



CONFÉDÉRATION SUISSE

OFFICE FÉDÉRAL DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

⑪ CH 654 700 A5

⑤① Int. Cl.⁴: H 02 P 3/18

Brevet d'invention délivré pour la Suisse et le Liechtenstein

Traité sur les brevets, du 22 décembre 1978, entre la Suisse et le Liechtenstein

⑫ FASCICULE DU BREVET A5

⑳ Numéro de la demande: 1870/83

㉔ Date de dépôt: 07.04.1983

㉔ Brevet délivré le: 28.02.1986

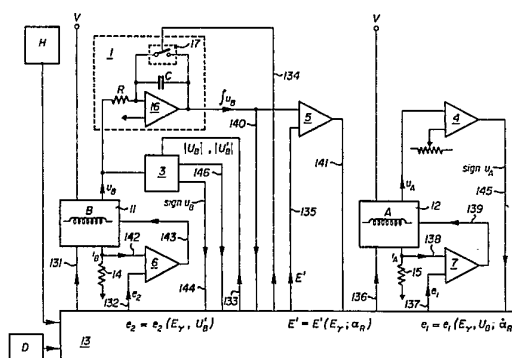
④⑤ Fascicule du brevet
publié le: 28.02.1986㉔ Titulaire(s):
Portescap, La Chaux-de-Fonds㉔ Inventeur(s):
Oudet, Claude, Besançon (FR)㉔ Mandataire:
William Blanc & Cie conseils en propriété
industrielle S.A., Genève

⑤④ Ensemble comportant un moteur synchrone diphasé et un dispositif entraîné par ce moteur.

⑤⑦ On utilise les bobines (A, B) d'un moteur diphasé présentant une très faible inductance mutuelle non seulement comme bobines motrices mais aussi comme capteurs de position et de vitesse.

L'ensemble comporte un circuit de commande et de traitement d'informations (13), des circuits de détection de courant (14, 15) pour chacune des bobines et des circuits de détection de tension (3, 4), un circuit intégrateur pour intégrer la tension induite dans une bobine (B) ainsi que des circuits comparateurs (6, 7) pour fournir des signaux de commande d'alimentation en fonction de signaux de valeurs de courant détectées et de valeurs de référence fournies par le circuit de traitement d'informations.

Cette disposition permet de déterminer l'énergie mécanique totale, principalement cinétique, du système et de doser le courant de freinage sur un parcours déterminé pour annuler cette énergie. Le moteur peut ainsi atteindre très rapidement et sans oscillation la position finale.



