Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 76 (1985)

Heft: 9

Artikel: Evolution récente et limites de la conception des moteurs pas à pas

Autor: Jufer, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904598

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Evolution récente et limites de la conception des moteurs pas à pas

M. Jufer

En partant des caractéristiques principales des moteurs pas à pas, l'article décrit l'état de l'évolution de la technique et explique les limites atteintes dans l'accroissement de la résolution de la précision du pas, de la suppression du couple de positionnement et des performances à haute vitesse.

Von den wichtigsten Merkmalen des Schrittmotors ausgehend, beschreibt der Aufsatz den Stand der Technik und befasst sich eingehend mit den heute erreichten Grenzen bezüglich der Auflösung der Schrittgenauigkeit, der Unterdrückung des Positioniermomentes und des Verhaltens bei hoher Geschwindigkeit.

Conférence présentée lors des troisièmes journées d'études sur les moteurs pas à pas: «Positionnement incrémental par entraînement électrique», les 13 et 14 juin 1984 à l'ENSEM de Nancy.

Adresse de l'auteur

Prof. *Marcel Jufer*, Laboratoire d'électromécanique et de machines électriques, Ecole Polytechnique Fédérale, 16, chemin de Bellerive, 1007 Lausanne.

1. Introduction

Vu leur développement récent et l'évolution des techniques d'entraînements électriques influencées par les possibilités d'alimentation et de commande électriques, les moteurs pas à pas voient leur domaine d'application ainsi que les impératifs spécifiques à leurs performances se modifier peu à peu. Les créneaux de leurs applications sont toujours plus liés à la nature des contraintes spécifiques. Ces impératifs nécessitent tout d'abord de mieux définir le concept de moteur pas à pas eu égard aux autres techniques d'entraînements synchrones. Les caractères communs, les spécificités et les implications qui en découlent permettent de mieux cerner les applications.

Les tendances dans l'évolution des performances des moteurs pas à pas, sous la pression des marchés les plus adaptés, sont principalement:

- l'augmentation de la résolution, tout en conservant la possibilité de réaliser des démultiplications de pas (mini-pas);
- la précision du pas à l'arrêt, sans asservissement;
- la suppression du couple de positionnement, de façon à améliorer les possibilités de démultiplication par mini-pas;
- l'accroissement des performances à haute vitesse, principalement en réduisant les pertes dans le fer.

La suite de la description met en évidence les possibilités et les limites associées à ces divers points.

2. Moteurs synchrones et moteurs pas à pas

2.1 Caractères communs

A priori, on peut distinguer trois types de moteurs très proches:

- le moteur synchrone à aimants permanents ou réluctant, démarrant en régime synchrone ou en régime asynchrone au moyen d'un enroulement rotorique asynchrone spécifique;
- le moteur synchrone à aimants permanents auto-commuté ou moteur à courant continu sans collecteur [1];
- le moteur pas à pas.

Le caractère commun de tous ces moteurs est le comportement synchrone de l'alimentation et du rotor. Ils sont tous caractérisés par la relation

$$\Omega = \omega / p \qquad p \geqslant 1 \tag{1}$$

La vitesse de rotation du rotor (Ω) est un sous-multiple constant de la pulsation de l'alimentation (ω).

C'est principalement par la conception, par l'alimentation et par l'usage que ces moteurs se différencient.

2.2 Le moteur synchrone

Le moteur synchrone est caractérisé par un stator dont les encoches sont le support d'un bobinage polyphasé (généralement trois phases) générant un champ tournant caractérisé par $2p$ pôles. Le rotor présente la même polarité, définie par des aimants permanents ou la saillance d'un circuit ferromagnétique dans le cas d'un moteur réluctant synchrone.

L'alimentation, en circuit ouvert, définit une rotation du rotor calquée sur celle du champ tournant, avec un éventuel phénomène d'oscillation dynamique autour de la position d'équilibre instantanée théorique.

