

2つの断熱材容器を用いた低コストで高精度な 熱量測定法の実験検証

濁川 厚志* 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Experimental Verification of the Low Cost and High Accuracy Calorimetric Power Loss Measurement
with Two Chambers made from the insulator materials

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

In this paper, a low cost power measuring system for the converter is proposed. The Calorimetric Power Loss Measurement (CPLM) uses the heat quantity which is generated by the power converter to measure losses. The proposed system is a low cost structure without the thermostatic chambers which will increase the cost the CPLM system. The measurement method of the power consumption based the rise in temperature is discussed. The power consumption of the power converter is measured from the transient state of the rise in temperature. As a result, in case of the measurement ranges are from 500 s to 4000 s, 500 s to 2000 s and even from 500 s to 1500 s, the maximum error of the measuring power consumption are within 10%. The proposed method can obtain the power loss of the power converter in a short-time.

キーワード：熱量計測定, 電力損失解析, 恒温槽

(Keyword: Calorimetric determination, Power loss analysis, Thermostatic chamber)

1. はじめに

近年、電力変換器は SiC や GaN などの高性能半導体デバイス及び磁性材料により、高効率・高周波数化が進んでいる。高効率化に伴って、出力電力に対して、電力損失の割合が大幅に減少すると測定精度を確保することが困難である。

最もよく使用される損失測定法の 1 つとして、パワーメータを使用して入力電力 P_m と出力電力 P_{out} を測定し、差分 $P_m - P_{out}$ から電力損失を導出する方法がある⁽¹⁾。しかし、測定した電力に対し電力損失の割合が非常に小さくなるとこの方法は測定レンジのフルスケール誤差が測定結果に含まれる。そのため、98% や 99% を超える効率では、高精度の測定結果が得られない。

一方、その他の損失測定法として、電力変換器の熱量を使用する熱量測定法がある⁽²⁾。測定対象の電力変換器を恒温槽の内部で駆動させる。高い熱伝導率を有する水などの媒体を恒温槽内に循環させ、媒体の温度変化から電力損失を導出する。この方法は電力損失を直接測定するため、測定誤差を減らすことができる。従って、この方法はパワーメータを使用するよりも高精度で損失を導出することができる。しかし、この熱量測定法のシステムは熱量の精密測定のために恒温槽と、恒温槽内に媒体を循環させるための循環器を使用する必要がある。恒温槽と循環器は高コストであるため、測定システムが高コストとなる問題がある⁽³⁾。また、熱量測定法は恒温槽内部の温度が飽和するまでに時間がかかる⁽⁴⁾。

本論文では、低コストで 2 つの安価な断熱材容器を使用した簡単な測定システムの熱量測定法を提案する⁽⁵⁾。提案するシステムは、恒温槽の代わりに 2 つの断熱材容器を使用する。また、恒温槽の温度を測定するための媒体は使用しない。従って、高コストである恒温槽と循環器を使用しないことにより、大幅な低コスト化となる。また、容器内の上昇温度の過度状態のデータから電力損失を計算により導出する。この方法を用いることで、電力損失を短時間で測定することができる。本稿ではまず、提案システムを紹介する。次に、提案システムの測定原理について説明する。最後に、試作機による実験結果により、提案システムの有用性を実証する。

2. 2つの断熱材容器を用いた熱量測定法

図 1 に 2 つの断熱材容器とヒータで構成された提案システムの制御ブロック図を示す。図 1 内の容器をそれぞれ容器 A・容器 B とする。測定対象の電力変換器を容器 A 内で駆動させる。容器 A 内の温度は電力変換器の発生損失による発熱により上昇する。やがて容器 A 内の温度は容器表面からの放熱量と均衡し、温度が飽和する。一方、容器 B 内の温度を PI 制御器を用いたフィードバック制御により制御する。容器 B 内の温度は降圧チョッパの ON, OFF 制御によるヒータの加熱で制御する。容器 A 内の飽和温度を容器 B 内の温度の指令値に設定する。温度センサの感度誤差は検出回路で修正する。容器 B 内の温度が容器 A 内の飽和温度と一致した時、容器 B 内のヒータから発生す

