

高性能ハーメチック・アナログ アイソレーションアンプによる設計

ホワイトペーパー

By Jamshed N. Khan
フォトカプラ・アプリケーション・エンジニア

概要

今日、フォトカプラは、ほとんどの電気機器や多くの産業分野の至る所で使用されている電子部品です。25年以前に最初に紹介されて以来、光学結合式アイソレータは、オプトカプラ、フォトカプラ、またはオプトアイソレータとしても知られ、ガルバニック絶縁、グラウンド・ループやノイズ除去、または他のEMI/ノイズによる障害の分離に不可欠な部品となっています。最も基本的なフォトカプラは、入力側のLED発光素子、出力側のバイポーラ受光素子、およびこれらに挟まれて分離する高誘電性絶縁フィルムで構成され、小さなパッケージに封止されています。

当初、このようなフォトカプラは、主にデジタル信号用途で使用されていました。フォトカプラは、その入出力応答の非線形性が低く、線形用途に使用するには独特な設計技術が必要でした。今日では線形フォトカプラが提供されていますが、あまり知られていないかもしれません。アナログ回路設計者もまた、デジタル設計者と同じように、フォトカプラが小型、高信頼性、低消費電力化することを期待しています。

アバゴ・テクノロジーの、気密性と放熱性に優れたハーメチックシール・パッケージに封入されたアナログ・アイソレーションアンプHCPL-7851は、通常の産業機器などよりも厳しい使用環境下でのアナログ電流または電圧検出用途に使用できます。このアナログ・アイソレーションアンプは、クローズループまたはオープンループ・ホールセンサやカレントトランスなどの従来の電流検出素子に置き換わるものとして開発されました。このホワイトペーパーでは、HCPL-7851、HCPL-7850などの線形フォトカプラについて述べます。また、これらのハーメチック型アイソレーションアンプの性能を、ホールセンサやカレントトランスなどの従来技術と比較します。

光絶縁型ハーメチック・アナログ・アイソレーションアンプ

ハーメチック・アナログ・アイソレーションアンプHCPL-7851ファミリは、40kHzまでの帯域幅の線形電流または電圧検出を行うように設計されています。1kVの同相電圧で5 kV/ μ sの高同相除去(CMR)を可能にするように独自の内部シールド構造が採用されています。-55°C~125°Cの米国MIL規格動作温度範囲全体にわたり、 ± 200 mVの最大入力電圧範囲で最大0.8%の非線形性を保証しています。これらのアナログ・アイソレーションアンプの消費電力は低く抑えられており、入力側と出力側でそれぞれ15.5mA以下の電源供給電流で動作します。消費電力が低いため、ブートストラッピング技術を使用して絶縁された電力を供給し、動作させることも可能です。

これらのアナログ・アイソレーションアンプはすべて、光結合されたシグマデルタ($\Sigma \Delta$)アナログ-デジタル変換器、光結合器、およびデジタル-アナログ変換器で構成されています。アナログ・アイソレーションアンプは、今日のインバータ・モータ制御回路で必要とされるきわめて高い同相除去性能(CMR)を備えています。また、このアンプは、信号を入力から出力に光により伝送するため、高い絶縁電圧を持っています。アイソレーションアンプは、入力端子と並列に接続された小さな抵抗値の外部シャント抵抗を介して入力電圧を検出します。アナログ線形性は、最大 ± 200 mVの入力電圧範囲にわたって保証されています。アイソレーションアンプの出力電圧は、入力電圧に比例したアナログ電圧です。

