



(22) Date de dépôt/Filing Date: 2000/04/06

(41) Mise à la disp. pub./Open to Public Insp.: 2000/10/13

(45) Date de délivrance/Issue Date: 2007/06/26

(30) Priorité/Priority: 1999/04/13 (FR99 04 602)

(51) Cl.Int./Int.Cl. *H02P 21/14* (2006.01),
H02P 21/13 (2006.01)

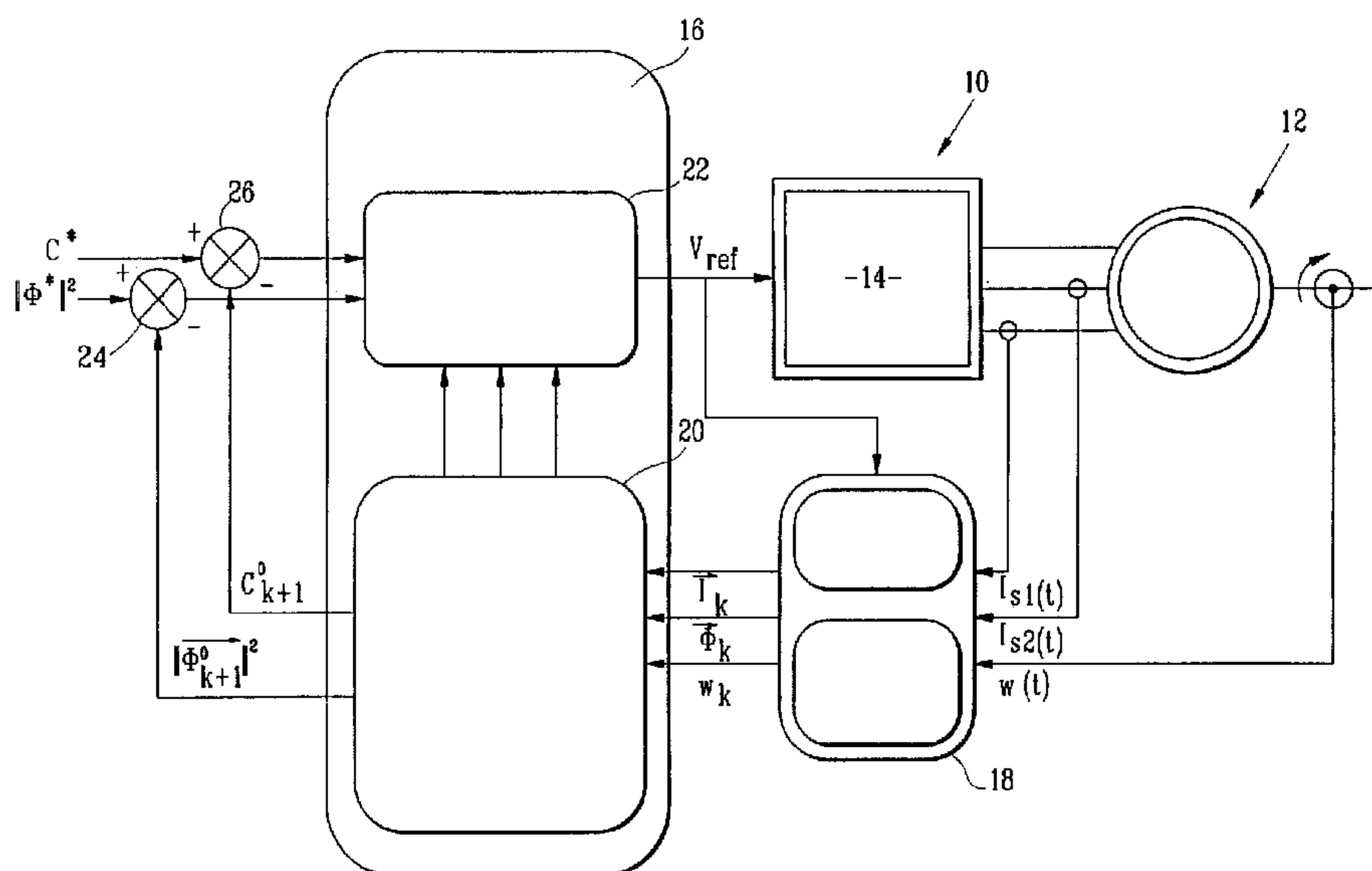
(72) Inventeurs/Inventors:
POULLAIN, SERGE, FR;
THOMAS, JEAN-LUC, FR

(73) Propriétaire/Owner:
ALSTOM, FR

(74) Agent: ROBIC

(54) Titre : PROCÉDE DE REGULATION D'UNE MACHINE TOURNANTE ET DISPOSITIF D'ALIMENTATION D'UNE
TELLE MACHINE

(54) Title: LATHE ADJUSTING PROCEDURE AND FEED DEVICE



(57) Abrégé/Abstract:

Dans ce procédé de régulation d'une machine tournante (12) alimentée par un onduleur de tension (14) recevant, en entrée, une tension de commande (V_{ref}) délivrée par un régulateur (16) asservissant le couple électromagnétique sur une valeur de consigne (C^*), le régulateur (16) reçoit en entrée la valeur de consigne et au moins un signal échantillonné ($\vec{T}_k, \vec{\Phi}_k, \omega_k$) représentatif du couple de la machine et procède, à chaque instant d'échantillonnage, à une prédiction de la valeur du couple à un instant d'échantillonnage suivant et à une modification consécutive de la tension de commande (V_{ref}). L'asservissement du couple comporte les étapes de calcul préalable d'un modèle discret de la machine (12) et de l'onduleur (14) établissant la variation du couple entre deux instants d'échantillonnage, sous la forme d'un premier terme correspondant à l'évolution libre du système en l'absence de tension de commande et d'un terme correspondant à l'évolution du système sous l'action du signal de commande et de modification de la tension de commande (V_{ref}) de manière à faire varier le couple électromagnétique d'une valeur correspondant à l'évolution libre du couple vers la valeur de consigne (C^*).



ABREGE DU CONTENU TECHNIQUE DE L'INVENTION

-:-:-:-:-

Dans ce procédé de régulation d'une machine tournante (12) alimentée par un onduleur de tension (14) recevant, en entrée, une tension de commande (V_{ref}) délivrée par un régulateur (16) asservissant le couple électromagnétique sur une valeur de consigne (C^*), le régulateur (16) reçoit en entrée la valeur de consigne et au moins un signal échantillonné $\left(\vec{I}_k, \vec{\Phi}_k, \omega_k \right)$ représentatif du couple de la machine et procède, à chaque instant d'échantillonnage, à une prédiction de la valeur du couple à un instant d'échantillonnage suivant et à une modification consécutive de la tension de commande (V_{ref}). L'asservissement du couple comporte les étapes de calcul préalable d'un modèle discret de la machine (12) et de l'onduleur (14) établissant la variation du couple entre deux instants d'échantillonnage, sous la forme d'un premier terme correspondant à l'évolution libre du système en l'absence de tension de commande et d'un terme correspondant à l'évolution du système sous l'action du signal de commande et de modification de la tension de commande (V_{ref}) de manière à faire varier le couple électromagnétique d'une valeur correspondant à l'évolution libre du couple vers la valeur de consigne (C^*).