1. Ensemble formé d'un moteur électrique synchrone, diphasé, et d'un dispositif entraîné mécaniquement par ce moteur, la charge du moteur étant essentiellement inertielle, le moteur ayant un rotor aimanté de façon à présenter $2N$ pôles de polarité alternante, N étant un nombre naturel, ces pôles évoluant dans les entrefers d'au moins deux circuits magnétiques de stator séparés, disposés conformément au mode de fonctionnement diphasé, ces circuits magnétiques étant couplés avec des bobines respectives, connectées à un dispositif d'alimentation et de commutation agencé pour alimenter ces bobines en courant électrique de manière que le rotor soit entraîné d'une position d'arrêt à une autre, chaque position d'arrêt correspondant à une position d'équilibre pouvant être maintenue par alimentation d'une bobine associée à l'une ou à l'autre des phases du moteur, caractérisé en ce qu'il comporte des moyens pour couper le courant d'entraînement dans la ou les bobines alimentées dès l'instant où, lors du mouvement du rotor d'une position de départ vers une position d'arrêt souhaitée, correspondant à un angle α_s , l'état d'alimentation correspond à la commande de l'avance du rotor vers la position $\alpha_s - 270^\circ/N$, pour intégrer la tension u_b , du moteur, entre le moment où cette tension u_b passe pour la première fois par zéro depuis ladite coupure du courant d'entraînement et le moment où la tension u_a induite dans la bobine ou au moins une des bobines associée(s) à l'autre phase, soit la phase A du moteur, passe pour la première fois par zéro depuis le début de l'intégration de la tension u_b , pour mémoriser le résultat de cette intégration, $E\gamma$, ainsi que la valeur absolue instantanée $|U_B|$ de la tension u_b apparaissant au moment où l'intégration prend fin, cette valeur définissant la vitesse du rotor à ce moment, pour alimenter la bobine ou au moins une des bobines associée(s) à la phase A, dans l'intervalle entre la fin de ladite intégration et le moment où le rotor atteint une position angulaire prédéterminée α_R comprise entre $\alpha_s - 20^\circ/N$ et $\alpha_s - 70^\circ/N$, par un courant de freinage i_A tel que la vitesse angulaire $\dot{\alpha}_R$ du rotor lors de son passage par cette position α_R ait une valeur souhaitée, choisie de telle façon que le rotor puisse, compte tenu de sa vitesse correspondant à la valeur mémorisée $|U_B|$, de son inertie propre, de sa charge et des couples de friction s'opposant à sa rotation, atteindre la position α_s , pour intégrer de nouveau la tension u_b induite dans la bobine ou au moins une des bobines associée(s) à la phase B, entre le moment où u_b passe pour la deuxième fois par zéro depuis ladite coupure du courant d'entraînement et le moment où cette intégrale atteint une valeur correspondant à l'angle α_R , pour mesurer la valeur absolue instantanée $|U'_B|$ de la tension u_b à ce moment, et pour alimenter ensuite la bobine ou au moins une des bobines associée(s) à la phase B par un courant de freinage i_B déterminé par une fonction empirique des valeurs $E\gamma$ et $|U'_B|$, cette fonction étant choisie de telle façon que le rotor ait, par expérience, lors de son premier passage par la position d'arrêt à atteindre, α_s , une vitesse résiduelle souhaitée $\dot{\alpha}_s$, très faible par rapport à $\dot{\alpha}_R$ ou pratiquement nulle.

2. Ensemble selon la revendication 1, caractérisé en ce que le courant i_A a une valeur constante I_A .

3. Ensemble selon l'une des revendications 1 ou 2, caractérisé en ce que le courant i_B a une valeur constante I_B .

4. Ensemble selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comporte des moyens pour alimenter la bobine ou les bobines associée(s) à la phase A par un courant de freinage préliminaire, dans un intervalle suivant ladite coupure du courant d'entraînement et se terminant sensiblement avant le moment prévu pour la détection dudit premier passage par zéro de la tension u_a .

5. Ensemble selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comporte des circuits d'alimentation et de commutation (11, 12) pour les bobines associées à chacune des phases A et B du moteur, ces circuits étant reliés à une source de tension d'alimentation (V), un circuit de commande et de traitement d'informations (13) relié à une source de signaux d'horloge (H), à un dispositif de déclenchement (D) fournissant un signal de déclenchement et de commande du nombre de pas à effectuer, ainsi qu'aux circuits d'alimentation et de

