

光プローブ電流センサの開発*

ー トランスインピーダンス回路の特性評価 ー

佐藤紘介*¹ 水寄英明*² 三沢雅芳*³ 垣内健児*¹ 曾根原 誠*⁴ 佐藤敏郎*⁴

Development of Optical Probe Current Sensor ー Evaluation of Transimpedance Circuit ー

Kosuke SATO, Hideaki MIZUSAKI, Masayoshi MISAWA, Kenji KAKIUCHI, Makoto SONEHARA and Toshiro SATO

パワーエレクトロニクス回路用電流センサとして、光プローブ電流センサの開発を進めている。本論文では、100kHzスイッチングを行うパワーエレクトロニクス回路への適用を想定した光プローブ電流センサの光-電気変換回路に用いるトランスインピーダンス回路の評価を行った。その結果、利得およびカットオフ周波数は目標仕様を満足していることを確認した。さらに、トランスインピーダンス回路の遅延時間を見積もり、パワーエレクトロニクス回路へ適用する際の影響について検討した。

キーワード：パワーエレクトロニクス、光プローブ電流センサ、光-電気変換回路、トランスインピーダンス回路

1 結 言

電気エネルギーの効率的な運用のため、パワーエレクトロニクス機器の重要性が高まっている。パワーエレクトロニクス機器は、大電力を効率的かつ安全に取り扱うため、入出力電圧・電流を監視しながら動作している。多くの場合、電圧は抵抗分圧することで検出が行われている。一方、電流はシャント抵抗、CT(Current Transformer)などを用いて検出が行われている。しかし、シャント抵抗は電流が流れることで電力損失が発生し、パワーエレクトロニクス機器の電力変換効率が低下する。また、大電流を流すためには大型のシャント抵抗が必要になるのに加え、抵抗値が小さくなるため検出分解能が低下するという課題がある。また、CTは一部の製品を除き、直流電流が測定できない、電磁ノイズに弱いといった課題がある。

ところで、光をプローブとした電流センサとして、検出原理にFaraday効果を用いた光CTが提案されている¹⁾。この電流センサは、小型・軽量、電磁ノイズに強い、大電流測定が可能、応答特性や周波数特性がよいといったメリットがある。しかし、電力インフラ用途向けであるため、パワーエレクトロニクス機器への適用は難しい。

信州大学では、光をプローブとした電流センサとして、磁気光学Kerr効果を用いたセンサに取り組んでいる^{2)~5)}。このセンサは、光CTの利点を有するのに加え、センサヘッドを電流の計測を行う箇所に当てるだけで測定が可能。そのため、光CTのように光ファイバケーブルを巻きまわす必要がなく取り回しに優れる。また、センサヘッドの磁性薄膜の材質や形状を変えることで、幅広い電流レンジの測定に適用できる。

光プローブ電流センサでは、光信号を電気信号に変えるため、フォトダイオードおよびトランスインピーダンス回路で構成される光-電気変換回路が必要となる。本論文では、トランスインピーダンス回路について評価を行った結果を報告する。

2 光プローブ電流センサの測定原理とシステム構成^{5),6)}

2. 1 電流測定原理

光プローブ電流センサは、磁気光学Kerr効果を用いて電流検出を行う。センサヘッドには、一軸磁気異方性を有する単磁区磁性薄膜を成膜する。図1に示すように、磁性薄膜の磁気モーメント M の向きと電流が流れる方向を平行にし、入射光(直線偏光)の入射面が磁気モーメントと垂直になるように光を入射させる。電流が流れ、磁気モーメントと垂直に磁界が発生すると、磁気モーメントは回転する。このとき、磁気光学Kerr効果により反射光の偏光面が回転し、S偏光成分のほかP偏光成分が生じ楕円偏光となる。磁性薄膜が磁気飽和しない範囲で、電

* 受託研究, JSTスーパークラスタープログラム

*¹ 電子部

*² 化学部(現 加工部)