2.3 Le moteur synchrone auto-commuté

Le moteur synchrone auto-commuté, ou à courant continu sans collecteur, est identique dans son principe au moteur synchrone à aimants permanents. Il se distingue par l'alimentation et la commande. Dans la règle, l'alimentation présente une séquence à $2m$ états (éventuellement $4m$) pour un bobinage à m phases, pilotée par des capteurs associés à la position du moteur. Celui-ci reste synchrone avec sa

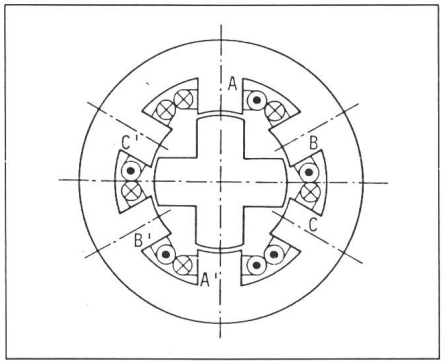

Fig. 1 Moteur réluctant triphasé, 12 pas par tour

propre alimentation. A la manière d'un moteur à courant continu, la fréquence de l'induit définit un champ fixe par rapport à l'inducteur.

La spécificité d'un tel moteur réside d'une part dans le stator dont le bobinage crée un champ de même polarité que le rotor et d'autre part dans la nature de la commande qui impose un champ synchrone avec la position du rotor, quelles que soient les conditions de fonctionnement.

2.4 Le moteur pas à pas

Les critères distinctifs du moteur pas à pas sont multiples, mais aucun d'eux n'est significatif, par suite d'exceptions. Citons:

- la *réduction* électromagnétique entre la vitesse apparente du «champ tournant» statorique et celle du rotor. Le moteur réluctant de la figure 1 présente un rapport de réduction de −3 (rotation du rotor de −60° pour une rotation de 180° du champ magnétique). Le moteur hybride de la figure 2 présente un rapport de réduction de +9.

En revanche, les moteurs à structure multiple tels que le moteur électromagnétique de la figure 3 ont une vitesse de rotation équivalente du champ qui est la même que celle du rotor.

- Découlant de ce concept de démultiplication, la notion de *positionnement de caractère incrémental* associé à une impulsion d'alimentation. Pour certaines applications, seul le caractère synchrone du moteur pas à pas est utilisé pour assurer un contrôle de vitesse.
- L'*alimentation de caractère impulsionnel,* en tout ou rien, associée au concept de pas. Cependant, dans le cas d'une alimentation en mini-pas, la source se rapproche d'une sinusoïde.

Nous définirons le moteur pas à pas comme étant un transducteur synchrone permettant une conversion d'énergie et d'information de caractère électromécanique. Son alimentation est de type électrique digital ou impulsionnel. Son mouvement, rotatif ou de translation, est de type incrémental continu.

3. Accroissement de la résolution

3.1 Possibilités

Deux voies s'offrent pour accroître la résolution des moteurs pas à pas:

- La conception permettant une augmentation du nombre de pas par tour par la géométrie des zones à réluctance variable ou par la magnétisation des aimants permanents;
- la commande et l'alimentation qui permettent une démultiplication de pas (technique de mini-pas) par l'excitation simultanée de deux phases.

Ces deux techniques ne sont pas équivalentes. En effet, pour un pas élémentaire égal à N_p obtenu par un moteur à m phases, on a la relation suivante pour le fondamental du couple en fonction de l'angle de rotation α:

$$T_1 = \hat{T}\sin\left(\frac{N_p}{m}\alpha + \alpha_0\right) \quad \alpha_0 = k \cdot 2\pi/m$$

