador receba, como entrada, um valor de consigne de fluxo magnético e um sinal aferido representativo do valor do fluxo magnético da máquina, e disponha de meios para gerar uma tensão de comando adaptada para modificar o fluxo magnético da máquina segundo um valor que corresponda à evolução livre do fluxo magnético em direcção ao valor de consigne de fluxo.

Preferencialmente, os meios para gerar a tensão de comando serão adaptados para gerar a tensão de comando, em cada momento de aferição, de maneira a obter, aquando do momento de aferição seguinte, os ditos valores de consigne de binário e de fluxo.

Outras características e vantagens tornar-se-ão perceptíveis a partir da descrição seguinte, exclusivamente dada a título de exemplo, e que foi feita tomando como

referência os desenhos anexos, para os quais:

a Figura 1 representa um esquema sinóptico ilustrando a constituição dum dispositivo de alimentação duma máquina rotativa em conformidade com a invenção;

a Figura 2 mostra curvas que ilustram o método de determinação da tensão de comando; e

a Figura 3 mostra linhas que permitem a determinação da tensão de comando, com a utilização de aproximações que se justificam no caso duma reduzida velocidade.

Na Figura 1, está representado um dispositivo de alimentação **10** duma máquina rotativa **12**.

Na mesma Figura, a máquina rotativa **12** foi esquematizada sob a forma dum motor trifásico constituído, a título de exemplo, pelo motor de tracção duma máquina ferroviária eléctrica, dum robô ou duma máquina ferramenta.

O dispositivo de alimentação **10** comporta, como é habitual, um ondulador de tensão **14** que alimenta o motor **12** com corrente alterna, estando este ondulador **14** ligado a uma fonte de alimentação em corrente contínua, por exemplo com uma tensão da ordem dos 1500 a 3000 Volts para uma aplicação no domínio ferroviário.

Refira-se que, ao passo que a máquina rotativa **12** pode ser considerada como um sistema contínuo e linear, o

ondulador **14** constitui um sistema discreto e não linear.

O ondulador **14** é comandado por um regulador **16**. Este regulador **16** envia para o ondulador **14** uma tensão de comando V_{ref} elaborada de maneira a submeter o binário electromagnético, e eventualmente o fluxo magnético da máquina **12**, a valores de consigne de binário electromagnético c^* e de fluxo magnético $\|\vec{\phi}^*\|^2$ que correspondem respectivamente aos valores de binário electromagnético e de fluxo magnético a obter.

Como se observa na Figura 1, o regulador **16** recebe igualmente, como entrada, um ou mais sinais aferidos $\vec{I}_k, \vec{\phi}_k, \omega_k$, correspondendo respectivamente ao vector da corrente do estator, ao vector do fluxo magnético e à velocidade mecânica do rotor da máquina **12**, sendo estes sinais representativos do binário electromagnético da máquina e sendo elaborados por um observador **18** a partir de sinais medidos em contínuo $I_{s1}(t)$, $I_{s2}(t)$ e $\omega(t)$ que correspondem, respectivamente, a correntes estatóricas de fase e a um sinal de medição da velocidade mecânica do rotor, enviados por receptores apropriados que equipam a máquina **12**.

Como é habitual, para submeter o binário electromagnético e o fluxo magnético da máquina **12** aos valores de consigne c^* e $\|\vec{\phi}^*\|^2$ recebidos como entrada, o regulador **16** promove, com a ajuda de meios de software

armazenados em memória e em cada momento de aferição, uma previsão dos valores de binário electromagnético e de fluxo do rotor para o momento de aferição seguinte, e modifica em conformidade a tensão de comando V_{ref} , de maneira a obter os valores de binário e de fluxo impostos pelos consignes.

Refira-se que, de preferência, o regulador **16** será constituído por um regulador do tipo “resposta súbita”, ou seja, ele modifica a tensão de comando V_{ref} de maneira a tomar em consideração os valores de consigne aquando do momento de aferição seguinte.

Para que isso aconteça, o regulador **16** comporta um primeiro escalão **20** no qual se armazena, em memória, um modelo discreto do sistema constituído pela máquina rotativa **12** e pelo ondulador **14**, de maneira a calcular a evolução do sistema entre dois momentos de aferição, e um segundo escalão **22** para cálculo da tensão de comando V_{ref} que irá ser aplicada como entrada no ondulador **14**, em função da evolução prevista para o sistema pelo primeiro escalão e dos sinais de consigne C^* e $\|\vec{\phi}^*\|^2$ que se apresentam como entrada do segundo escalão.

No seguimento da descrição, vai-se começar por descrever o método de cálculo do modelo discreto do sistema constituído pela máquina rotativa **12** e pelo ondulador **14**, descrevendo-se depois o método de cálculo da tensão de comando V_{ref} .

Como foi anteriormente mencionado, a máquina rotativa **12** é constituída por um sistema algébrico-diferencial definido em tempo contínuo, ao passo que o ondulator de tensão **14** é constituído por um sistema não linear.