*³ 化学部

*⁴ 信州大学工学部

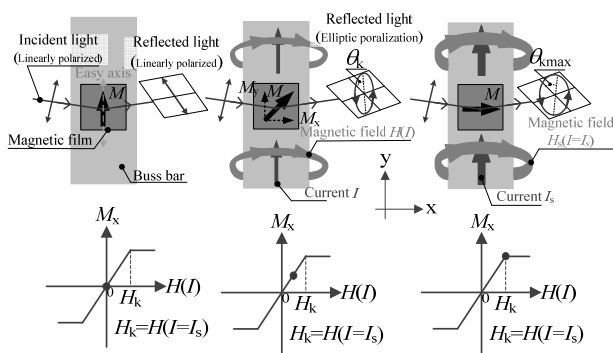


図1 電流測定原理⁵⁾

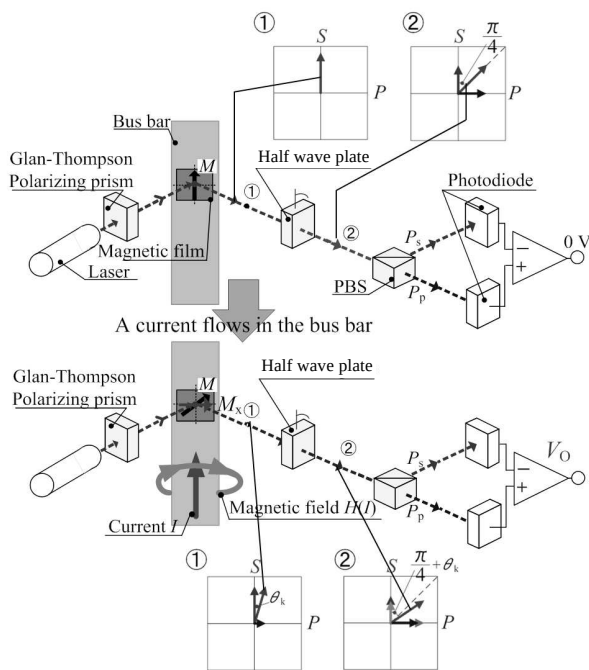


図2 システム構成⁵⁾

流磁界とP偏光成分の大きさは比例するため、P偏光成分を検出することにより電流検出ができる。

2.2 システム構成

図2に基本的なシステム構成を示す。垂直共振器面発光レーザ(VCSSEL)を光源とし、この光をグラントムソンプリズムを通して、S偏光成分のみ磁性薄膜に当て反射させる。反射光は1/2波長板により偏光面を45°回転させたのち、偏光ビームスプリッタ(PBS)によってS偏光成分とP偏光成分に分け、それぞれフォトダイオードへ入力し、差動検出する。

測定箇所に電流が流れていないとき、偏光面は変化しないため、反射光はS偏光のみとなる。よって、1/2波長板により偏光面を回転させた光のS偏光成分とP偏光成分は等しくなるので、2個のフォトダイオードに流れる電流も等しく、トランスインピーダンス回路側へ電流は流れ込まない。測定箇所に電流が流れると、磁気光学Kerr効果により反射光の偏光面が変化するため、2個のフォト

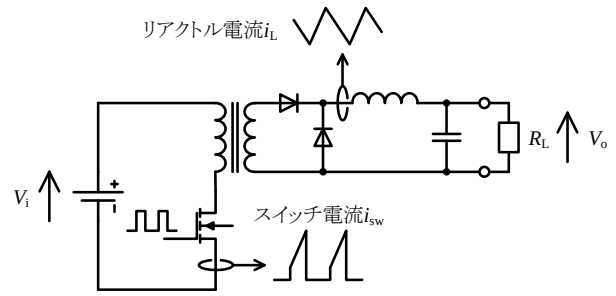


図3 パワーエレクトロニクス回路の電流波形

ダイオードに流れる電流が変化し、その差分がトランスインピーダンス回路に流れ、電圧信号として出力される。

3 トランスインピーダンス回路の構成

3.1 目標仕様

本論文で扱うトランスインピーダンス回路は、100kHzでスイッチングするパワーエレクトロニクス機器への適用を想定した。

2.2節で示したシステムにおいて、使用するフォトダイオードの短絡電流は1μAである。このときに、100mVの電圧信号として出力できるようにするため、トランスインピーダンス回路の目標利得は100dBとした。