PROCÉDÉ DE RÉGULATION D'UNE MACHINE TOURNANTE ET
DISPOSITIF D'ALIMENTATION D'UNE TELLE MACHINE

La présente invention est relative à un procédé de régulation d'une machine tournante, en particulier une machine tournante asynchrone. Elle se rapporte également à un dispositif d'alimentation d'une telle machine.

Plus précisément, l'invention concerne un procédé de régulation capable d'asservir le couple électromagnétique de la machine, et incidemment le flux magnétique (rotorique ou statorique) de cette dernière, sur des valeurs de consigne correspondantes.

10 En effet, la commande de la vitesse d'une machine asynchrone est généralement effectuée en régulant la commande du couple électromagnétique de la machine.

Pour ce faire, les machines tournantes asynchrones sont généralement dotées d'un régulateur recevant en entrée, une valeur de consigne de couple électromagnétique et un ou plusieurs signaux échantillonnés représentatifs du couple électromagnétique de la machine élaborés à partir d'une mesure du courant statorique.

20 Pour asservir le couple électromagnétique de la machine sur la valeur de consigne de couple, le régulateur procède, à chaque instant d'échantillonnage, à une prédiction de la valeur du couple à l'instant d'échantillonnage suivant, et modifie en conséquence la tension de commande.

L'une des principales préoccupations pour la plupart des applications industrielles est l'augmentation des performances dynamiques de tels régulateurs, et en particulier l'augmentation de la dynamique de couple.

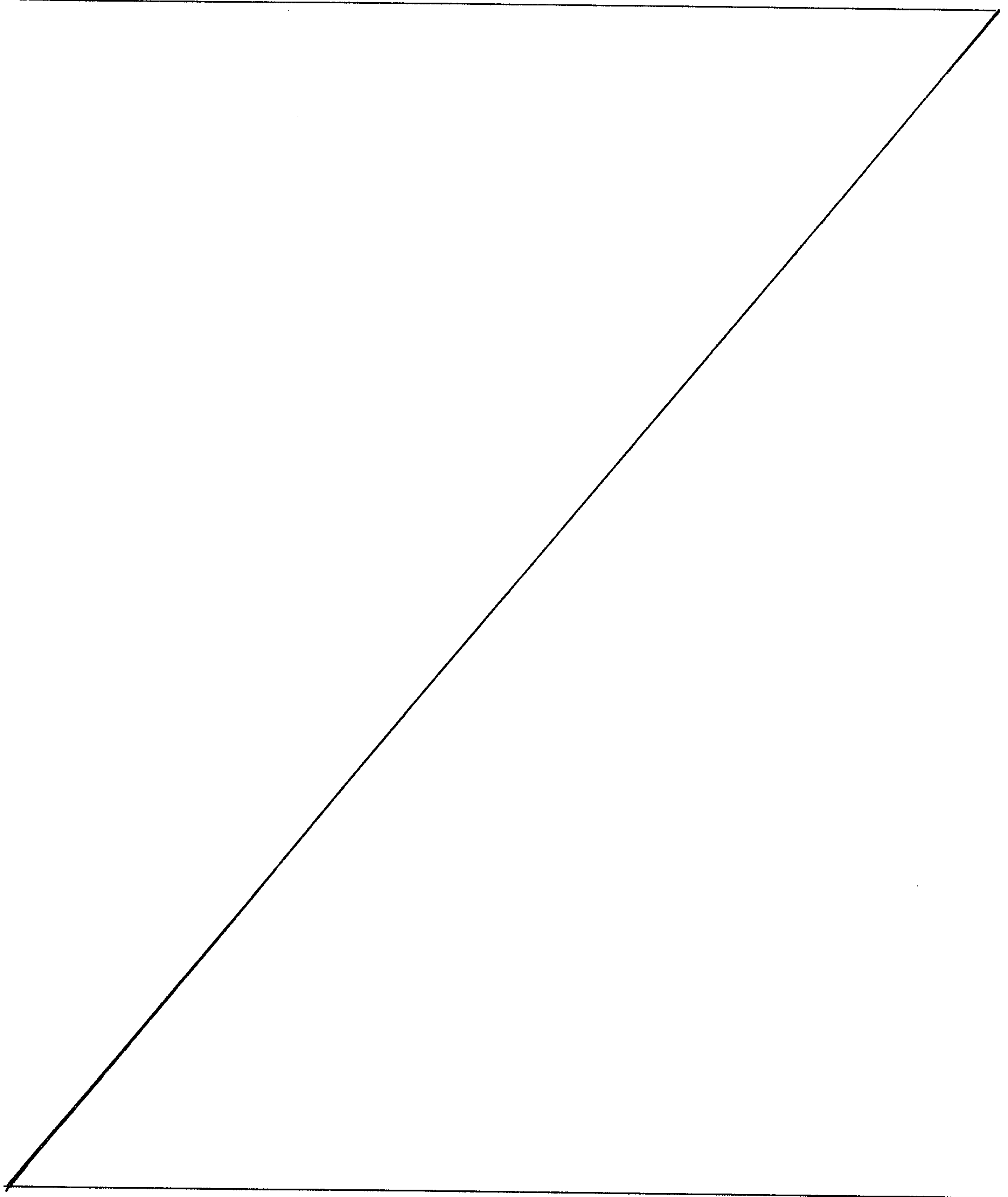
Pour que le système ait une bonne dynamique de couple, il est nécessaire de disposer d'une fréquence de découpage de l'onduleur grande devant la dynamique que l'on souhaite obtenir, faute de quoi la compensation est mal effectuée et les performances sont dégradées. En particulier on diminue le rendement de l'onduleur et du moteur et on augmente les pertes à évacuer.

30 Une solution à ce problème consiste à doter le système de composants électroniques à faible perte. Une telle solution est cependant inacceptable dans la mesure où elle contribue à augmenter considérablement le coût du dispositif d'alimentation de la machine.

1a

Le but de l'invention est de palier les inconvénients précités.

Elle a donc pour objet un procédé de régulation d'une machine tournante alimentée par un onduleur de tension recevant, en entrée, une tension discrète de commande délivrée par un régulateur de manière à asservir le couple électromagnétique de la machine sur une valeur de consigne de couple, le régulateur recevant, en entrée, ladite valeur de consigne



et au moins un signal échantillonné représentatif du couple électromagnétique de la machine et procédant, à chaque instant d'échantillonnage, à une prédiction de la valeur du couple à un instant d'échantillonnage suivant et à une modification consécutive de la tension de commande, caractérisé en ce que l'asservissement du couple électromagnétique

5 comporte les étapes de :

- calcul préalable d'un modèle discret de l'ensemble constitué par la machine et l'onduleur établissant la variation du couple électromagnétique entre deux instants d'échantillonnage, sous la forme d'un premier terme correspondant à l'évolution libre du système à partir d'un état correspondant à l'instant d'échantillonnage et en l'absence de
- 10 tension de commande et d'un terme correspondant à l'évolution du système sous l'action du signal de commande ; et

- modification de la tension de commande de manière à faire varier le couple électromagnétique de la machine d'une valeur correspondant à l'évolution libre du couple vers la valeur de consigne de couple.

15 Ainsi, l'amélioration des performances dynamiques est due à l'utilisation d'un régulateur amélioré, ce qui est moins coûteux que de prévoir des composants électrotechniques plus performants.