O sistema constituído pelo ondulator e pela máquina pode ser definido pelas seguintes equações de estado:

$$\dot{X} = [A(\omega)]X + [B]V_{ref} \quad (1)$$

$$Y = h(X) \quad (2)$$

Nas quais,

- **X** e $\dot{X}$ designam respectivamente o vector de estado e a derivada do vector de estado da máquina, definidos pelas componentes medidas da corrente do estator da máquina e pelas componentes de fluxo magnético da máquina, representadas num referencial com duas dimensões α, β , que está fixo relativamente ao estator,

onde **X** se escreve da forma seguinte, ao representar o estado magnético da máquina pelo fluxo do rotor:

$$X = \begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \\ \phi_{r\alpha} \\ \phi_{r\beta} \end{bmatrix}$$

- **[A]** representa uma matriz de estado da máquina, que evolui em função da velocidade ω da máquina e se

escreve da seguinte forma:

$$[A] = \begin{bmatrix} -\gamma & \mathbf{0} & \alpha\beta & \beta\omega \\ \mathbf{0} & -\gamma & -\beta\omega & \alpha\beta \\ \alpha L_m & \mathbf{0} & -\alpha & -\omega \\ \mathbf{0} & \alpha L_m & \omega & -\alpha \end{bmatrix}$$

- $[B]$ representa uma matriz de entrada do sistema e escreve-se da seguinte forma:

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \frac{1}{\sigma L_s} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

- $\mathbf{V}_{ref}$ está representada no referencial com duas dimensões α , β fixado no estator e tem como componentes:

$$\mathbf{V}_{ref} = \begin{bmatrix} V_{ref\alpha} \\ V_{ref\beta} \end{bmatrix}$$

e $\mathbf{h}$ representa uma função de saída do sistema,

$$\text{com } \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}, \gamma = \frac{R_{sr}}{\sigma L_s}, \beta = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}, \alpha = \frac{R_r}{L_r}$$

$$\text{e com } R_{sr} = R_s + R_r \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2$$

onde R_s designa a resistência do estator, R_r a resistência do rotor, L_m designa a indutância mútua, L_s designa a indutância do estator, e sendo L_r a indutância do rotor.

Da mesma maneira, o vector de saída **Y** - tendo como componentes o fluxo do rotor e o binário electromagnético, e sendo definido de acordo com a equação (2) atrás referida - escreve-se da seguinte forma:

$$Y = \begin{bmatrix} \|\vec{\phi}_r\|^2 \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{r\alpha}^2 + \phi_{r\beta}^2 \\ p \frac{Lm}{Lr} (\phi_{r\alpha} I_{s\beta} - \phi_{r\beta} I_{s\alpha}) \end{bmatrix}$$

na qual **p** representa o número de pares de pólos.

É de referir, no que atrás foi dito, que a tensão de comando **V_{ref}** pode ser considerada como constante entre dois períodos de aferição. Por essa razão, o primeiro escalão **20** do regulador **16** é capaz de proceder directamente a uma discretização das equações de estado mencionadas anteriormente, a partir das equações seguintes:

$$X_{k+1} = [F(\omega_k)]X_k + [G]V_{ref} \quad (3)$$

$$Y_K = h(X_K), \quad (4)$$

com:

$$[F] = e^{[A]T},$$

e

$$[G] = [A]^{-1} [e^{[A]T} - I][B]$$

nas quais:

X_{k+1} designa o vector de estado discretizado no momento **(k+1)T**;

X_k e **V_{ref}** designam respectivamente o vector de estado do sistema e a tensão de comando no momento **kT**;

$\mathbf{I}$ designa a matriz identidade;

$[\mathbf{F}(\omega_K)]$ designa a matriz de estado discretizada,

$[\mathbf{G}]$ é a matriz de entrada discretizada e

$\mathbf{h}$ é a função de saída discretizada.

Deve-se referir que as equações (3) e (4) atrás apresentadas, que permitem a discretização do sistema, tomam igualmente em conta a natureza discreta do ondulator, na medida em que, como anteriormente mencionado, este último envia uma tensão média constante durante um período de aferição.

Se bem que o ondulator envie uma tensão cujo valor médio é constante durante um período de aferição, é evidente que a frequência de corte do ondulator poderá ser superior à frequência de aferição. Do mesmo modo que a tensão enviada pelo ondulator permite a regulação do binário e do fluxo da máquina rotativa 12, torna-se possível actuar sobre a frequência e a duração dos patamares de tensão enviada pelo ondulator, em cada período de aferição, ao mesmo tempo que se conserva um valor médio constante, por exemplo de maneira a respeitar um conteúdo harmónico no período de aferição.

O vector de estado $\mathbf{X}$ tem como componentes os previstos vector de fluxo da corrente do estator e o vector de fluxo do rotor da máquina, expressos num referencial com duas dimensões que está fixo relativamente ao estator, e que consequentemente se exprime pela equação seguinte:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{k+1} \\ \bar{\phi}_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_k \\ \bar{\phi}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 + G_3 \\ G_2 + G_4 \end{bmatrix} \bar{V}_{ref} \quad (5)$$

ou ainda:

$$\bar{I}_{k+1} = [F_{11}] \bar{I}_k + [F_{12}] \bar{\phi}_k + [G_1] \bar{V}_{ref} + [G_3] \bar{V}_{ref}$$

$$\bar{\phi}_{k+1} = [F_{21}] \bar{I}_k + [F_{22}] \bar{\phi}_k + [G_2] \bar{V}_{ref} + [G_4] \bar{V}_{ref}$$

com:

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

$$[G_2] = \begin{bmatrix} b & 0 \\ 0 & b \end{bmatrix},$$

$$[G_3] = \begin{bmatrix} 0 & +c \\ -c & 0 \end{bmatrix},$$

$$[G_4] = \begin{bmatrix} 0 & -d \\ +d & 0 \end{bmatrix},$$

Nestas circunstâncias, o vector de estado previsto para o primeiro escalão **20** do regulador **16**, tendo como componentes o valor previsto para o vector de corrente do estator $\bar{I}_{k+1}$ e o valor previsto para o vector de fluxo do rotor $\bar{\phi}_{k+1}$ no momento **(k+1)T**, comporta um primeiro termo que depende unicamente da tensão de comando $\bar{V}_{ref}$ a ser aplicada no ondulador **14** e um segundo termo que apenas depende do momento de início **kT**, correspondendo à evolução livre do sistema entre dois momentos de aferição, na

ausência de tensão de comando aplicada.

