Caractérisation des tôles Fer-Silicium en régime dynamique pulsant

A. MOUILLET, M. AKROUNE et M.A. DAMI

Laboratoire GERE, Université de Bourgogne, Equipe Electrotechnique, I.U.T., 12 rue de la Fonderie, 71200 Le Creusot, France

Astract : Using a characterization method based on the Epstein's frame principle, we study the evolution of the magnetic and losses characteristics of NO Fe-Si sheets with respect to the fundamental frequency, the temperature and the wave front under time-variable sinusoidal or constant wave front trapezoidal magnetic flux density. At last, we modelise the evolution of the iron losses with respect to these parameters, except the temperature.

L'origine de cette étude réside dans l'utilisation qui est faite aujourd'hui des tôles magnétiques Fe-Si à grains non orientés dans des machines électriques mobiles, sous des inductions magnétiques alternatives de fréquence de plus en plus élevée, et à des températures elles-mêmes de plus en plus élevées, les signaux choisis pour l'étude correspondant à ceux que l'on rencontre dans ces machines lorsqu'elles ne sont pas alimentées par des variateurs électroniques de vitesse.

I - Contexte de l'étude et dispositif expérimental.

Les épaisseurs de tôles retenues ont été 20/100, 35/100 et 50/100 mm ; leurs caractéristiques constructeur sont données en Annexe 1. Pour chacune d'elles, 3 échantillons provenant de 3 coulées différentes ont été testés, les essais ayant été fait séparément pour les sens de laminage parallèle et perpendiculaire au sens de l'induction. Les fréquences fondamentales ont été comprises entre 50 Hz et 2000 Hz, les températures entre l'ambiante et 220°C, et pour le signal d'induction trapézoïdal, les fronts de montée compris entre 4 T.ms⁻¹ et 16 T.ms⁻¹ ; enfin, l'amplitude de l'induction magnétique B a été comprise entre 0,25 T et 1,7 T, valeurs imposées par les performances de notre banc de mesures, tant sur la précision de mesure que sur le maintien de la qualité du signal.

Le schéma de principe de celui-ci ainsi que les modalités d'obtention des grandeurs caractéristiques (induction magnétique moyenne B, champ magnétique tangentiel H et pertes fer volumiques) à partir des grandeurs mesurées sont données sur la figure 1. [1]

Les tendances observées dans le même contexte sont identiques quels que soient l'épaisseur de la tôle, l'échantillon et le sens du laminage de celle-ci.

On observe cependant une dispersion importante des valeurs numériques et des écarts relatifs d'un échantillon à l'autre d'une tôle de même épaisseur, dispersion décroissante vers les valeurs élevées de l'induction, mais toujours supérieure à 5%, ce qui interdit la réalisation de courbes statistiques relatives à ce type de tôle qui soient exploitables pour le calcul des machines électriques. Les figures qui illustrent la suite de ce texte illustreront donc chacune une des tendances observées commune à l'ensemble des tôles Fe-Si étudiées.

(fig.1)

II - Caractérisation des tôles Fe-Si en onde d'induction à variation temporelle sinusoïdale.

II-1. Etude des caractéristiques magnétiques : $B = f(H)$.

A température constante, on constate que la perméabilité magnétique d'amplitude décroît avec la fréquence jusqu'au coude de saturation (fig.2), la décroissance relative s'accroissant avec l'épaisseur de la tôle.

A fréquence constante, cette perméabilité croît avec la température jusqu'au coude dit "de saturation" ; les caractéristiques se croisent, apparemment en un même point, dans le coude de saturation (les coordonnées de ce point variant avec la fréquence), pour s'étager ensuite en fonction de la température en restant parallèles, la caractéristique "la plus haute" correspondant à la température ambiante (fig.3).

(fig.2)

(fig.3)

Aucune modélisation de ces évolutions en fonction des 2 paramètres précités n'a été possible.

Enfin, quels que soient l'épaisseur et l'échantillon, la caractéristique magnétique en induction perpendiculaire au sens de laminage est toujours située en dessous de la caractéristique

magnétique en induction parallèle au sens de laminage ; après le coude de saturation, l'écart entre les 2 courbes est constante en valeur absolue et égal à 0,12 T. (fig.4).

(fig.4)

(fig.5)

II-2. Etudes des caractéristiques de pertes fer massiques : $P_{\text{fer}} \cdot \text{kg}^{-1} = f(B)$

A fréquence constante, on constate une diminution des pertes avec la température, la diminution relative de celles-ci décroissant elle-même quand la fréquence augmente. (fig.5) Cette évolution n'a pu être modélisée car, pour un même type de tôle, elle s'est révélée très différente d'un échantillon à l'autre.

A température constante, les pertes Fer croissent bien entendu avec la fréquence f (fig. 6a) ; la loi d'évolution, commune à l'ensemble des tôles pour la gamme de fréquence étudiées, a pu être modélisée selon la formulation suivante :

$$P_{\text{fer}} \cdot \text{kg}^{-1}(f) = f(\alpha + \beta \cdot f + \gamma \cdot \sqrt{f}) \quad (1)$$

où les coefficients α , β , γ sont positifs. (fig.6b). Ce résultat confirme pour une bande de fréquences nettement plus large, la formulation proposée par G.BERTOTTI. [2] [3].