Le procédé de régulation selon l'invention peut en outre comporter une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prises isolément ou selon toutes les combinaisons

20 techniquement possibles :

- au cours de l'asservissement du couple sur la valeur de consigne, on asservit le flux magnétique de la machine sur une valeur de consigne de flux reçue en entrée du régulateur en faisant varier la tension de commande de manière à modifier le flux magnétique d'une valeur correspondant à l'évolution libre du flux magnétique vers la
- 25 valeur de consigne de flux ;

- la modification de la tension de commande est effectuée, à chaque instant d'échantillonnage, de manière à obtenir les valeurs de consigne de couple et de consigne de flux à l'instant d'échantillonnage suivant ;

- l'étape de modélisation du système consiste à discrétiser les équations d'état du
- 30 système suivant :

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

$$Y = h(X)$$

dans lesquelles :

X et Y représentent respectivement des vecteurs d'état et de sortie de la machine,

$[A(\omega)]$ représente une matrice d'état de la machine, évoluant en fonction de la

5 vitesse ω de la machine,

$[B]$ représente une matrice d'entrée du système,

h représente une fonction de sortie du système, et

V_{ref} représente la tension de commande ;

et à élaborer des caractéristiques ΔC et $\Delta \phi$ représentatives de la variation du couple

10 et du flux à obtenir entre, d'une part, l'évolution libre pendant la période d'échantillonnage et, d'autre part, l'instant d'échantillonnage suivant, à partir de la modélisation discrétisée du système, définie selon les relations suivantes,

$$\Delta C = \left(\vec{\Psi}_{k+1}^o \wedge \vec{V}_{ref} \right) - (ad + bc) \left\| \vec{V}_{ref} \right\|^2 \text{ et}$$

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

15 dans lesquelles,

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

a, b, c, d représentant des coefficients de la matrice d'entrée discrétisée du système,

$\vec{I}_{k+1}^o$ désignant l'évolution libre prédite du vecteur de courant magnétique de la

machine, pendant la période d'échantillonnage, $\vec{\Phi}_{k+1}^o$ désignant l'évolution libre prédite

20 du vecteur de flux magnétique de la machine, pendant la période d'échantillonnage et

$\left\| \vec{V}_{ref} \right\|^2$ désignant le module au carré de la tension de commande ;

le régulateur étant élaboré de manière à déterminer la valeur de la tension de commande à appliquer en entrée de l'onduleur de manière à obtenir les variations de flux et de couple ΔC et $\Delta \phi$.

25 - la tension de commande appliquée en entrée de l'onduleur est constituée par la tension correspondant à une énergie électrique minimale parmi les tensions de référence satisfaisant aux relations définissant lesdites caractéristiques représentatives de la variation du couple et du flux.

L'invention a également pour objet un dispositif d'alimentation d'une machine tournante, comprenant un onduleur de tension alimenté par une tension d'alimentation, un régulateur recevant, en entrée, une valeur de consigne de couple électromagnétique et au moins un signal échantillonné représentatif du couple électromagnétique de la machine et
5 délivrant à l'onduleur une tension de commande adaptée pour asservir le couple électromagnétique de la machine sur une valeur de consigne de couple, par prédiction, à chaque instant d'échantillonnage, de la valeur de couple électromagnétique à l'instant d'échantillonnage suivant et modification consécutive de la tension de commande, caractérisé en ce que le régulateur comporte, stocké en mémoire, un modèle discret du
10 système constitué par la machine et l'onduleur sous la forme d'un terme correspondant à l'évolution libre du système en l'absence de tension de commande et d'un terme correspondant à l'évolution du système sous l'action du signal de commande, entre deux instants d'échantillonnage, et en ce qu'il comporte en outre des moyens pour générer une tension de commande adaptée pour faire varier le couple électromagnétique d'une valeur
15 correspondant à l'évolution libre du couple vers la valeur de consigne de couple.

Avantageusement le régulateur reçoit, en entrée, une valeur de consigne de flux magnétique et un signal échantillonné représentatif de la valeur du flux magnétique de la machine et comporte des moyens pour générer une tension de commande adaptée pour modifier le flux magnétique de la machine d'une valeur correspondant à l'évolution libre
20 du flux magnétique vers la valeur de consigne de flux.

De préférence, les moyens pour générer la tension de commande sont adaptés pour générer la tension de commande, à chaque instant d'échantillonnage, de manière à obtenir, lors de l'instant d'échantillonnage suivant, lesdites valeurs de consigne de couple et de flux.

25 D'autres caractéristiques et avantages ressortiront de la description suivante, donnée uniquement à titre d'exemple, et faite en référence aux dessins annexés sur lesquels :

- la figure 1 est un schéma synoptique illustrant la constitution d'un dispositif d'alimentation d'une machine tournante conforme à l'invention ;

- la figure 2 montre des courbes illustrant la méthode de détermination de la tension
30 de commande ; et

- la figure 3 montre des courbes permettant la détermination de la tension de commande en utilisant des approximations justifiées dans le cas d'une faible vitesse.

Sur la figure 1, on a représenté un dispositif 10 d'alimentation d'une machine tournante 12.

Sur cette figure, la machine tournante 12 a été schématisée sous la forme d'un moteur triphasé, constitué, par exemple, par le moteur de traction d'une machine ferroviaire électrique, d'un robot ou d'une machine outil.

Le dispositif d'alimentation 10, comporte, comme cela est classique, un onduleur de tension 14 alimentant le moteur 12 en tension alternative, lequel onduleur 14 est raccordé à une source d'alimentation en tension continue, par exemple une tension de l'ordre de 1500 à 3000 Volts, pour une application dans le domaine ferroviaire.

On notera que, alors que la machine tournante 12 peut être considérée comme un système continu, linéaire, l'onduleur 14 constitue un système discret non linéaire.

L'onduleur 14 est piloté par un régulateur 16. Ce régulateur 16 délivre à l'onduleur 14 une tension V_{ref} de commande élaborée de manière à asservir le couple électromagnétique et, incidemment le flux magnétique de la machine 12, sur des valeurs de consigne de couple électromagnétique C^* et de flux magnétique $\|\vec{\Phi}^*\|^2$ correspondant respectivement aux valeurs de couple électromagnétique et de flux magnétique à obtenir.

Comme on le voit sur la figure 1, le régulateur 16 reçoit également, en entrée, un ou plusieurs signaux échantillonnés $\vec{I}_k, \vec{\Phi}_k, \omega_k$ correspondant respectivement au vecteur du courant statorique, au vecteur du flux magnétique et à la vitesse mécanique du rotor de la machine 12, ces signaux, représentatifs du couple électromagnétique de la machine, étant élaborés par un observateur 18 à partir de signaux continus mesurés $I_{S1}(t)$, $I_{S2}(t)$ et $\omega(t)$ correspondant respectivement à des courants statoriques de phase et à un signal de mesure de la vitesse mécanique du rotor délivrés par des capteurs appropriés équipant la machine 12.

Comme cela est classique, pour asservir le couple électromagnétique et le flux magnétique de la machine 12 sur les valeurs de consigne C^* et $\|\vec{\Phi}^*\|^2$ reçues en entrée, le régulateur 16 procède, à l'aide de moyens logiciels stockés en mémoire, à chaque instant d'échantillonnage, à une prédiction des valeurs de couple électromagnétique et de flux rotorique à l'instant d'échantillonnage suivant, et modifie en conséquence la tension de

commande V_{ref} de manière à obtenir les valeurs de couple et de flux imposées par les consignes.