一方、パワーエレクトロニクス機器に用いられるパワー半導体デバイスやリアクトルに流れる電流は、図3に示すように台形波または三角波となる。この電流波形を歪ませずに電圧波形として変換するには、パワー半導体デバイスのスイッチング周波数の10次高調波成分まで応答できれば十分と考えられる。よって、トランスインピーダンス回路の目標周波数帯域は1MHzとした。

3.2 回路構成と変換特性

トランスインピーダンス回路の回路構成を図4に示す。100dB以上の変換利得を得るため、トランスインピーダンスアンプ(以下、TIAと称す)と反転増幅アンプをカスケード接続している。

図4より、トランスインピーダンス回路の伝達関数は式(1)で表される。ただし、sはラプラス変換演算子である。

$$G(s) = \frac{V_{out}}{I_{in}} = \frac{R_1}{1 + sR_1C_1} \times \frac{R_3}{R_2} \dots \dots \dots (1)$$

式(1)においてs→jωとおき、周波数領域の伝達関数とすると、変換利得と位相の周波数特性は式(2)、式(3)で表される。

$$|G(j\omega)| = 20 \log_{10} \left| \frac{R_1}{1 + j\omega R_1C_1} \frac{R_3}{R_2} \right| \dots \dots \dots (2)$$

$$\angle G(j\omega) = -\tan^{-1}(\omega R_1C_1) \dots \dots \dots (3)$$

式(2)より、直流における変換利得は式(4)となる。

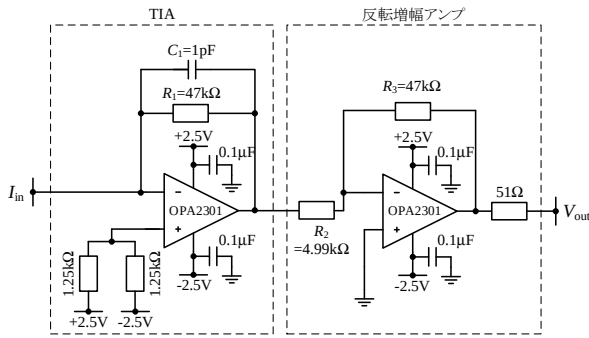


図4 トランスインピーダンス回路の回路構成

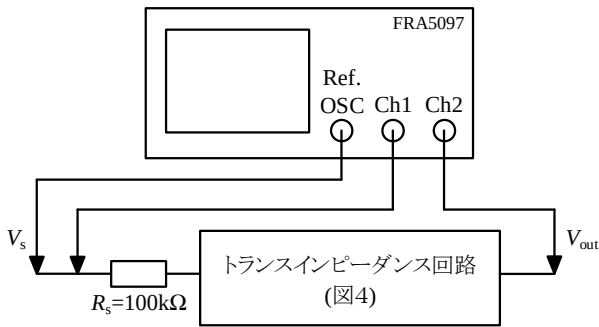


図5 測定時の接続

$$|G(0)| = 20 \log_{10} \left(\frac{R_1 R_3}{R_2} \right) \quad (4)$$

また式(3)より、カットオフ周波数 f_c は式(5)となる。

$$f_c = \frac{1}{2\pi C_1 R_1} \quad (5)$$

式(4), (5)に図4の部品定数を代入して計算すると、直流利得 $|G(0)|=112.9\text{dB}$ 、カットオフ周波数 $f_c=3.4\text{MHz}$ となり目標仕様を満足できる。