図1に、アイソレーションアンプのブロック図を示します。

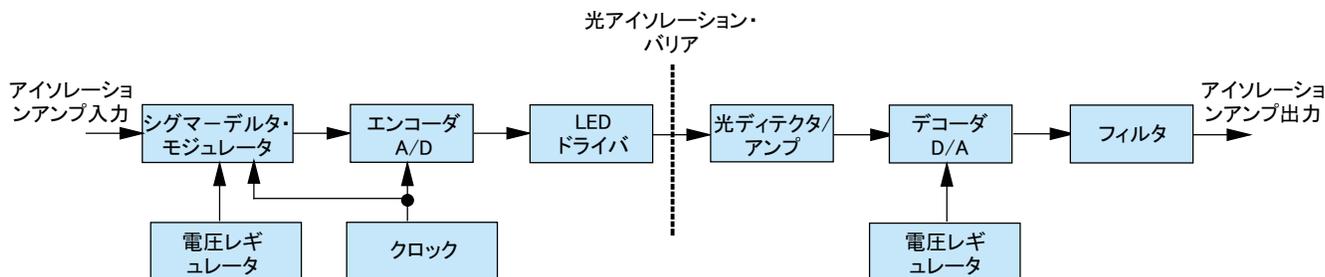


図1. 光絶縁型アナログ・アイソレーションアンプのブロック図

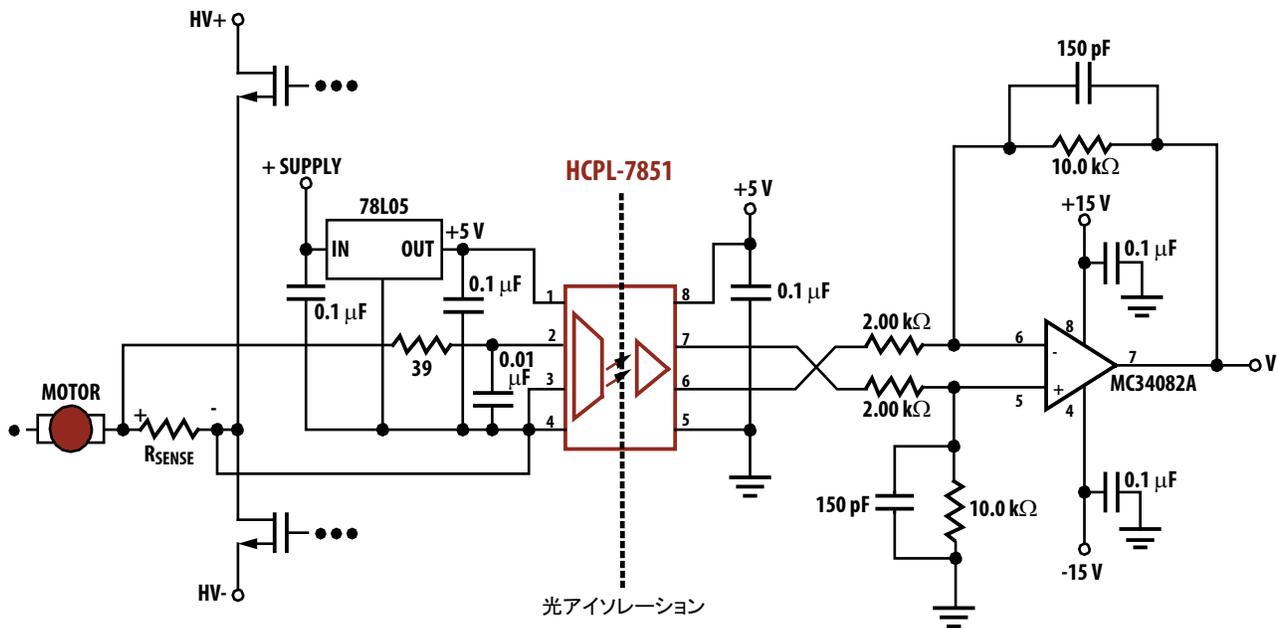


図2. HCPL-7851アイソレーションアンプを使用した電流検出回路例

入力電圧は、 $\Sigma \Delta$ アンプのチョッパ安定化差動増幅器によって高速でサンプリングされます。サンプリング周波数は、6~10MHzと極めて高速な入力検出が行われます。この高速検出により、高周波の入力信号を検出するときに常にナイキスト基準を満たすことができます。

$\Sigma \Delta$ モジュレータは、アナログの入力信号を高速のシリアル・ビットストリームに変換します。このビットストリームの時間平均は、直接入力信号に比例します。このデジタル・データストリームはエンコードされ、光信号により光ディテクタに伝送されます。検出された信号は、アナログ信号に復号された後フィルタリングされ、最終的なアナログ出力信号が得られます。図2に代表的な応用回路例を示します。

入力電圧は、高精度で低抵抗、低インダクタンス、低温度係数の外部シャント抵抗の両端の電圧降下として検出されます。入力に配置されたローパスフィルタ(39Ωの抵抗と0.01μFのコンデンサ)は、高周波ノイズ成分を除去し、エイリアシングを抑えます。アイソレーションアンプの出力に接続された差動ポ

トアンプは、アイソレーションアンプの差動出力信号をマイコンのA/Dコンバータに適合したグランド基準の電圧信号に変換します。差動アンプの信号帯域幅は、フィードバック経路のR-Cフィルタによって調整でき、必要に応じて帯域幅を最小レベルに調整することにより、出力ノイズを除去したり最小にするのに有効です。表1は、アバゴの光絶縁型アイソレーションアンプとホールセンサの性能を比較したものです。

この比較から、オフセット・ドリフト、ゲイン・ドリフト、同相除去、およびコストの点でアイソレーションアンプが、オープンループおよびクローズループ・ホールセンサより有利なことがわかります。さらに、アイソレーションアンプはパッケージ・サイズが小さく、自動挿入と表面実装が可能です。これらより、検出精度、信頼性、コスト面で光絶縁型アイソレーションアンプに優位性があり、効率的なモータ制御回路の設計が可能になります。