On notera que, de préférence, le régulateur 16 est constitué par un régulateur de type "à réponse pile", c'est à dire qu'il modifie la tension de commande V_{ref} de manière à
5 atteindre les valeurs de consigne lors de l'instant d'échantillonnage suivant.

Pour ce faire, le régulateur 16 comporte un premier étage 20 dans lequel est stocké, en mémoire, un modèle discret du système constitué par la machine tournante 12 et l'onduleur 14 de manière à calculer l'évolution du système entre deux instants d'échantillonnage et un deuxième étage 22 de calcul de la tension de commande V_{ref} à
10 appliquer en entrée de l'onduleur 14, en fonction de l'évolution prédite du système par le premier étage, et des signaux de consigne C^* et $\left\| \vec{\Phi}^* \right\|^2$ présentés en entrée du deuxième étage.

Dans la suite de la description, on va tout d'abord décrire la méthode de calcul du modèle discret du système constitué par la machine tournante 12 et l'onduleur 14, puis l'on
15 va décrire la méthode de calcul de la tension de commande V_{ref} .

Comme mentionné précédemment, la machine tournante 12 est constituée par un système algébro-différentiel défini en temps continu, alors que l'onduleur de tension 14 est constitué par un système non linéaire.

Le système constitué par l'onduleur et la machine peut être défini par les équations
20 d'état suivantes :

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

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

25

Dans lesquelles,

- X et $\dot{X}$ désignent respectivement le vecteur d'état et la dérivée du vecteur d'état de la machine, définis par les composantes mesurées du courant statorique de la machine et les composantes de flux magnétique de la machine exprimées dans un repère à deux
30 dimensions α, β , fixe par rapport au stator,

X s'écrivant comme suit, en représentant l'état magnétique de la machine par le flux rotorique :

$$X = \begin{pmatrix} Is\alpha \\ Is\beta \\ \Phi r\alpha \\ \Phi r\beta \end{pmatrix}$$

- [A] représente une matrice d'état de la machine, évoluant en fonction de la vitesse

$$\omega \text{ de la machine et s'écrit } [A] = \begin{pmatrix} -\gamma & 0 & \alpha\beta & \beta\omega \\ 0 & -\gamma & -\beta\omega & \alpha\beta \\ \alpha L_m & 0 & -\alpha & -\omega \\ 0 & \alpha L_m & \omega & -\alpha \end{pmatrix}$$

$$- [B] \text{ représente une matrice d'entrée du système et s'écrit } [B] = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

5 - V_{ref} est exprimé dans le repère à deux dimension α et β fixé au stator et a pour

$$\text{composantes : } V_{ref} = \begin{pmatrix} V_{ref\alpha} \\ V_{ref\beta} \end{pmatrix}$$

et h représente une fonction de sortie du système,

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

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

10

R_s désignant la résistance du stator, R_r étant la résistance du rotor, L_m désignant l'inductance mutuelle, L_s désignant l'inductance du stator, et L_r étant l'inductance du rotor.

De même, le vecteur de sortie Y ayant pour composantes le flux rotorique et le couple électromagnétique, et défini selon la relation (2) mentionnée précédemment, s'écrit

$$15 \quad Y = \begin{pmatrix} \|\vec{\Phi}_r\|^2 \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Phi_{r\alpha}^2 + \Phi_{r\beta}^2 \\ p \frac{L_m}{L_r} (\Phi_{r\alpha} I_{s\beta} - \Phi_{r\beta} I_{s\alpha}) \end{pmatrix}$$

dans laquelle p est le nombre de paires de pôles.

On notera que, dans ce qui précède, la tension de commande V_{ref} peut être considérée comme constante entre deux périodes d'échantillonnage. Dès lors, le premier étage 20 du régulateur 16 est à même de procéder à une discrétisation des équations d'états

20 mentionnées précédemment, à partir des relations suivantes :

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

$$Y_k = h(X_k), \quad (4)$$

avec :

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

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

dans lesquelles :

X_{k+1} désigne le vecteur d'état discrétisé à l'instant $(k+1) T$;

X_k et V_{ref} désignent respectivement le vecteur d'état du système et la tension de commande à l'instant kT ;

10 I désigne la matrice identité ;

$[F(\omega_k)]$ désigne la matrice d'état discrétisée,

$[G]$ est la matrice d'entrée discrétisée et

h est la fonction de sortie discrétisée.

On notera que les relations (3) et (4) ci-dessus, qui permettent la discrétisation du système, prennent également en compte la nature discrète de l'onduleur, dans la mesure où, comme mentionné précédemment, ce dernier délivre une tension moyenne constante au cours d'une période d'échantillonnage.

Bien que l'onduleur délivre une tension dont la valeur moyenne est constante au cours d'une période d'échantillonnage, bien entendu, la fréquence de découpage de l'onduleur peut être supérieure à la fréquence d'échantillonnage. Ainsi, bien que la tension délivrée par l'onduleur permette la régulation du couple et du flux de la machine tournante 12, il est possible d'agir sur la fréquence et la durée des paliers de la tension délivrée par l'onduleur, à chaque période d'échantillonnage, tout en conservant une valeur moyenne constante, de manière, par exemple, à respecter un contenu harmonique sur la période d'échantillonnage.

Le vecteur d'état X a pour composantes le vecteur de flux courant statorique et le vecteur de flux rotorique prédits de la machine, exprimés dans un repère à deux dimensions fixe par rapport au stator et s'exprime dès lors selon la relation suivante:

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

ou encore :

$$\vec{I}_{k+1} = [F11] \vec{I}_k + [F12] \vec{\Phi}_k + [G1] \vec{V}_{ref} + [G3] \vec{V}_{ref}$$

$$\vec{\Phi}_{k+1} = [F21] \vec{I}_k + [F22] \vec{\Phi}_k + [G2] \vec{V}_{ref} + [G4] \vec{V}_{ref}$$

avec :

$$\begin{aligned} [G_1] &= \begin{bmatrix} a & o \\ o & a \end{bmatrix}, \\ [G_2] &= \begin{bmatrix} b & o \\ o & b \end{bmatrix}, \\ 5 \quad [G_3] &= \begin{bmatrix} o & +c \\ -c & o \end{bmatrix}, \text{ et} \\ [G_4] &= \begin{bmatrix} o & -d \\ +d & o \end{bmatrix} \end{aligned}$$

- Ainsi, le vecteur d'état prédit par le premier étage 20 du régulateur 16, ayant pour composante la valeur vecteur de courant statorique prédit $\vec{I}_{k+1}$ et du vecteur de flux rotorique prédit $\vec{\Phi}_{k+1}$ à l'instant $(k+1)T$ comporte un premier terme dépendant uniquement de la tension de commande V_{ref} à appliquer à l'onduleur 14 et un deuxième terme ne dépendant que de l'instant de départ kT , correspondant à l'évolution libre du système entre deux instants d'échantillonnage en l'absence de tension de commande appliquée.
- 15 Dès lors, le courant statorique et le flux rotorique prédit peuvent s'exprimer sous la forme

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

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

- 20 dans lesquelles $\vec{I}_{k+1}^o$ et $\vec{\Phi}_{k+1}^o$ désignent respectivement l'évolution libre du courant statorique et l'évolution libre du flux rotorique à partir de l'instant kT , entre deux périodes d'échantillonnage.