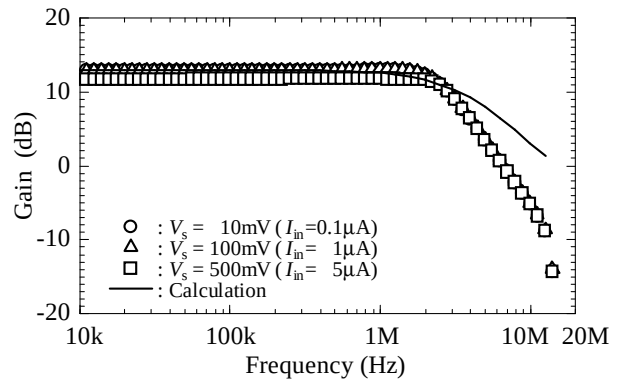
4 評価結果と考察

4.1 評価方法

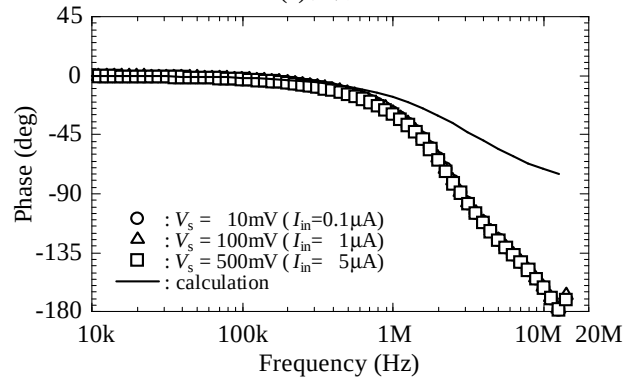
試作したトランスインピーダンス回路は、周波数特性分析器(FRA5097; (株)エヌエフ回路設計ブロック製)を用いて変換特性の評価を行った。

トランスインピーダンス回路の入力信号は2個のフォトダイオードに流れる電流の差分だが、周波数特性分析器の基準信号源は定電流出力することはできない。そこで、図5に示すように入力部に抵抗 R_s を挿入し、周波数特性分析器で振幅 V_s の信号を入力した。このとき、TIAのオペアンプのプラス側入力端子電圧は、バーチャルショートによりマイナス側入力端子電圧と等しく0Vとなる。よって、TIAの入力電流は $I_{in}=V_s/R_s$ となる。

なお、抵抗 R_s が入ることでトランスインピーダンス回路の伝達関数は式(6)となる。



(a)利得



(b)位相

図6 測定結果

$$G(s) = \frac{V_{out}}{V_s} = \frac{1}{R_s} \frac{R_1 R_3}{1 + s R_1 C_1 R_2} \quad (6)$$

よって、測定される利得は式(2)で計算される値から $20 \log_{10}(1/R_s) = -20 \log_{10}(R_s)$ だけ変化する。今回は $R_s=100\text{k}\Omega$ であるため測定される利得は実際の値より100dB小さい12.9dBとなる。この値となっていればトランスインピーダンス回路は目標仕様を満足しているといえる。なお、位相特性については変化しない。

4.2 評価結果

4.2.1 利得・位相の周波数特性

図6に測定結果を示す。プロット(○, △, □)は測定値、実線は式(6)から求められる計算値である。 $V_s=10\text{mV}$ 、 100mV および 500mV として、それぞれ $I_{in}=0.1\mu\text{A}$ 、 $1\mu\text{A}$ および $5\mu\text{A}$ の入力電流を模擬した。

図6より、低域利得12.9dB、カットオフ周波数2.8MHzである。前述の通り、測定値は100dB小さく見えるため、トランスインピーダンス回路としては112.9dBの利得があり、目標仕様を満足している。また、入力信号レベルによらず、同じ周波数特性が得られている。しかしながら、利得は1MHz、位相は800kHz程度までは測定値と計算値の一致は良好であるものの、それ以上の周波数においては差異が大きくなっている。これは、回路および測定系の寄生容量による影響、使用しているオペアンプのGB積の影響と考えられる。より高周波スイッチングへ対

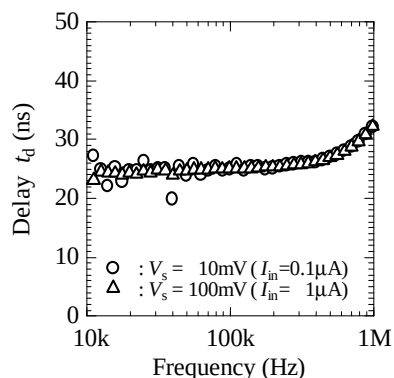


図7 遅延時間

応するためには、回路の寄生容量、オペアンプのGB積を含めた設計が必要になると考える。

4. 2. 2 遅延時間

高周波スイッチングを行うパワーエレクトロニクス機器では、センサの伝搬遅延時間も重要な特性となる。そこで、トランスインピーダンス回路に信号が入力されてから、出力されるまでの伝搬遅延時間を見積もった。