(fig.6a)

(fig.6b)

A température et fréquence constantes (pour des inductions supérieures ou égales à 0,25 T compatibles avec les performances de notre banc de mesures) l'évolution en fonction de l'amplitude de l'induction moyenne B dans la tôle a pu être modélisée selon la formulation suivante :

$$P_{\text{fer}} \cdot \text{kg}^{-1}(B) = a + b \cdot \text{Log } B + c \cdot B^3 \quad (2)$$

où les coefficients a , b et c sont positifs (fig.7) ; le second terme est en fait un terme correctif, le terme en B^3 étant très nettement prépondérant.

(fig .7)

Les coefficients de la relation (2) peuvent s'exprimer en fonction de la fréquence pour obtenir une formulation globale à température constante, compatible avec la relation (1) :

$$P_{\text{fer}} \cdot \text{kg}^{-1}(f, B) = [(a_1 + b_1 \cdot f + c_1 \cdot \sqrt{f}) + (a_2 + b_2 \cdot f + c_2 \cdot \sqrt{f}) \cdot \text{Log } B + (a_3 + b_3 \cdot f + c_3 \cdot \sqrt{f}) \cdot B^3] f \quad (3)$$

Certains des 9 coefficients pouvant être négatifs.

III - Caractérisation des tôles Fe-Si en onde d'induction à variation temporelle trapézoïdale à front de montée constant.

III-1. Etude des caractéristiques magnétiques $B = f(H)$

Le comportement observé avec ce type de signal est, vis à vis de la température et du sens de laminage, identique à celui observé avec l'onde d'induction sinusoïdale.

A température et fréquence constantes, on constate une "détérioration" de la caractéristique magnétique avec le front de montée avant le coude de saturation, la caractéristique se déplaçant vers les champs magnétiques élevés, puis à partir d'une certaine valeur de l'induction située dans le coude de saturation, toutes les caractéristiques magnétiques se confondent en une caractéristique unique. (fig.8). Enfin, à température et front de montée constants, la caractéristique magnétique est indépendante de la fréquence fondamentale de l'onde. (fig.9).

III-2. Etudes des caractéristiques de pertes fer massiques :

$$P_{\text{fer}} \cdot \text{kg}^{-1} = f(B).$$

L'évolution avec la température est identique à celle constatée avec le signal d'induction sinusoïdal, tant qualitativement que quantitativement.

Tous les autres paramètres étant constants, nous avons constaté que les pertes croissent :

- avec le front de montée F_M une loi affine (fig.10).

$$P_{\text{fer}} \cdot \text{kg}^{-1}(F_M) = c + d \cdot F_M \quad (4)$$

- avec la fréquence fondamentale f selon une loi linéaire (fig.11).

$$P_{\text{fer}} \cdot \text{kg}^{-1}(f) = af \quad (5)$$

- avec l'amplitude de l'induction magnétique moyenne B selon une loi exponentielle (fig.12).

$$P_{\text{fer}} \cdot \text{kg}^{-1}(B) = k \cdot \exp(\beta \cdot B) \quad (6) \text{ avec } \beta \# 1,6 \text{ à } 1,7$$

Nous avons vérifié que les formulations (4)(5) et (6) étaient compatibles entre elles, la formulation globale s'écrivant finalement :

$$P_{\text{fer}} \cdot \text{kg}^{-1}(F_M, f, B) = f(c_1 + d_1 \cdot F_M) \exp(\beta \cdot B) \quad (7)$$

valable pour toutes les épaisseurs de tôle et les deux sens de laminage, avec des coefficients évidemment différents à chaque fois.

(fig.8)

(fig.9)

(fig.10)

(fig.11)

(fig.12)

IV - Conclusion :

Les caractérisations que nous avons effectuées sur les tôles Fer-Silicium en onde d'induction temporelle variable, avec les signaux qui recouvrent la quasi totalité des types d'onde rencontrées dans les machines électriques tournantes, montrent que leur comportement vis à vis de la température et du sens de laminage est toujours le même. Par contre, en fonction de la forme du signal, il est très différent vis à vis de la fréquence et de l'amplitude de l'induction.

Bibliographie :

- 1 J-L.ILLE - A.MOUILLET - J-J.COTTET et A.ECK.
Influence de hautes fréquences et des hautes températures sur les pertes fer d'une machine électrique (Revue Scientifique et Technique de la Défense - N°5 - 3e trimestre 1989).
- 2 G.BERTOTTI - Physical interpretation of eddy current losses in ferromagnetic materials. I - Theoretical considerations
(Journal of Applied Physics - 57(6). March 1985 - page 2110).
- 3 G.BERTOTTI - Physical interpretation of eddy current losses in ferromagnetic materials. II - Analysis of experimental results.
(Journal of Applied Physics - 57(6) - March 1985 - page 2118).

Annexe I

Caractéristiques constructeur des tôles étudiées.

- 20/100 mm : pertes fer à 400 Hz et 1 T égales à 15 W.kg^{-1}
- 35/100 mm : pertes fer à 50 Hz et 1,5 T égales à 3 W.kg^{-1}
- 50/100 mm : pertes fer à 50 Hz et 1,5 T égales à $3,3 \text{ W.kg}^{-1}$
- résistivité des tôles (toutes épaisseurs) : $52 \mu\Omega.\text{cm}$