Consequentemente, a corrente do estator e o fluxo do rotor previstos podem-se exprimir sob a forma

$$\vec{I}_{k+1} = \vec{I}_{k+1}^0 + [G_1] \vec{V}_{ref} + [G_3] \vec{V}_{ref} \quad (6);$$

e

$$\vec{\phi}_{k+1} = \vec{\phi}_{k+1}^0 + [G_2] \vec{V}_{ref} + [G_4] \vec{V}_{ref} \quad (7)$$

para os quais $\vec{I}_{k+1}^0$ e $\vec{\phi}_{k+1}^0$ designam respectivamente a evolução livre da corrente do estator e a evolução livre do fluxo do rotor a partir do momento kT , entre dois períodos de aferição.

As equações que acabam de ser descritas permitem, na maneira como foram concebidas, prever o estado do sistema no momento $(k+1)T$, a partir da tensão de comando V_{ref} conduzindo o ondulator **14** e do estado do sistema no momento kT , considerando a velocidade da máquina rotativa como constante, parâmetro que evolui lentamente.

Refira-se no entanto que estas equações, as quais definem o valor da corrente do estator e do fluxo do rotor no momento $(k+1)T$, não permitem submeter directamente o binário electromagnético e o fluxo do rotor aos valores de consigne impostos.

Contudo, tais equações possibilitam que o primeiro escalão **20** calcule o valor previsto para o binário C_{k+1} , que corresponde ao valor do binário electromagnético

no momento de aferição seguinte, com a ajuda da seguinte equação:

$$C_{k+1} = K(\vec{\phi}_{k+1} \Lambda \vec{I}_{k+1}) \quad (8)$$

na qual **K** designa um termo que depende unicamente dos parâmetros da máquina **12**.

De igual modo, o módulo do fluxo do rotor previsto irá satisfazer a seguinte equação:

$$\|\vec{\phi}_{k+1}\|^2 = \langle \vec{\phi}_{k+1}, \vec{\phi}_{k+1} \rangle \quad (9)$$

Quando se substituem as grandezas previstas para a corrente e o fluxo nas equações **(8)** e **(9)** precedentes, obtém-se:

$$C_{k+1} = C_{k+1}^0 + K(\vec{\Psi}_{k+1}^0 \Lambda \vec{V}_{ref}) - K(ad + bc) \|\vec{V}_{ref}\|^2 \quad (10)$$

com:

$$\vec{\Psi}_{k+1}^0 = \begin{bmatrix} a & -c \\ +c & a \end{bmatrix} \vec{\phi}_{k+1}^0 - \begin{bmatrix} b & d \\ -d & b \end{bmatrix} \vec{I}_{k+1}^0$$

também o módulo do fluxo do rotor previsto irá satisfazer à seguinte equação:

$$\|\vec{\phi}_{k+1}\|^2 = \|\vec{\phi}_{k+1}^0\|^2 + 2b \langle \vec{\phi}_{k+1}^0, \vec{V}_{ref} \rangle - 2d(\vec{\phi}_{k+1}^0 \Lambda \vec{V}_{ref}) + (b^2 + d^2) \|\vec{V}_{ref}\|^2 \quad (11)$$

É portanto concebível que, a partir da modelização do sistema constituído pela máquina rotativa **12** e pelo ondulator de tensão **14** memorizada no primeiro escalão **20** do regulador **16**, este último estará apto a

determinar, em cada momento de aferição **kT**, a previsão do valor do binário electromagnético e do fluxo do rotor da máquina rotativa **12**, no momento de aferição seguinte **(k+1)T**.

Estes valores previstos C_{k+1} e $\|\vec{\phi}_{k+1}\|^2$ comportam um primeiro termo que corresponde à evolução livre do sistema C_{k+1}^0 e $\|\vec{\phi}_{k+1}^0\|^2$ a partir do valor de binário electromagnético e de fluxo do rotor no momento **kT**, na ausência de tensão de comando V_{ref} , e um segundo termo dependente da tensão de comando V_{ref} aplicada à entrada do ondulator de tensão **14**.

Refira-se que as evoluções livres C_{k+1}^0 e $\|\vec{\phi}_{k+1}^0\|^2$ podem ser determinadas de maneira relativamente precisa, na medida em que as características da máquina rotativa **12** e do ondulator **14** são rigorosamente conhecidas.

Por isso, para submeter o binário electromagnético e o fluxo aos correspondentes valores de consigne, será conveniente gerar simplesmente uma tensão de comando V_{ref} que permita modificar as características de funcionamento do motor **12**, de maneira a fazer evoluir o binário electromagnético e o fluxo do rotor, a partir do valor que corresponde respectivamente à evolução livre do binário e à evolução livre do fluxo e em direcção aos valores de consigne a obter.

Dito de outra maneira, será conveniente

determinar a tensão de comando $\mathbf{V}_{ref}$ que satisfaça às equações (10) e (11) atrás mencionadas.

