

Approche multiphysique pour la simulation du bruit rayonné par un transformateur : prise en compte des effets magnétostrictifs

J.-B.DUPONT^a, R.LENEVEU^a, C.CLERC^a, R.LOUVIOT^b, D.LALEVEE^b

a. Vibratec, 28 chemin du petit bois, 69130 Ecully, France.

b. Thalès Avionics Electrical Systems, 41-51 Bd de la République, BP53, 78401 Chatou Cedex, France

Résumé :

Ce papier présente une approche multiphysique pour estimer le bruit rayonné par un transformateur en réponse aux excitations électromagnétiques. La méthode compte 3 étapes : il s'agit tout d'abord de calculer l'induction dans le circuit magnétique. Les effets magnétostrictifs sont alors pris en compte grâce à une analogie thermique et les réponses dynamiques de la structure peuvent être calculées. Le rayonnement acoustique est ensuite estimé par éléments finis acoustiques ou par une méthode analytique. Une démarche expérimentale, analyses modales et réponses en fonctionnement, permet de valider la méthode de simulation.

Abstract :

This paper presents a multiphysical approach that aims at simulating the noise radiated by a transformer under electromagnetic excitations. This is a 3-step methodology. The first one is about the calculation of the flux density all over the magnetic core. Excitations related to magnetostriction are applied through a thermal analogy and dynamic responses are computed. Then, the noise radiation can be estimated with the aid of an acoustic model (finite/boundary elements or analytical). Experimental Modal Analyses and Operating response measurements strengthen the simulation approach reliability.

Mots clefs : Bruit de transformateur, Magnétostriction, Multiphysique, Éléments finis, Analogie thermique

1 Introduction

Le bruit rayonné par un transformateur est dû aux vibrations de sa structure en réponse aux excitations qui lui sont appliquées. Ces excitations peuvent être de natures et d'origines différentes, mais le phénomène de magnétostriction a été identifié comme la principale source de bruit. La magnétostriction se caractérise par une élongation du matériau magnétostrictif sous l'effet de l'induction magnétique. Cette élongation dynamique a pour conséquence des vibrations. Les vibrations induites par ce mécanisme sont ensuite transmises à la coque externe du transformateur qui peut alors rayonner du bruit.

2 Méthodologie de simulation

La stratégie de modélisation nécessite une approche multiphysique par couplage faible entre un modèle électromagnétique et un modèle vibroacoustique. Les principales étapes sont :

1. Modèle électromagnétique: cette étape permet d'estimer l'induction dans le circuit magnétique et autour des enroulements. Un solveur éléments finis électromagnétiques peut être utilisé.
2. Modèle de structure : modélisation de la structure du transformateur avec liaisons mécaniques par éléments finis :
 - Extraction de la base modale et recalage du modèle (matériau homogène équivalent pour le circuit magnétique). Des analyses modales expérimentales (figure 1) permettent de recaler les modèles mécaniques des différents constituants puis du transformateur complet.
 - Application des données d'excitation.
 - Calcul de réponse dynamique et extraction des déplacements sur la peau du transformateur.
3. Modèle acoustique : estimation de la puissance acoustique rayonnée par une méthode de type éléments finis, éléments de frontière ou modèle analytique.

3 Prédiction des excitations relatives à la magnétostriction

La magnétostriction a pour effet une élévation du matériau, traduite par une modification de la loi de Hooke [1] :

$$\{\sigma\} = [C](\{\varepsilon\} - \{\lambda^{MS}\})$$

Où $\{\sigma\}$ et $\{\varepsilon\}$ sont les tenseurs de contrainte et de déformation, $[C]$ est la matrice de rigidité du matériau et $\{\lambda^{MS}\}$ l'élévation magnétostrictive.

L'élévation magnétostrictive dépend du niveau d'induction magnétique, déterminé grâce à un outil de simulation éléments finis électromagnétiques (figure 2) et des propriétés magnétostrictives du matériau ferromagnétique : les courbes λ -B caractéristiques déterminées expérimentalement (figure 3).