commutation pour la commande de ceux-ci, des dispositifs de détection de courant (14, 15) pour détecter la valeur du courant dans les bobines associées à chacune des phases du moteur, des premier et deuxième dispositifs comparateurs (6, 7) connectés chacun de façon à être commandés, d'une part, par le signal de sortie d'un dispositif de détection de courant correspondant et, d'autre part, par un signal de référence de courant (e_2 , e_1) correspondant, fourni par le circuit de commande et de traitement d'information, et de façon à fournir un signal de réglage du courant au circuit d'alimentation et de commutation correspondant, un premier circuit de détection de tension (4) connecté au circuit d'alimentation et de commutation (12) connecté au circuit d'alimentation et de commutation (12) associé à la première phase, A, du moteur pour détecter, au moment voulu, un passage par zéro de la tension induite dans au moins une bobine associée à cette phase A et connecté au circuit de commande et de traitement d'information pour lui fournir un signal correspondant, un deuxième circuit de détection de tension (3) connecté au circuit d'alimentation et de commutation (11) associé à la deuxième phase, B, du moteur pour détecter, au moment voulu, un passage par zéro de la tension induite dans au moins une bobine associée à cette phase B et pour mesurer la valeur absolue de cette tension induite à des instants déterminés par un signal de commande de mesure fourni à ce circuit par le circuit de commande et de traitement d'information, ce deuxième circuit de détection de tension étant connecté en outre au circuit de commande et de traitement d'information pour lui fournir des signaux relatifs au passage par zéro et à la valeur absolue de la tension induite, un circuit intégrateur (1) connecté au circuit d'alimentation et de commutation associé à la deuxième phase B du moteur pour intégrer, au moment voulu, la tension induite dans au moins une bobine associée à cette phase B, ce circuit intégrateur comportant un dispositif de remise à zéro connecté au circuit de commande et de traitement d'information pour recevoir des signaux de commande de remise à zéro, la sortie de ce circuit intégrateur étant reliée, d'une part, au circuit de commande et de traitement d'information et, d'autre part, à une première entrée d'un troisième dispositif comparateur (5) dont une deuxième entrée est reliée au circuit de commande et de traitement d'information pour recevoir un signal de référence de position (E') et dont la sortie est connectée au circuit de commande et de traitement d'information pour lui fournir un signal de détection de position correspondant.

L'invention concerne un ensemble formé d'un moteur électrique synchrone, diphasé, et d'un dispositif entraîné mécaniquement par ce moteur, tel que décrit dans le préambule de la revendication 1.

Dans de nombreuses applications, notamment lorsque le rotor du moteur doit effectuer des mouvements de rotation successifs se suivant à des intervalles très courts, il est important de réaliser un amortissement du rotor à la fin de chaque mouvement de rotation.

Les solutions déjà proposées à cet effet présentent des inconvénients majeurs. Ainsi, un amortissement mécanique par frottement sec ou visqueux, par exemple, produit un freinage sur toute la trajectoire et pas seulement à la fin de celle-ci. Un amortissement électrique par court-circuit des bobines ou par une impulsion de freinage, ou encore un amortissement par ajustement de la rampe de décélération, ont tous l'inconvénient d'être très sensibles aux variations de température et à la variation des caractéristiques des moteurs. Il a également été proposé d'asservir le courant dans le moteur à la position angulaire du rotor, déterminée par un codeur optique, mais l'adjonction d'un tel codeur optique coûte relativement cher.

L'invention vise à fournir un ensemble du type susmentionné ne nécessitant pas de dispositifs de détection optique, tout en réalisant un freinage parfaitement dosé sur un parcours déterminé, en tenant compte des caractéristiques du moteur et de sa charge et notamment de la variation de ces grandeurs en fonction de la température et de la dispersion de fabrication.

A cet effet, l'ensemble selon l'invention est caractérisé par les moyens décrits dans la partie caractéristique de la revendication 1. Les revendications 2 à 4 concernent des formes de réalisation particulières de cet ensemble.

Les avantages, propriétés et possibilités d'application de l'ensemble selon l'invention ressortiront plus clairement de la description d'un exemple de mise en œuvre et des explications données ci-après en rapport avec le dessin annexé, dans lequel:

la fig. 1 est un graphique montrant la variation de certaines grandeurs intervenant dans le présent ensemble en fonction de la position du rotor, et

la fig. 2 est un schéma synoptique du dispositif de commande.

