

電力変換回路における熱流センサを用いた 半導体損失・銅損・鉄損のリアルタイム検出手法の提案

村井 颯馬* 平尾 宗之 日下 佳祐（長岡技術科学大学）

Real-Time Detection of Semiconductor, Copper, and Iron Losses in Power Converters with Heat Flux Sensors

Soma Murai*, Kazuyuki Hirao, Keisuke Kusaka, (Nagaoka University of Technology)

This paper proposes a detection method that separately measures semiconductor, copper, and iron losses of power converters in operation using heat flux sensors. A heat flux sensor directly measures the heat flux emitted from an object, and the power loss is calculated from the corresponding measured heat flux. By installing multiple heat flux sensors at each heat source, semiconductor, copper, and iron losses can be detected separately. To experimentally validate the proposed method, heat flux sensors were attached to the semiconductor device, the winding, and the core of the inductor in a buck converter. The heat flux from each component was measured by the sensors, and the corresponding losses were calculated with each surface area. All measured losses reached a steady state after approximately 3 hours. At steady state, the total measured loss was 5.0 W, whereas the theoretical total loss under the same operating conditions was 4.3 W, resulting in an error of 15 %. These results demonstrate the effectiveness of the proposed method for separately measuring semiconductor, copper, and iron losses of power converters in operation.

キーワード：損失測定，熱流センサ，損失分離

(Keywords, Loss measurement, Heat flux sensor, Loss separation)

1. はじめに

近年，電力変換回路は電気自動車，産業機器，再生エネルギーシステムなど幅広い分野で用いられており，エネルギー利用効率の向上や省エネルギー化の観点から，さらなる高効率化が求められている。一方で，電力変換回路の小型化や高パワー密度化に伴い，半導体デバイスや磁気部品における発熱量が増加しており，素子温度の上昇による性能低下や寿命低下が問題となる。

従来の電力変換回路設計では，半導体デバイスや磁気部品で発生する損失について，理論解析やシミュレーションに基づく最適設計が行われている⁽¹⁻²⁾。しかし，これらの設計手法は，動作状態や環境条件が一定である静的条件下での最適点を前提としている。そのため，実際の運用環境では，動作状態や環境条件の変化に伴って電力変換回路の損失が変動し，設計段階で想定した損失と実際に発生する損失が異なる場合がある。このことから，設計時に求めた最適動作点が，実運用時においても常に最適点となるとは限らない。

また，温度変化による特性変動を考慮した温度補償設計や設計マージンを設ける手法も広く用いられている⁽³⁾。しかし，これらの手法はあらかじめ想定した条件に基づく事前補償であり，逐次変化する動作状態や環境条件に追従して

対応することは困難である。

この課題に対し，電力変換回路の動作中に損失を測定できれば，実際の動作状態や環境条件に応じた損失を把握し，その情報に基づいて制御パラメータを調整することで，動作点を最適化することが可能となる。そのため，動作中の損失測定技術が重要となる。

動作中の損失測定法として，電圧および電流を高速に測定し，瞬時電力から損失を算出する電氣的測定法がある⁽⁴⁾。しかし，高速スイッチングが可能な SiC MOSFET などのパワー半導体の普及に加え，回路の高電圧化に伴い測定系にも高い絶縁性能などが求められるようになったことから，電氣的測定には高帯域かつ高速サンプリングが可能な測定系が必要となる。そのため，測定システムが高価となり，製品への組み込みは困難である。また，インダクタやトランスといった磁気部品では銅損と鉄損を同時に独立して測定することはできない。

一方，他の損失測定法として，電力変換回路から放出される熱量を利用して損失を算出する熱量測定法がある⁽⁵⁻⁹⁾。例えば文献⁽⁵⁾では，電力変換回路を恒温槽内で動作させ，循環媒体の温度変化から損失を算出する。この手法は発生した熱量を直接測定するため高精度な損失測定が可能である。しかし，これらの熱量測定法は電力変換回路全体の発熱量を測定対象とするため，半導体デバイスや磁気部品など，各