Mais detalhadamente, será conveniente determinar a tensão de comando $\mathbf{V}_{ref}$ que satisfaça às equações que se seguem:

$$\Delta C = \left(\tilde{\Psi}_{k+1}^0 \Lambda \bar{V}_{ref} \right) - (ad + bc) \left\| \bar{V}_{ref} \right\|^2 \quad (12)$$

$$\Delta \phi = 2b \langle \tilde{\phi}_{k+1}^0, \bar{V}_{ref} \rangle - 2d \left(\tilde{\phi}_{k+1}^0 \Lambda \bar{V}_{ref} \right) + (b^2 + d^2) \left\| \bar{V}_{ref} \right\|^2 \quad (13)$$

com

$$\Delta C = \frac{1}{K} \left(C_{k+1} - C_{k+1}^0 \right)$$

e

$$\Delta \phi = \left\| \tilde{\phi}_{k+1} \right\|^2 - \left\| \tilde{\phi}_{k+1}^0 \right\|^2,$$

ou seja, segundo uma forma desenvolvida no referencial α, β com duas dimensões:

$$\Delta C = \Psi_{(k+1)\alpha}^0 V_\beta - \Psi_{(k+1)\beta}^0 V_\alpha - (ad + bc) \left(V_{ref\alpha}^2 + V_{ref\beta}^2 \right) \quad (14)$$

$$\Delta \phi = 2b \left[\phi_{(k+1)\alpha}^0 V_{ref\alpha} + \phi_{(k+1)\beta}^0 V_{ref\beta} \right] - 2d \left[\phi_{(k+1)\alpha}^0 V_{ref\beta} - \phi_{(k+1)\beta}^0 V_{ref\alpha} \right] + (b^2 + d^2) \left(V_{ref\alpha}^2 + V_{ref\beta}^2 \right) \quad (15)$$

Como pode ser observado na Figura 1, para proceder a este cálculo, o segundo escalão de cálculo 22 do regulador 16 recebe, proveniente do primeiro escalão 20, o valor da evolução livre da corrente do estator e do fluxo do rotor da máquina, bem como os componentes da matriz de

entrada discretizada $\mathbf{G}(\omega_K)$.

Consoante foi concebido, e ao fazer:

$$\lambda_1 = -(\mathbf{ad} + \mathbf{bc})$$

e

$$\bar{\mathbf{M}}_{(k+1)1}^0 = \begin{bmatrix} m_1 \alpha \\ m_1 \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \frac{1}{2\lambda_1} \\ -\frac{1}{2\lambda_1} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \bar{\Psi}_{k+1}^0,$$

obtém-se:

$$\left(V_{ref\alpha} - m_{1\alpha}\right)^2 + \left(V_{ref\beta} - m_{1\beta}\right)^2 = \frac{\Delta C}{\lambda_1} + \left\| \bar{\mathbf{M}}_{(k+1)1}^0 \right\|^2 \quad (16)$$

Da mesma maneira, ao fazer:

$$\lambda_2 = \mathbf{b}^2 + \mathbf{d}^2,$$

e

$$\bar{\mathbf{M}}_{(k+1)2}^0 = \begin{bmatrix} m_2 \alpha \\ m_2 \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-b}{\lambda_2} & \frac{-d}{\lambda_2} \\ \frac{d}{\lambda_2} & \frac{b}{\lambda_2} \end{bmatrix} \bar{\Phi}_{k+1}^0,$$

obtém-se, a partir da equação (15) anteriormente mencionada:

$$\left(V_{ref\alpha} - m_{2\alpha}\right)^2 + \left(V_{ref\beta} - m_{2\beta}\right)^2 = \frac{\Delta \phi}{\lambda_2} + \left\| \bar{\mathbf{M}}_{(k+1)2}^0 \right\|^2 \quad (17)$$

Nestas circunstâncias, e como se pode observar na Figura 2, a tensão de comando discreto exacta $\mathbf{V}_{ref}$, solução do sistema de equações (14) e (15), é constituída pela intersecção de dois círculos que correspondem respectivamente às equações (16) e (17) atrás mencionadas; mais concretamente, um primeiro círculo $\mathbf{C}_1$ com centro em

$M_1 = \begin{bmatrix} m_1 \alpha \\ m_1 \beta \end{bmatrix}$ e raio $R_1 = \sqrt{\frac{\Delta C}{\lambda_1} + \|\bar{M}_{(k+1)1}^0\|^2}$ e um círculo C_2 com centro em $M_2 = \begin{bmatrix} m_2 \alpha \\ m_2 \beta \end{bmatrix}$ e raio $R_2 = \sqrt{\frac{\Delta \phi}{\lambda_2} + \|\bar{M}_{(k+1)2}^0\|^2}$.

Refira-se que os centros M_1 e M_2 dos círculos C_1 e C_2 se deslocam respectivamente sobre a trajectória das evoluções livres $\bar{\Psi}_{k+1}^0$ e $\bar{\phi}_{k+1}^0$.

No caso dos círculos C_1 e C_2 se intersectarem em dois pontos distintos $\bar{V}_{ref1}$ e $\bar{V}_{ref2}$, o segundo escalão de cálculo **22** selecciona a tensão de referência V_{ref} que corresponde a uma energia eléctrica mínima.