伝搬遅延時間は入出力信号の位相遅れとして現れ、式(3)で計算される回路構成に起因する位相遅れ θ_{calc} と、実測の位相遅れ θ_{meas} の差が遅延時間による位相遅れとなる。よって、周波数を f とすると遅延時間 t_d は式(8)で計算できる。

$$t_d = \frac{1}{f} \frac{(\theta_{\text{meas}} - \theta_{\text{calc}})}{360^\circ} \quad (8)$$

なお、遅延時間の見積もりは、測定値と計算値の一致が良好な、寄生容量やGB積の影響が小さい範囲で行っている。

式(8)により求めたトランスインピーダンス回路の遅延時間を図7に示す。図7から、遅延時間は約25nsであることがわかる。500kHz近傍から遅延時間が大きくなっていくように見えるが、群遅延特性および寄生容量やGB積の影響による遅れであると考えられる。

4. 2. 3 遅延時間が及ぼす影響の検討

図7に示した結果は、トランスインピーダンス回路における遅延のみであり、これにセンサヘッド、フォトダイオード等における遅延が加わると、システム全体の遅延は30ns～50ns程度になると推察される。

光プローブ電流センサを、図3に示したようなPWM制御のDC-DCコンバータへ適用することを考える。このとき、(i)電流モード制御のため、(ii)過電流保護のため、にスイッチ電流の検出を行うことを想定し、影響を検討する。

(i)電流モード制御に用いるとき

電流モード制御は、出力電圧値とスイッチに流れる電流値の2つの情報を用いてオンパルス幅を制御し、コンバータ出力安定化制御を行う方式である。具体的には、図8に示すように出力電圧をフィードバックしてエラー

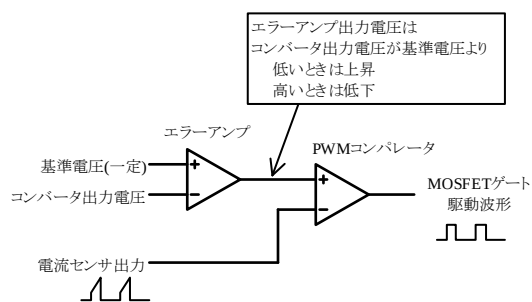


図8 電流モード動作時

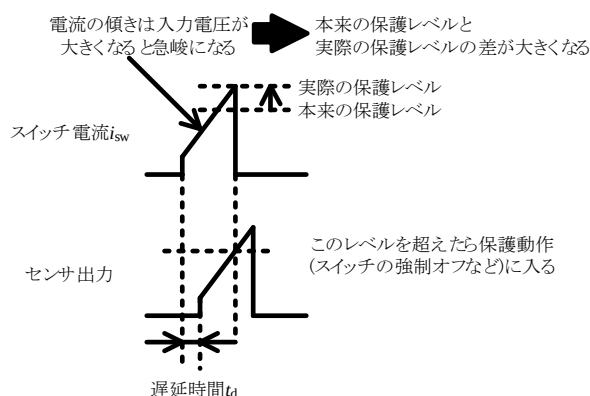


図9 過電流保護動作時

アンプへ入力する。また、スイッチ電流を電流センサで検出し、エラーアンプ出力と電流センサ出力値をPWMコンパレータで比較してオンパルス幅を制御し、MOSFETゲート駆動波形を生成している。電流検出に遅延があると、本来の値よりもオンパルス幅が広がるため出力電圧は上昇しようとする。しかし、同時に出力電圧を一定値に安定化するためのフィードバック制御がかかるため、出力電圧の上昇を抑制しようとしてオンパルス幅を狭くする方向にエラーアンプ出力が変化する。これらの動作により、コンバータ出力電圧は設計値で安定する。よって定常状態においては、ほとんど伝搬遅延は影響しないと考えられる。

ただし、今回は評価できていないが、矩形波信号を入力した際の立ち上がり時の遅延時間と立ち下り時の遅延時間が異なる場合などは、遅延の影響で不感帯ができ、制御できるオン時比率の範囲が狭くなることがある。このとき、パワーエレクトロニクス機器の過渡応答特性や入出力電圧の設定範囲に影響する可能性がある。