構成要素の損失を個別に分離して測定することはできない⁽⁵⁻⁹⁾。また、恒温槽および循環器を必要とするため、測定システムが高コストかつ大型となるという課題がある⁽⁵⁾。これに対し、恒温槽の代わりに2つの断熱材容器を使用し、循環媒体を使用しないことで低コスト化を実現した熱量測定法も提案されている⁽⁶⁾。しかし、本手法では測定対象を断熱材容器内に設置する必要があるため、実際の運用環境における測定は困難である。

以上のように、動作状態や環境条件の変化に対応しながら、低コストで動作中に各部品の損失を分離して測定できる手法は、未だ十分に確立されていない。

本研究ではこれらの課題を解決するため、熱流センサを用いて動作中の電力変換回路で発生する半導体損失、銅損および鉄損をリアルタイムに分離して検出する手法を提案する。熱流センサは、対象物から外部へ流出する熱流を直接測定するセンサであり、測定した熱流に基づいて発生損失を算出することができる。また、複数の熱流センサを各損失発生源に設置することで、半導体損失、銅損および鉄損などの各損失要因を個別に測定することが可能である。

本稿では、まず提案する熱流センサを用いた損失測定手法について、熱流センサの原理および各部品への取り付け手法について述べる。次に、実機検証として降圧チョップパ回路に対する適応例を示し、測定結果と理論値およびパワーメータによる測定結果との比較を通して本手法の有用性を示す。

2. 提案手法

本章では、提案手法で用いる熱流センサの測定原理および損失測定手法、ならびに熱流センサを用いた半導体デバイスおよび磁気部品の損失測定手法について述べる。

〈2・1〉熱流センサの測定原理と損失算出方法 本節では、提案手法で用いる熱流センサの測定原理および損失の算出方法について説明する。図1に熱流センサの構造を示す。本研究で用いる熱流センサは、熱電変換材料としてP型半導体およびN型半導体を使用しており、これらを対にして直列接続した構造となっている。測定対象物(DUT)から放出された熱が熱流センサを通過すると、センサの表裏には熱流に応じた温度差 $T_1 - T_2$ [K]が生じる。この温度差はフーリエの法則に基づき、(1)式に示すように熱流 q [W/m²]と対応付けられる。

$$q = \frac{\lambda}{d}(T_1 - T_2) \quad (1)$$

ただし、 λ [W/(m・K)]は熱流センサの熱伝導率、 d [m]は熱流センサの厚さである。

熱流センサでは、センサの表裏に温度差が生じるとゼーベック効果により起電力が発生する。この起電力 E [V]は熱流 q に比例し、(2)式で表される。

$$E = K \cdot q \quad (2)$$

ただし、 K [V/(W/m²)]は熱流センサ固有の感度係数である。

測定対象物で発生する損失 P_{loss} [W]は、熱流 q を放熱に有効な表面積 S [m²]で面積分することで、(3)式に示すように求められる。また、(2)式より熱流 q は熱流センサの起電力 E を用いて表すことができるため、発生損失 P_{loss} は熱流センサの起電力 E から算出可能である。

$$P_{loss} = \int_S q dS = \frac{1}{K} \int_S E dS \quad (3)$$

〈2・2〉半導体デバイスの損失測定手法 本節では、半導体デバイスで発生する損失(半導体損失)の測定手法について説明する。半導体デバイスは、一般的にヒートシンクに接続されており、デバイス内部で発生した熱は主としてベースプレートからヒートシンクへ放熱される。そのため、デバイスとヒートシンクの間に熱流センサを設置し、デバイスからヒートシンクへ流出する熱流 q_s [W/m²]を測定することで、半導体損失 P_s [W]を算出することが可能である。

図2に半導体損失の測定手法を示す。上述したように、半導体損失を算出するには、熱流センサをヒートシンクとデバイスの間に設置し、デバイスからヒートシンクへ流れる熱流を測定することが基本となる。しかし、実際のデバイス構造では、ベースプレートに熱流センサを直接設置するための十分な設置面積を確保することが困難である。そこで、デバイスとヒートシンクの間に銅製のヒートスプレッダを配

