

# 高効率電力変換器のための2つの断熱材容器を用いた精密な熱量測定法の実験解析

濁川 厚志\*, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Experimental Analysis on Precise Calorimetric Power Loss Measurement  
using Two Chambers for High Efficiency Converter

Atsushi Nigorikawa, Jun-ich Itoh (Nagaoka University of Technology)

## 1. はじめに

近年、半導体素子や磁性材料の性能向上により、電力変換器の高効率化が進んでいる。その結果、電力変換器の損失が小さいため、正確な損失評価が困難となっている。損失評価の方法として、パワーメータを用いて入出力電力を測定し、その差分から導出する方法がある。しかし、この方法は入出力電力に対する損失の割合が非常に小さく、測定結果に測定レンジのフルスケール誤差が含まれる。一方、他の損失測定法として、電力変換器からの発熱量を用いて、損失を導出する熱量測定法がある<sup>(1)</sup>。この測定法は、電力変換器から発生する熱量を精密に測定することで、損失を導出する。そのため、精密な熱量測定には恒温槽が必要である。しかし、恒温槽は高価であるため、構成システムが高コストとなる。また、温度が飽和するまでに時間を多く消費する<sup>(2)</sup>。

本論文では、低コストで簡単な構成システムの熱量測定法を提案する<sup>(3)</sup>。特にここでは、提案システムにおける容器内温度の過渡状態から、温度上昇の理論式を用いた電力変換器の電力損失の導出法について検証したので、報告する。

## 2. システム構成

図1に提案する熱量測定法のブロック図を示す。ここでは、2つの断熱材容器を使用する。容器A内部に測定対象の電力変換器を設置し、駆動させる。容器A内部の温度は、電力変換器内で発生する電力損失の熱により上昇する。そして、容器表面からの放熱量と均衡し、温度は飽和する。一方、容器B内部の温度をPI制御器によるフィードバック制御により制御する。ここで、PI制御器の目標値は、容器A内の温度に設定する。また、容器B内の温度は、ヒータを用いて制御する。容器A内と容器B内の温度が等しくなった時、電力変換器とヒータの熱量は等しくなる。その結果、ヒータの電力損失を測定することで、電力変換器の電力損失を求めることができる。よって、提案する熱量測定法では、恒温槽を使用しないため、大幅な低コスト化が望める。また、損失だけを測定しているため、高精度となる。

## 3. 熱モデル

まず、電力変換器を容器内Aに設置し、駆動させる。次に、容器A内の空気の温度を均等にするために、ファンにより循環させる。ここで、容器内の体積をV、空気密度を $\rho$ 、空気の比熱を $C_p$ 、容器A内の温度を $T_m$ とする。すると、電力変換器内部か

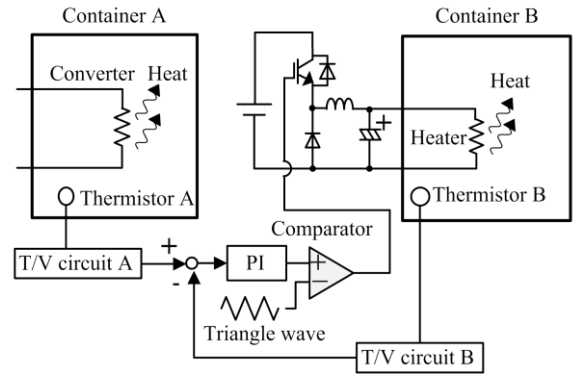


図1 提案する熱量測定法のシステムブロック図

Fig.1. System configuration of proposed CPLM system.