- Les équations qui viennent d'être décrites permettent, comme on le conçoit, de prédire l'état du système à l'instant $(k+1)T$, à partir de la tension de commande V_{ref} pilotant l'onduleur 14 et de l'état du système à l'instant kT , en supposant la vitesse de la machine tournante constante, paramètre qui évolue lentement.
- 25

On notera toutefois que ces équations, qui définissent la valeur du courant statorique et du flux rotorique à l'instant $(k+1)T$ ne permettent pas directement d'asservir le couple électromagnétique et le flux rotorique sur les valeurs de consigne imposées.

Toutefois, ces relations permettent au première étage 20 de calculer la valeur du couple prédit C_{K+1} , correspondant à la valeur du couple électromagnétique à l'instant

d'échantillonnage suivant, à l'aide de la relation suivante : $C_{k+1} = K \left(\vec{\Phi}_{k+1} \wedge \vec{I}_{k+1} \right)$ (8)

dans laquelle K désigne un terme dépendant uniquement des paramètres de la machine 12.

De même, le module du flux rotorique prédit satisfait la relation suivante :

$\left\| \vec{\Phi}_{k+1} \right\|^2 = \langle \vec{\Phi}_{k+1}, \vec{\Phi}_{k+1} \rangle$ (9)

En remplaçant les grandeurs prédites du courant et du flux dans les relations (8) et (9) précédentes on obtient :

$$C_{k+1} = C_{k+1}^o + K \left(\vec{\Psi}_{k+1}^o \wedge \vec{V}_{ref} \right) - K(ad + bc) \left\| \vec{V}_{ref} \right\|^2$$
 (10)

avec :

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

de même, le module du flux rotorique prédit satisfait à la relation suivante :

$$\left\| \vec{\Phi}_{k+1} \right\|^2 = \left\| \vec{\Phi}_{k+1}^o \right\|^2 + 2b \langle \vec{\Phi}_{k+1}^o, \vec{V}_{ref} \rangle - 2d (\vec{\Phi}_{k+1}^o \wedge \vec{V}_{ref}) + (b^2 + d^2) \left\| \vec{V}_{ref} \right\|^2$$
 (11)

On conçoit donc que, à partir de la modélisation du système constitué par la machine tournante 12 et l'onduleur de tension 14 mémorisée dans le premier étage 20 du régulateur 16, ce dernier est en mesure de calculer à chaque instant d'échantillonnage kT , la prédiction de la valeur du couple électromagnétique et du flux rotorique de la machine tournante 12, à l'instant d'échantillonnage $(k+1)T$ suivant.

Ces valeurs prédites C_{K+1} et $\left\| \vec{\Phi}_{k+1} \right\|^2$ comportent un premier terme correspondant à

l'évolution libre du système C_{K+1}^o et $\left\| \vec{\Phi}_{k+1}^o \right\|^2$ à partir de la valeur de couple

électromagnétique et de flux rotorique à l'instant kT , en l'absence de tension de commande V_{ref} , et un deuxième terme dépendant de la tension de commande V_{ref} appliquée en entrée de l'onduleur de tension 14.

On notera que les évolutions libres C_{K+1}^0 et $\left\| \vec{\Phi}_{k+1}^o \right\|^2$ peuvent être déterminées de façon relativement précise dans la mesure où les caractéristiques de la machine tournante 12 et de l'onduleur 14 sont connues précisément.

Dès lors, pour asservir le couple électromagnétique et le flux sur les valeurs de consigne correspondante, il convient simplement de générer une tension de commande V_{ref} permettant de modifier les caractéristiques de fonctionnement du moteur 12 de manière à faire évoluer le couple électromagnétique et le flux rotorique, depuis la valeur correspondant respectivement à l'évolution libre du couple et à l'évolution libre du flux vers les valeurs de consigne à obtenir.

En d'autres termes, il convient de déterminer la tension de commande V_{ref} satisfaisant aux relations (10) et (11) mentionnées précédemment.

Plus particulièrement, il convient de déterminer la tension de commande V_{ref} satisfaisant aux relations ci-dessous

$$\Delta C = \left(\vec{\Psi}_{k+1}^o \wedge \vec{V}_{ref} \right) - (ad + bc) \left\| \vec{V}_{ref} \right\|^2 \quad (12)$$

$$\Delta \Phi = 2b \langle \vec{\Phi}_{k+1}^o, \vec{V}_{ref} \rangle - 2d \left(\vec{\Phi}_{k+1}^o \wedge \vec{V}_{ref} \right) + (b^2 + d^2) \left\| \vec{V}_{ref} \right\|^2 \quad (13)$$

$$\text{avec } \Delta C = \frac{1}{K} (C_{k+1} - C_{k+1}^o) \text{ et}$$

$$\Delta \Phi = \left\| \vec{\Phi}_{k+1} \right\|^2 - \left\| \vec{\Phi}_{k+1}^o \right\|^2,$$

soit, sous forme développée, dans le repère α, β à deux dimensions :

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

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

Comme on le voit sur la figure 1, pour procéder à ce calcul, le deuxième étage de calcul 22 du régulateur 16 reçoit, en provenance du première étage 20, la valeur de l'évolution libre du courant statorique et du flux rotorique de la machine ainsi que les composantes de la matrice d'entrée discrétisées $G(\omega_K)$.

Comme on le conçoit, et en posant :

$$\lambda_1 = -(ad+bc)$$

et

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

$$\text{on obtient : } (V_{ref\alpha} - m_1 \alpha)^2 + (V_{ref\beta} - m_1 \beta)^2 = \frac{\Delta C}{\lambda_1} + \left\| \vec{M}_{(k+1)1}^o \right\|^2 \quad (16)$$

De même, en posant :

$$5 \quad \lambda_2 = b^2 + d^2, \text{ et}$$

$$\vec{M}_{(k+1)2}^o = \begin{pmatrix} m_2 \alpha \\ m_2 \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -b/\lambda_2 & -d/\lambda_2 \\ d/\lambda_2 & -b/\lambda_2 \end{pmatrix} \vec{\Phi}_{k+1}^o,$$

on obtient, à partir de la relation (15) mentionnée précédemment :

$$(V_{ref\alpha} - m_2 \alpha)^2 + (V_{ref\beta} - m_2 \beta)^2 = \frac{\Delta \Phi}{\lambda_2} + \left\| \vec{M}_{(k+1)2}^o \right\|^2 \quad (17)$$

10 Ainsi, et comme on le voit sur la figure 2, la tension de commande discrète exacte V_{ref} , solution du système d'équation (14) et (15) est constitué par l'intersection de deux cercles correspondant respectivement aux relations (16) et (17) mentionnées ci-dessus, à

savoir un premier cercle C1 de centre $M_1 = \begin{pmatrix} m_1 \alpha \\ m_1 \beta \end{pmatrix}$ et de rayon $R_1 = \sqrt{\frac{\Delta C}{\lambda_1} + \left\| \vec{M}_{(k+1)1}^o \right\|^2}$, et

un cercle C2 de centre $M_2 = \begin{pmatrix} m_2 \alpha \\ m_2 \beta \end{pmatrix}$ et de rayon $R_2 = \sqrt{\frac{\Delta \Phi}{\lambda_2} + \left\| \vec{M}_{(k+1)2}^o \right\|^2}$.

15 On notera que les centres M1 et M2 des cercles C1 et C2 se déplacent respectivement sur la trajectoire des l'évolutions libres $\vec{\Psi}_{k+1}^o$ et $\vec{\Phi}_{k+1}^o$.