る熱量は、容器 A 内の電力変換器から発生する熱量と等しくなる。これにより、ヒータの消費する電力は電力変換器で発生する電力損失と等しくなる。従って、ヒータの消費電力を測定することで、容易に電力変換器の発生損失を求めることができる。

提案する熱量測定法は室温と 2 つの容器の放熱量が精度に影響する。そこで、本論文では次章より理論式からそれらの影響について議論する。

3. 電力損失と容器内の温度変化の関係

電力変換器を容器 A 内に入れ、駆動させる。容器 A 内の温度は、電力変換器で発生した電力損失による熱量により上昇する。容器 A 内の温度は測定点による観測温度のばらつきを無くすため、ファンにより循環させる。(1)式に、提案システムの単位時間当たりの温度上昇と熱量(電力損失)の関係を示す。

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

ここで、 V (m^3)は容器 A の内部体積、 ρ (kg/m^3)は空気の密度、 C_p (J/gK)は空気の比熱、 T_{in} (K)は容器 A 内の空気の温度、 Q_{in} (W)は容器 A 内の電力変換器内部から表面までの熱量、 Q_R (W)は容器 A 内の電力変換器の表面から空気温度測定点までの熱量、 Q_{cool} (W)は容器 A からの放熱量を示す。 Q_R と Q_{cool} は(2)式で表される。

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

ここで、 T_R (K)は電力変換器の内部温度、 R_r (W/K)は容器 A 内の電力変換器の表面から空気温度測定点までの熱抵抗、 T_{amb} (K)は周辺温度、 R_{amb} (W/K)は容器の熱抵抗、 R (W/K)は R_r と R_{amb} の合計の熱抵抗を示す。

(2)式をラプラス変換すると、(3)式で表される。

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

ここで、 T_o は容器 A 内の初期温度を示す。電力変換器の熱量をステップ入力とする。(3)式を T_{in} について求め、逆ラプラス変換を行うと、(4)式となる。

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

つまり、容器内の温度は、体積、熱抵抗、空気の比熱、密度に応じた時定数を持つ 1 次遅れ系で表すことができる。収束する温度は熱量 Q_{in} に比例するが、飽和時間まで計算すると、非常に時間がかかる。そこで、熱量を過渡状態から求めることを考える。まず、(4)式を微分し、自然対数を求めると(5)式が導ける。

$$\ln\left(\frac{dT_{in}}{dt}\right) = \ln\left(\frac{Q_{in}(R - R_r) + T_{amb} - T_o}{\rho c_p V R} - \frac{1}{\rho c_p V R} t\right) \quad (5)$$

その結果、温度が飽和する前に(5)式より Q_{in} を導出することができる。具体的には、測定した温度上昇を微分し、両辺の自然対数を求める。測定温度を 1 次方程式で回帰分析することで切片と傾きが求められる。この時、 R と R_r は、傾き a と切片 b を用いて

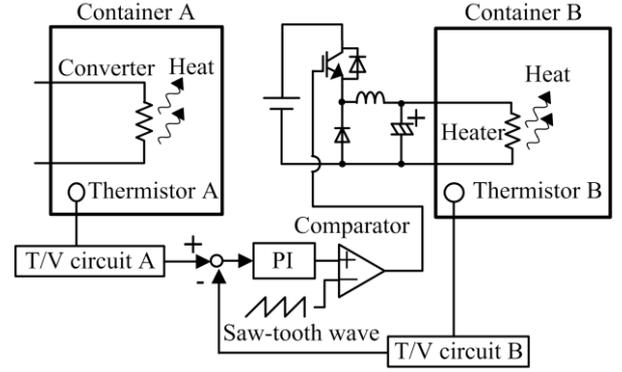


Fig. 1. System configuration of CPLM using two chambers.