ら変換器表面までの熱量 $Q_{in}$ は、(1)式から求めることができる。

$$\rho C_p V \frac{dT_{in}}{dt} = Q_{in} - Q_R - Q_{cool} \quad (1)$$

$Q_R$ は変換器表面から空気温度測定点までの熱量、 $Q_{cool}$ は容器を通過する熱量を示す。 $Q_R$ と $Q_{cool}$ は(2)式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \rho C_p V \frac{dT_{in}}{dt} &= Q_{in} - \frac{T_R - T_{in}}{R_r} - \frac{T_{in} - T_{amb}}{R_{amb}} \\ &= Q_{in} - \frac{(Q_{in} \cdot R_r + T_{in}) - T_{amb}}{R} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $T_R$ は電力変換器の内部温度、 $R_r$ は変換器表面から測定点までの空気の熱抵抗、 $T_{amb}$ は周辺温度、 $R_{amb}$ は容器Aの熱抵抗、 $R$ は全体の熱抵抗を示す。

(2)式をラプラス変換すると、(3)式となる。

$$\rho C_p V (sT_{in}(s) - T_o) = \frac{Q_{in}}{s} \left(1 - \frac{R_r}{R}\right) - \frac{T_{in}(s)}{R} - \frac{T_{amb}}{sR} \quad (3)$$

ここで、 $T_o$ は容器A内の初期温度である。なお、電力変換器の熱量をステップ入力と仮定する。(3)式を $T_{in}$ について求め、逆ラプラス変換を行うと、(4)式で表すことができる。

$$\begin{aligned} T_{in} &= R \left\{ Q_{in} \left(1 - \frac{R_r}{R}\right) + \frac{T_{amb}}{R} \right\} \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{1}{\rho C_p V R} t\right) \right\} \\ &\quad + T_o \exp\left(-\frac{1}{\rho C_p V R} t\right) \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式を微分し、両辺の自然対数を求めると、(5)式となり、直線となる。

$$\ln(\dot{T}_{in}) = \ln \frac{R Q_{in} - R_r Q_{in} + T_{amb} - T_o}{\rho C_p V R} - \frac{1}{\rho C_p V R} t \quad (5)$$

このとき、(5)式の傾き $a$ と切片 $b$ は(6)、(7)式で示すことができ

る。

$$a = -\frac{1}{\rho C_p V R} \quad (6)$$

$$b = \ln \frac{R Q_{in} - R_f Q_{in} + T_{amb} - T_o}{\rho C_p V R} = \ln \{- Q_{in} R_{amb} (T_{amb} - T_o) a \} \quad (7)$$

つまり、測定した温度上昇を微分し、両辺の自然対数を求め、切片を導出することで、 $Q_{in}$  を求めることができる。実際の測定では、この  $Q_{in}$  が電力変換器の損失  $P_{loss}$  となる。このとき容器 A の熱抵抗  $R_{amb}$  は環境に依存して変化するので容器 B でヒータの発生熱量からも同様な計算を行い、 $R_{amb}$  を求め、補正することで高い精度が得られる。

#### 4. 実験結果

##### (4.1) 提案システムの評価

試作機を用いて、電力変換器の電力損失  $P_{loss}$  を 5, 15, 25W とした時の測定精度を評価する。2 つの断熱材容器は同じ場所に設置するため、周囲温度から受ける影響は同じとする。

図 2 に、 $P_{loss}=5W$  時の PI 制御器を用いた温度制御結果を示す。図 2 から、PI 制御器により、容器 B 内の温度は容器 A 内の温度と等しくなっていることが確認できる。各消費電力での最大誤差率は、 $P_{loss}=25W$  時に 4.8%、 $P_{loss}=15W$  時に 1.3%、 $P_{loss}=5W$  時に 8% が確認された。以上の結果から、提案システムにより、消費電力の測定誤差率が 10% 以内を達成したことを確認した。

##### (4.2) 温度上昇の過渡状態から消費電力を導出

温度上昇の過渡状態から理論式を用いて電力変換器の消費電力を導出する。図 3 に、容器 A 内の電力変換器消費電力による温度上昇測定結果を示す。図 3 より、約 7200 s で温度が飽和している。加えて、0 から 4000 s までに、温度の著しい変化が確認される。図 3 で得られた温度上昇結果を微分し、自然対数を求める。この時、温度上昇の遅れ時間を考慮し、500 s までのデータは使用しない。そして、得られた結果を回帰分析し、1 次方程式で表し、(6)、(7)式から消費電力を導出する。なお、温度測定結果を用いる範囲は、500 s から 4000, 2000, 1500 s とする。この時、 $T_o$  は  $T_{amb}$  と同じとする。