Dans les cas où les cercles C1 et C2 se coupent en deux points distincts $\vec{V}_{ref1}$ et $\vec{V}_{ref2}$, le deuxième étage de calcul 22 sélectionne la tension de référence $\vec{V}_{ref}$ correspondant à une énergie électrique minimale.

20 On notera par ailleurs que les coefficients c et d de la matrice d'entrée discrétisée [G] dépendent de la vitesse mécanique ω et de la période d'échantillonnage T à la puissance 3 et plus. Par conséquence, pour une vitesse mécanique ω faible, et dans la mesure où la période d'échantillonnage T est généralement petite, ces coefficients peuvent

être négligés. Dès lors, la relation (14) mentionnée précédemment peut s'écrire de la façon suivant :

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

Ainsi, dans ce cas, la tension de commande V_{ref} à appliquer en entrée de l'onduleur 14 est constitué par l'intersection du cercle C2 correspondant à la relation (17) mentionnée précédemment et par une droite correspondante à la relation (18).

Selon une autre approximation, on peut négliger le terme b^2 dans la mesure où le coefficient b de la matrice d'entrée discrétisée $[G]$ dépend de la période d'échantillonnage par un ordre au moins égal à deux.

Ainsi, en conservant l'approximation faite précédemment, c'est à dire avec c et d nuls, la relation (15) devient :

$$\Delta \Phi = 2b \left[\Phi_{(k+1)\alpha}^o V_{ref\alpha} + \Phi_{(k+1)\beta}^o V_{ref\beta} \right] \quad (19)$$

Dans ce cas, avec ces approximations, et comme cela est visible sur la figure 3, la tension de commande satisfaisant aux relations (18) et (19) ci-dessus correspond à l'intersection de deux droites D1 et D2 illustrant la tension de commande à appliquer pour obtenir le couple électromagnétique et le flux rotorique désirés entre deux périodes d'échantillonnage, en fonction des composantes $V_{ref\alpha}$ et $V_{ref\beta}$ de la tension de référence, dans le repère fixe par rapport au stator.

Sur cette figure 3, on a représenté, en pointillé, la solution exacte, c'est à dire l'intersection de deux cercles C'1 et C'2, lequel est confondu à D2, obtenus sans négliger les termes b^2 , c et d .

On voit que les approximations faites pour calculer la tension de commande V_{ref} n'engendrent sensiblement pas de variation dans cette tension pour un domaine de vitesses faibles.

Une autre approximation consiste à ne négliger que les termes $(ad+bc)$ et (b^2+d^2) , dépendant de la période d'échantillonnage par un ordre au moins égal à 4.

Une telle approximation reste valable pour des vitesses plus élevées.

Dans ce cas, l'équation (15) devient :

$$\Delta \Phi = 2b \left[\Phi_{(k+1)\alpha}^o V_{ref\alpha} + \Phi_{(k+1)\beta}^o V_{ref\beta} \right] - 2d \left[\Phi_{(k+1)\alpha}^o V_{ref\beta} - \Phi_{(k+1)\beta}^o V_{ref\alpha} \right] \quad (20)$$

La tension de commande satisfaisant alors aux relations (18) et (20) correspond également à l'intersection de deux droites.

On conçoit que l'invention qui vient d'être décrite utilisant un régulateur comportant, stocké en mémoire, un modèle discret de la machine 12 et de l'onduleur 14, permet, à l'aide d'algorithmes de calcul appropriés, d'une part, de calculer les valeurs de couple et de flux à ajouter à l'évolution libre du couple et du flux entre deux périodes d'échantillonnage et, d'autre part, de générer la tension de commande V_{ref} pilotant l'onduleur de manière à obtenir les valeurs de consignes imposées.

Pratiquement, et comme cela est visible sur la figure 1, le premier étage fournit, à la borne inverseuse de comparateurs 24 et 26, la valeur des évolutions libres qui sont soustraites aux valeurs de consignes correspondantes, le deuxième étage générant, à partir de la sortie de ces comparateurs, la version de commande V_{ref} .

REVENDICATIONS

1. Procédé de régulation d'une machine tournante (12) alimentée par un onduleur de tension (14) recevant, en entrée, une tension discrète (V_{ref}) de commande délivrée par un régulateur (16) de manière à asservir le couple électromagnétique de la machine sur une
 5 valeur de consigne de couple (C^*), le régulateur recevant, en entrée, ladite valeur de consigne (C^*) et au moins un signal échantillonné ($\vec{I}_k, \vec{\Phi}_k, \omega_k$) représentatif du couple électromagnétique de la machine et procédant, à chaque instant d'échantillonnage, à une prédiction de la valeur du couple à un instant d'échantillonnage suivant et à une modification consécutive de la tension de commande (V_{ref}), caractérisé en ce que
 10 l'asservissement du couple électromagnétique comporte les étapes de :

- calcul préalable d'un modèle discret de l'ensemble constitué par la machine (12) et l'onduleur (14) établissant la variation du couple électromagnétique entre deux instants d'échantillonnage, sous la forme d'un premier terme correspondant à l'évolution libre du système à partir d'un état correspondant à l'instant d'échantillonnage et en l'absence de
 15 tension de commande et d'un terme correspondant à l'évolution du système sous l'action du signal de commande ; et

- modification de la tension de commande (V_{ref}) de manière à faire varier le couple électromagnétique de la machine (12) d'une valeur correspondant à l'évolution libre du couple vers la valeur de consigne de couple.

20 2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'au cours de l'asservissement du couple sur la valeur de consigne (C^*), on asservit le flux magnétique de la machine sur une valeur de consigne de flux ($\|\vec{\Phi}^*\|^2$) reçue en entrée du régulateur (16), en agissant sur la tension de commande (V_{ref}) de manière à faire varier le flux magnétique d'une valeur correspondant à l'évolution libre du flux magnétique vers la valeur de consigne de flux.

25 3. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce que la modification de la tension de commande est effectuée, à chaque instant d'échantillonnage, de manière à obtenir les valeurs de consigne de couple et de consigne de flux à l'instant d'échantillonnage suivant.

4. Procédé selon la revendication 3, caractérisé en ce que l'étape de modélisation du
 30 système consiste à discrétiser les équations d'état du système suivant :

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

$$Y = h(X)$$

dans lesquelles :

X et Y représentent respectivement des vecteurs d'état et de sortie de la machine,

$[A(\omega)]$ représente une matrice d'état de la machine, évoluant en fonction de la

5 vitesse ω de la machine,

$[B]$ représente une matrice d'entrée du système,

h représente une fonction de sortie du système, et

V_{ref} représente la tension de commande ;

et à élaborer des caractéristiques ΔC et $\Delta \phi$ représentatives de la variation du couple

10 et du flux à obtenir entre, d'une part, l'évolution libre pendant la période d'échantillonnage et, d'autre part, l'instant d'échantillonnage suivant, à partir de la modélisation discrétisée du système, définie selon les relations suivantes :

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

et

$$15 \quad \Delta \phi = 2b \langle \vec{\phi}_{k+1}^o, \vec{V}_{ref} \rangle - 2d \left(\vec{\phi}_{k+1}^o \wedge \vec{V}_{ref} \right) + (b^2 + d^2) \left\| \vec{V}_{ref} \right\|^2,$$

dans lesquelles,

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

a, b, c, d représentant des coefficients de la matrice d'entrée discrétisée du système,

$\vec{I}_{k+1}^o$ désignant l'évolution libre prédite du vecteur de courant statorique, pendant la

20 période d'échantillonnage, $\vec{\phi}_{k+1}^o$ désignant l'évolution libre prédite du vecteur de flux magnétique de la machine, pendant la période d'échantillonnage et $\left\| \vec{V}_{ref} \right\|^2$ désignant le module au carré de la tension de commande ;

le régulateur étant élaboré de manière à déterminer la valeur de la tension de commande à appliquer en entrée de l'onduleur de manière à obtenir les variations de flux et de couple ΔC et $\Delta \phi$.

