

高精度，広帯域，高安定な電流センシング技術

池田 健太，増田 秀和

1 はじめに

現在，パワーコンディショナやインバータなどの電力変換システムに代表されるパワーエレクトロニクス分野では，高精度，広帯域な電流測定が求められている．当社は，1971年にクランプテスト CT-300(Fig.1)を発売して以降，測定用途に応じた様々な電流センサ (Fig.2)を提供してきた．本稿では，高精度，広帯域な電流測定に焦点を絞り，当社の電流センサの特長や電流測定のポイントについて記述する．



Fig. 1 Current Sensor CT-300, launched in 1971.



Fig. 2 Hioki zero-flux current sensors.

2 電流センサの検出方式について

電流センサの検出方式は多岐に渡るが，多くの方式は被測定導体に電流が流れることによって磁気コアに生じる磁束をギャップに挿入した磁電変換素子や磁気コアに施した巻線で検出を行う．しかし，それぞれの検出方式には利点，欠点が存在するため，1つの検出方式ではすべての測定要求に対応することは困難である．当社は2つの検出方式を組み合わせたゼロフラックス方式（クローズドループ式または磁気平衡式とも呼ばれる）を採用することで高精度，広帯域な電流センサを提供している．

ゼロフラックス方式とは，Fig.3, 4のように磁気回路を含めて負帰還回路を形成し，被測定電流によってコアに生じる磁束をキャンセルするように帰還コイルに電流を流す方式である．動作磁束を極めて小さいレベルに抑えられるため，磁性材の非線形性による影響を最小限に抑えることができる利点がある．当社の高精度電流センサは，Fig.3に示すフラックスゲート方式と変流器 (CT) 方式を組み合わせたゼロフラックス方式である．フラックスゲート方式は直流からの検出が可能であり，半導体を使用しない検出方式のため，オフセット電圧が小さく，温度安定性，長期安定性に優れている特長がある．当社は，確度 0.02 %rdg.，帯域 3.5 MHz と世界トップクラスの精度と帯域を持つ電流センサを提供している．また，フラックスゲート方式の高い温度安定性を活かし， -40°C ～ $+85^{\circ}\text{C}$ までの温度範囲で使用可能な製品も提供している．

一方，広帯域電流センサは Fig.4 に示すホール素子と変流器 (CT) 方式を組み合わせたゼロフラックス方式を採用しており，直流から最大 120 MHz までの測定帯域を持つ電流センサを提供している．磁気検出のキーデバイスであるホール素子は自社生

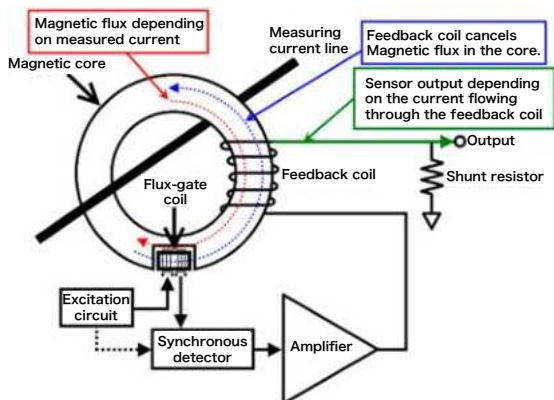


Fig. 3 Zero-flux method (flux-gate type).

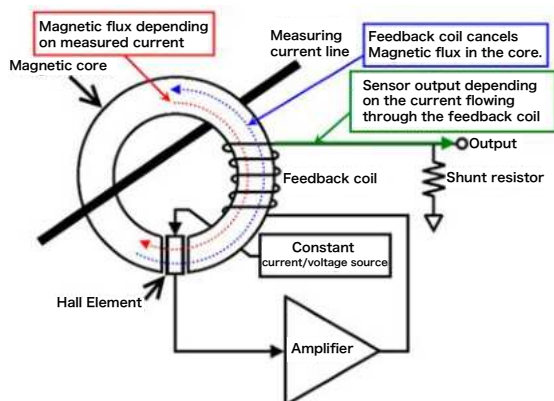


Fig. 4 Zero-flux method (Hall element type).