Refira-se por outro lado que os coeficientes c e d da matriz de entrada discretizada $[G]$ dependem da velocidade mecânica ω e do período de aferição T elevados a potências de expoente 3 e superior. Como consequência, para uma reduzida velocidade mecânica ω , e uma vez que o período de aferição T é geralmente pequeno, estes coeficientes podem ser desprezados. Então, a equação (14) anteriormente mencionada pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\Delta C = \Psi_{(k+1)\alpha}^0 V_\beta - \Psi_{(k+1)\beta}^0 V_\alpha \quad (18)$$

Portanto, nesta situação, a tensão de comando V_{ref} a ser aplicada como entrada do ondulador **14** é constituída pela intersecção do círculo C_2 que corresponde à equação

(17) atrás mencionada com uma recta correspondente à equação (18).

De acordo com uma outra aproximação, pode-se desprezar o termo $\mathbf{b}^2$ já que o coeficiente $\mathbf{b}$ da matriz de entrada discretizada $[\mathbf{G}]$ depende do período de aferição elevado a uma potência com expoente pelo menos igual a dois.

Portanto, mantendo a aproximação atrás referida, ou seja com $\mathbf{c}$ e $\mathbf{d}$ nulos, equação (15) transforma-se em:

$$\Delta\phi = 2b[\phi_{(k+1)\alpha}^0 V_{ref\alpha} + \phi_{(k+1)\beta}^0 V_{ref\beta}] \quad (19)$$

Nesta situação, com estas aproximações e como é perceptível na Figura 3, a tensão de comando que satisfaz às equações (18) e (19) anteriores corresponde à intersecção de duas rectas $\mathbf{D}_1$ e $\mathbf{D}_2$ ilustrando a tensão de comando a ser aplicada para obter o binário electromagnético e o fluxo do rotor desejados, entre dois períodos de aferição, em função das componentes $\mathbf{V}_{ref\alpha}$ e $\mathbf{V}_{ref\beta}$ da tensão de referência, no referencial fixo em relação ao estator.

Nesta Figura 3, está representada a ponteado a solução exacta, ou seja a intersecção de dois círculos $\mathbf{C}'_1$ e $\mathbf{C}'_2$ - o qual se confunde em $\mathbf{D}_2$ - obtidos sem desprezar os termos $\mathbf{b}^2$, $\mathbf{c}$ e $\mathbf{d}$.

Percebe-se que as aproximações feitas para calcular a tensão de comando $\mathbf{V}_{ref}$ não provocam uma variação sensível nesta tensão para um gama de velocidades reduzidas.

Uma outra aproximação consiste em apenas desprezar os termos $(\mathbf{ad}+\mathbf{bc})$ e $(\mathbf{b}^2+\mathbf{d}^2)$ que dependam do período de aferição através duma potência com expoente pelo menos igual a 4.

Uma tal aproximação mantém-se válida para velocidades mais elevadas.

Nesta caso, a equação (15) transforma-se em:

$$\Delta\phi = 2b[\phi_{(k+1)\alpha}^0 V_{ref\alpha} + \phi_{(k+1)\beta}^0 V_{ref\beta}] - 2d[\phi_{(k+1)\alpha}^0 V_{ref\beta} - \phi_{(k+1)\beta}^0 V_{ref\alpha}] \quad (20)$$

A tensão de comando que satisfaça então às equações (18) e (20) corresponde igualmente à intersecção de duas rectas.

Consoante foi concebida, a invenção que acaba de ser descrita utilizando um regulador que comporta, armazenado em memória, um modelo discreto da máquina 12 e do ondulator 14, irá permitir, com o auxílio de algoritmos de cálculo apropriados, por um lado calcular os valores de binário e de fluxo a acrescentar à evolução livre do binário e do fluxo entre dois períodos de aferição e, por outro lado, gerar a tensão de comando $\mathbf{V}_{ref}$ que vai conduzir

o ondulador de maneira a obter os valores de consigne impostos.

Em termos práticos, e como é perceptível na Figura 1, o primeiro escalão fornece, ao borne inversor dos comparadores **24** e **26**, o valor das evoluções livres que são subtraídos aos valores de consigne correspondentes, e o segundo escalão gera, a partir da saída destes comparadores, a versão de comando **V_{ref}** .

Lisboa, 18 de Julho de 2008

REIVINDICAÇÕES

1. Procedimento para regulação duma máquina rotativa (12) alimentada por um ondulador de tensão (14) que recebe, como entrada, uma tensão discreta (V_{ref}) de comando fornecida por um regulador (16) de maneira a submeter o binário electromagnético da máquina a um valor de consigne de binário (C^*), e em que o regulador recebe, como entrada, o dito valor de consigne (C^*) e pelo menos um sinal aferido $(\vec{I}_k, \vec{\phi}_k, \omega_k)$ representativo do binário electromagnético da máquina e realiza, em cada momento de aferição, uma previsão do valor do binário para um momento de aferição seguinte e uma consequente modificação da tensão de comando (V_{ref}), **caracterizado por** a submissão do binário electromagnético integrar as etapas seguintes:

- cálculo preliminar dum modelo discreto do conjunto constituído pela máquina (12) e pelo ondulador (14), estabelecendo a variação do binário electromagnético entre dois momentos de aferição, sob a forma dum primeiro termo correspondente à evolução livre do sistema a partir dum estado que corresponde ao momento de aferição e na ausência de tensão de comando, e dum termo que corresponde à evolução do sistema sob a acção do sinal de comando ; e
- modificação da tensão de comando (V_{ref}) de maneira a fazer variar o binário electromagnético da máquina (12) segundo um valor que corresponde à evolução

livre do binário em direcção ao valor consignado para o binário.