表1. アイソレーションアンプとホールセンサの比較

センサ・タイプ	検出可能電流範囲 A(rms)	非校正検出精度 (25°C)	校正検出精度 (25°C)	非校正検出精度(全温度範囲)	信号帯域幅	ソリューション・コスト
光絶縁型アイソレーションアンプ	25Aまで	4.6 %	0.2 %	7 %	100 kHz (typical)	比較的安め
ホールセンサ (オープンループ)	25Aまで	4.2 %	1.2 %	16 %	25 kHz	比較的安め
ホールセンサ (クローズループ)	25Aまで	1.1 %	0.6 %	3 %	150 kHz	比較的高い

光絶縁型アイソレーションアンプの応用例

HCPL-7851は、高電圧バス電流やモータ相電流の検出、高電圧バス電圧の検出、IGBTモジュールなどパワーデバイスの温度センサ出力電圧の検出、ブラシレスDCモータの逆起電圧などの検出用途向けに開発されたデバイスです。図2は、HCPL-7851を用いたモータ相電流検出回路の例です。図3の応用回路例では、入力電圧が±200 mVを超えないよう抵抗により適切に分圧することにより、ブラシレスDCモータのDCバス電圧または逆起電力を測定することができます。

この応用例での注意点は、分圧抵抗R1の値を1kΩ以下にしなければならないことです。それにより、HCPL-7851の入力インピーダンス(標準値280 kΩ)と入力電流(標準値1 μA)によるオフセットが生じることなく、高い測定精度が実現できます。0.01 μFの入力バイパス・コンデンサが必要ですが、39Ωの抵抗は分圧抵抗が同様なローパスフィルタの機能を果たすため省略することができます。

HCPL-7851アナログ・アイソレーションアンプの出力ピン6および7の出力は差動電圧です。HCPL-7851の出力に接続された差動ポストアンプの主な目的は、HCPL-7851の差動出力をグランド基準の電圧信号に変換することです。また、このポストアンプは必要なゲインを得るのに役立ち、信号帯域幅を低く抑えることにより、高周波チョッパ・ノイズのフィルタリングを容易にします。

ΣΔモジュレータのノイズシェーピング特性により、約40kHz以下の帯域では出力ノイズのスペクトルはフラットで、それ以上では1オクターブあたりおよそ12dBの割合で上昇します。また、内部フィルタにより約200kHzからノイズ・スペクトルのロール・オフが始まり、1MHz近傍で急激に減衰します。

前述のように、ポストアンプの帯域幅を低くすることにより、出力ノイズが抑えられます。40kHzを超えるとノイズが増加するため、ノイズのフィルタリングには一次のフィルタよりも二次のフィルタの利用が特に有効です。ポストアンプの帯域幅を最小にすると出力ノイズも最小になります。図2と図3に示した代表的な応用回路例は、一次ローパスフィルタの特性を持っています。図4に示したように、2つの抵抗(R1a、R2a)と1つのコンデンサ(C9)を追加することにより、二次のフィルタ特性とすることができます。この回路において、R1aとC9の積がR3とC5の積と等しくなるようにします。抵抗とコンデンサの値を適切な値にすることにより、2つのポールがまったく同じ周波数になります。2ポールとすることにより、一次のローパスフィルタでは-20dB/decadeだったゲインの減衰特性が、-40dB/decadeに改善されます。