$$k = 0 \text{ à } (m-1) \qquad (2)$$

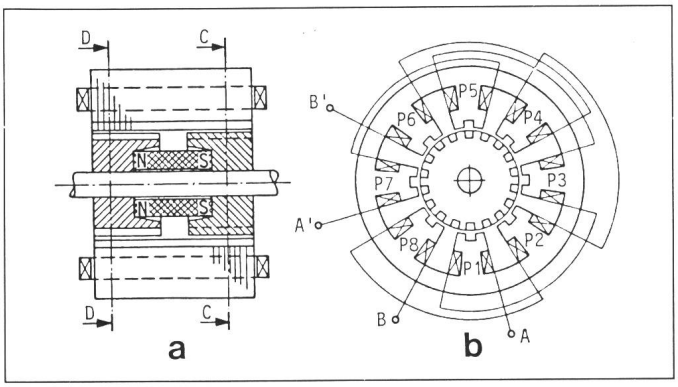

Fig. 2 Moteur hybride, 72 pas par tour

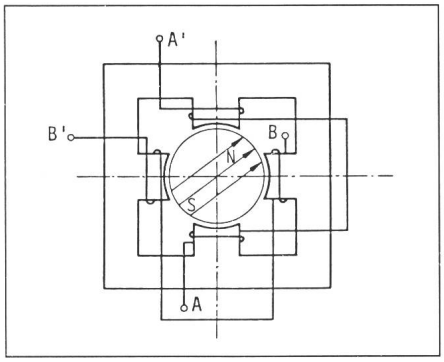

Fig. 3 Moteur électromagnétique biphasé, 4 pas par tour

Si ce pas N_p est obtenu à partir d'un pas élémentaire N_{p0} par une division en ν mini-pas, on a la relation

$$T_2 = \hat{T}\sin\left(\frac{N_{p0}}{m}\alpha + \alpha_0'\right) \qquad (3)$$

$$\alpha_0' = k \cdot 2\pi/m\nu$$

$$k = 0 \text{ à } \nu(m-1)$$

Pour une même amplitude de couple, ces deux solutions diffèrent par la pente (fig. 4). Comme

$$\frac{dT}{d\alpha} = \frac{N_p}{m}\hat{T}\cos\left(\frac{N_p}{m}\alpha + \alpha_0\right) \qquad (4)$$

le quotient des pentes à l'origine s'écrit

$$\frac{dT_1/d\alpha)_0}{dT_2/d\alpha)_0} = \frac{N_p}{N_{p0}} = \nu \qquad (5)$$

Le moteur dont la résolution est accrue par une technique de mini-pas présente une sensibilité de position à la charge accrue dans le rapport de dé-

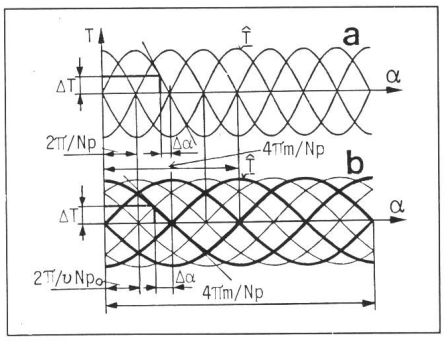

Fig. 4 Caractéristiques de couple en fonction de la position de deux moteurs électromagnétiques biphasés bipolaires

a) moteur de référence
b) moteur présentant une résolution moitié, alimenté par une technique de mini-pas de rapport 2

$\Delta T/\Delta\alpha$ pente au point d'équilibre stable

multiplication de pas v. La solution liée à la conception du moteur offre donc plus de possibilités par une raideur plus grande de la caractéristique de couple que la technique de minipas. C'est celle-ci qui sera retenue pour un examen plus détaillé.

3.2 Limites de la conception

Dans le cas du moteur hybride, qui se prête le mieux à un nombre de pas élevé, la résolution est associée au pas dentaire τ_d. Dans le cas d'une alimentation bipolaire, on a

$$N_p = 2\,m \cdot \pi d / \tau_d \qquad (6)$$

Le pas dentaire est limité en fonction de l'entrefer. En effet, s'il est trop faible en valeur relative, la variation de perméance est insuffisante et le couple qui en résulte devient trop faible.