2. Procedimento em conformidade com a reivindicação 1, **caracterizado por**, durante a submissão do binário ao valor de consigne (C^*), ser o fluxo magnético da máquina submetido a um valor de consigne de fluxo $\left(\|\vec{\phi}^*\|^2\right)$ recebido à entrada do regulador (16), actuando sobre a tensão de comando (V_{ref}) de maneira a fazer variar o fluxo magnético segundo um valor que corresponde à evolução livre do fluxo magnético em direcção ao valor de consigne de fluxo.

3. Procedimento em conformidade com a reivindicação 2, **caracterizado por** a modificação da tensão de comando ser efectuada, em cada momento de aferição, de maneira a obter os valores de consigne de binário e de consigne de fluxo no momento de aferição seguinte.

4. Procedimento em conformidade com a reivindicação 3, **caracterizado por** a etapa de modelização do sistema consistir em discretizar as equações de estado do sistema seguinte:

$$\dot{X} = [A(\omega)]X + [B]V_{ref} ,$$

e

$$Y = h(X)$$

para as quais:

X e Y representam respectivamente vectores de estado e de saída da máquina,

$[A(\omega)]$ representa uma matriz de estado da máquina, que vai evoluindo em função da velocidade ω da máquina,

$[B]$ representa uma matriz de entrada do sistema,

h representa uma função de saída do sistema, e

V_{ref} representa a tensão de comando;

e em elaborar características ΔC e $\Delta \phi$ representativas da variação do binário e do fluxo que se irá obter entre, por um lado, a evolução livre durante o período de aferição e, por outro lado, o momento de aferição seguinte, a partir da modelização discretizada do sistema, definida segundo as equações seguintes:

$$\Delta C = \left(\tilde{\Psi}_{k+1}^{\circ} \Lambda \vec{V}_{ref} \right) - (ad + bc) \left\| \vec{V}_{ref} \right\|^2$$

E

$$\Delta \phi = 2b < \vec{\phi}_{k+1}^{\circ}, \vec{V}_{ref} > - 2d \left(\vec{\phi}_{k+1}^{\circ} \Lambda \vec{V}_{ref} \right) + (b^2 + d^2) \left\| \vec{V}_{ref} \right\|^2,$$

nas quais,

$$\tilde{\Psi}_{k+1}^{\circ} = \begin{bmatrix} a & -c \\ +c & a \end{bmatrix} \vec{\phi}_{k+1}^{\circ} - \begin{bmatrix} b & d \\ -d & b \end{bmatrix} \vec{I}_{k+1}^{\circ}$$

a, b, c, d representam coeficientes da matriz de

entrada discretizada do sistema,

$\vec{I}_{k+1}^{\circ}$ designa a evolução livre prevista para o vector de corrente do estator durante o período de aferição,

$\vec{\phi}_{k+1}^{\circ}$ designa a evolução livre prevista para o vector de fluxo magnético da máquina durante o período de aferição, e

$\|\vec{V}_{ref}\|^2$ designa o módulo da tensão de comando elevado ao quadrado;

sendo o regulador elaborado de maneira a determinar o valor da tensão de comando a ser aplicada na entrada do ondulator, de modo a obter as variações de fluxo e de binário ΔC e $\Delta \phi$.

5. Procedimento em conformidade com a reivindicação 4, **caracterizado por** a tensão de comando aplicada na entrada do ondulator (14) ser constituída pela tensão que corresponde a uma energia eléctrica mínima entre as tensões de referência que satisfaçam às equações que definem as ditas características representativas da variação do binário e do fluxo.