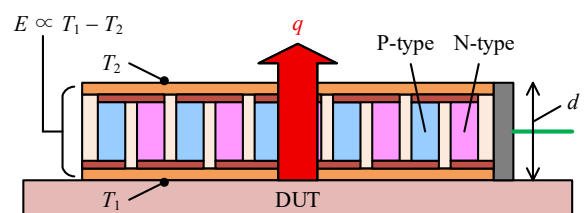


図1 熱流センサの構造図

Fig. 1. Structural diagram of a heat flux sensor.

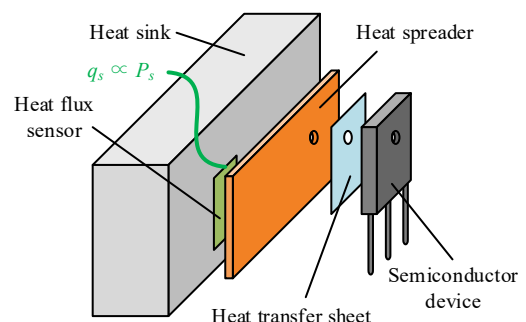


図2 半導体損失の測定手法

Fig. 2. Measurement method for semiconductor loss.

置し、ヒートスプレッド上に熱流センサを設置する構造とした。銅製ヒートスプレッドは高い熱伝導率を有するため、ベースプレートから伝達された熱をヒートスプレッド全体へ均一に伝達される。これにより、熱流センサをベースプレートへ直接設置することなく、半導体デバイスからヒートシンクへ流れる熱流を測定することが可能となる。

〈2・3〉磁気部品の損失測定手法 本節では、磁気部品で発生する損失である銅損および鉄損の測定手法について説明する。図3に磁気部品の損失測定手法を示す。本測定では、熱流センサを磁気部品の巻線部およびコア部にそれぞれ取り付ける。このとき巻線とコアの間が断熱されており、両者間の熱移動がなければ、巻線部のセンサでは銅損に比例する熱流 q_c [W/m²]、コア部のセンサでは鉄損に比例する熱流 q_i [W/m²]が測定される。したがって、測定した熱流から銅損 P_c [W]および鉄損 P_i [W]をそれぞれ算出することができ、磁気部品の銅損と鉄損を分離して測定することが可能となる⁽¹⁰⁻¹¹⁾。

3. 実機検証

〈3・1〉検討システムの構成 本節では、実機検証に用いた実験装置について述べる。測定対象の電力変換回路として同期整流方式の双方向降圧チョップ回路を用いた。図4に実験回路と熱流センサの配置を示し、表1に回路パラメータおよび熱流センサの仕様を示す。熱流センサは、半導体デバイス、インダクタの巻線部およびコア部の計3箇所に設置し、半導体損失、銅損および鉄損を独立に検出できる構成としている。

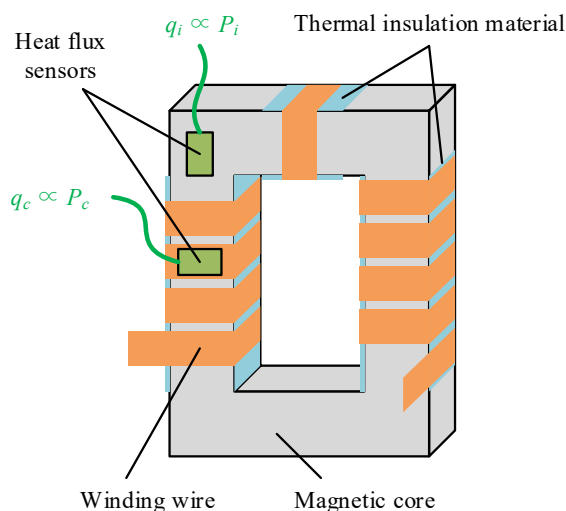


図3 磁気部品の損失測定手法

Fig. 3. Measurement method for power loss in magnetic components.