(6)と(7)式で求めることができる。すなわち、容器 A 内の電力変換器の表面から空気温度測定点までの熱抵抗 R_r がわかれば、 Q_{in} を過渡状態から求めることができる。

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

$$R_r = R - \frac{\rho c_p V R \exp(b)}{Q_{in}} \quad (7)$$

4. 実験結果

〈4・1〉 熱抵抗の導出

試作機を用いて測定精度の評価を行う。この試験では、容器 B 内温度の制御に用いているヒータと同じものを電力変換器の代わりに使用し、電力変換器を模擬する。電力変換器を容器 A 内で駆動させる。熱抵抗を容器 A 内の温度上昇の実験結果から求める。実験で使用する容器はより低コスト化を図るため、市販の汎用発泡スチロールを使用する。容器の内部体積 $V = 3.17 \times 10^{-2} m^3$ (容器の寸法: 長さ 44.7 cm, 横 32.2 cm, 高さ 22.0 cm)である。また、得られた熱抵抗を(4)式に代入し、測定誤差率に応じた許容温度誤差範囲を検討する。

図 2 に、電力変換器を置いた容器 A 内の温度特性を示す。図 3 に $P_{loss} = 25W$ の時の温度上昇を微分し、両辺の自然対数を求めた結果を示す。 P_{loss} は容器 A 内の電力変換器の発生損失を示す。図 3 の傾き a 、切片 b から熱抵抗を(6)式と(7)式を用いて導出する。得られた熱抵抗と許容電力範囲を(4)式に代入し、許容温度計測誤差範囲を求める。

表 1 に熱抵抗と許容温度誤差範囲を示す。この時、 T_o は T_{amb} と等しいと仮定する。表 1 から、発生損失が小さいほどより温度の精度が必要となる。 P_{loss} が 5W の時、測定誤差率 10%以内に収まるとした場合、許容温度計測誤差範囲は $\pm 0.635^\circ C$ となる。

〈4・2〉 提案システムの評価

容器 B 内のヒータの消費電力が容器 A 内に設置した測定対象の電力変換器の発生損失と等しくなることを確認する。2 つの容器は同一環境下に設置するため、周囲温度から受ける影響は等しいと仮定する。

図 4 に $P_{loss} = 5W$ 時の PI 制御器を用いた温度制御の実験結果を示す。図 4 から、PI 制御により容器 B 内部の温度と容器 A 内部の温度が等しくなっていることが確認できる。

図 5 に電力変換器の電力損失とヒータの消費電力との誤差率を示す。それぞれの電力値に対して、3回ずつ測定を行い、バラ

つきを観測している。図 5 から、 $P_{loss} = 5W$ 時に最大 8% の誤差率を確認した。以上の結果から提案システムにより、測定誤差率 10% 以下に収まることを確認した。

理論上容器 A と容器 B の温度差が $0^{\circ}C$ となる時、電力変換器の発生損失とヒータの消費電力の誤差は $0W$ となる。しかし、実験では温度差が $0^{\circ}C$ にもかかわらず、誤差が発生した。この原因としては、容器 A と容器 B のそれぞれ受ける周囲温度からの影響や R_{mab} は容器の熱抵抗に誤差があったためである。

〈4・3〉 温度上昇の過渡状態から電力損失を導出

熱量測定法は容器 A 内の温度が飽和するまでに時間を要する。そこで、(6)式と(7)式を用いて、過渡状態から電力損失を求める。

図 2 から、温度の飽和時間は約 7200sec である。さらに、著しい温度変化が 0 から 4000sec の間で確認されている。従って、4000sec までの温度上昇のデータから発生損失を導出することができる。ここで、温度上昇にはむだ時間が存在するため、今回は 500sec 後からのデータを使用する。

図 6 に $P_{loss} = 25W$ 時の回帰分析結果を示す。図 6 から、回帰分析により得られた 1 次方程式が、回帰曲線から得られた結果に重なっていることが確認できる。定常状態に入った 5000sec 以上の領域では、温度変化が微小になるため、ノイズの影響を受けやすくなり、温度変化の微分値がばらつく。