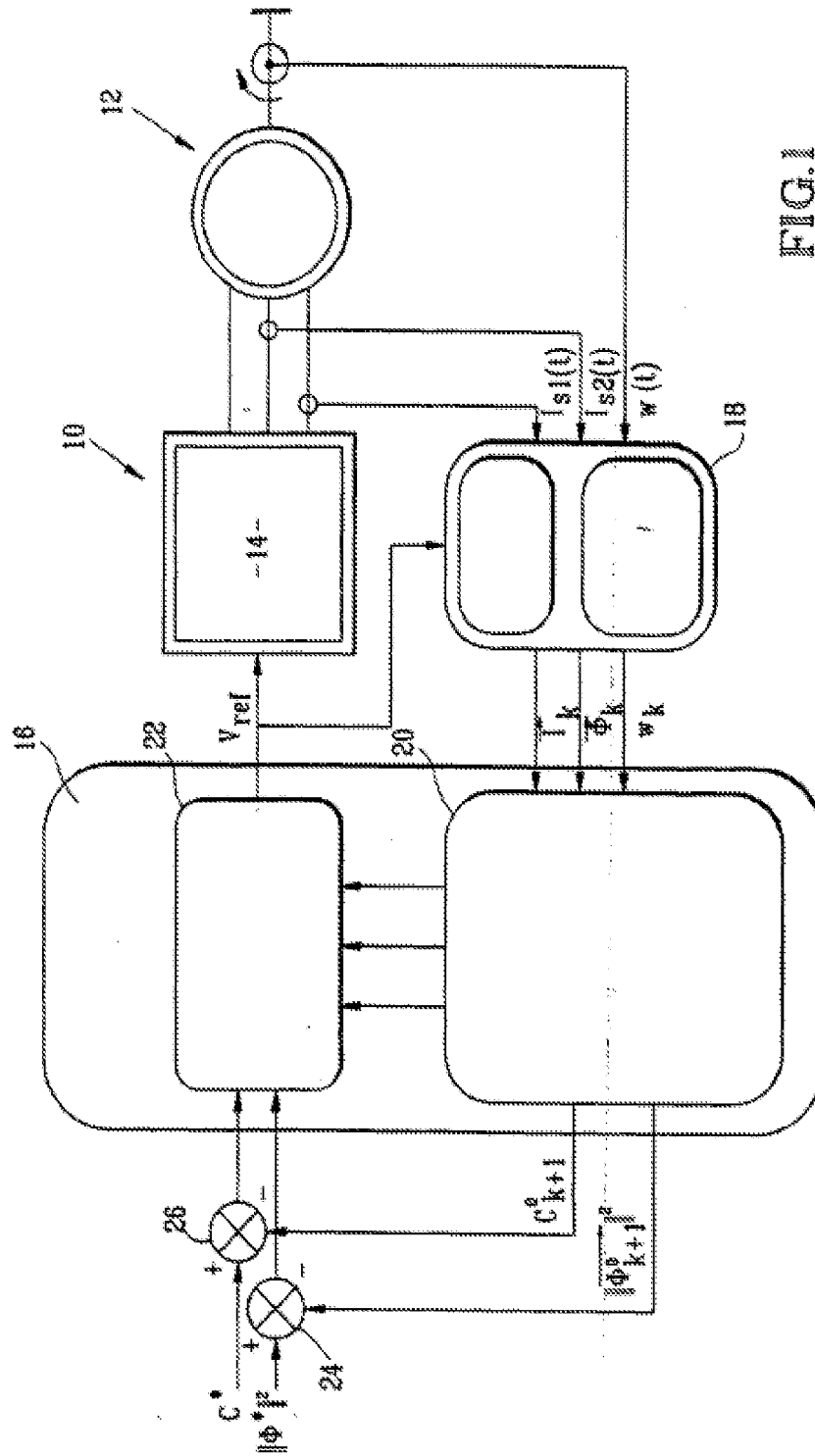
6. Dispositivo para alimentação duma máquina rotativa (12) integrando um ondulator (14) de tensão alimentado por uma determinada tensão de alimentação, um regulador (16) recebendo, como entrada, um certo valor de consigne de binário electromagnético (C^*) e pelo menos um sinal aferido $(\vec{I}_k, \vec{\phi}_k, \omega_k)$ que seja representativo do binário electromagnético da máquina (12) e que envia para o

ondulador (14) uma tensão de comando (V_{ref}) adaptada para submeter o binário electromagnético da máquina a um valor de consigne de binário (C^*), mediante previsão, em cada momento de aferição, do valor de binário electromagnético no momento de aferição seguinte, e consequente modificação da tensão de comando; o dispositivo de alimentação é **caracterizado por** o regulador (16) comportar, armazenado em memória, um modelo discreto do sistema constituído pela máquina (12) e pelo ondulador (14), sob a forma dum termo que corresponde à evolução livre do sistema na ausência de tensão de comando, e dum termo que corresponde à evolução do sistema sob a acção do sinal de comando, entre dois momentos de aferição, e **caracterizado por** ele ainda comportar meios (22) para geração duma tensão de comando adaptada para fazer variar o binário electromagnético segundo um valor que corresponde à evolução livre do binário em direcção ao valor de consigne de binário.

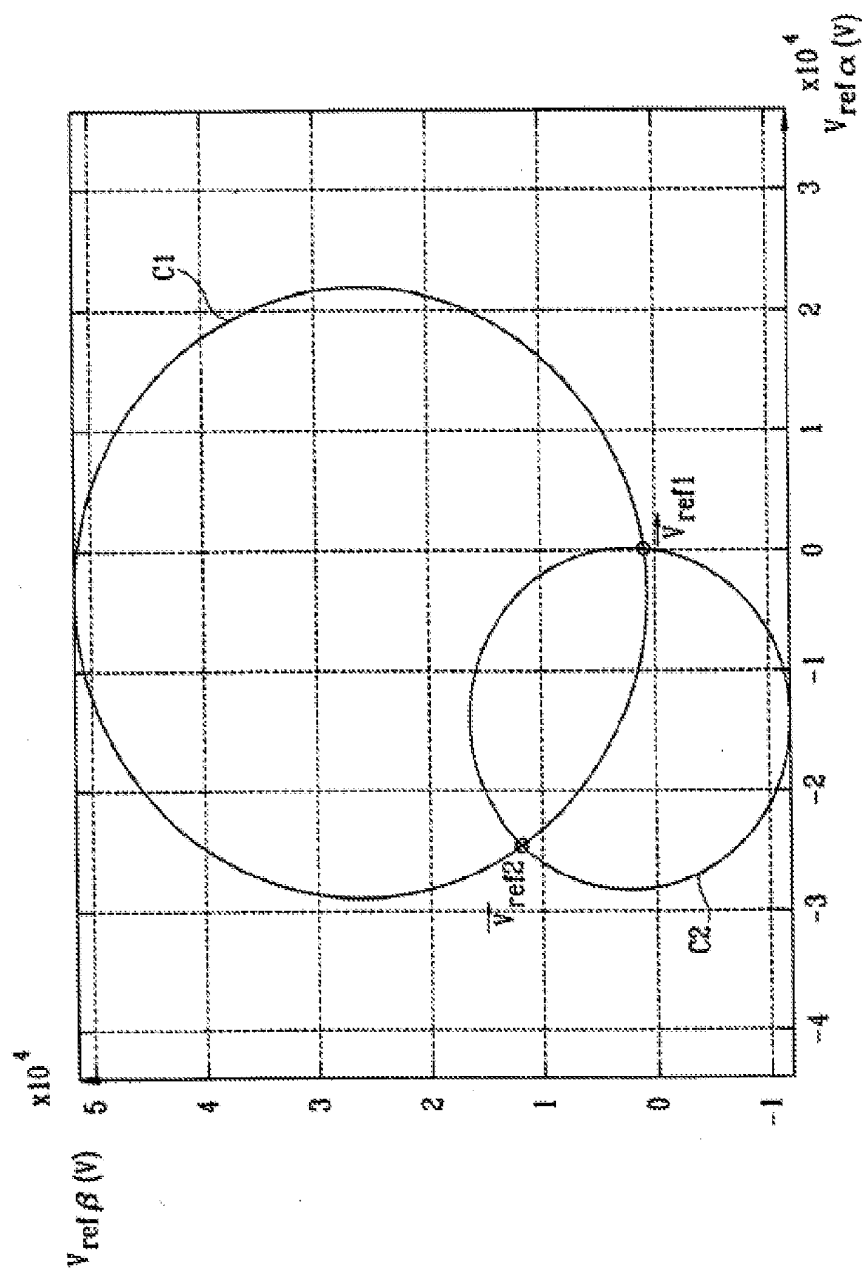
7. Dispositivo de alimentação em conformidade com a reivindicação 6, **caracterizado por** o regulador (16) receber, como entrada, um valor de consigne de fluxo magnético ($\|\vec{\phi}^*\|^2$) e um sinal aferido representativo do valor do fluxo magnético da máquina, e dispor de meios para gerar uma tensão de comando (V_{ref}) adaptada para fazer variar o fluxo magnético da máquina segundo um valor que corresponde à evolução livre do fluxo magnético em direcção ao valor de consigne de fluxo.