(ii)過電流保護に用いるとき

このとき、図9に示すように過電流検出値の設計値よりも大きな電流にならないと過電流保護がかからず、またトランスの1次巻線のインダクタンスや入力電圧の変化に伴い設計値からの差異も変化するという影響が現れる。そのため、回路設計後の過電流検出レベルの調整などが必要になる。許容できる遅延時間をスイッチング周期の1%程度までと仮定すると、現在のセンサを適用でき

るのは、スイッチング周波数200kHz程度までになると想定される。

なお、パワーエレクトロニクス機器用電流センサとして研究が進められているIGBTモジュールの電流測定用ロゴスキーコイルの遅延時間は、現在主に用いられているCTから約20ns遅延という結果が報告されている⁷⁾。また、オシロスコープの電流プローブでは、約30nsの遅延であるという報告がある^{8),9)}。これらに比べても約1.5～2倍程度の遅延となるため、より高周波スイッチングを行うパワーエレクトロニクス機器への適用を考えると、伝搬遅延時間の短縮が必要になると考えられる。

5 結 論

光プローブ電流センサ用のトランスインピーダンス回路の特性評価を行った。以下に得られた結果を要約して示す。

- (1) 試作したトランスインピーダンス回路は、低域利得112.8dB、カットオフ周波数2.8MHzであり、目標仕様を満足し、100kHzスイッチングを行うパワーエレクトロニクス回路システムへ適用できると考えられる。
- (2) トランスインピーダンス回路の周波数特性は、実測値と計算値で一致は良好であった。1MHz以上では、寄生容量や使用したオペアンプのGB積の影響などにより差異が大きくなった。
- (3) トランスインピーダンス回路の遅延時間は25ns程度であった。100kHzスイッチングを行うパワーエレクトロニクス回路ではそれほど問題にならないと考えられる。

今後、より高周波スイッチングを行うパワーエレクトロニクス機器への適用を考えると、回路の寄生容量成分の低減、周波数帯域の高周波化および伝搬遅延時間の短縮のため、トランスインピーダンス回路の専用集積回路チップ化などが必要になると考えられる。

参考文献

- 1) 村尾武, 平田幸久, 佐々木欣一. 直流送電システム用光CT. 東芝レビュー. Vol.64. No.11. pp.47-51(2009).
- 2) 柄澤大樹, 森崎裕基, 曾根原 誠, 佐藤敏郎, 浅沼和志. パワーエレクトロニクス用光プローブ電流センサの基礎検討. 電気学会全国大会. 3-140(2014).
- 3) 北澤真, 柄澤大樹, 曾根原誠, 佐藤敏郎. パワーエレクトロニクス用光プローブ電流センサの試作と特性評価. 電気学会基礎・材料共通部門大会. 22-B-a2-2(2014).
- 4) 北澤真, 柄澤大樹, 曾根原誠, 佐藤敏郎. 形状磁気異方性を有する反射磁性膜の磁気Kerr効果を利用する光プローブ電流センサの開発. 計測自動制御学会中部支部シンポジウム2014. PD-7(2014).
- 5) D. Karasawa, M. Sonehara, S. Kitazawa, T. Sato. Development of Optical Probe Current Sensor with Kerr Effect for Power Electronics. IEEE Sensors 2014 Proceedings. pp.1928-1931 (2014).
- 6) 高周波マイクロ磁気応用技術調査専門委員会編. 高周波マイクロ磁気応用技術の最新動向. 電気学会技術報告. 第1313号, pp.36-37(2014).
- 7) 山口治之, 附田正則, 渡邊晃彦, 大村一郎. IGBTモジュール高信頼化に向けたチップ間電流不均衡計測技術の開発. 電気学会電子デバイス半導体電力変換合同研究会. SPC-14-129(2014).
- 8) V. Joseph Thottuvelil, Thomas G. Wilson, Harry A. Owen Jr.. High-Frequency Measurement Techniques for Magnetic Cores. IEEE Transactions on Power Electronics. Vol.5. No.1, pp.41-53(1990).
- 9) 村田仁一, 湯川格, 二宮保. スwitchング電源用フェライトコアの実使用状態に於ける電力損失測定. 電子情報通信学会技術研究報告. EE. 電子通信エネルギー技術. Vol.104. No.575, pp.39-46(2005).