図5に本回路で使用したインダクタの外観を示す。本検証では銅損と鉄損の検出精度を評価する目的から、巻線として銅箔を用いることで、巻線の放熱面の形状および放熱表面積を明確に定義できるようにした。また、巻線部およびコア部から放出される熱流を個別に測定しやすくするた

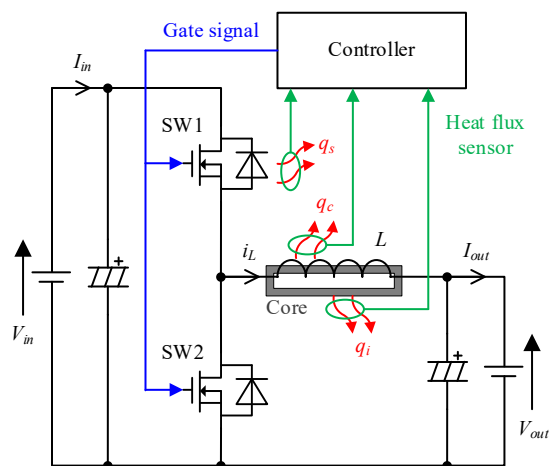


図4 実験回路と熱流センサの配置

Fig. 4. Experimental circuit and heat flux sensor arrangement.

表1 回路パラメータと熱流センサの仕様

Table 1. Circuit parameters and heat flux sensor specifications.

Parameters	Symbol	Value
Input voltage	V_{in}	80 V
Output voltage	V_{out}	40 V
Switching frequency	f_{sw}	20 kHz
Power	P_{out}	220 W
Load	R	6.67 Ω
Semiconductor device		
Model number	ROHM Co., Ltd., SCT3030AR	
Inductor		
Core model number	Proterial, Ltd., F1AH1266	
Winding wire model number	TERAOKA SEISAKUSHO CO.,LTD., No.8323	
Winding width	w	15 mm
Number of turns	N	9
Inductance	L	659.8 μ H
Heat flux sensor (for q_s measurement)		
Model number	TOYOTA Energy Flow, T - Built-in S * Al - 1.5	
Sensitivity	K_s	0.0100 mV/(W/m ²)
Heat flux sensor (for q_c measurement)		
Model number	TOYOTA Energy Flow, T - Built-in S - 1.5	
Sensitivity	K_c	0.0078 mV/(W/m ²)
Heat flux sensor (for q_i measurement)		
Model number	TOYOTA Energy Flow, T - Built-in S - 5	
Sensitivity	K_i	0.0106 mV/(W/m ²)

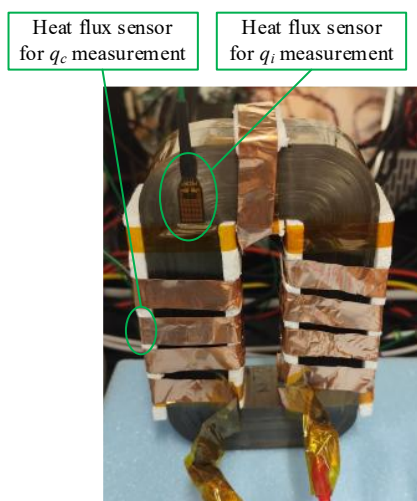


図 5 インダクタの外観
Fig. 5. Overview of the inductor.

め、両者間に断熱材を挿入し、熱的な干渉を低減した。さらに、インダクタは断熱材上に設置することで架台との熱伝導を抑制し、巻線部およびコア部から空气中に放出される熱流をより正確に測定できる構成とした。