図 7 に(6)式と(7)式により求めた発生損失の計算値と電力変換器の発生損失との誤差率と、図 5 で得られた消費電力に対する最大誤差率を示す。このとき、 R_r は図 2 の測定データを元に求め、表 1 に示す値を使用した。電力変換器の発生損失を 500sec から 4000sec 間で導出した時、電力損失の最大誤差率は $P_{loss} = 15W$ で 5.8% となった。一方、電力変換器の電力損失を 500sec から 2000sec 間で導出した時、電力損失の最大誤差率は $P_{loss} = 15W$ で 6.7% となった。同様に、電力変換器の電力損失を 500sec から 1500sec 間で導出した時、電力損失の最大誤差率は $P_{loss} = 25W$ で 6.2% となった。

以上の結果を 4.2 の実験結果と比較する。その結果、(6)式と(7)式を使用して求めた場合の測定精度は試作機を用いた場合よりも低かった。しかし、測定誤差率が 10% 以内を達成していることが確認された。従って、提案方法では長い測定時間を必要とする熱量測定法に対し、短時間で電力変換器の電力損失を求めることができた。さらに、測定時間を 1/5 に短縮できることが確認された。

〈4・4〉 温度追従制御による精度向上

過渡状態から電力損失を求める場合、電力損失の誤差は容器の熱抵抗 R_{mab} により変化する。従って、電力損失の誤差を減らすために、容器 B の温度上昇を使用することで修正する。制御対象の時定数 $T = PI$ 制御器の積分時定数 T_i とし、PI 制御器の比例ゲイン K_p を十分に大きく設計することで、容器 B 内の温度を容器 A 内の温度に過渡状態も含めて、追従させる。この時に得られた容器 A, B 内の温度上昇の傾きから電力損失を導出し、平均の値を求める。熱量測定法では温度変化が少ないほうが、測定誤差が生じやすい。そこで、電力変換器の発生損失 5W 時の実験を行って本方式の有用性を確認する。

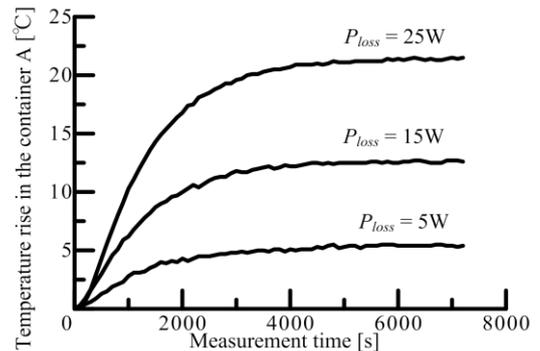


Fig. 2. Temperature characteristic of the container A.

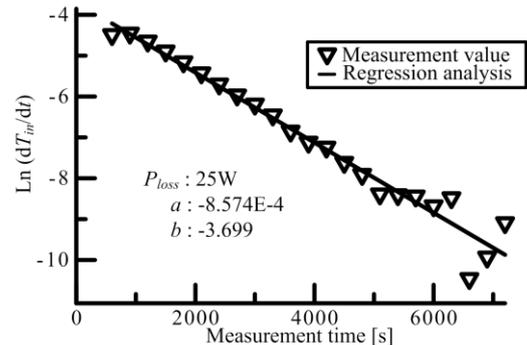


Fig. 3. Relation between the differential of temperature and time in log scale.

Table I Temperature allowance ΔT to keep within $\pm 10\%$ measurement accuracy.

P_{loss} [W]	R [W/K]	R_r [W/K]	ΔT_{in} [$^{\circ}C$]
5.0	32.996	31.725	± 0.635
15.0	25.910	24.813	± 1.646
25.0	28.284	27.130	± 2.885

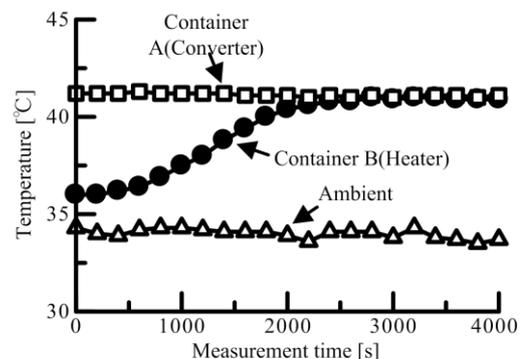


Fig. 4. Temperature control results for constant temperature command using PI control.

