



**HAL**  
open science

# Influence du spectre de l'induction magnétique sur les pertes fer dans les stators de machines électriques

Alexandre Giraud, Alix Bernot, Jean-François Llibre, Yvan Lefèvre

## ► To cite this version:

Alexandre Giraud, Alix Bernot, Jean-François Llibre, Yvan Lefèvre. Influence du spectre de l'induction magnétique sur les pertes fer dans les stators de machines électriques. Symposium de Genie Electrique, Jun 2016, Grenoble, France. hal-01361700v2

**HAL Id: hal-01361700**

**<https://hal.science/hal-01361700v2>**

Submitted on 7 Sep 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Influence du spectre de l'induction magnétique sur les pertes fer dans les stators de machines électriques

Alexandre GIRAUD<sup>1,2</sup>, Alix BERNOT<sup>1</sup>, Yvan LEFÈVRE<sup>2</sup>, Jean-François LLIBRE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IRT Saint-Exupéry, Toulouse, France, [alexandre.giraud@irt-saintexupery.com](mailto:alexandre.giraud@irt-saintexupery.com), <sup>2</sup>LAPLACE, Université de Toulouse, France, [lefevre@laplace.univ-tlse.fr](mailto:lefevre@laplace.univ-tlse.fr)

**RÉSUMÉ** – Cet article propose d'étudier expérimentalement la pertinence d'une analyse harmonique pour le calcul des pertes fer dans les matériaux magnétiques des machines électriques afin d'améliorer la représentativité de leurs modèles. Un banc d'essai avec un hystérésigraphe pouvant générer diverses formes d'ondes et mesurer les pertes fer induites sur des échantillons magnétiques sera utilisé. Des formes d'ondes sinusoïdales de différentes fréquences et amplitudes seront étudiées seules, puis combinées entre elles. Il est ainsi possible d'analyser l'impact de formes d'ondes complexes sur les pertes fer et collecter de nouvelles données afin d'établir ultérieurement des modèles de pertes fer sous spectre d'induction complexe.

**Mots-clés**—Pertes fer, Spectre complexe, harmoniques, hystéresis, matériaux magnétique, machines électriques.

## 1. INTRODUCTION

Suite à l'apparition et au développement de nouveaux systèmes d'alimentation comme la Modulation à Largeur d'Impulsion (MLI), les pertes fer dans les machines électriques ont augmenté. Elles dépendent des paramètres et des modes de fonctionnement de la MLI [1]. En effet, ce type de source d'énergie génère un nombre important d'harmoniques hautes fréquences. Les modèles analytiques classiques de pertes fer [2] ne peuvent tenir compte convenablement des harmoniques et des formes d'ondes complexes. Plusieurs moyens d'atteindre un niveau de précision satisfaisant ont été proposés : des modèles numériques basés sur des modèles analytiques de calcul de champs [3] et des modèles utilisant des cartographies détaillées des pertes en fonction des champs et de leurs dynamiques [4], nécessitant dans les deux cas une grande puissance de calcul.

Cette étude s'intéresse en particulier à l'influence de la composition spectrale de l'induction magnétique sur les pertes fer. L'objectif est de rechercher des corrélations entre le contenu spectral de l'induction (nombre, phases et rangs des harmoniques, cycles mineurs...), les pertes globales et les pertes de chaque harmonique seul. La finalité est d'apporter une contribution à l'amélioration des modèles existants avec l'apport d'une approche harmonique permettant des calculs plus rapides.

## 2. PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE

### 2.1. Principe

Afin d'obtenir des modèles analytiques efficaces, il est nécessaire d'effectuer une étude comportementale sous différents niveaux de fréquences, fournissant ainsi des données essentielles concernant les pertes fer. De telles données phénoménologiques pourraient permettre d'établir de nouveaux modèles ou bien de perfectionner ceux existants. En réalité, les pertes fer provoquées par des formes complexes d'inductions

magnétiques doivent être analysées pour pouvoir décrire le comportement global des pertes. Pour cela, les pertes fer dues à des combinaisons de différentes inductions sinusoïdales sur différents matériaux magnétiques sont étudiées.

