

Étude et réalisation d'un calorimètre isotherme - Mesure des pertes d'un transformateur planar de 5,5kW

Stéphane Vighetti⁽¹⁾, Corentin Rizet⁽¹⁾, Bruno Cogitore⁽²⁾, Bruno Iamamura⁽²⁾

⁽¹⁾ SIREPE SAS, 540 route de la tour 73460 Montailleur, stephane.vighetti@sirepe.fr

⁽²⁾ MICROSPIRE, R&D center 137 rue de Mayoissard 38430 Moirans, bruno.cogitore@microspire.com

RÉSUMÉ – Les mesures des pertes de composants discrets ou de convertisseurs statiques à partir des mesures électriques sont très peu précises lorsque le rendement se rapproche de 1. La réalisation de mesures précises est aujourd'hui un enjeu important pour valider des méthodes de conception que l'on veut de plus en plus précises. Cet article présente la réalisation d'un calorimètre isotherme pour la mesure des pertes de différents composants ou convertisseurs statiques. Dans la littérature on trouve de nombreux calorimètres appliqués au domaine du génie électrique mais de nombreux inconvénients restent présents (coût, complexité...). Le calorimètre présenté ici est de type isotherme, visant une réalisation simplifiée, un coût maîtrisé et des performances élevées. Dans la première partie nous présentons le principe de ce calorimètre, ses caractéristiques propres, ses avantages et ses inconvénients. Dans la deuxième partie, nous décrivons sa réalisation et ses performances. Nous présenterons ici également les difficultés rencontrées qui en limitent les performances. Dans la dernière partie, nous présentons un exemple d'application : la mesure des pertes de transformateurs Planars de 5,5 kW.

MOTS-CLES – Calorimètre, isotherme, rendement, transformateur planar, électronique de puissance, métrologie, mesure

1. Introduction

La mesure des pertes et/ou du rendement d'un composant discret ou d'un convertisseur est aujourd'hui un enjeu très important. En effet l'augmentation de la densité de puissance massique/volumique demandée par certains marchés (aéronautique, spatial) nécessite de connaître de manière précise les pertes des composants au point de fonctionnement choisi en conception. Pour cela le développement de modèles de pertes précis est un enjeu fort. La validation de ces modèles nécessite une confrontation avec des mesures également précises. L'évaluation des pertes par une mesure électrique est très difficile lorsque le rendement s'approche de l'unité. [1] montre en effet qu'avec un rendement de 98 % et une erreur de 1 % sur la mesure du courant et de la tension, l'erreur faite sur la mesure des pertes est de 20 %. Pour obtenir des résultats d'une précision satisfaisante, [1] et [2] proposent d'effectuer des mesures par calorimétrie. Cet article propose donc la réalisation d'un calorimètre isotherme adapté à la mesure des pertes de composants moyenne puissance ou de convertisseurs de quelques kW. Dans la première partie nous présenterons le principe de fonctionnement du calorimètre étudié. Dans la deuxième partie nous présenterons les avantages, performances et limites du calorimètre. Nous réaliserons également une comparaison entre les différentes versions de calorimètre réalisées. Dans la dernière partie, nous proposerons comme exemple d'application la détermination des pertes dans des transformateurs Planars de 5,5 kW.

2. Le principe – Calorimètre isotherme

2.1 La calorimétrie et le génie électrique

Les recherches bibliographiques ont montrées que de nombreux travaux sur la calorimétrie appliquée au génie électrique ont été réalisés [1],[2],[3]. Elles présentent toutes des précisions remarquables par rapport aux mesures indirectes (électriques). En revanche, ces méthodes calorimétriques présentent toutes des limites tant sur la gamme de puissance, que sur les températures de fonctionnement, sur la complexité de la mise en œuvre, le coût, le temps de mesure ou sur la taille des échantillons.