〈3・2〉測定結果 本節では、実機において熱流センサを用いて測定した熱流、およびその熱流から算出した各損失の測定結果について述べる。

図 6 に実験装置の外観を示す。本実験では、実際の機器の使用環境を想定し、密閉容器などは用いず、オープン環境で測定を実施した。

図 7 に半導体デバイスおよびインダクタの表面温度分布を示す。図 7(a)より、銅製ヒートスプレッド全体の温度がほぼ均一であることから、半導体デバイスのベースプレートから放出された熱は、ヒートスプレッド全体へほぼ均一に伝達されていることが確認できる。したがって、ヒートスプレッドに設置した熱流センサで測定される熱流は、半導体デバイスから伝達される熱流を適切に反映しているとみなされる。また、ヒートシンクについても表面全体で温度が概ね均一に分布していることから、安定した放熱が行われていることが確認できる。図 7(b)より、インダクタにおいては巻線およびコアの表面温度分布がそれぞれ概ね均一であり、局所的な発熱は認められなかった。このことから、巻線およびコアのそれぞれで熱が均一に拡散しており、測定位置による熱流の差は小さいと考えられる。

図 8 に各損失の測定値の時間変化を示す。各損失の測定値は、熱流センサの出力電圧をデータロガーで取得し、センサ感度および放熱表面積を用いて換算した後、30 sec の後方移動平均を適用することで求めた。図 8 より、測定開始から

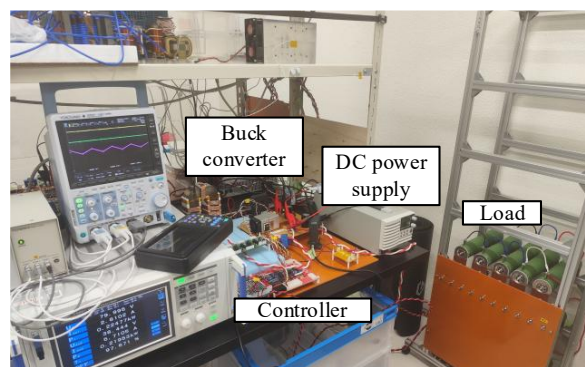
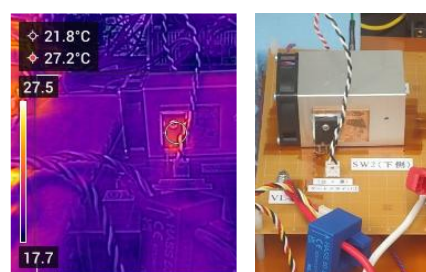
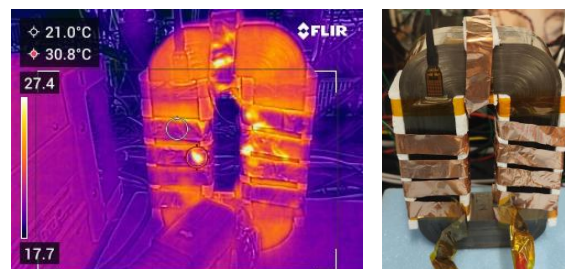


図 6 実験装置の外観

Fig. 6. Overview of the experimental setup.



(a)



(b)

図 7 (a) 半導体デバイスと (b) インダクタの表面温度分布

Fig. 7. Surface temperature distributions of (a) the semiconductor device and (b) the inductor.

約 3 時間でいずれの損失も定常状態に到達していることが確認された。定常状態における半導体損失は 1.2 W、銅損は 2.2 W、鉄損は 1.6 W であった。なお、半導体損失は、発生した熱がすべてベースプレートからヒートスプレッドへ伝達され、さらにヒートスプレッドからヒートシンクへ伝達して放熱されるものと仮定して算出した。また、銅損および鉄損は、断熱材と接触している面から放熱しないものと仮定し、当該面を放熱表面積から除外して算出した。

〈3・3〉理論値との比較 本節では、実験条件における各損失の理論値を算出し、測定した熱流から算出した各損失の測定値との比較結果について述べる。

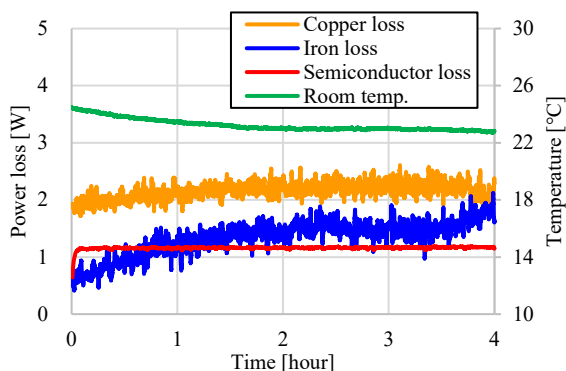


図 8 損失分離測定の結果
Fig. 8. Results of separate loss measurements.