### 2.2. Protocole expérimental

Pour générer et contrôler l'induction de forme complexe dans les échantillons magnétiques, un hystérésigraphe MPG200 Brockhaus est utilisé, permettant également de mesurer les pertes fer ainsi produites. Celles-ci sont tout d'abord mesurées pour chaque induction sinusoïdale indépendamment des autres, avec ou sans offset DC. Elles le sont ensuite pour les différentes combinaisons de ces formes d'ondes « élémentaires », ayant ainsi divers rangs d'harmoniques, amplitudes et phases. Les premiers tests expérimentaux sont réalisés sur des tôles de Fer-Cobalt AFK502R de 60mm\*60mm\*0,35mm et des tores en SMC (Micrometals T300-26), soumis à des inductions sinusoïdales de différentes fréquences et amplitudes.

Dans un premier temps un produit  $B \times f$  constant est choisi afin de travailler avec des harmoniques de puissances comparables [2]. Les sinusoïdes élémentaires utilisées pour le spectre de l'induction dans les échantillons sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Sinusoïdes élémentaires pour l'induction

| Sinusoïde n°1 | Sinusoïde n°2 | Sinusoïde n°3 |
|---------------|---------------|---------------|
| 0,5T@50Hz     | 0,055T@450Hz  | 0,005T@4950Hz |

Ensuite, des combinaisons de ces sinusoïdes de même phase sont utilisées afin de générer des spectres complexes pour l'induction dans les échantillons, Figures 1 et 2. Enfin, dans l'article final, nous présenterons les pertes dues à une alimentation MLI.

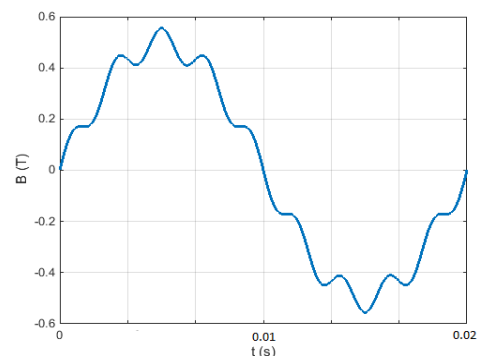


Figure 1 : Sinusoïdes 1+2

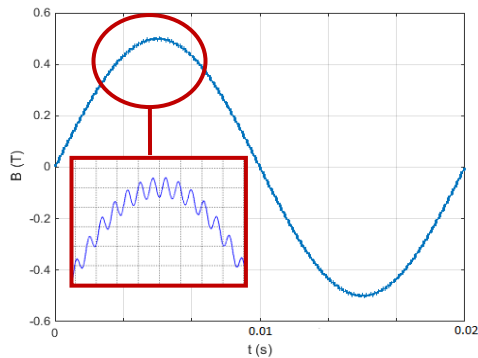


Figure 2 : Sinusoïdes 1+3

### 3. RÉSULTATS

Le contenu harmonique des différentes combinaisons de sinusoïdes induit des cycles mineurs au sein du cycle d'hystérésis. La Figure 3 représente le cycle d'hystérésis avec l'induction magnétique de la Figure 1 et la Figure 4 celle de la Figure 2.

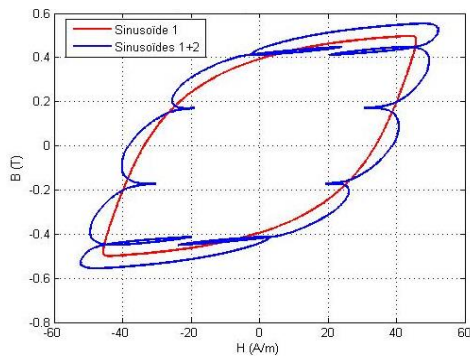


Figure 3 : Comparaison des cycles d'hystérésis 1+2

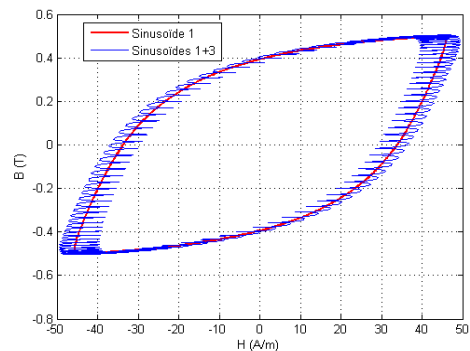


Figure 4 : Comparaison des cycles d'hystérésis 1+3

Tableau 2 : Grandeurs électriques et magnétiques pour l'AFK502R

| Formes d'onde | Fréquence (Hz) | Induction magnétique maximum (T) | Champ magnétique maximum (A/m) | Pertes fer (W/kg) |
|---------------|----------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| 1             | 50             | 0,50                             | 45,9                           | 0,336             |
| 2             | 450            | 0,055                            | 23,9                           | 0,106             |
| 3             | 4950           | 0,0042                           | 4,79                           | 0,0163            |
| 1+2           | 50             | 0,56                             | 52,3                           | 0,416             |
| 1+3           | 50             | 0,505                            | 49,5                           | 0,359             |