2.1.1 Les principes de la calorimétrie

Les mesures par calorimétrie reposent sur les fondements de la thermique, notamment des principes physiques du transfert thermique. Il y a un transfert thermique dès que deux points différents de l'espace ont une température différente. Il y a échange de chaleur du point chaud vers le point froid. Ce transfert de chaleur s'effectue selon trois modes : la conduction, la convection et le rayonnement [4].

Les mesures par calorimétrie appliquées au génie électrique utilisent ce principe pour évaluer les pertes d'un composant. Le calorimètre caractérise donc la quantité de chaleur échangée entre l'échantillon et l'enceinte. Plusieurs types de calorimètre peuvent être réalisés : adiabatique, isopéribolique (ou quasi-adiabatique), isotherme, à flux thermique... Chacun de ces calorimètres présente des caractéristiques différentes, le cahier des charges déterminant le choix [2].

2.1.2 Le champ d'application

Le cadre de notre étude vise la réalisation d'un calorimètre pour la mesure des pertes de composants allant de 1W à 35 W, avec une température ambiante comprise entre 0°C et 90°C et présentant un volume de quelques dizaine de cm³.

2.2 Le calorimètre isotherme

Au vue de notre cahier des charges, notre choix c'est porté sur la réalisation d'un calorimètre isotherme. Le principe d'un calorimètre isotherme est d'absorber la chaleur générée par le dispositif en test. Plusieurs réalisations de calorimètre de ce type ont été discutées dans la bibliographie [2], [5]. Le principal problème de ces calorimètres est la complexité de leur mise en œuvre. Dans ce type de calorimètre, la mesure se fait en deux étapes. Dans un premier temps, une première mesure sert à calibrer les pertes thermiques du calorimètre, le dispositif n'étant pas alimenté. La seconde mesure se fait le dispositif étant alimenté. Les pertes du dispositif sont directement déduites de la différence des deux puissances

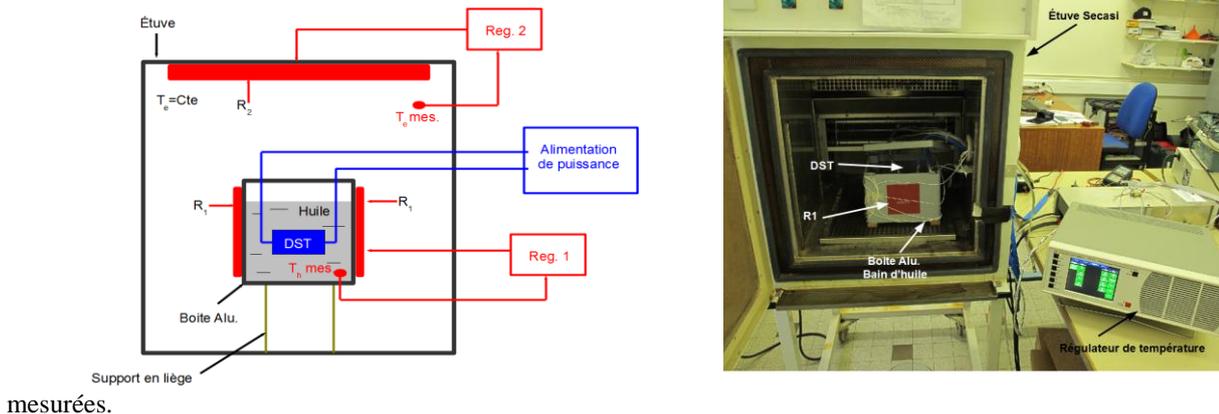


Figure 1 : Schéma de principe et photographie du calorimètre isotherme réalisé

Dans ce calorimètre le dispositif sous test (DST) est placé dans un bain d'huile. Ce bain d'huile est régulé à T_{huile} . Le bain d'huile a pour fonction d'homogénéiser la température du DST et de l'enceinte. Ce bain d'huile peut être régulé entre 0°C et 90°C. Il est lui-même placé dans une enceinte thermique. Une seconde régulation permet de piloter la température de cette enceinte à $T_{\text{Étuve}}$, entre -10°C et +95°C. Les échanges thermiques entre la boîte en aluminium et l'étuve sont définis par la géométrie du calorimètre et la nature des matériaux utilisés. Ces éléments étant fixés, la valeur des fuites thermiques de la boîte en aluminium est directement liée à la différence de température $\Delta T = T_{\text{Huile}} - T_{\text{Étuve}}$ et à la température de fonctionnement T_{Huile} .