25 5. Procédé selon la revendication 4, caractérisé en ce que la tension de commande appliquée en entrée de l'onduleur (14) est constituée par la tension correspondant à une

énergie électrique minimale parmi les tensions de référence satisfaisant aux relations définissant lesdites caractéristiques représentatives de la variation du couple et du flux.

6. Dispositif d'alimentation d'une machine tournante (12) comprenant un onduleur (14) de tension alimenté par une tension d'alimentation, un régulateur (16) recevant, en
 5 entrée, une valeur de consigne de couple électromagnétique (C^*) et au moins un signal échantillonné ($\vec{I}_k, \vec{\Phi}_k, \omega_k$) représentatif du couple électromagnétique de la machine (12) et délivrant à l'onduleur (14) une tension de commande (V_{ref}) adaptée pour asservir le couple électromagnétique de la machine sur la valeur de consigne de couple (C^*), par
 10 prédiction, à chaque instant d'échantillonnage, de la valeur de couple électromagnétique à l'instant d'échantillonnage suivant et modification consécutive de la tension de commande, caractérisé en ce que le régulateur (16) comporte, stocké en mémoire, un modèle discret du système constitué par la machine (12) et l'onduleur (14) sous la forme d'un terme correspondant à l'évolution libre du système en l'absence de tension de commande et d'un
 15 terme correspondant à l'évolution du système sous l'action du signal de commande, entre deux instants d'échantillonnage, et en ce qu'il comporte en outre des moyens (22) pour générer une tension de commande adaptée pour faire varier le couple électromagnétique d'une valeur correspondant à l'évolution libre du couple vers la valeur de consigne de couple.

7. Dispositif d'alimentation selon la revendication 6, caractérisé en ce que le
 20 régulateur (16) reçoit, en entrée, une valeur de consigne de flux magnétique ($\|\vec{\Phi}^*\|^2$) et un signal échantillonné représentatif de la valeur du flux magnétique de la machine et comporte des moyens pour générer une tension de commande (V_{ref}) adaptée pour faire varier le flux magnétique de la machine d'une valeur correspondant à l'évolution libre du flux magnétique vers la valeur de consigne de flux.

25 8. Dispositif d'alimentation selon la revendication 7, caractérisé en ce que les moyens (22) pour générer la tension de commande sont adaptés pour générer la tension de commande, à chaque instant d'échantillonnage, de manière à obtenir, lors de l'instant d'échantillonnage suivant, lesdites valeurs de consigne de couple et de flux.