Soit $\tau_d = \gamma\,\delta$ la valeur limite du pas dentaire permettant d'obtenir un couple suffisant par unité de surface active. L'entrefer δ minimum réalisable est une fonction du diamètre d. Nous admettons la caractéristique suivante, liée aux contraintes de fabrication:

$$\delta = \delta_{\min} + \beta\,d \qquad (7)$$

Le nombre de pas par tour N_p est alors donné par la relation suivante:

$$N_p = 2\,m\,\frac{\pi d}{\gamma(\delta_{\min} + \beta\,d)} \qquad (8)$$

Pour illustrer cette relation, les valeurs suivantes, découlant de l'expérience, ont été admises: $\delta_{\min} = 0{,}02$ mm, $\beta = 0{,}001$ à $0{,}0015$, $\gamma = 10$ à 15. La figure 5 présente le nombre de pas par tour en fonction du diamètre pour $\beta = 0{,}0012$ et trois valeurs de γ pour un moteur biphasé. La figure 6 décrit la même fonction pour une valeur $\gamma = 12$ et différentes valeurs de β.

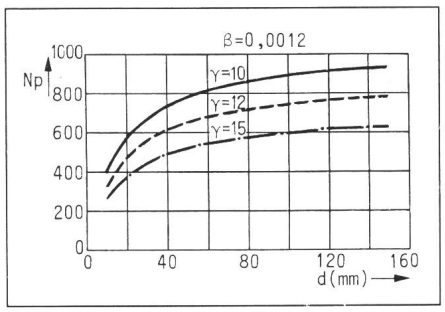

Fig. 5 Nombre de pas N_p possible en fonction du diamètre pour différents paramètres constructifs, pour un moteur biphasé

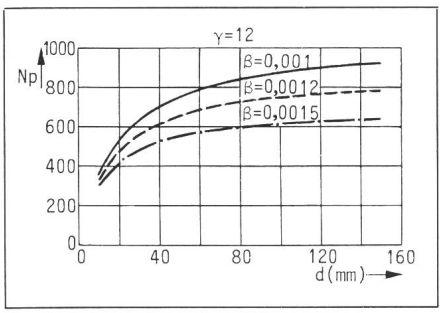

Fig. 6 Nombre de pas N_p analogue à la figure 5, pour d'autres paramètres

En conséquence, une résolution maximale de l'ordre de 1000 peut être obtenue avec un moteur biphasé et de l'ordre de 2500 avec un moteur à 5 phases. Ces valeurs correspondent à des exécutions très soignées et à un couple légèrement réduit.

4. Précision du pas

4.1 Concept de précision

Une des qualités du moteur pas à pas est son aptitude à assurer un positionnement précis sans asservissement par le biais d'un capteur. Cette précision découle de deux exigences différentes: de la régularité du pas et du caractère répétitif du positionnement sur un pas déterminé. La première exigence implique la seconde. Mais de nombreuses applications nécessitent la deuxième condition tout en admettant une tolérance beaucoup plus grande sur la première.

A titre d'exemple, le positionnement du chariot d'une machine à écrire exige une régularité moyenne, compatible avec la qualité de l'écriture, elle-même irrégulière (la lettre m est nettement plus large que la lettre i). En revanche, l'usage d'une touche correctrice implique une qualité de répétition élevée de la position sur un pas déterminé.

4.2 Sensibilité à la charge

Un facteur important est la sensibilité à la charge. Celle-ci n'est généralement pas maîtrisable (en circuit ouvert) par des astuces constructives, ou alors dans une faible mesure dans le moteur réluctant. Les moteurs polarisés présentent généralement un couple principal sinusoïdal. Pour une alimentation bipolaire à m phases, le couple est donné par la relation (3). La pente maximum du couple s'écrit

$$\left.\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}\alpha}\right|_0 = \hat{T}\frac{N_p}{2m} \qquad (9)$$

Pour une variation de couple ΔT, il résulte une variation de positionnement

$$\Delta\alpha = \Delta T \Big/ \left.\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}\alpha}\right|_0 = \frac{2\,m}{N_p}\,\frac{\Delta T}{\hat{T}} \qquad (10)$$

Rapporté au pas angulaire α_p, cet écart de position vaut:

$$\alpha_p = 2\pi / N_p$$

$$\Delta\alpha / \alpha_p = \frac{m}{\pi}\,\frac{\Delta T}{\hat{T}} \qquad (11)$$

Un écart de couple de 10% du couple de crête conduit à un écart angulaire de 0,1 m/π, soit de 6,4% pour 2 phases et 15,9% pour 5 phases. Ceci reste un facteur essentiel de l'imprécision du pas.

