

Mesure précise des pertes dans un module d'électronique de puissance par une méthode calorimétrique

Anne-Sophie Podlejski, Julien Morand, Dominique Bergogne, Cyril Buttay, Christian Vollaire

Laboratoire Ampère UMR CNRS 5005, Ecole Centrale de Lyon
 36 Avenue Guy de Collongue, 69134 Ecully Cedex
 anne-sophie.podlejski@ec-lyon.fr

RESUME – Cet article présente une méthode de mesure précise de pertes dans un module d'électronique de puissance grâce à une méthode calorimétrique. Le module de puissance est placé sur la surface supérieure d'une colonne en aluminium. Le flux thermique, correspondant aux pertes traversant cette colonne peut être évalué en mesurant une différence de température entre deux points précis de la colonne. En connaissant la résistance thermique de la portion de la colonne étudiée, les pertes peuvent être déterminées. L'étude de la précision des mesures garantit une exactitude des pertes évaluées à plus ou moins 0,6 % quelle que soit la puissance injectée.

MOTS-CLES – Mesure de pertes, module de puissance, calorimétrie

1. Introduction

La tendance actuelle dans le domaine de l'électronique de puissance est de concevoir des dispositifs de conversion d'énergie électrique, utilisant des composants en carbure de Silicium. Ce matériau possède en effet des propriétés électriques qui leur permettent de fonctionner dans un environnement sévère tel que celui de l'aéronautique, [1]. Le but ici est d'évaluer les pertes dans un bras d'onduleur réalisé avec des transistors JFETs en SiC.

Dans cette optique, nous avons engagé des travaux sur l'étude des pertes dans un module de puissance par une voie thermique. Afin de déterminer le flux thermique à travers un circuit, une étude de la résistance thermique de ce dernier doit être réalisée, Figure 1.

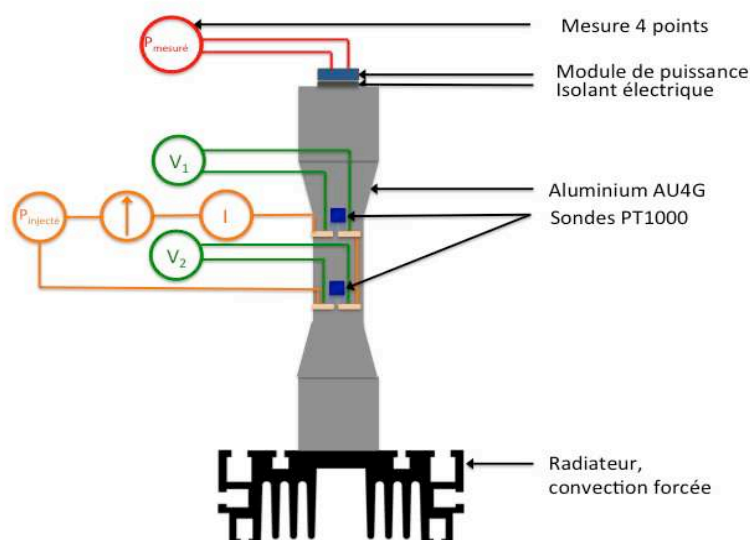


Figure 1 : schéma global du principe de mise en œuvre

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer les pertes dans un module d'électronique de puissance tel un convertisseur. L'évaluation de ces pertes dans un bras d'onduleur en mesurant le courant dans le drain et la tension drain-source constitue une tâche difficile du à la vitesse de commutation élevée des transistors, [2]. D'autre part, si le rendement du convertisseur atteint les 98%, la méthode de mesure de pertes, qui repose sur l'évaluation de la différence entre la puissance en sortie et la puissance en entrée devient inappropriée de part les incertitudes pour la mesure électrique. Plusieurs méthodes pour l'évaluation des pertes par calorimétrie ont déjà été mises au point. Cependant, elles ne garantissent pas une précision optimale des mesures. Dans [3], pour une puissance injectée de 30W, la précision est de 2% sur le dispositif de convertisseur DC-DC étudié. De plus, ces méthodes de calorimétrie, [4] [5] [6], se révèlent difficiles à mettre en œuvre (conception de la chambre adiabatique).

2. Principe

2.1 Dimensionnement de la partie thermique

Le dimensionnement de la colonne en aluminium a été réalisé utilisant la résistance thermique voulue (environ 1°C/W pour faciliter les calculs). Cette dernière a été calculée sur le cylindre grâce à l'équation (1).

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda S} \quad (1)$$

La conductivité de l'alliage de l'aluminium $\lambda = 181 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ étant connue, la surface a été fixée avec R, le rayon du cylindre, $R=15,01\text{mm}$ pour permettre de mettre les composants de puissance au dessus. La distance entre les deux sondes est $e=10,083\text{cm}$, la résistante thermique peut être calculée, $R_{th}=0,7870^\circ\text{C/W}$.