まず、インダクタの銅損の理論値を算出する。銅損 P_c は、(4)式に示すように求められる。

$$P_c = RI_{out}^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 R は巻線抵抗、 I_{out} は出力電流である。インダクタ電流は直流重畳電流であるため、巻線抵抗 R に対する交流成分による表皮効果および近接効果の影響を考慮する必要がある。しかし、本実験で用いるインダクタの巻線には導体厚さの薄い銅箔を用いており、さらに 1 層巻かつ巻線間を離れた構造とした。そのため、表皮効果および近接効果による巻線抵抗の増加は十分小さいものとし、巻線抵抗には直流抵抗値を用いた。以上より、直流抵抗値を用いて算出したインダクタの銅損 P_c の理論値は 1.8 W となった。

次に、インダクタの鉄損の理論値を算出する。インダクタ電流の交流成分であるリップルの波形は三角波状である。そのため、IGSE (Improved Generalized Steinmetz Equation) を用いて算出する。IGSE は(5)式で表される⁽¹²⁾。

$$P_i = \frac{1}{T} \int_0^T k \left| \frac{dB(t)}{dt} \right|^\alpha (\Delta B)^{\beta-\alpha} dt \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 k 、 α 、 β は鉄損波形からカーブフィッティングにより求めたスタインメッツ係数、 T はスイッチング周期、 B は磁束密度、 ΔB は交流成分による磁束密度変化量である。(5)式により算出したインダクタの鉄損 P_i の理論値は 1.6 W となった。

さらに、半導体損失の理論値を算出する。本稿では、半導体損失として、導通損失、スイッチング損失、およびリカバリ損失を考慮した。各損失の理論値は、MOSFET 部の導通損失が 0.62 W、FWD 部の導通損失が 0.18 W、スイッチング損失が 0.078 W、リカバリ損失が 0.063 W であった。これらを合計した半導体損失 P_s の理論値は、0.95 W である。

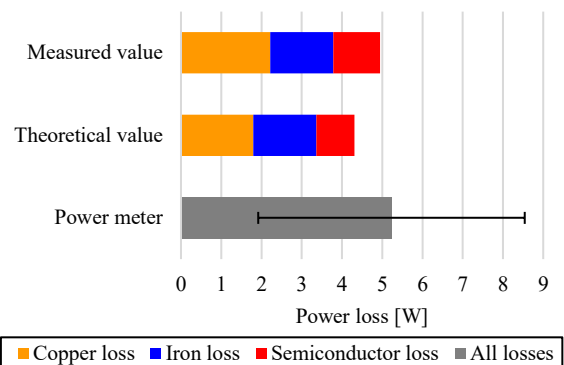


図 9 測定値、理論値およびパワーメータによる測定値の比較
Fig. 9. Comparison of measured, theoretical, and power meter values.

図 9 に測定値、理論値およびパワーメータによる測定値の比較を示す。測定値および理論値のグラフは、それぞれ半導体損失、銅損および鉄損の合計損失の測定値と理論値、ならびにそれらの内訳を示している。一方、パワーメータの測定値のグラフは、入力電力と出力電力の差から求めた回路全体の総損失を示している。また、エラーバーはパワーメータの測定精度範囲を示している。測定した熱流から算出した合計損失の測定値は 5.0 W であり、合計損失の理論値は 4.3 W であった。また、パワーメータの測定値は 5.23 W であった。半導体損失、銅損および鉄損の測定値と理論値の誤差はそれぞれ 23%、0.31%、24%であり、合計損失の測定値と理論値の誤差は 15%となった。