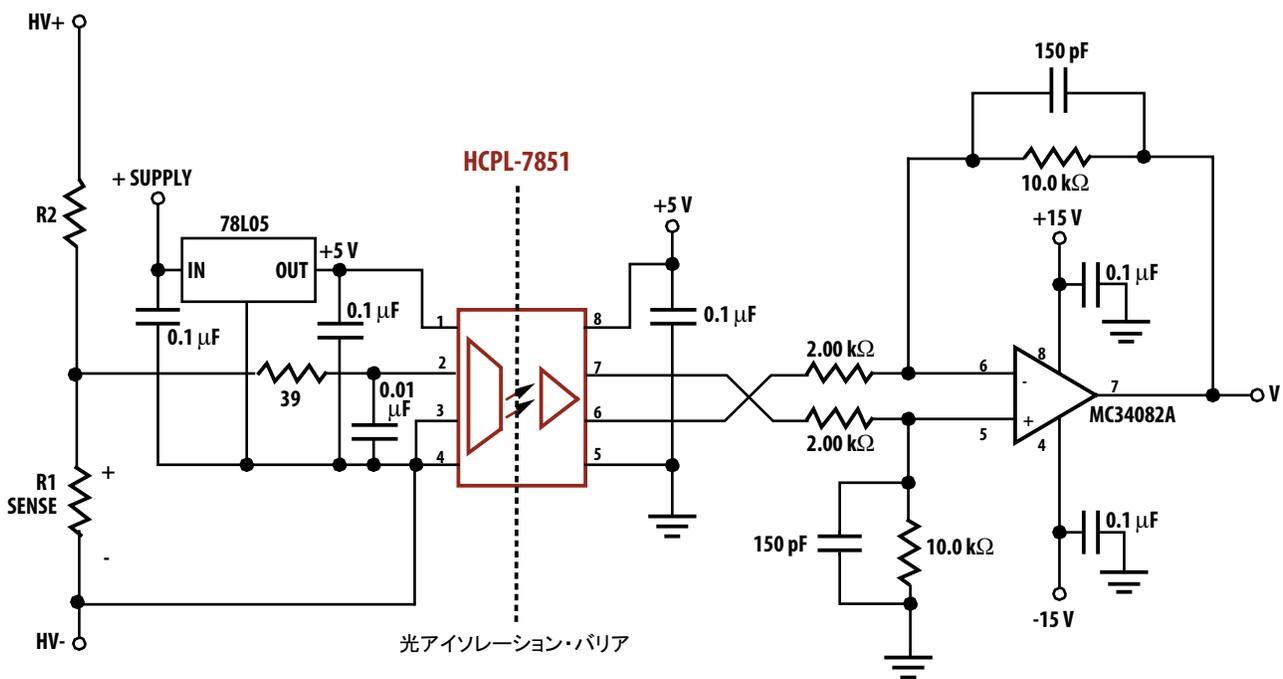


図3. HCPL-7851アイソレーションアンプを使用した電圧検出回路例

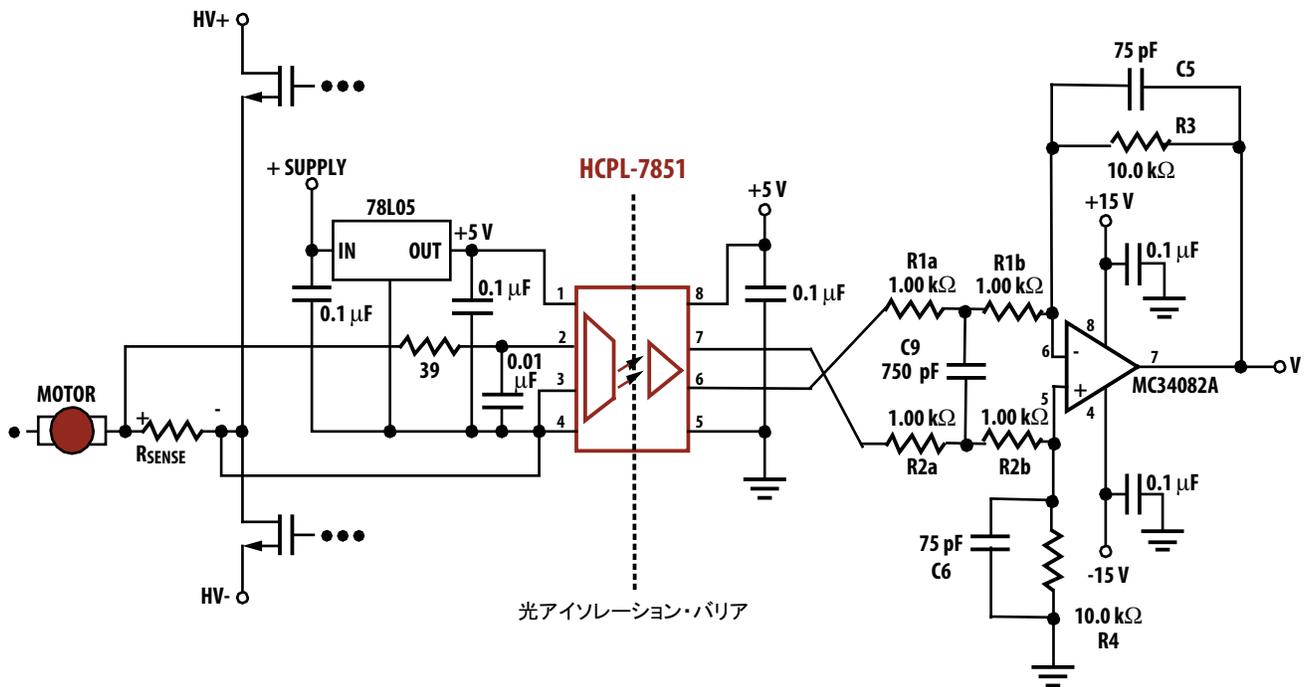


図4. 二次のローパスフィルタフィルタ特性を持つポストアンプ回路例

ポストアンプ回路は、単一電源で動作させることもできます。図5は、5V単一電源ポストアンプの回路例です。入力電圧範囲全体の回路動作を可能にするには抵抗R_{4a}を追加する必要がありますが、これによりゲインは低下します。また、出力基準電圧は0Vから電源電圧の1/2に変化します。