8. Dispositivo de alimentação em conformidade com a reivindicação 7, **caracterizado por** os meios (22) para gerar a tensão de comando serem adaptados para gerar a tensão de comando, em cada momento de aferição, de maneira a obter, aquando do momento de aferição seguinte, os ditos valores de consigne de binário e de fluxo.

Lisboa, 18 de Julho de 2008



GIL

FIG.2

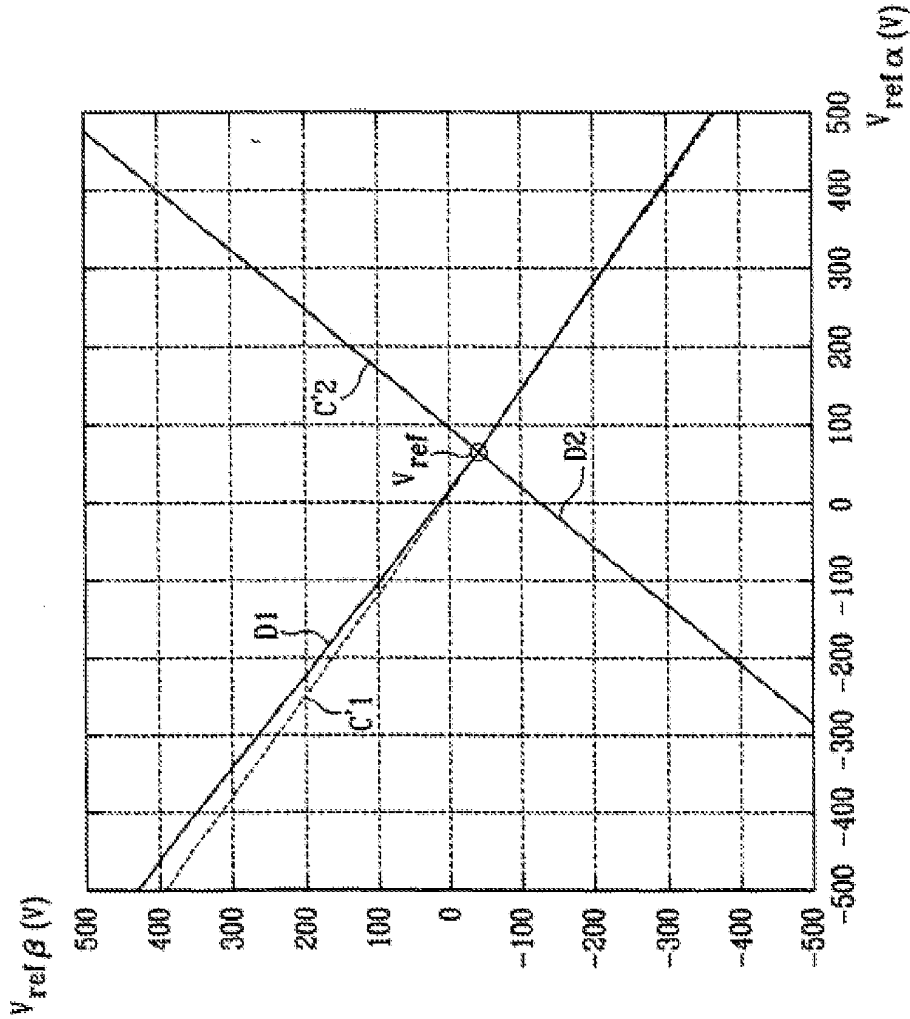


FIG.3