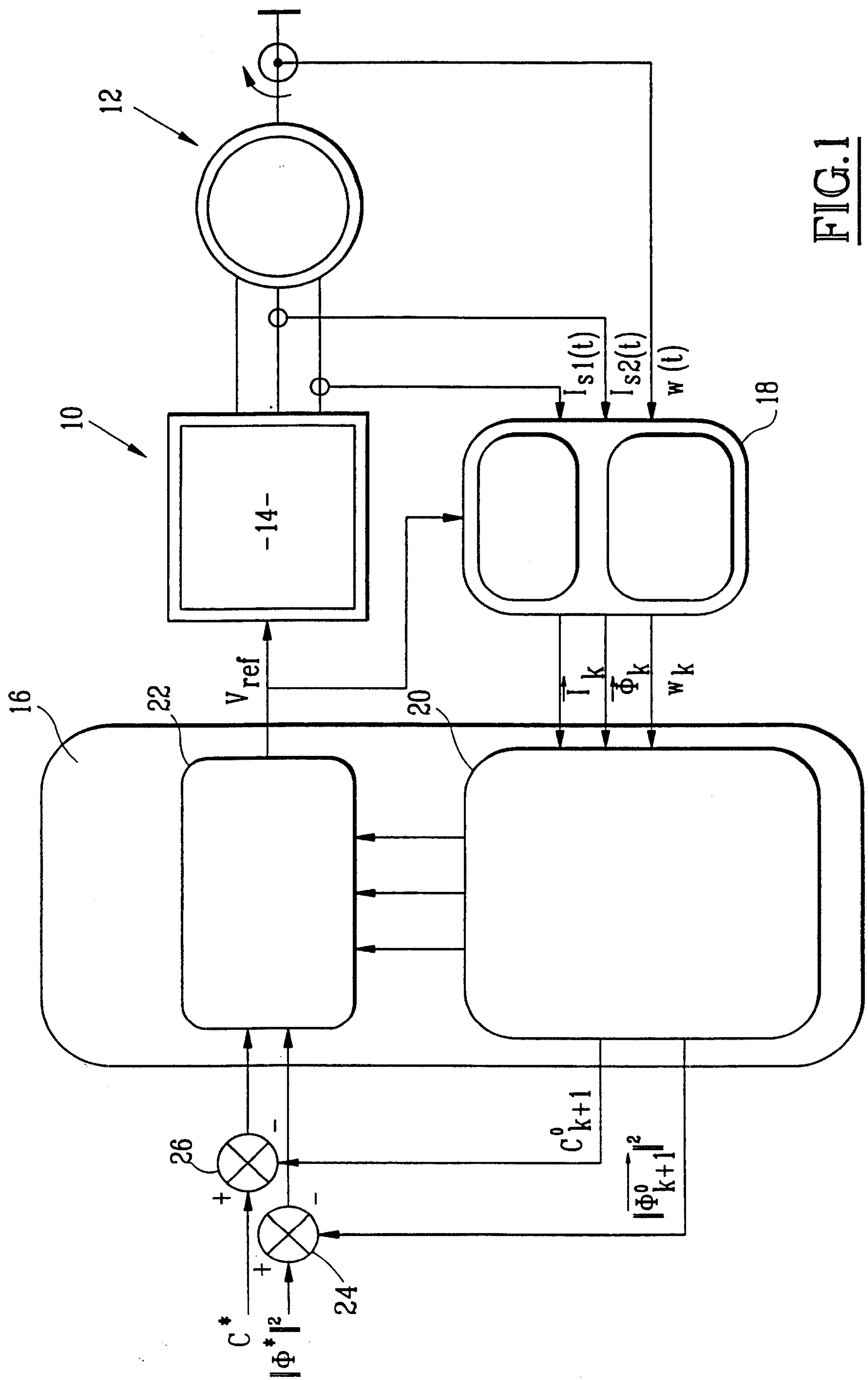


Fig. 1

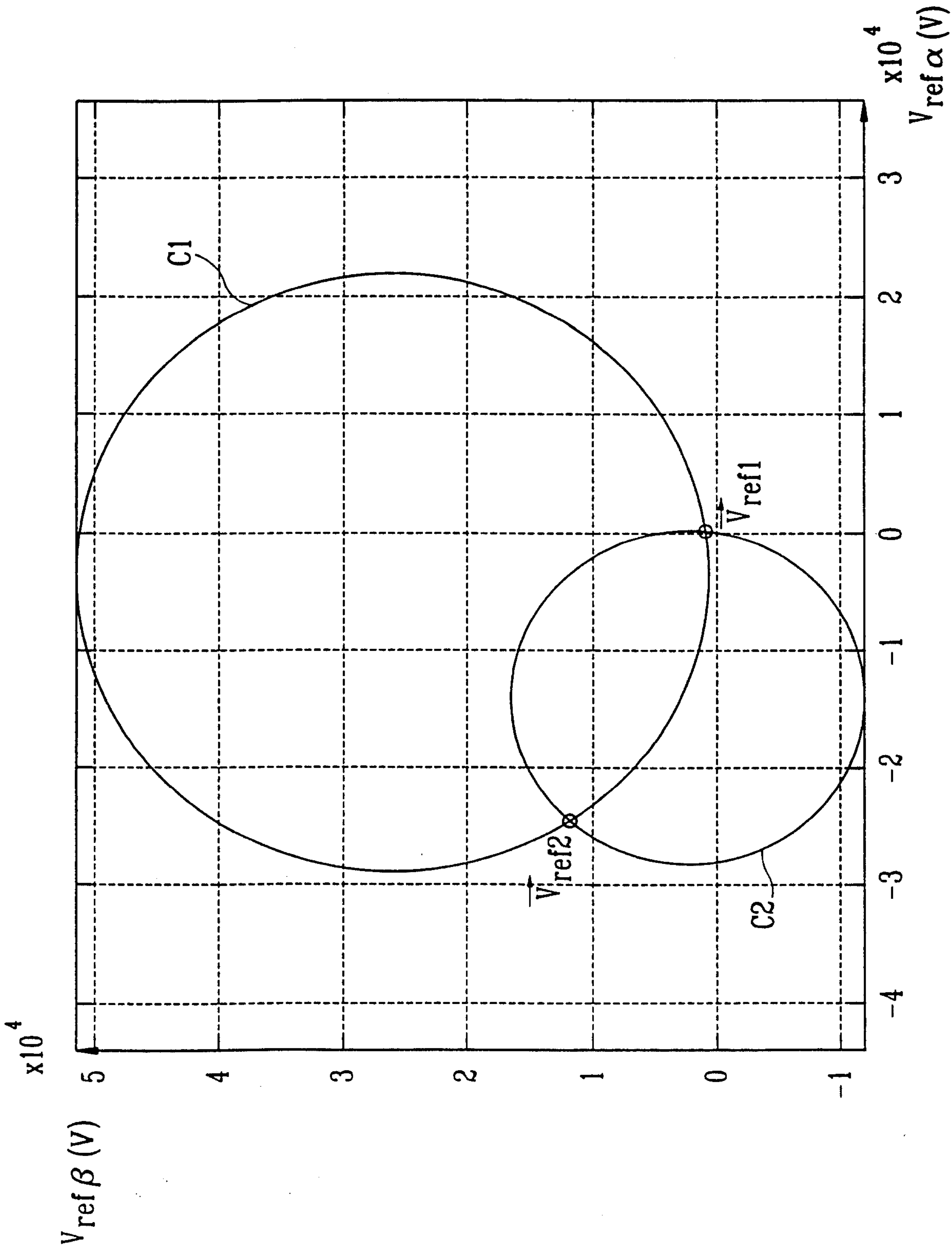


FIG.2

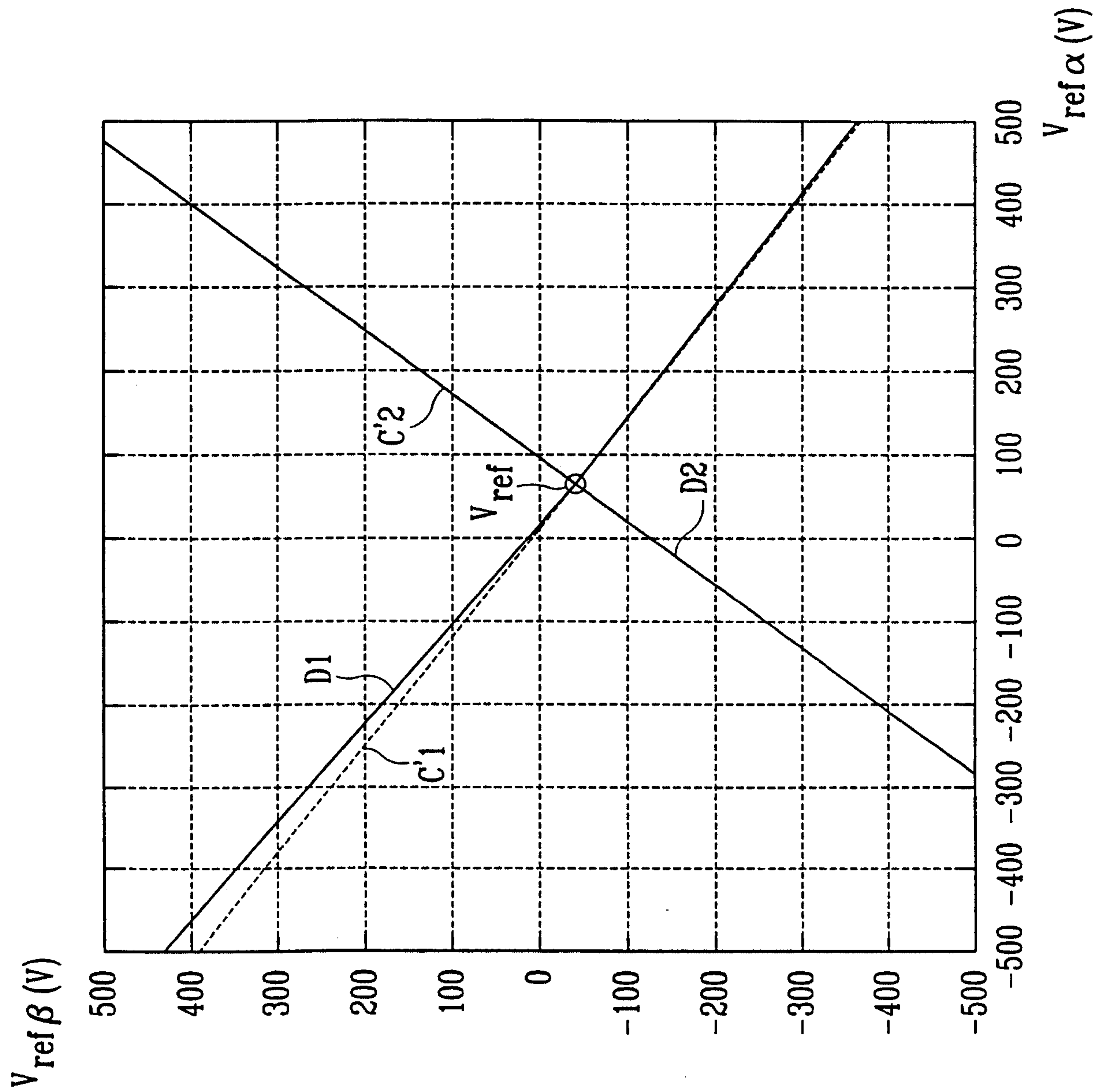


FIG.3