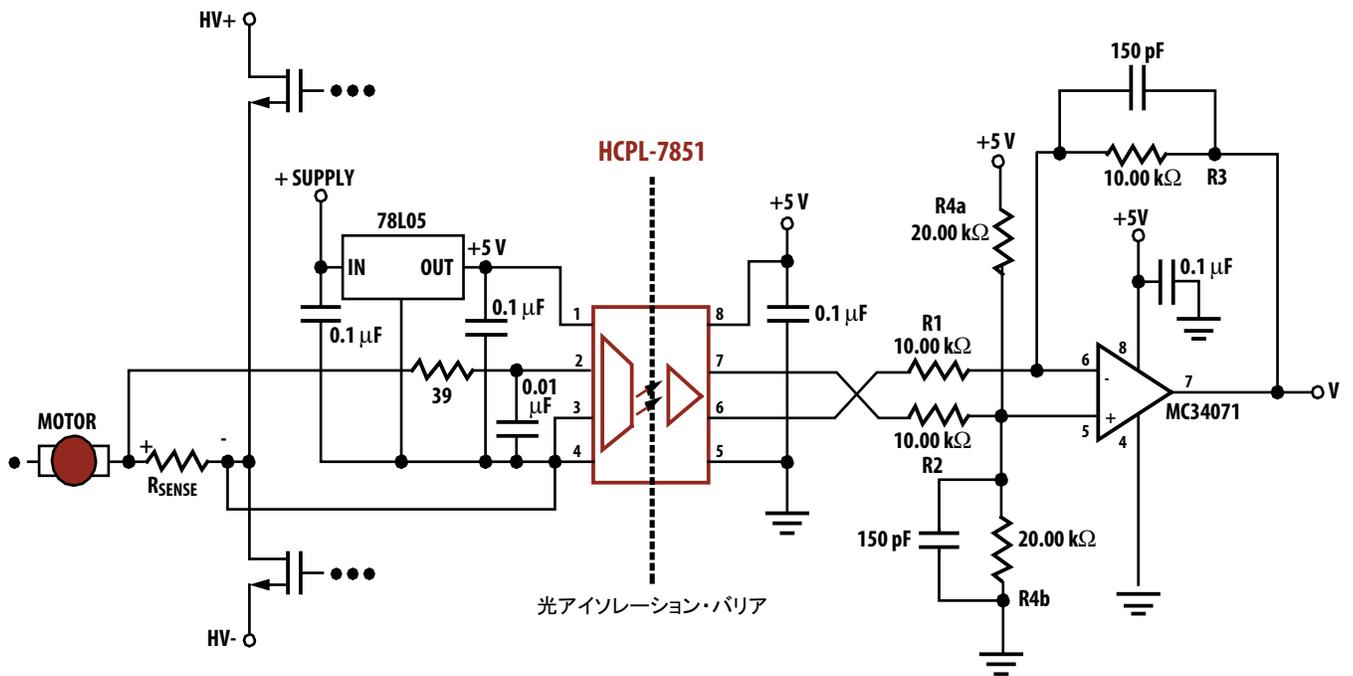


図5. 単一電源のポストアンプ回路例

いろいろな電流測定技術

モータ制御において、インバータのゲート駆動の次に大きな課題は、モータ相電流、高電圧バス電流、および温度や電圧のようなアナログ・パラメータの測定方法です。一般にこれらの測定はすべて何らかのタイプのアイソレーション・バリアを介して行います。現在では、このアイソレーション・バリアを形成するため、主に次の3つの技術が用いられています。

1. カレントトランス
2. ホール電流センサ
3. 光絶縁型アナログ・アイソレーションアンプ

これらの技術にはそれぞれ長所と短所があります。回路設計者は、全体のコスト低減、性能と信頼性の最適化、基板スペース、精度と線形性などの要件を考慮し、最適なソリューションを選択します。

カレントトランスによる電流検出方法は、導体に電流が流れたとき、アンペールの法則に従い電流に比例した磁界が生成されるという現象に基づくものです。トランスの一次巻線がこの磁界を二次巻線に結合させることにより、二次巻線に比例電流が流れます。二次電流は、トランス巻線の巻数比に従います。この電流は、一般的なりニア・オペアンプにより適切に検出することができます。この方法による電流測定回路の例を図6に示します。