2.2.1 Avantages

Ce calorimètre présente l'avantage de pouvoir faire fonctionner le DST dans une plage assez large de température correspondant à la majorité des applications d'électronique de puissance. L'utilisation de l'huile permet de garantir une température homogène de fonctionnement du DST. En réglant le ΔT , on peut faire varier les fuites thermiques et les adapter aux niveaux de pertes que l'on souhaite mesurer. Plus le ΔT est faible plus les fuites sont faibles. Ceci permet d'améliorer la précision en fonction de la puissance à mesurer.

2.2.2 Inconvénients

Selon la constante de temps du système, les mesures peuvent nécessiter un temps relativement long, de l'ordre de la journée. Pour obtenir une précision satisfaisante il faut maîtriser parfaitement les échanges thermiques. Ces échanges sont directement liés à la géométrie. Le placement des sondes, du DST, des éléments chauffants, de la boîte doivent être contrôlés avec précision. Les régulations doivent elles aussi être très stables et précises pour garantir un résultat fiable et précis.

3. Réalisation et performances

3.1 La réalisation

Le DST est placé dans une boîte en aluminium remplie d'huile silicone qui assure une homogénéisation des températures du dispositif, de la boîte et de l'huile elle-même. Cette huile est isolante et stable jusqu'à 180°C. La régulation de la température du bain d'huile est assurée par un régulateur avec une précision de +/- 0,001°C. La boîte en aluminium est placée dans une enceinte thermique de SECASI Technologies dont la température peut être régulée entre -20°C et + 95°C.

3.2 Les problématiques

La réalisation de ce calorimètre nous a confrontés à plusieurs problématiques couvrant différents domaines : automatique, thermique, électronique de puissance, CEM... La précision expérimentale obtenue est plus faible que la précision théorique attendue. Nous présenterons ici ces problématiques et des pistes pour améliorer la précision.

3.2.1 Les éléments chauffants

Dans une première version nous avons utilisé des tapis chauffants en silicone collés sur l'extérieur de la boîte en aluminium pour chauffer le bain d'huile. Nous avons fait l'hypothèse que le flux thermique vers l'extérieur était négligeable. Après avoir fait des mesures, cette hypothèse s'est avérée fautive. L'étude de ce point sera présentée dans la version finale. L'erreur due à cette hypothèse sera notée Err_{flux} .

3.2.2 Constante de temps

Nous avons réalisé deux versions du calorimètre. Une version sans isolation (uniquement la boîte en aluminium, voir Fig. 1) et une autre version dans laquelle cette boîte est placée à l'intérieur d'une enceinte isolante en liège et en bois. Les constantes de temps des deux systèmes sont très différentes. En effet, dans le scénario boîte + isolant, on introduit une capacité thermique importante. La constante de temps est donc très fortement augmentée. Dans ce cas, la constante de temps est de l'ordre de 48h. Dans le cas sans isolation, la constante de temps est de 1h15. Cependant, la boîte isolante permet de diminuer les échanges thermiques et ainsi d'augmenter la précision pour des dispositifs présentant de faibles pertes. Dans le futur, l'isolation pourrait être réalisée avec des matériaux à faible inertie afin de diminuer la constante de temps.

3.2.3 Régulation

La mise en place d'une régulation efficace et précise a également demandé un travail important de mise au point. Les performances de plusieurs régulateurs Proportionnel (P), Proportionnel Intégrale (PI) ou Proportionnel Intégral Dérivé (PID) ont été comparées. En final, on a choisi un correcteur PI pour la régulation de T_{Huile} .