4.3 Régularité constructive du pas

Les facteurs affectant la régularité du pas à la construction sont:

- La précision d'exécution de la géométrie des dents du stator et du rotor. Ce sont principalement les décalages d'ensemble d'un pôle qui introduisent des écarts. Pour un moteur électromagnétique, la précision de la magnétisation des pôles affecte également le positionnement, de même qu'une inhomogénéité du matériau constitutif. Les écarts résultant de la qualité d'exécution sont généralement peu importants (ordre de grandeur ±1% du pas).
- Le centrage du rotor dans l'alésage stator. Une excentricité ou une oblicité des axes conduit automatiquement à des irrégularités périodiques de pas. A titre d'exemple, dans le cas d'un moteur hybride biphasé (bipolaire), une excentricité - ou décalage parallèle des axes - fait apparaître un harmonique 2 de couple dû à l'aimant seul. Le couple mutuel est considéré comme fondamental, le couple de positionnement dû à l'aimant étant alors un harmonique 4. Dans le cas d'une oblicité des axes, ce couple présente des harmoniques 1, 2 et 3.

Ces termes vont bien évidemment affecter la régularité du positionnement dans de grandes proportions sans courant, mais également avec courant.

4.4 Caractère répétitif

Deux facteurs affectent le caractère répétitif du positionnement sur un pas déterminé:

- Les frottements secs liés à la charge; c'est un élément externe non maîtrisable;
- l'hystérésis du circuit ferromagnétique du moteur, qui présente une rémanence variable selon le sens du mouvement du rotor (sens de rotation principal ou dû à des oscillations [2]). Il en résulte des écarts de position qui peuvent dépasser 5% du pas. La référence [3] présente une description détaillée du phénomène.

5. Suppression du couple de positionnement

5.1 Augmentation de la résolution par mini-pas

La technique de mini-pas [4] est classique. Elle permet une démultiplication de la position par génération de couples combinant les caractéristiques de deux phases, en ajustant les niveaux de courant respectifs. Pour les moteurs polarisés, le couple mutuel (aimant-bobine) est pratiquement sinusoïdal. Une démultiplication de la position de couple est obtenue par les relations suivantes:

$$i_1^2 + i_2^2 = i_N^2 \qquad (12)$$

i_N courant nominal d'une phase

$i_{1,2}$ = courant des phases 1,2

$i_1 = i_N \sin n\pi/2\nu \qquad n = 0 \text{ à } (\nu-1)$

$i_2 = i_N \cos n\pi/2\nu$

La régularité des ν positions obtenues par démultiplication est affectée par le couple harmonique dû à l'aimant seul (fig. 7). Une correction du niveau des courants prenant en compte ce couple permanent est possible, mais très délicate en cas de variation de niveau de courant. La meilleure solution consiste à supprimer le couple résiduel dû à l'aimant seul.

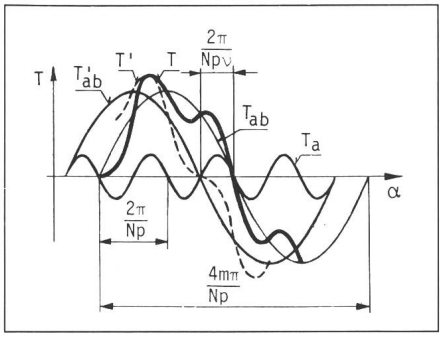

Fig. 7 Caractéristiques de couple d'un moteur électromagnétique biphasé en fonction de la position

T_a couple dû à l'aimant seul
T_{ab} couple mutuel
T'_{ab} couple mutuel obtenu par une technique de démultiplication des pas
$T = T_{ab} + T_a$ couple résultant
$T' = T'_{ab} + T_a$ couple résultant avec démultiplication de pas

5.2 Suppression du couple de positionnement

Le couple de positionnement résulte d'un phénomène harmonique de la perméance. Il peut être éliminé en le décomposant en deux couples partiels en opposition. Ceci peut être obtenu par des décalages opposés de deux pôles homologues. La référence [5] décrit cette solution dans le cas d'un moteur électromagnétique à rotor de type disque. Cette solution peut être étendue à tout type de moteur polarisé, en particulier au moteur hybride. Les remarques relatives au centrage du rotor restent bien entendu valables (§ 4.3).