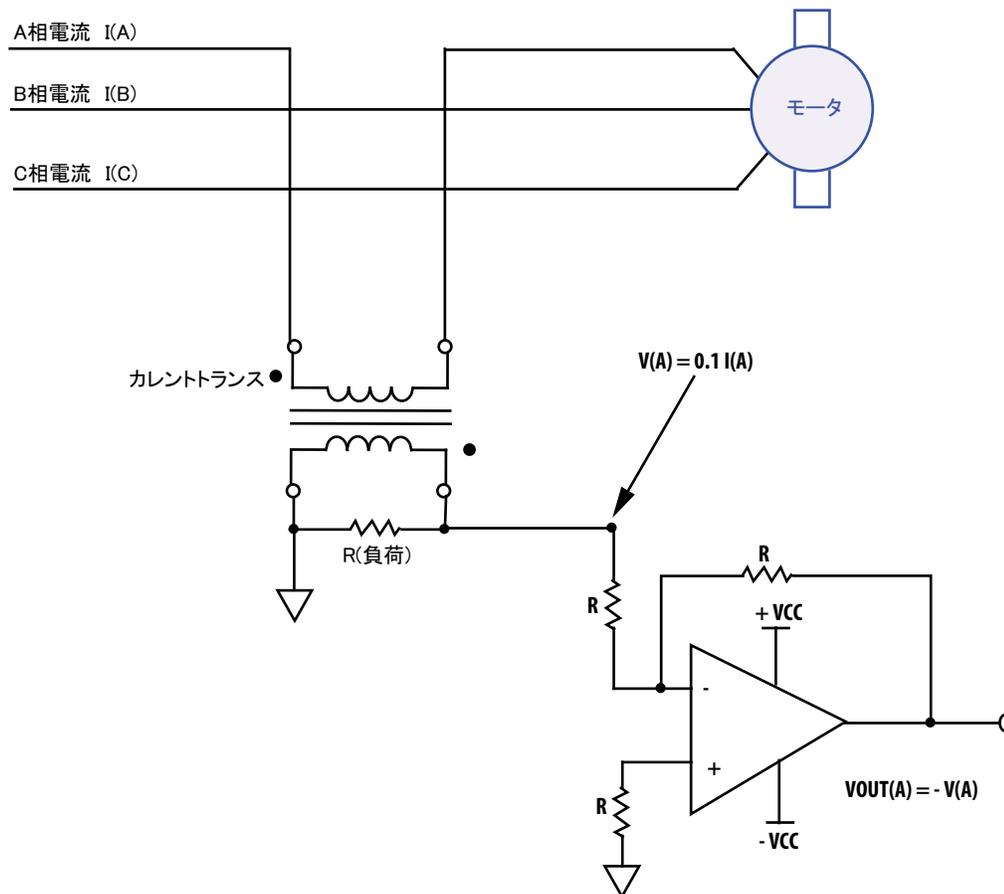


図6. カレントトランスを使用したモータ相電流の測定例

カレントトランスの主な利点は、測定する電流に対する現実的な線形性、良好な絶縁安全性、および高い信頼性です。さらにトランスは、電圧測定法に比べ高い耐ノイズ性を持った比例電流を生成します。欠点は、トランスのため高い周波数のAC電流しか測定できず、低い周波数では測定誤差が生じ、迷走磁場による誤差が生じる場合があることです。また、トランスは一般にサイズが大きくなります。

ホール電流センサは、1879年にEdward H. Hallによって発見されたホール効果を利用しています。この原理は、導体中の電子が磁界の中で力を受けて導体の一方の側に向かって移動し、導体の両端にホール電位差が生じるというものです。このホール電圧を利用し、モータ相電流を線形に測定することができます。

ホール効果は図7のように、磁界(B)が金属または半導体に印加されたとき、そこに印加磁界と垂直方向の電流(IC)が流れ、ホール材料の磁界と電流の両方に垂直な両端にホール電圧(VH)が生じるというものです。

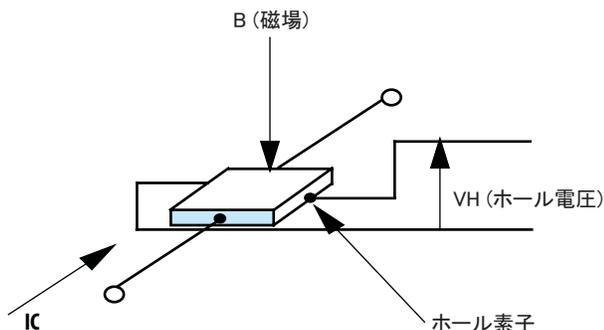


図7. ホール効果の原理

ホールセンサの基礎となるこの関係は、次のように表されます。

$$V_H = K \times I_C \times B$$

ここで、Kはホール材料の物理特性に依存する比例定数です。現在市販されているホール電流センサには、オープンループ・ホールセンサ(図8)と、クローズループ・ホールセンサ(図9)の2つのタイプがあります。

ホール電流センサは、一般的にほぼ円形の素子で、測定するモータ相電流などの電流が流れる導線を通し、その導線によって生じる磁界を検出します。導体によって生成された磁界は、導体を流れる電流に比例し、線形ホール測定に利用されます。

ホールセンサは、検出した磁界に比例した電圧を発生する磁界センサを備えています。このことは、センサが高電圧と物理的に接触することなく、検出が磁界によって行われるため、ホールセンサが絶縁機能を持っていることを示しています。ホールセンサと光アイソレータのどちらを使用するかは、次のような比較基準によります。

- 絶縁電圧能力
- 線形性
- ゼロ・オフセット
- 応答時間/速度
- 信号帯域幅
- 動作温度範囲
- ヒステリシス
- 耐ノイズ性/同相除去能力
- 挿入損失
- コスト