Dans un moteur diphasé du type mentionné plus haut et qui est décrit par exemple dans le brevet suisse N° 637508, et selon une autre forme d'exécution dans la demande de brevet internationale publiée WO N° 83/02042, le calage des bobines des deux phases en quadrature implique que, la vitesse du rotor étant supposée constante, la tension induite dans une bobine d'une première phase est maximale lorsque la tension induite dans une bobine associée à l'autre phase passe par 0. La variation des tensions induites étant essentiellement sinusoïdale en fonction de l'angle de rotation du rotor, on peut écrire

$$\text{pour la phase A: } u_A = \gamma n \dot{\alpha} \sin(N\alpha) \quad (1)$$

$$\text{pour la phase B: } u_B = \gamma n \dot{\alpha} \cos(N\alpha) \quad (2)$$

où γ désigne le couple par ampère-tour de la bobine considérée, n le nombre de spires de celle-ci, $\dot{\alpha} = d\alpha/dt$ la vitesse angulaire instantanée du rotor et N le nombre de paires de pôles du rotor, $N\alpha$ représentant par conséquent l'angle électrique correspondant à la position instantanée du rotor.

La vitesse angulaire du rotor ainsi que le couple, en particulier, peuvent présenter des variations relativement importantes en fonction de la température et également d'un moteur à l'autre dans la même série de fabrication. Les caractéristiques de l'alimentation, la perméabilité du fer doux et les frottements sont les principales sources de variation. La dispersion de γ d'un moteur à l'autre peut par exemple dépasser $\pm 15\%$ et, compte tenu de la température, il faut admettre que la valeur de γ n'est connue qu'à $\pm 20\%$.

Pour déterminer la valeur réelle de γ au cours du fonctionnement du moteur, on peut intégrer la tension induite dans une bobine du moteur, soit e , au moyen d'un intégrateur électronique. Un tel intégrateur ayant les caractéristiques capacitive C et résistive R , l'intégration durant un intervalle $[t_1, t_2]$ fournit la valeur:

$$E = \left(\int_{t_1}^{t_2} e \, dt \right) / RC$$

Si l'on intègre, par exemple, u_B entre un instant t_1 où cette tension induite passe par 0, soit par exemple à un angle électrique $N\alpha_1 = 90^\circ$, et un instant t_2 tel que $N\alpha_2 = N\alpha_1 + 90^\circ = 180^\circ$, le résultat $E\gamma$ de cette intégration devient:

$$\begin{aligned} E\gamma &= \left[\int_{t_1}^{t_2} \gamma n \dot{\alpha} \cos(N\alpha) dt \right] / RC = \\ &= \gamma n \left[\int_{t_1}^{t_2} (d\alpha/dt) \cos(N\alpha) dt \right] / RC \\ &= \gamma n \left[\int_{N\alpha_1}^{N\alpha_2} \cos(N\alpha) d\alpha \right] / NRC = \\ &= -\gamma n / NCR \\ \text{d'où } \gamma &= NRC |E\gamma| / n \end{aligned} \quad (3)$$

Si l'on mesure la valeur U_B de la tension induite u_B au moment où l'intégration prend fin (c'est-à-dire lorsque $N\alpha = 180^\circ$), on peut ainsi déterminer $\dot{\alpha}$ à ce moment, à savoir:

$$\dot{\alpha}_2 = -U_B / \gamma n = |U_B| / NRC |E\gamma| \quad (4)$$

D'autre part, une certaine position angulaire α_3 peut être déterminée en intégrant u_B entre une position du rotor α_1 où cette tension induite passe par 0, soit par exemple $270^\circ/N$, et la position $\alpha_3 < \alpha_1 + 90^\circ/N$. Le résultat de cette intégration E' est en effet:

$$\begin{aligned} E' &= \gamma n \left[\int_{N\alpha_1}^{N\alpha_3} \cos(N\alpha) d(N\alpha) \right] / NRC \\ &= -E\gamma [\sin(N\alpha_3) + 1] \end{aligned} \quad (5)$$

Cela permet donc, en détectant le moment où la valeur E' est atteinte par l'intégrateur, de déceler le passage du rotor par la position particulière α_3 .