6. Performances à haute vitesse

6.1 Facteurs limitatifs

Plusieurs facteurs limitent les performances à haute fréquence des moteurs pas à pas. Ce sont principalement:
- l'effet de limitation de courant, dû aux inductances des bobinages, qui crée une réduction correspondante de couple. Cet effet peut être réduit en recourant à une alimentation en courant (hacheur);
- les oscillations dynamiques autour de la vitesse synchrone liées à la raideur propre de la caractéristique de couple. Cet effet peut être éliminé par un asservissement ou un auto-asservissement [6];
- les pertes fer, dont l'effet de freinage et de réduction du flux entraîne une réduction globale du couple.

Ce dernier effet sera examiné plus en détail, car c'est le plus spécifique du moteur; il ne peut pas être compensé par un artifice externe de l'alimentation ou de la commande.

6.2 Pertes fer dues à l'aimant

La rotation de l'aimant crée des pertes par hystérésis et par courants de Foucault dans le fer du stator (tôles, carcasse, rivets, etc.) qui produisent un couple de freinage. Ce phénomène peut être modélisé de façon relativement simple [7]:

Considérons un moteur polarisé, présentant deux phases électriquement en quadrature et un aimant associé au rotor. Il est possible d'associer un bobinage équivalent en court-circuit correspondant au fer. En liaison avec le bobinage statorique, cet enroulement peut être composé de deux phases placées sur les mêmes axes que les bobinages statoriques. Le schéma équivalent correspondant est présenté à la figure 8. Les inductances mutuelles entre phases 1 et 2 sont ainsi nulles. La référence [8] présente les principales équations découlant de ce modèle. Il est en particulier possible d'en déduire le comportement à vide, soit le couple de freinage résultant du courant induit dans le circuit.

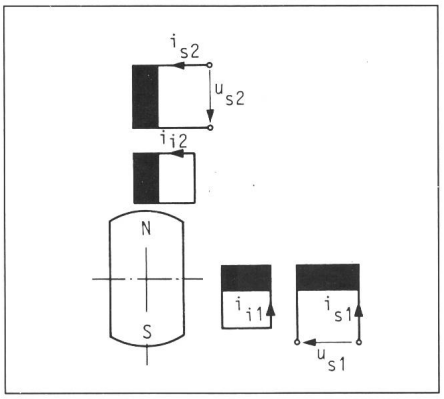

Fig. 8 Schéma équivalent pour tenir compte des pertes de fer dues à l'aimant

6.3 Mesures

Expérimentalement, si un moteur est alimenté à courant constant au stator, on constate que l'amplitude du couple maximum décroît avec la fréquence par suite de l'apparition de ce couple de freinage T_{fa}. La figure 9 présente l'évolution du couple maximum en fonction de la fréquence pour sept moteurs de différents constructeurs.

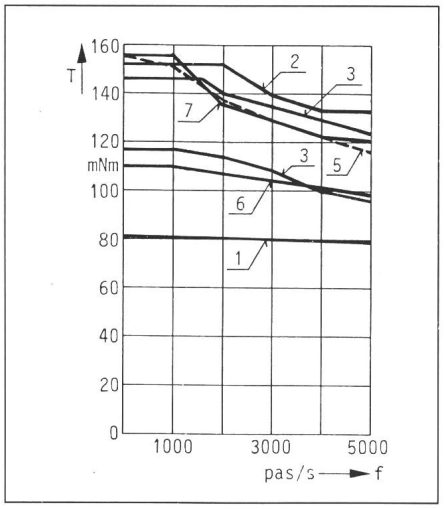

Fig. 9 Couple maximum en fonction de la fréquence pour sept moteurs de type hybride carré à 100 pas par tour