ホールセンサのホール素子は、通常、電流が流れる導体の磁界による電子の偏りにより電圧を生成する半導体素子です。ホールセンサは、磁気コアにより磁界を収束させ、それを半導体ホール素子で検出し、磁界に比例した電圧を生成します。オープンループ・ホールセンサは、磁界に比例した電圧を出力します。オープンループ・ホールセンサの問題点の1つは、磁気コアが、ゼロ・オフセットに影響を与えるヒステリシス特性を持つことです。クローズループ・ホールセンサは、帰還巻線に戻って元の磁界内の磁束を打ち消す電流を生成することにより動作します。この電流がクローズループ・ホールセンサの出力となり、センサにより測定する電流に比例します。クローズループ・ホールセンサは、コア内に磁束がなく、ヒステリシスの影響をあまり受けません。クローズループ・ホールセンサは、精度と線形性が高く、オープンループ・ホールセンサよりも高価です。

ホール電流センサの利点は、ガルバニック絶縁を提供しながらAC電流とDC電流の両方を測定できることです。この素子の主な欠点は、電流オフセット(電流がゼロのときの出力信号)がないことです。これに対し、光アイソレーションアンプを利用したソリューションの主な優位点は、高性能、高同相除去(CMR)、小型パッケージ・サイズ、小さな基板実装面積、ゼロ電流オフセット、および全動作温度範囲にわたる極めて小さな温度ドリフトです。

ソリューションを選択するにあたり、応答時間/速度、帯域幅、温度感受性、および線形性などのパラメータも同様に大切です。光アイソレーションアンプは、これらのパラメータにおいても高い線形性を持ち、オープンループ・ホールセンサよりも高速で、クローズループ・ホールセンサとほぼ同等かやや低速です。光アイソレーションアンプの信号帯域幅は、オープンループ・ホールセンサよりもかなり高く、クローズループ・ホールセンサとほぼ同等かまたはそれよりやや低い特性を持ちます。光アイソレーションアンプの温度感受性は、外部シャント抵抗の温度係数に依存しますが、一般に極めて小さな値です。オープンループおよびクローズループ・ホールセンサは、磁気コア材質とそれに関連したヒステリシス特性により、高い温度感受性を持っています。光アイソレーションアンプは、オープンループまたはクローズループ・ホール電流センサと比較し、総じて高い検出精度、線形性と、優れた信頼性のソリューションを提供します。