La fig. 1 illustre l'application de ces considérations au freinage d'un moteur du type susmentionné. Plus particulièrement, la charge du moteur est supposée essentiellement inertielle, comme c'est le cas dans l'utilisation du moteur pour l'entraînement d'une marguerite d'imprimante, par exemple. Les frottements dus aux roulements du moteur et le couple sans courant sont supposés très faibles. Dans ces conditions, l'énergie mécanique totale W_m de l'ensemble moteur-charge se limite à l'énergie cinétique:

$$W_m = J_t \dot{\alpha}^2 / 2 \quad (6)$$

J_t représentant l'inertie totale de cet ensemble.

Par ailleurs, il est à noter que, dans le moteur concerné ici, chaque position d'arrêt correspond à une position d'équilibre pouvant être maintenue par l'alimentation d'une bobine associée à l'une ou à l'autre des phases du moteur.

La fig. 1 montre, au moins partiellement, la variation en fonction de l'angle électrique $N\alpha$ des principales grandeurs intervenant dans le procédé de freinage décrit ici. Ce freinage intervient au cours des quatre derniers pas du moteur précédant l'immobilisation du rotor dans une position angulaire α_s correspondant au point S du graphique. En effet, selon le présent procédé, le freinage est appliqué dans le cas de mouvements du rotor dépassant quatre pas. Pour des mouvements de quatre pas ou moins, il s'avère que, dans la plupart des applications, par exemple dans le cas de l'entraînement d'une marguerite d'imprimante, les temps de déplacement des autres parties mécaniques du système telles que le chariot de l'imprimante deviennent prépondérants.

L'origine O des angles électriques $N\alpha$ est donc placée dans le graphique de la fig. 1 à $N\alpha_s - 360^\circ$, chaque pas correspondant à un angle électrique $N\alpha$ de 90° .

Dans le cas considéré ici à titre d'exemple, l'entraînement du moteur est effectué par des impulsions de fréquence de répétition constante et la ou les bobines d'une seule phase, A ou B, sont alimentées à la fois de la manière bien connue dans cette technique (cf. par exemple le brevet suisse N° 647129).

La fig. 2 montre le schéma synoptique du dispositif de commande du moteur. Les bobines associées aux phases A et B sont connectées à des circuits d'alimentation et de commutation respectifs 11 et 12, ce qui est indiqué symboliquement dans les blocs correspondants de la fig. 2. Ces circuits 11 et 12 comportent des moyens de connexion et de commutation bien connus, montrés par exemple dans le brevet suisse susmentionné N° 647129, et ils permettent en particulier de brancher les bobines du moteur dans un sens voulu à une tension d'alimentation V ou à des circuits de détection et de traitement de signaux qui seront décrits plus en détail ci-après. Les moyens de connexion notamment sont agencés pour effectuer le branchement voulu sous l'effet de signaux de commande qui leur sont fournis par un circuit de commande et de traitement de l'information représenté par le bloc 13 de la fig. 2. Ce circuit comporte notamment un microprocesseur programmé conformément au présent procédé, tel qu'il sera décrit ci-après. Le circuit de commande et de traitement de l'information est relié à une source de signaux d'horloge H et à un dispositif de déclenchement D , ce dernier fournissant un signal de déclenchement et de commande du nombre de pas p à effectuer lors d'un mouvement de rotation donné. Le circuit 13 est

en particulier agencé pour commander les circuits 11 et 12, par l'intermédiaire de liaisons respectives 131 et 136, de manière que les bobines soient alimentées en impulsions de courant d'entraînement selon le mode diphasé susmentionné, pour déterminer le nombre de pas effectué, et pour réaliser les autres fonctions qui seront décrites ci-après.

Selon le présent procédé, lors d'un mouvement du rotor correspondant à $p > 4$ pas, le circuit 13 commande la coupure du courant d'alimentation du moteur dès l'instant où l'état du cycle d'alimentation correspond à la commande de l'avance du rotor vers la position $\alpha_s - 270^\circ/N$, c'est-à-dire avant que soit appliquée l'impulsion de courant destinée normalement à faire avancer le rotor vers la position correspondant à 3 pas avant la position d'arrêt. Le point où cette coupure de courant intervient est indiqué par Z sur l'axe des abscisses de la fig. 1, la phase alimentée en dernier lieu étant désignée par A et le couple correspondant par C_A .