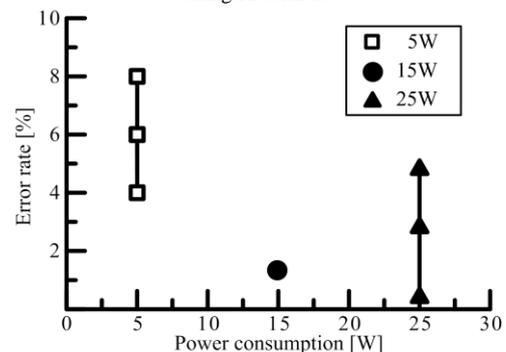


Fig. 5 Measurement error rate.

図 8 に容器 A の温度に容器 B の温度を追従させたときの結果を示す。図 8 より、測定開始から容器 B 内の温度が追従して

いることが確認できる。容器 B より得られた温度上昇の傾きから実験 4.3 と同様に電力損失を導出し、修正する。

図 9 に容器 A のみを用いた場合と容器 A, B を用いて導出した電力損失の結果を示す。電力変換器の発生損失を 500sec から 4000sec 間で導出した時、電力損失の誤差率は容器 A のみの場合 4.9% となった。容器 A, B の温度上昇を用いた場合、7.3% となった。500sec から 2000sec 間で導出した時、電力損失の誤差率は容器 A のみの場合 5.7% となった。容器 A, B を用いた場合、0.0% となった。500sec から 1500sec 間で導出した時、電力損失の誤差率は容器 A のみの場合 15.3% となった。容器 A・B の温度上昇を用いた場合、7.0% となった。以上の結果から、測定時間 500sec から 4000sec 間では誤差率が増加したが、500sec から 1500sec, 2000sec 間では容器 B の温度上昇を用いて修正することで精度を向上させることができた。500sec から 4000sec 間で誤差が増加したのは、2000sec から 4000sec 間で容器の周辺温度が変化したためと考えられる。

5. まとめ

本論文では、電力変換器の電力損失を測定するための低コストなシステムを提案する。熱量測定法は電力変換器の損失により発生した熱量を使用する。提案システムは、恒温槽を使用しない低コストな構造である。電力損失の測定方法を温度上昇に基づいて説明する。測定に飽和温度を使用する場合、測定時間は長くなる。提案システムでは、電力変換器の電力損失を過度状態の温度上昇から導出する。結果として、測定時間範囲を 500sec から 4000sec, 2000sec, 1500sec までとし、最大誤差率は 15W で 5.8%, 15W で 6.7%, 25W で 6.2% が得られた。これにより、提案システムは測定誤差率を 10% 以内に収めることができた。また、提案システムでは短時間で電力変換器の電力損失を求めることができた。さらに、容器 B 内の温度を測定開始から容器 A 内の温度に急速に追従させることで容器 A と同等の温度上昇を取得し、容器 B から電力損失を導出した。これにより、容器 B を用いることで精度を向上させた。

文 献

- (1) B. Szabados, A. Mihalcea, "Design and Implementation of a Calorimetric Measurement Facility for Determining Losses in Electrical Machines", IEEE tran. VOL. 51, NO. 5, pp902-907 (2002)
- (2) D. Christen, U. Badstuebner, J. Biela, J.W.Kolar : "Calorimetric Power Loss Measurement for Highly Efficient Converters", IPEC2010, pp1438-1445 (2010)
- (3) S. Weier, M. A. Shafi, R. McMahon "Precision Calorimetry for the Accurate Measurement of Losses in Power Electronic Devices", IEEE tran. VOL. 46, NO. 1, pp278-284 (2010)
- (4) M. Yagi, S. Tanaka, S. Mukoyama, M. Mimura, H. Kimura, S. Torii, S. Akita, and A. Kikuchi, "Measurement of AC Losses of Superconducting Cable by Calorimetric Method and Development of HTS Conductor With Low AC Losses", IEEE tran. VOL. 13, NO. 2, pp1901-1905 (2003)
- (5) A. Nigorikawa, Y. Nakata, K. Orikawa, J. Itoh : "Experimental Verification on Precise Calorimetric Power Loss Measurement Using Two Chambers", 2011 Japan-Korea Joint Technical Workshop on Semiconductor Power Converter, pp77-78, IEEEJ-SPC-10