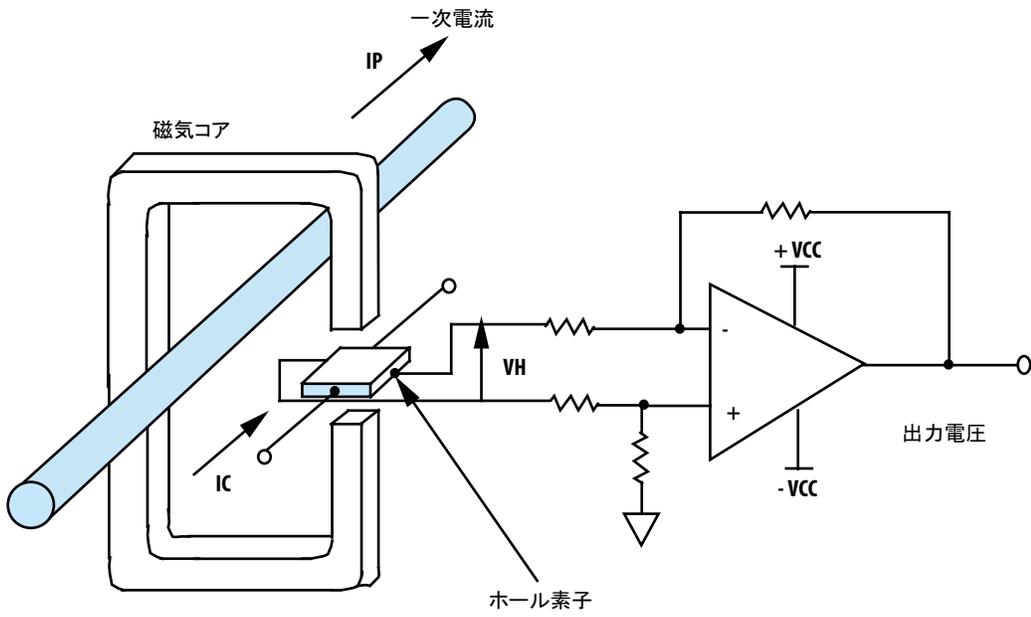


図8. オープンループ・ホール電流センサ

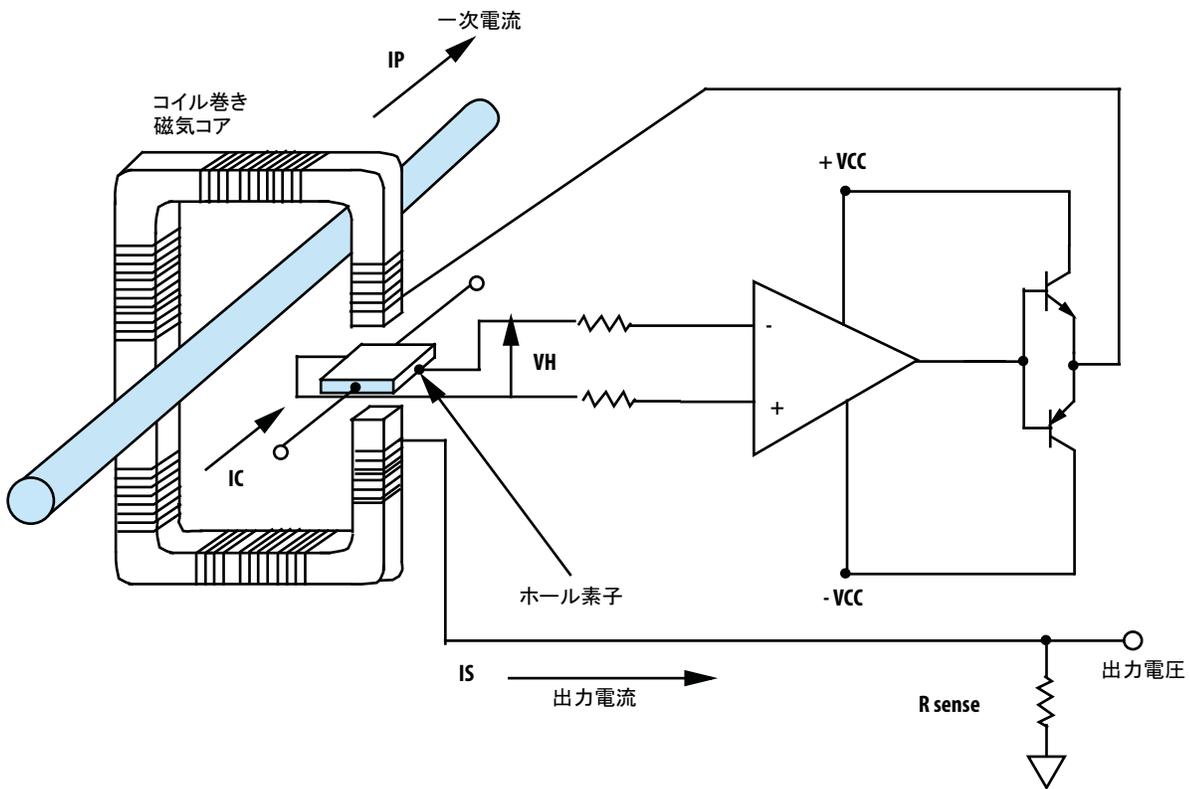


図9. クローズループ・ホール電流センサ

まとめ

このペーパーでは、アバゴ・テクノロジーが提供するHCPL-7851、HCPL-7850などのハーメチック・アナログ・アイソレーションアンプ製品のアプリケーションと電気的特性について述べました。これらのデバイスは、種々の電流または電圧検出用に開発された高い信頼性と性能を持つ特定用途向けフォトICです。アナログ・アイソレーションアンプは、特に可変速度モータ制御などの用途で、モータ相電流などのアナログ・パラメータを検出・測定するのに最適です。また、これらのフォトICは、DCバス高電圧やDCバス電流の検出にも適し、IGBTモジュールなどに内蔵された温度センサのアナログ出力電流を検出し絶縁するのも適しています。さらに、ホール電流センサやカレントトランスなど従来の電流測定技術についても述べ、線形性、オフセット、温度安定性などの観点から、アナログ・アイソレーションアンプが、電流または電圧検出アプリケーション向けのきわめて優れた素子であることを紹介しました。アナログ・アイソレーションアンプは、従来の電流または電圧測定技術と比較し、優れたパフォーマンスと信頼性をリーズナブルなコストで提供します。

また、これらのハーメチック・アナログ・アイソレーションアンプは、気密性と放熱性に特に優れたセラミック・ハーメチックパッケージに封入されています。一般的な産業機器の動作環境よりも厳しい環境で高い性能と信頼性を提供し、HCPL-7851はMIL-PRF-38534 Class H対応製品として米政府DSCCのSMD型名も取得しています。

References

1. David Jones, "New SR Motors, Drives, and Applications in the USA and Europe," Proceedings of The Second Small Motor International Conference (SMIC), pp 25-95, 1996
2. Drew Plant, "Isolation Amplifiers Compared to Hall Effect Devices for Providing Feedback in Power-Conversion Applications," Proceeding of the Second Small Motor International Conference (SMIC), pp 353-358, 1996
3. Jamshed Namdar Khan, "Optocouplers for Variable Speed Motor Control Electronics in Consumer Home Appliances," Proceedings of the 52nd International Appliance Technical Conference (IATC), pp 256-285, 2001
4. Drew Plant, Mike Walters, "Isolation Amplifiers: Isolation for Sense Resistor Applications," Principles of Current Sensors, Powersystems World, pp19-38, 1997
5. Warren Schultz, "New Components Simplify Brush DC Motor Drives," Motorola Semiconductor Application Note AN1078

For product information and a complete list of distributors, please go to our web site: www.avagotech.com