Il est à noter que, dans la présente description, la désignation par A et B des phases et des bobines respectives correspond aux désignations de la fig. 1. Toutefois, il est évident que, selon le nombre de pas effectués, la phase B pourra jouer le rôle de la phase A du dessin, c'est-à-dire être la dernière phase alimentée en courant d'alimentation avant l'opération de freinage, de sorte que les désignations A et B de la présente description et des dessins pourront simplement être interverties.

Conformément au diagramme de la fig. 1, si l'on maintenait l'état d'alimentation existant avant la coupure du courant, le moteur s'arrêterait finalement à l'origine O. Au moment de la coupure, le rotor peut être en avance, comme dans l'exemple illustré à la fig. 1, ou en retard par rapport au cycle d'alimentation et on ne sait donc pas exactement dans quelle position Z il se trouve au moment où il recevrait normalement l'impulsion d'entraînement destinée à le faire avancer vers la position correspondant à $p - 3$ pas. Toutefois, dans un système stable, la position Z est nécessairement située avant le point M correspondant à $N\alpha_s - 270^\circ$.

Après un intervalle de temps permettant l'extinction des phénomènes transitoires suivant la coupure du courant au point Z, les circuits 11 et 12 sont commandés à partir du circuit 13 de façon à déconnecter les bobines. Puis, alors que le rotor continue son parcours sur sa lancée, la ou les bobines de la phase B sont branchées, sous la commande du circuit 13, d'une part, sur un intégrateur 1 et, d'autre part, sur un circuit de détection 3 comportant un convertisseur analogique-numérique. Ce circuit 3 est de préférence d'un type fournissant deux signaux séparés pour la valeur absolue et pour le signe de la tension u_B induite dans la ou les bobines B. La commande de ce circuit à partir du circuit 13 s'effectue par l'intermédiaire d'une liaison 133.

L'intégrateur 1 comporte un amplificateur opérationnel 16 avec une résistance d'entrée R et une capacité C branchée entre ses bornes d'entrée et de sortie selon le schéma de la fig. 2. En outre, un dispositif de remise à zéro 17 est monté en parallèle aux bornes d'entrée et de sortie de l'amplificateur 16, le dispositif 17 étant commandé, par l'intermédiaire d'une liaison 134, à partir du circuit 13.

Pendant le mouvement du rotor vers le point M situé à $N\alpha_s - 270^\circ$, l'intégrateur est maintenu hors fonctionnement au moyen du dispositif 17, et la ou les bobines A sont connectées au moyen du dispositif 12, commandé par le circuit 13, à un circuit comparateur 4.

Lorsque le rotor passe par le point M, la tension u_B détectée par le circuit 3 passe par 0, c'est-à-dire change de signe dans le sens indiqué. Cette information, transmise par une liaison 144 «sign u_B » au circuit 13, déclenche la mise en action de l'intégrateur 1 par l'intermédiaire d'un signal correspondant apparaissant sur la liaison 134.

Le rotor continue son mouvement au-delà de M à une vitesse qui, du fait que la charge est essentiellement inertielle, ne baisse que peu pendant ce parcours. L'intégration de la tension u_B fournit un signal correspondant, sur une liaison 140, au circuit 13.

Au passage du point P correspondant à l'angle électrique $N\alpha_s - 180^\circ$, la tension u_A change de signe dans le sens indiqué, ce qui

est détecté par le circuit 4 qui fournit un signal correspondant «sign u_A » au circuit 13, par l'intermédiaire d'une liaison 145. Ce signal commande la mise en mémoire, dans le circuit 13, du résultat $E\gamma$ de l'intégration de la tension u_B à ce moment, ainsi que de la valeur absolue $|U_B|$ de cette tension au même point P, valeur absolue fournie par le circuit 3 sur une liaison 146. A cet instant, l'intégrateur est remis à zéro sous l'effet d'une commande par la liaison 134.