3.3 Performances

3.3.1 Calibration

Une calibration des pertes du calorimètre a été nécessaire. Ces pertes dépendent de la température d'huile, de la différence de température $\Delta T = T_{Huile} - T_{étuve}$, des amenées de courant et du courant circulant dans les câbles. Dans la suite de l'étude nous allons travailler avec le calorimètre sans le caisson isolant. Dans ce cas, pour une température d'huile de 70 °C et une température d'étuve variant de 65,0°C à 65,7°C le calorimètre présente un coefficient K de 7,953 W/°C. Dans cette plage de variation de température la valeur maximale mesurée est de 8,018 W/°C et la valeur minimale est de 7,889 W/°C

3.3.2 Précision

Il y a plusieurs sources d'erreurs dans la mesure effectuée. La première erreur est issue des mesures de la puissance délivrée au DST. La seconde erreur vient de la précision du contrôleur de température. La troisième erreur est faite lors du calcul de la moyenne nécessaire pour limiter l'influence des oscillations et des variations des paramètres. La quatrième erreur est issue du coefficient utilisé pour corriger la régulation de l'étuve qui peut dériver de quelques dixièmes de degré. L'erreur globale est égale à : $Err_P = Err_{Lec} + Err_{Reg} + Err_{Mes} + Err_{Cor} = \pm 0,122 W$

La puissance délivrée par le dispositif se calcule par la différence entre la mesure à vide et la mesure avec le dispositif alimenté.

On peut donc écrire que l'erreur sur la mesure des pertes du dispositif est égale à :

$$Err_{P_d} = Err_P + Err_{P_o} = 2 \times Err_P + Err_{Flux} = \pm 0,744 W$$

Ces précisions théoriques ont été validées par des tests. Les tests consistent à placer une résistance de valeur connue dans le calorimètre. Pour plusieurs valeurs de courant la puissance mesurée par le calorimètre et la puissance mesurée sur les grandeurs électriques sont comparées. Les valeurs mesurées sont dans la marge d'erreur définie plus haut.

4. Exemple d'application – Transformateur planar de 5,5 kW

L'application pour laquelle a été développé ce calorimètre est la mesure des pertes de transformateurs Planars de 5,5 kW. Ce transformateur s'insère dans un convertisseur Pont complet à double enroulements secondaires et redresseur à cathodes communes. Au primaire il y a un seul enroulement (150V – 40A) et au secondaire il y a deux enroulements avec un point milieu commun (75V – 80 A). L'objectif de l'étude est de définir les pertes de plusieurs versions de ce transformateur ayant tous le même point de fonctionnement magnétique (Sfer, Nb spires, Scu), mais présentant des différences technologiques. Ces transformateurs ont des imbrications, des formes, des soudures, des isolants ou encore des matériaux magnétiques différents. L'objectif était d'identifier les choix technologiques à éviter ou à privilégier pour

des produits futurs.

L'étude a porté sur la mesure des pertes de 7 versions différentes. La mesure des pertes en charges a été effectuée pour ces 7 transformateurs. Pour définir les pertes réelles du transformateur, une mesure de calibrage a été faite, le courant efficace nominal circulant dans les câbles court-circuités. Pour obtenir les pertes du transformateur, on effectue l'opération suivante : $P_{transfo} = P_{Calibrage} - (P_{Mesurée} + Coeff_{Correction})$

Le coefficient de correction permet de corriger des écarts éventuels de température lors de différentes mesures. Il permet de placer toutes les mesures avec le même ΔT . Il est déterminé par la valeur des pertes du dispositif à mesurer. Le ΔT choisit doit induire des fuites thermiques dans le calorimètre légèrement supérieures aux pertes à mesurer. Dans notre cas $\Delta T = 4,400^{\circ}\text{C}$.