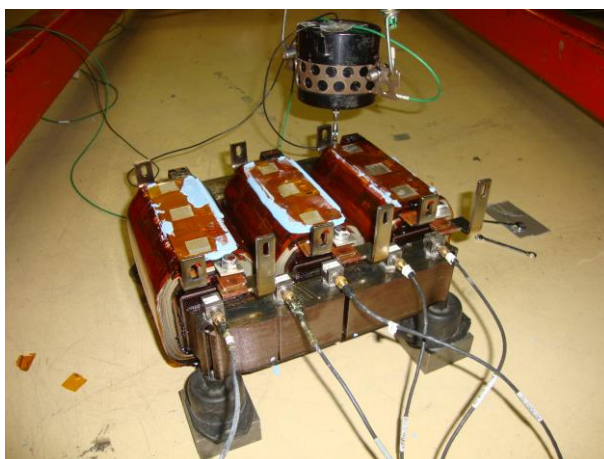


Figure 1 : Analyse modale expérimentale du circuit magnétique du transformateur

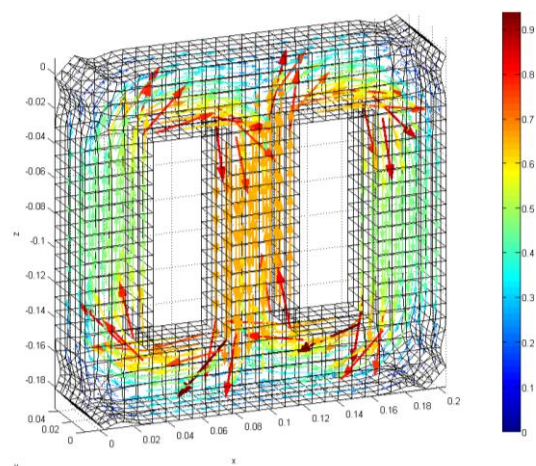


Figure 2 : calcul de l'induction dans le circuit magnétique du transformateur

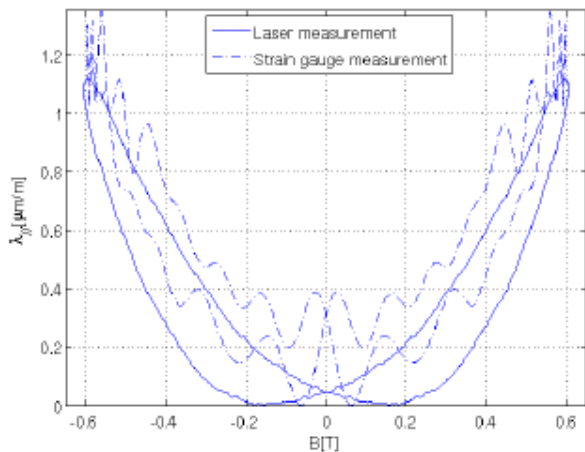
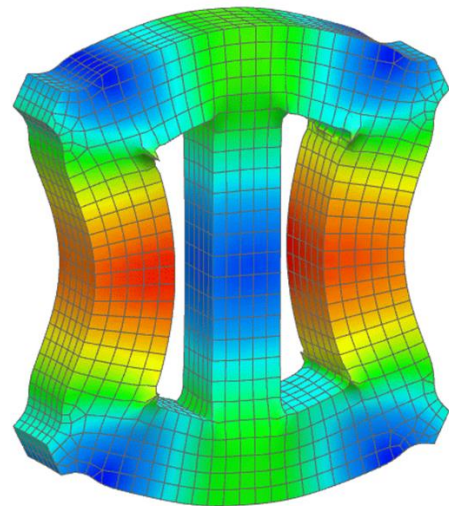
Figure 3 : Courbes λ -B caractéristiques [2]

Figure 4 : Exemple de réponse dynamique d'un circuit magnétique de transformateur sous excitation de magnétostriction

4 Modèle vibroacoustique

4.1 Modèle de structure et stratégie d'homogénéisation

Un modèle éléments finis de la structure est construit. Le circuit magnétique étant constitué d'un empilement de tôles isolées électriquement par des couches de résine, il est exclu de représenter finement cette structure multicouche, la stratégie d'homogénéisation proposée par Millithaler et al. est donc mise en œuvre [3].

4.2 Application des excitations relatives à la magnétostriction

Afin de pouvoir utiliser les solveurs du marché (MSC.Nastran par exemple) pour le calcul des réponses dynamiques, une analogie entre magnétostriction et phénomènes thermiques est développée. Elle s'appuie sur l'écriture de la loi de Hooke avec prise en compte des effets thermiques :

$$\{\sigma\} = [C](\{\varepsilon\} - \{A\}(T - T_{\text{ref}}))$$

Les effets de la magnétostriction peuvent donc être pris en compte au sein d'un modèle de taille significative, résolu par un solveur performant. La réponse dynamique de la structure est alors calculée pour les différentes harmoniques des courants parcourant le transformateur (figure 4). Une méthode classique (éléments finis acoustiques par exemple) est enfin utilisée pour déterminer le bruit d'origine électromagnétique rayonné par le transformateur.

Cette méthode de simulation permet donc d'anticiper les problèmes de bruit lié aux transformateurs. Elle permet également d'optimiser leur design ainsi que leur implantation. Le développement de l'analogie thermique évite le développement d'un nouvel outil éléments finis. Une validation expérimentale de cette simulation sera réalisée sur des transformateurs existants afin de garantir la pertinence du modèle qui pourra ensuite être utilisé pour la conception d'une nouvelle génération de transformateurs.

Références

- [1] A. Belhacen, Magnetoelasticity, Magnetic Forces and Magnetostriction in Electrical Machines. Ph.D. Dissertation, Helsinki Univ. Tech., Espoo, Finland, 2004.
- [2] S. Gorji Ghalamestani, L. Vandeveld, J. Dirckx and Jan Melkebeek, “Magnetostriction strain measurement: 2 heterodyne laser 3 interferometry versus strain gauge technique”, OPTIMESS2012, 2012
- [3] P. Millithaler et al., Structural dynamics of electric machine stators: Modelling guidelines and identification of three-dimensional equivalent material properties for multi-layered orthotropic laminates, Journal of Sound and Vibration (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2015.03.010>