産しており、高感度かつ低ノイズのため、オシロスコープと組み合わせた微小電流の波形観測用途に最適である。

3 電流センサの構造の違い

電流センサは構造面で、貫通式とクランプ式の2つに分類される。貫通式は、磁気コアに分割面がなく、磁気コア全周が均一な特性を得ることが容易であるため、非常に高精度な電流センサを構成できる。しかし、結線時に電源線を通すために電源線を一旦切断する必要があるため、稼働状態の機器に結線することはできない。

一方、クランプ式は、磁気コアが分割構造のため、電源線を挟むだけで測定が可能である。貫通式のように電源線を切断する必要がないため、稼働状態の機器の測定も容易である。しかし、分割面を作ることによって、磁気コア全周で均一な特性を得ることが

困難であるため、一般的にクランプ式電流センサは測定精度が悪く、導体位置の影響が大きい。そのため、再現性のよい測定が困難である。当社は長年電流センサを開発してきたノウハウを活かし、クランプ式で高精度な電流センサの提供もしており、後述する。

4 電流センサの選定のポイント

電流センサで高精度な測定を行う上で最も重要であることは、測定対象に対して適切な電流センサを選定することである。

多くの高精度電流センサ（精度 0.1 % 以下）は電流出力を採用しているが、当社の高精度電流センサは電圧出力を採用している。一般的に、信号伝送品質は電流出力の方が優れているとされているが、電流センサの出力形式においては、電圧出力の利点が多く存在する。以下に電圧出力の利点を交えながら、電流センサを選定する上でのポイントを記述するので参考にいただきたい。

4.1 電流センサの定格、測定帯域が適切であること

高精度な電流計測のためには、測定対象の電流レベルに適した定格の電流センサの選択が必要である。例えば、同じ測定精度の 10 A 定格センサと 500 A 定格のセンサで 5 A を測定することを考えると、測定対象に近い 10 A 定格の電流センサで測定した方が精度や再現性の面で有利となる。当社の電流センサは実効値で定格電流を規定しているが、ピーク値で定格電流を規定している電流センサが多いので注意が必要である。

加えて、測定対象となる電流の全周波数成分が電流センサの測定帯域に含まれていることを確認していただきたい。

4.2 測定帯域で振幅、位相が精度規定されていること

一般的に、電力計と組み合わせて使用される高精度電流センサの多くは、直流と商用周波数 (50 Hz/60 Hz) の振幅のみが精度規定されており、位相については精度規定がされていないことがほとんどである。一般的な高精度電流センサで使われる電流出力では、高周波域での振幅や位相の精度規定は

困難である。そのため商用周波数以外は、代表特性のグラフだけを公表しているものが多いので注意が必要である。当社は電圧出力を採用しているため、測定帯域の全域で振幅、位相の確度規定が可能である。正確な電力測定においては振幅確度だけでなく、位相確度も非常に重要となるため、特に電力測定に使う電流センサを選定する際は、位相が確度規定されていることを確認した上での選定が重要になる。

4.3 汎用性が高いこと

電流センサを電圧出力にすることで、電力計だけでなく DMM、オシロスコープ、記録計などとも容易に接続可能であるため、1 台の電流センサで様々な測定用途に対応ができる利点がある。

4.4 S/N 比が高いこと

当社の高精度電流センサは、定格電流測定時に 2 V 出力する設計である。例えば、当社の CT6863 (200A 定格) と電力計で AC 200 A 測定した場合、電力計には AC 2 V が入力されることになる。一方、電流入力タイプの電力計の入力部はシャント抵抗が内蔵されているため、電流センサの出力を電流伝送しても最終的には電圧に変換されて処理される。変流比 1500:1 の高精度電流センサを使って AC 200 A を測定する場合、通常シャント抵抗の抵抗値は 0.5 Ω や 0.1 Ω であるため、電力計で測定する電圧は、

$$133.3\text{mA} \times 0.5\Omega = 66.65\text{mV AC}$$

$$133.3\text{mA} \times 0.1\Omega = 13.33\text{mV AC}$$

となる。電力計で計測する信号レベルは 2V と 13.33 mV～66.65 mV であるから電流出力の電流センサよりも S/N 比を高くできる。

4.5 調整、校正が容易であること

当社の電流センサは電圧出力であるため、調整、校正が容易である利点がある。そのため、出力ケーブルまで含めて確度規定ができる。また、ケーブル抵抗による微小な電圧降下分も含めて調整できるため、標準のケーブル長以外での製作も対応可能である。