Un petit intervalle de temps plus tard, la ou les bobines de la phase A sont déconnectées du circuit 4, toujours sous la commande du circuit 13, et sont branchées sur l'alimentation V de manière à être parcourues par un courant de freinage i_A de valeur constante I_A , fournissant un couple négatif C_A tel que représenté à la fig. 1. La valeur du courant de freinage I_A est déterminée par un signal de référence e_i fourni par le circuit 13, par l'intermédiaire d'une liaison 137, à un comparateur 7. Ce dernier reçoit en outre, par l'intermédiaire d'une liaison 138, un signal représentant le courant effectif i_A dans la ou les bobines A, une résistance de mesure 15 étant branchée en série avec ces bobines. Ce comparateur 7 fournit, sur une liaison 139, un signal d'asservissement au circuit 12, de manière à maintenir le courant i_A à la valeur I_A . Le signal de référence e_i déterminant I_A est une fonction des valeurs de $E\gamma$ et de U_B mémorisées dans le circuit 13, et dépend en outre de la valeur α_R de la vitesse que le rotor devrait avoir, selon l'expérience, en une position angulaire $\alpha_s - 70^\circ/N$ (point R de la fig. 1), pour pouvoir atteindre la position finale α_s , compte tenu de sa vitesse réelle au point P, de son inertie propre, de sa charge et des couples de friction s'opposant à sa rotation.

Plus particulièrement, dans le présent exemple, le courant constant I_A injecté entre les points P et R de la fig. 1, P correspondant à l'angle électrique $N\alpha_s - 180^\circ$, sera déterminé par la relation suivante, exprimant l'égalité entre l'énergie électrique du freinage et la réduction de l'énergie cinétique du rotor selon (6):

$$I_A \int u_A dt = -J_i(\dot{\alpha}_P^2 - \dot{\alpha}_R^2)/2$$

durée du freinage
ou, avec (1):

$$I_A \left[N\alpha_R \gamma n \sin(N\alpha) d(N\alpha) \right] / N = -J_i(\dot{\alpha}_P^2 - \dot{\alpha}_R^2)/2$$

En introduisant les relations (3) et (4), avec $\alpha_2 = \alpha_P$, on obtient:

$$I_A = J_i [U_B^2 / (NRCE\gamma)^2 - \dot{\alpha}_R^2 / 2RCE\gamma (\cos N\alpha_R + 1)]$$

Pour $N\alpha_R = 315^\circ$ par exemple:

$$I_A = J_i [U_B^2 / (NRCE\gamma)^2 - \dot{\alpha}_R^2 / 3,414 RCE\gamma]$$

Les valeurs de $|U_B|$ et de $E\gamma$ sont fournies ou converties en valeurs numériques et le microprocesseur du circuit 13 est agencé pour déterminer I_A à partir d'un tableau de valeurs, par exemple sous la forme de 16 ou 32 niveaux discrets de courants, représentés par des signaux de commande e_i correspondants.

Lorsque le rotor passe par le point Q situé à $N\alpha_s - 90^\circ$, la tension induite u_B change de signe. Un signal correspondant apparaît sur la liaison 144 et déclenche dans le circuit de commande la mise en action de l'intégrateur 1. Le circuit 13 a déterminé, par ailleurs, en fonction de la valeur de $E\gamma$ mesurée, une valeur de référence E' correspondant à la position α_R du rotor, conformément à la relation (5), avec $\alpha_1 = 270^\circ$ et $\alpha_3 = \alpha_R$. Cette valeur de référence est fournie par une liaison 135 à un comparateur 5 qui reçoit sur une autre entrée le signal de sortie de l'intégrateur 1. Le comparateur 5 fournit ainsi au circuit 13, sur une liaison 141, un signal de position indiquant le moment où le rotor passe par le point R. Ce signal déclenche la mise en mémoire, dans le circuit 13, de la valeur absolue $|U'_B|$ de la tension induite u_B fournie par le circuit 3. D'autre part, ce signal sur la liaison 141 déclenche la commande de coupure du courant I_A , par l'intermédiaire du circuit 12, et le branchement de la bobine ou des bobines A sur le comparateur 4, pour permettre de décélérer le chan-