5. まとめ

本稿では、熱流センサを用いて動作中の電力変換回路における半導体損失、銅損および鉄損をリアルタイムに分離して測定する手法を提案した。提案手法では、複数の熱流センサを各損失発生源に設置することで、各損失を個別に測定することが可能である。提案手法の有効性を検証するため、双方向降圧チョッパ回路を対象とした実機実験を行った。その結果、各損失は約 3 時間で定常状態へ到達し、定常状態における半導体損失、銅損および鉄損の合計損失は 5.0 W となった。一方、実験条件における合計損失の理論値は 4.3 W であり、測定値との誤差は 15%であった。以上の結果から、提案手法により動作中の電力変換回路における半導体損失、銅損および鉄損を個別に測定できることを確認した。

今後は、本稿の実験で用いた簡易構造のリアクトルではなく、実際の電力変換回路で使用されるインダクタに対して提案手法を適用する。また、各部の損失情報を活用し、測定した損失に基づいた電力変換回路の動作条件の最適化を

実現する予定である。

文 献

- (1) Y. Ren, M. Xu, J. Zhou, and F. C. Lee : “Analytical Loss Model of Power MOSFET”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 21, No. 2, pp. 310-319 (2006)
- (2) A. D. Rajapakse, A. M. Gole, and P. L. Wilson : “Electromagnetic Transients Simulation Models for Accurate Representation of Switching Losses and Thermal Performance in Power Electronic Systems”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, pp. 319-327 (2005)
- (3) T. Bruckner and S. Bernet : “Estimation and Measurement of Junction Temperatures in a Three-Level Voltage Source Converter”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 22, No. 1, pp. 3-12 (2007)
- (4) B. Szabado and A. Mihalcea : “Design and implementation of a calorimetric measurement facility for determining losses in electrical machines”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 51, No. 5, pp. 902-907 (2002)
- (5) D. Christen, U. Badstuebner, J. Biela, and J. W. Kolar : “Calorimetric Power Loss Measurement for Highly Efficient Converters”, The 2010 International Power Electronics Conference (IPEC), pp. 1438-1445 (2010)
- (6) J. Itoh and A. Nigorikawa : “Experimental analysis on precise calorimetric power loss measurement using two chambers”, The 2012 International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), pp. DS2b.1-1 - DS2b.1-7 (2012)
- (7) A. Kosonen, L. Aarniovuori, J. Ahola, and J. Backman : “Loss Definition of Electric Drives by a Calorimetric System With Data Processing”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 8, pp.4432-4442 (2014)
- (8) D. Neumayr, M. Guacci, D. Bortis, and J. W. Kolar : “New calorimetric power transistor soft-switching loss measurement based on accurate temperature rise monitoring”, The 2017 IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's (ISPSD), pp. 447-450 (2017)
- (9) K. Mitsugi, R. Chikaraishi, M. Deng, and Y. Noge : “A Design Based on Operator Theory and Isomorphism: Operator-Based Nonlinear Adaptive Control for a Calorimetric Power Loss Measurement System Using a Peltier Element”, IEEE Systems Man and Cybernetics Magazine, Vol. 9, No. 1, pp. 58-68 (2023)
- (10) 平尾宗之, 日下佳祐 : 「熱流センサを用いた運転中の磁気部品で生じる銅損と鉄損の分離測定 -簡易構造を有するリアクトルにおける検証-」, 2026 年電気学会産業応用部門大会, Vol. 1, No.67 (2026)
- (11) K. Kusaka and K. Hirao : “Separated Measurement of Copper and Core Losses in Operating Magnetic Components Using Heat flux Sensors”, 2026 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), No. 544 (2026)
- (12) K. Venkatachalam, C.R. Sullivan, T. Abdallah, and H. Tacca : “Accurate prediction of ferrite core loss with nonsinusoidal waveforms using only Steinmetz parameters”, The 2002 IEEE Workshop on Computers in Power Electronics, pp. 36-41 (2002)