Tableau 3 : Grandeurs électriques et magnétiques pour le SMC T300 26

| Formes d'onde | Fréquence (Hz) | Induction magnétique maximum (T) | Champ magnétique maximum (A/m) | Pertes fer (W/kg) |
|---------------|----------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| 1             | 50             | 0,5                              | 2,453k                         | 3,745             |
| 2             | 450            | 0,0556                           | 371,28                         | 0,475             |
| 3             | 4950           | 0,0051                           | 52,62                          | 0,039             |
| 1+2           | 50             | 0,556                            | 2,801k                         | 4,563             |
| 1+3           | 50             | 0,505                            | 2,472k                         | 3,823             |

Les pertes semblent indépendantes du produit  $B \times f$ , qui est constant pour les formes d'ondes 1 à 3, par opposition aux modèles habituels comme [2]. Ce point sera à éclaircir en effectuant des mesures supplémentaires pour d'autres inductions et fréquences. La contribution de chaque harmonique sera, dans l'article final, analysée en fonction de sa fréquence et de sa phase. Il sera alors possible d'étudier les corrélations entre les différentes grandeurs physiques du matériau et du spectre de l'induction. Le Tableau 2 montre les pertes fer massiques dans de l'AFK502R et le Tableau 3 celles dans un tore en SMC selon les différentes forme d'inductions et leurs combinaisons. Le Tableau 4 montre quant à lui les erreurs relatives entre la somme des pertes par sinusoïde et les pertes de la somme des sinusoïdes.

Tableau 4 : Ecart relatif des pertes fer pour comparer la contribution des harmoniques

| Pertes fer pour les sinusoïdes | Rang des harmoniques | Écart relatif pour l'AFK502R | Écart relatif pour le SMC T300-26 |
|--------------------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 1 et 3 / 1+3                   | 99                   | 1,9%                         | 1%                                |
| 1 et 2 / 1+2                   | 9                    | 6,25%                        | 7,5%                              |

### 4. CONCLUSIONS

Ces premiers résultats révèlent un écart entre les pertes globales et les pertes de chaque harmonique, pouvant signifier une non-linéarité des pertes fer vis-à-vis de leur seul contenu harmonique. Les premiers écarts mesurés, plus élevés pour des harmoniques de rangs inférieurs, restent faibles : entre 1% (rang 99) et 8% (rang 9) ; peut-être de l'ordre de l'incertitude expérimentale. Des mesures additionnelles seront faites à d'autres fréquences, pour d'autres matériaux, d'autres formes d'onde et contenus spectraux (avec une attention particulière portée aux cycles mineurs et aux formes d'ondes simulant une alimentation MLI). Des liens éventuels avec d'autres grandeurs magnétiques (champ coercitif, rémanence...) et électriques (déphasage, tension, courant) seront également étudiés. Un modèle de la dépendance entre pertes fer et spectre complexe de l'induction, basé sur les données collectées, sera développé et présenté dans l'article final.

### 5. RÉFÉRENCES

- [1] A.Boglietti, « Comparison of Lamination Iron Losses Supplied by PWM Voltages : US and European Experiences », IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, San Antonio, 2005
- [2] G.Bertotti, « General Properties of Power Losses in Soft Ferromagnetic Materials », IEEE Transaction on Magnetics, vol. 24, n°1, 1988
- [3] O.De La Barrière, H.Ben Ahmed, M.Gabsi et M.LoBue, « Computation of the Losses in a Laminated Ferromagnetic Material Under Bidirectional Induction Excitation », IEEE Transaction on Magnetics, vol. 46, n°2, 2010
- [4] A.Frias, A.Kedous-Lebouc, C.Chillet, L.Albert et L.Calegari, « Electrical steel solicitation in traction electrical machine », IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Montreal, 2012