図 4 に、測定値と理論値の測定誤差率を示す。500 から 4000 s までの時間範囲で導出した消費電力は、 $P_{loss}=25W$  時に、最大誤差率 3.67% を確認した。500 から 2000 s までの時間範囲で導出した消費電力は、 $P_{loss}=5W$  時に、最大誤差率 5.33% を確認した。500 から 1500 s までの時間範囲で導出した消費電力は、 $P_{loss}=15W$  時に、最大誤差率 8.41% を確認した。

この結果と実験(4.1)の測定誤差率を比較する。(6)、(7)式を用いて得られた消費電力の測定精度は、試作機に比べて低い。しかし、測定誤差率が 10% 以内を達成できることを確認した。したがって、提案システムでは、熱量測定を長時間行わず、短時間で電力変換器の消費電力を測定することができる。さらに、その測定時間を 1/5 倍まで短縮できることを確認した。

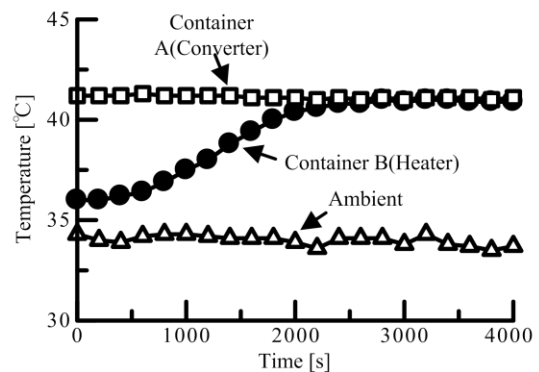


図 2. PI 制御結果  
Fig.2 PI control result.

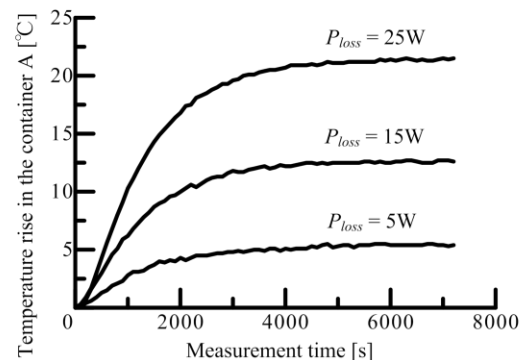


図 3. 電力変換器の温度特性  
Fig.3 Temperature character of the power converter.

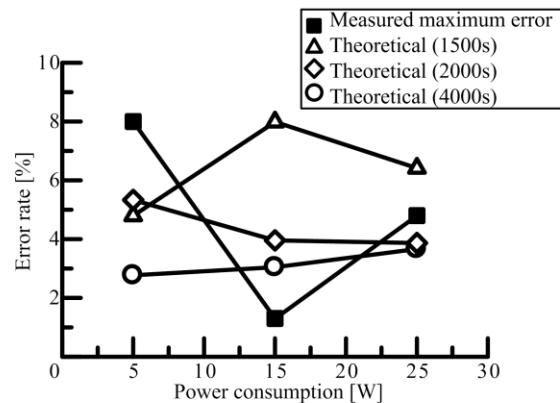


図 4. 測定値と理論値の電力損失の測定誤差率  
Fig.4 Measurement error rate of the power consumption between the measurement values and the calculation values.

#### 5. まとめ

本論文では、高効率変換器のための低コストの熱量測定法を提案し、測定精度を実験により検証し、誤差率 8% を得た。また、容器内温度が過渡状態の時から、電力損失を求める方法を示した。この場合、誤差率は 10% 以内であり、測定時間を 1/5 倍まで短縮できることを確認した。

#### 文 献

- (1) D. Christen, et.al, IPEC2010, pp. 1438-1445 (2010)
- (2) C. Xiao, et.al, IEEE tran. VOL. 43, NO. 3, pp. 657-664 (2007)
- (3) A. Nigorikawa, et.al, 2011 Japan-Korea Joint Technical Workshop on Semiconductor Power Converter, pp. 77-78, IEEJ-SPC-10