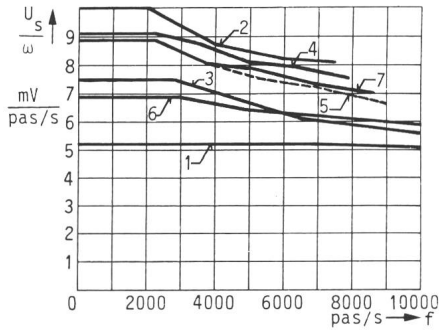

Fig. 10 Tension induite en fonction de la fréquence, pour les mêmes moteurs que figure 9

Certains ne sont pratiquement pas affectés par une telle réduction de couple, d'autres au contraire sont fortement influencés.

La référence [8] établit une corrélation entre la tension induite mesurée à vide et le couple de freinage dû aux pertes fer:

$$T_{fa} = K(\hat{U}_s - \hat{U}_0)\,\omega$$

$\hat{U}_s$ = tension induite
$\hat{U}_0$ = tension induite sans effet du fer

La valeur $\hat{U}_0/\omega$ est pratiquement égale à la valeur limite $\hat{U}_s/\omega$ correspondant à une pulsation nulle. La figure 10 présente les tensions induites $\hat{U}_s/\omega$ correspondant aux sept mêmes moteurs que pour la figure 9. L'analogie entre les courbes des deux figures est frappante. La mesure de la tension induite est donc révélatrice de l'amplitude du couple parasite dû au fer.

7. Conclusion

Le présent article a tenté de montrer que le moteur pas à pas présente un certain nombre de limites naturelles:

- La résolution, imposée par des contraintes d'entrefer et de couple par le biais du rapport τ_p/δ;
- la précision de pas à l'arrêt, qui peut être excellente sur une base constructive, mais qui est encore affectée par l'hystérésis;
- l'amélioration de la qualité du positionnement en régime de mini-pas, par suppression du couple dû à l'aimant seul; les effets liés aux défauts de centrage subsistent néanmoins;
- la limitation des performances à haute fréquence par la présence du fer. Des astuces constructives permettent une réduction de cet effet.

L'évolution des produits de la plupart des fabricants tend à s'approcher le plus possible de ces limites, voire de les repousser en utilisant des matériaux ou des constructions spéciales.

Bibliographie

[1] *M. Jufer:* Comparaison des moteurs pas à pas et à courant continu. Bull. ASE/UCS 73(1982)11, p. 517...521.

[2] *R. Wetter:* Amortissement des oscillations d'un moteur pas à pas. Bull. ASE/UCS 73(1982)11, p. 527...534.

[3] *R. Wetter:* Influence de l'hystérésis sur la précision de positionnement d'un moteur pas à pas. Comptes rendus des troisièmes journées d'études: Les moteurs pas à pas. Nancy, Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique (ENSEM) 1984.

[4] *C. Carbon:* La commande électronique des moteurs pas à pas. Bull. ASE/UCS 73(1982)11, p. 522...526.

[5] *D. Prudhom:* Dans quelle mesure peut-on corriger les erreurs de position dans un moteur pas à pas. Comptes rendus des troisièmes journées d'études: Les moteurs pas à pas. Nancy, Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique (ENSEM), 1984, p. 44...58.

[6] *L. Antognini:* Amortissement de moteurs pas à pas à l'arrêt. Comptes rendus des troisièmes journées d'études: Les moteurs pas à pas. Nancy, Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique (ENSEM), 1984, p. 81...92.

[7] *M. Abdelaziz* et *M. Jufer:* Modèle magnétique et électrique des machines synchrones à aimants permanents. Bull. ASE/UCS 74(1983)23, p. 1339...1343.

[8] *M. Jufer* and *A. Cassat:* Effect on the damping circuits due to eddy current losses on the dynamic characteristics of PM stepping motors. Proceedings of the thirteenth annual symposium on incremental motion control systems and devices 1984, p. 251...258.

[9] *M. Jufer:* Transducteurs électromécanique. Traité d'électricité de l'EPFL Vol. IX. St-Saphorin, Editions Georgi, 1979.