Théoriquement, pour une puissance injectée, lorsque le courant et la tension aux bornes du composant sont connus, les pertes peuvent être déterminées par la formule de la puissance, (2).

$$P=UI \quad (2)$$

2.2 Appareils de mesures utilisés

Les températures ont été mesurées par le biais de deux sondes de température (Labfacility, Platinum Sensing Resistors Thin Film Pt1000). Dans un premier temps, la source chaude est constituée par une résistance (Vishay, Power Resistor Thick Film Technology, LTO 100) qui a été placée au dessus de la colonne. Toute la puissance dissipée par les composants sous test est évacuée par conduction vers le radiateur, qui constitue ici la source froide. Le système est isolé thermiquement par de la vermiculite. La mesure des tensions V_1 et V_2 ainsi que le courant I a été réalisée via des multimètres (Keithley, 6 ½ Digit USB Digital Multimeter, 2100).

3. Evaluation des pertes

3.1 Mesure, principe de l'utilisation de la différence de température

La résistance des sondes à 0°C est de 1000 Ohm et l'intervalle fondamental entre 0°C et 100°C est de 385 Ohm. Sur la plage de fonctionnement de notre expérience, on peut linéariser avec une précision de 0,15%, selon la norme IEC 751 [7]. L'expression de la température est donnée par l'équation (3).

$$T = \frac{R-1000}{3,85} \quad (3)$$

Les résistances des deux sondes PT1000 sont calculées en mesurant les tensions et courant dans le système, quand ce dernier a atteint son fonctionnement en régime établi. On obtient donc la différence de température sur la hauteur de la colonne. La résistance thermique est définie par l'équation (4).

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\phi} \quad (4)$$

ϕ correspond au flux thermique dans la colonne, i.e. les pertes.

3.2 Calibrage et incertitudes

Dans la section 2.2., il a été noté que la différence de température pouvait être évaluée seulement une fois le régime établi atteint. Selon les mesures (Figure 2), la réponse temporelle du système à un échelon de puissance injectée correspond à un système du premier ordre. Le temps de réponse à 95% a été calculé par la méthode des moindres au carrés et est égal à 8 min. Les mesures ont donc été effectuées 30 min après la mise sous tension une fois le régime établi atteint.

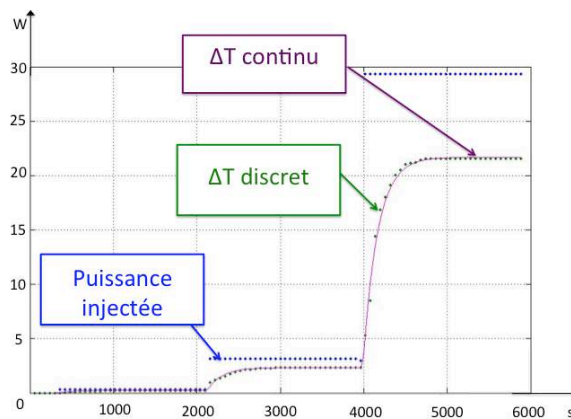


Figure 2 : réponse temporelle du système pour une gamme de puissance entre 0,3W et 30W

Toute la puissance dissipée par le composant est transférée par conduction dans la colonne. Celle-ci a été placée dans une boîte en plexiglas et remplie d'un isolant thermique. Sa faible conductivité ($\lambda=0,0694 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) nous permet de négliger les pertes par convection et par rayonnement. La figure 3 illustre une image du système avec l'isolation. Deux colonnes en aluminium sont placées côte à côte afin pouvoir recevoir plusieurs composants ou de plus grands le cas échéant.

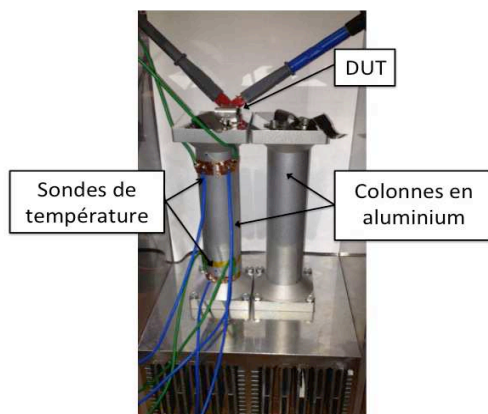


Figure 3 : Système sans isolation thermique

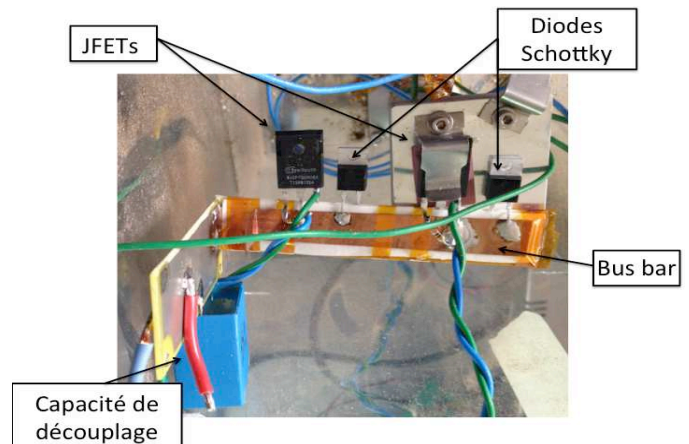


Figure 4 : Montage du bras d'onduleur

La température est une fonction de la résistance des sondes. En mettant les deux sondes PT1000 en série, on impose une tension et l'on mesure le courant dans le circuit ainsi que la tension aux bornes de chaque sonde.