gement de signe de la tension induite u_A indiquant le passage du rotor par la position $N\alpha_s$, c'est-à-dire par le point S.

Enfin, toujours suite à l'apparition du signal de position fourni par 5, une nouvelle phase de freinage est déclenchée. Elle consiste à injecter dans la ou les bobines de la phase B un courant de freinage C_B tel que représenté à la fig. 1. On choisit la phase B pour ce deuxième freinage puisque le couple C_A tend vers 0 au voisinage du point S, alors que le couple C_B y atteint son maximum. Le circuit 13 commande donc le débranchement de la ou des bobines de la phase B des circuits 1 et 3 et l'alimentation de ces bobines par un courant $i_B = I_B = \text{const.}$, déterminé par un signal de référence e_2 . Ce signal e_2 est fonction de la valeur de $E\gamma$ mémorisée ainsi que de la valeur $|U'_B|$ mesurée au point R. Le courant I_B dépend ainsi de la vitesse effective du rotor au début de cette nouvelle phase de freinage, ce qui permet d'adapter le freinage parfaitement aux conditions réelles du fonctionnement du moteur. En effet, la vitesse effective du rotor au point R peut se révéler plus grande que la vitesse qui aurait dû être atteinte par la phase de freinage précédente, par exemple du fait d'une saturation, ou elle peut être plus petite que cette vitesse théorique du fait de frottements plus importants que prévu. La valeur I_B est déterminée par une fonction empirique à partir d'un tableau de valeurs comportant comme valeur d'entrée $E\gamma$ et U'_B . Le signal de référence correspondant est fourni par une liaison 132 à un comparateur 6 qui reçoit en outre, par une liaison 142, un signal fonction du courant i_B effectif, mesuré par l'intermédiaire d'une résistance 14 branchée en série avec la ou les bobines concernées. Une liaison 143

avec le circuit 11 assure l'asservissement du courant i_B à la valeur voulue I_B .

On peut déterminer la valeur I_B de façon que le rotor passe pour la première fois par S à une vitesse résiduelle très faible, de l'ordre de 1 à 2 rad/s. A titre d'exemple, pour un moteur effectuant 100 pas par tour, à une vitesse de 2 rad/s, le temps pour parcourir 3° électrique est de 0,9 ms, ce qui est compatible avec la tolérance de position de $\pm 3^\circ$ électriques généralement exigée dans la commande d'une marteau.

En atteignant le point S, il est possible d'alimenter de nouveau la ou les bobines de la phase A en courant de signe adéquat, pour fixer la position d'équilibre.

On peut également prévoir un préfreinage au moyen de la phase A avant que le rotor ait atteint le point P, ce qui permet une vitesse initiale plus élevée. Un tel freinage serait ajusté non en niveau de courant, mais seulement en durée à partir de l'instant de passage du rotor en M, de telle sorte que la phase A soit sûrement disponible pour détecter le passage du rotor par le point P.

Dans le présent exemple de réalisation, le courant de freinage a été considéré comme constant, ce qui peut être réalisé par exemple grâce à un circuit de découpage permettant de maîtriser le courant quelle que soit la valeur demandée, entre deux limites, et la force électromotrice induite. Toutefois, il est également possible de prévoir un courant de freinage variable, à condition d'engendrer la même énergie électrique de freinage que dans le cas du courant constant, dans un intervalle de temps déterminé.



[illegible]