Tableau 1. Mesures en charge

	T_Étuve (°C)	ΔT (°C)	P mesurée (W)	Coeff _{correction} ($\Delta T=4,400^{\circ}\text{C}$)	Pertes (W)
Calibrage	65,509	4,491	30,427	- 0,724	29,703
Transfo 3	65,593	4,406	9,672	- 0,048	20,079
Transfo 4	65,590	4,411	13,215	- 0,087	16,575
Transfo 7	65,611	4,389	11,928	0,087	17,688

Notre industriel partenaire avait des doutes sur les pertes cuivre par courants de Foucault. Pour les identifier, il fallait séparer les pertes Fer. Pour mesurer les pertes Fer, des tests avec le secondaire du transformateur à vide ont été effectuées. Seuls 3 transformateurs ont été testés. Ces trois tests sont suffisants car ils caractérisent les trois ferrites utilisées pour les 7 versions. Pour déterminer les pertes Fer nous avons réalisé un test à vide comme valeur de référence. Les courants magnétisants étant faibles ($\leq 0,2\text{A}$), nous avons négligé les pertes cuivre dues à ces courants. On peut donc déterminer les pertes fer de la manière suivante : $P_{Fer} = P_{Avide} - (P_{Mesurée} + Coeff_{Correction})$

De même un facteur de correction est utilisé pour ramener toutes les mesures au même ΔT .

Tableau 2. Mesures à vide

	T_Étuve (°C)	ΔT (°C)	P mesurée (W)	Coeff _{correction} ($\Delta T=4,000^{\circ}\text{C}$)	Pertes (W)
Calibrage	65,935	4,067	32,670	0,533	32,137
Transfo 3	66,049	3,951	21,415	0,390	10,332
Transfo 4	66,072	3,928	26,014	0,573	5,550
Transfo 7	66,068	3,932	22,391	0,541	9,205

Pour des raisons de confidentialité nous ne pouvons pas décrire davantage les différents transformateurs, mais les résultats obtenus sont cohérents avec les choix technologiques faits. Ces mesures ont permis de quantifier les gains apportés par chaque solution technologique, et permettront de corriger et d'améliorer les modèles de pertes par courants de Foucault de notre partenaire.

5. Conclusion

Dans cet article, la réalisation d'un calorimètre dédié au génie électrique a été présentée. L'objectif de cette réalisation est la simplification des systèmes existants tout en gardant une performance satisfaisante pour l'application visée, la mesure des pertes de transformateurs Planars. La mise en œuvre, les points forts, les faiblesses et les performances de ce calorimètre ont été présentés. Les résultats des mesures sur les transformateurs ont permis de valider la fonctionnalité et la performance du calorimètre. Les résultats et les précisions obtenues ont été utiles à notre partenaire industriel pour corriger et améliorer ses méthodes d'évaluation de pertes par courants de Foucault. Les précisions obtenues lors de ces mesures de rendement n'auraient pas pu être obtenues par des mesures électriques. L'intérêt d'une mesure par calorimétrie est donc confirmé.

6. Références

- [1] Didier Flumian, « Caractéristiques des pertes dans les composants magnétiques, mise en œuvre d'une méthode calorimétrique », Diplôme de recherche universitaire, GIS 3DPhi, 2011 (France)
- [2] Elysée Obame Ndong, « Développement d'un dispositif de calorimétrie par rayonnement thermique : application à la mesure des pertes dans les composants électriques » Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble, G2Elab 2010 (France)
- [3] Arnaud Teissier, « Mesure de pertes par calorimétrie, conception et réalisation d'un banc de test de

transformateur par calorimétrie » , Master 2 recherche ENEL, SIREPE, Tech Power Electronics & PhiTem, 2013

- [4] J-L. Battaglia –A. Kusiak –J-R. Puggali, « Introduction aux transferts thermiques », Dunod, 2010
- [5] B. Seguin –J.P. Gosse, « Dispositif de mesure calorimétrique des pertes dans les condensateurs de puissance », Journal de Physique III, 1997, pp. 321 – 336