Les pertes sont déterminées expérimentalement avec la méthode qui vient d'être expliquée via l'équation (5).

$$P = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad (5)$$

Le tableau 1 récapitule les résultats.

$P_{\text{mesurée}}$	0,292W	2,744W	7,535W	13,21W	24,50W
ΔT	0,228°C	2,057°C	6,016°C	10,39°C	19,99°C
$P_{\text{calculée}}$	0,290W	2,616W	7,651W	13,22W	25,42W

Tableau 1. Résultats des différentes puissances injectées, mesurées et des différences de température

Les incertitudes sur le calcul des pertes, quelle que soit la puissance injectée peuvent être calculées suivant les équations (6) à (8).

$$\frac{\Delta\phi}{\phi} = \sqrt{\left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_{th}}{R_{th}}\right)^2} \quad (6)$$

avec

$$\frac{\Delta T}{T} = \sqrt{\left(\frac{\Delta V_1}{V_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_2}{V_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2} \quad (7)$$

et

$$\frac{\Delta R_{th}}{R_{th}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta e}{e}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2} \quad (8)$$

Les valeurs des différentes incertitudes sont données dans le tableau 2.

Incertitude	$\frac{\Delta e}{e}$	$\frac{\Delta \lambda}{\lambda}$	$\frac{\Delta S}{S}$	$\frac{\Delta V_1}{V_1}$	$\frac{\Delta V_2}{V_2}$	$\frac{\Delta I}{I}$
Valeur	9,92e ⁻³ %	0,50%	0,067%	0,055%	0,055%	0,055%

Tableau 2. Valeurs des différentes incertitudes

4. Conclusion

Nous avons présenté une nouvelle approche calorimétrique pour l'évaluation des pertes dans un module de puissance. Cette méthode garantit une bonne précision à plus ou moins 0,6%, et se révèle très stable dans le temps, une fois le régime permanent atteint. Dans le papier final, une simulation thermique de la calibration du système par le biais du logiciel Comsol [8] sera réalisée et une comparaison avec les résultats de l'expérience sera présentée. Finalement, la moyenne des pertes par conduction et par commutation dans un bras d'onduleur (Figure 4) sur une période de temps sera évaluée. Ce bras d'onduleur sera constitué de deux JFETs verticaux et deux diodes Schottky. Une comparaison entre le bras d'onduleur avec et sans diodes Schottky sera présentée dans le papier final, il permettra de compléter les travaux initiés au laboratoire AMPERE sur les JFETs verticaux, [9].

5. Références

- [1] P. G. Neudeck and R. S. Okojie, "High-temperature electronics - a role for wide bandgap semiconductors?," *Proc. IEEE*, vol. 90, no. 6, pp. 1065–1076, Jun. 2002.
- [2] C. Cai, W. Zhou, and K. Sheng, "Characteristics and Application of Normally-Off SiC-JFETs in Converters Without Antiparallel Diodes," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 10, pp. 4850–4860, Oct. 2013.
- [3] L. Hoffmann, C. Gautier, S. Lefebvre, and F. Costa, "Thermal measurement of losses of GaN power transistors for optimization of their drive," in *EPE Power Electronics and Applications, 2013 European Conference on*, 2013, pp. 1–8.
- [4] D. Christen, U. Badstuebner, J. Biela, and J. W. Kolar, "Calorimetric Power Loss Measurement for Highly Efficient Converters," *2010 Int. Power Electron. Conf. - ECCE ASIA* -, pp. 1438–1445, Jun. 2010.
- [5] K. Bradley, W. Cao, J. Clare, and P. Wheeler, "Predicting Inverter-Induced Harmonic Loss by Improved Harmonic Injection," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 5, pp. 2619–2624, Sep. 2008.
- [6] K. J. Bradley and A. Ferrah, "Development of a High-Precision Calorimeter for Measuring Power Loss in Electrical Machines," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, no. 3, pp. 570–577, Mar. 2009.
- [7] "DIN IEC 751 Temperature / Resistance Table for Platinum Sensors."
- [8] COMSOL Multiphysics®, "www.comsol.com."
- [9] R. Ouaida, X. Fonteneau, F. Dubois, D. Bergogne, F. Morel, H. Morel, and S. Oge, "SiC vertical JFET pure diode-less inverter leg," in *2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2013, pp. 512–517.