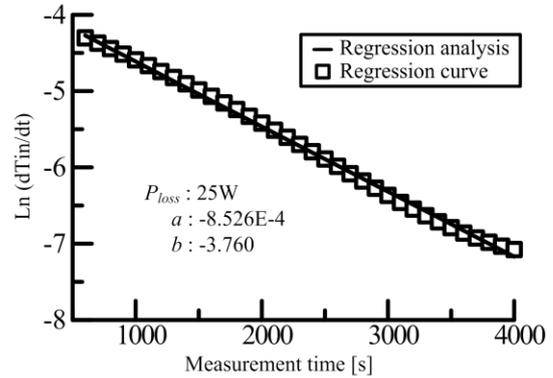


Fig. 6. Natural logarithm of differential temperature rise (25W:500-4000 s).

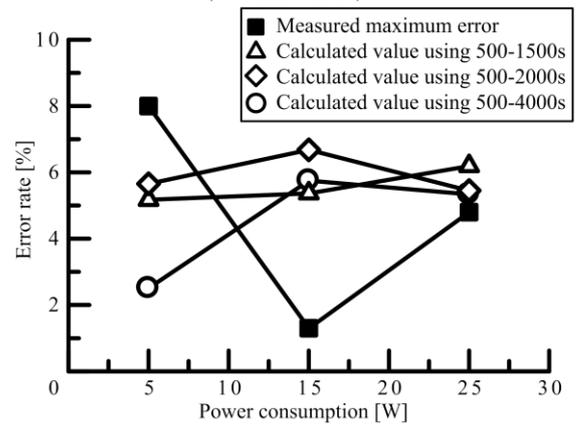


Fig.7. the error rate of the power consumption between the measurement values and the calculation values.

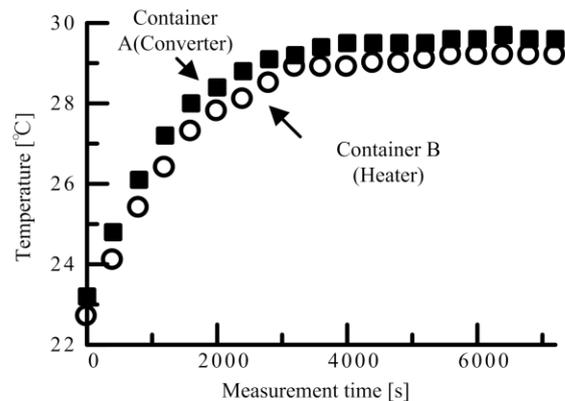


Fig.8. Temperature characteristics B when the temperature of chamber A is used as the temperature command of chamber B.

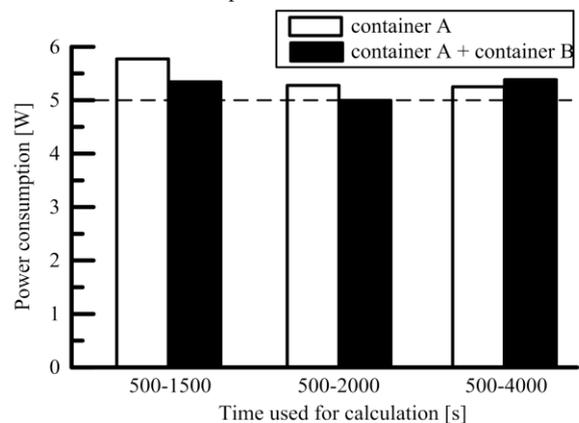


Fig.9 Power consumption measurement results corrected by the temperature rise of the container B.