当社の高精度電流センサは、直流と商用周波数だけでなく、高周波域での校正も行っている。以下に

当社の電流センサの校正ポイント例を示すが、各周波数ポイントでトレーサビリティの取れた校正を行っている。

振幅 : ±DC, 50 Hz, 60 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz,
300 kHz, 700 kHz, 1 MHz

位相 : 50 Hz, 60 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz,
300 kHz, 700 kHz, 1 MHz

5 高精度測定のための注意点

長年電流センサの開発で培ってきた経験から、電流センサで高精度に電流を測定するための注意事項を紹介する。

5.1 測定導体は中心位置に配置する

どの電流センサにも導体位置の影響が必ず存在する。影響量は測定周波数が大きくなるにつれて大きくなる傾向がある。特性の良い貫通式の電流センサであっても 10 kHz 以上の高周波になると影響が大きくなる。電流センサメーカーが規定する測定確度は必ず電流センサの中心位置において規定される。特に高周波電流を測定する際は、導体をセンサの中心位置に配置することで高精度かつ再現性の良い測定ができるということを考慮して測定をしていただきたい。

5.2 近接する導体は電流センサから離す

電流センサは、被測定導体に電流が流れることによって生じる磁界を検出しているため、測定対象でなくても、近接する導体に電流が流れていれば、その影響を少なからず受けてしまう。特に、高周波電流ではその影響が大きくなる。したがって、精度の良い電流測定のためには近接する導体は可能な限り電流センサから離すことが望ましい。特に高周波電流ではその影響が大きくなり、全ての電流センサは影響を受けることを考慮して測定をしていただきたい。

6 高精度電流センサの確度の謳い方

当社の高精度電流センサは測定帯域内の全ての周波数帯域で確度規定をしている。一般的に、電流センサの確度は電流センサの中心位置において規定さ

れる。しかし、実際の使用環境で中心位置に配置することは容易ではない。Fig.5 に当社の高精度電流センサ (CT6841) の周波数特性と仕様を示す。帯域ごとに規定している確度は、導体位置が変わっても仕様を満足するように規定している。

また、当社の高精度電流センサは確度仕様に対して十分なマージンを持っている。したがって、仕様よりも遥かに高い実力を持っている。

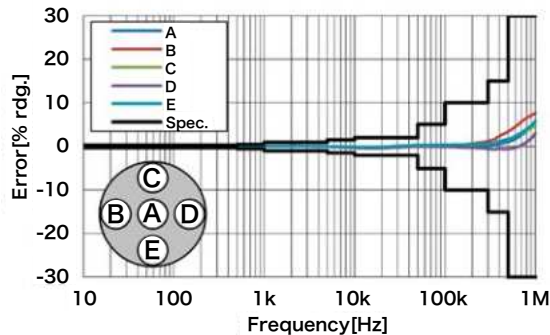


Fig. 5 Gain-frequency characteristics.

7 高精度クランプ式電流センサ



Fig. 6 High-precision clamp sensor.

一般的なクランプ式電流センサは、分割構造により、精度や測定の再現性が悪いと前述した。この章では、Fig.6 に示す当社の高精度クランプ式電流センサ CT6843(200 A 定格) の特性の一部を紹介する。Fig.7～9 は同定格の当社の貫通式電流センサ CT6863(200 A 定格) との特性比較である。当社のクランプ式電流センサは貫通式に迫る特性であるため、高精度な電力測定にも十分使用可能である。

クランプ式でここまでの性能を実現できた要因は、分割部を除く全周で均一な構造や磁気抵抗を最

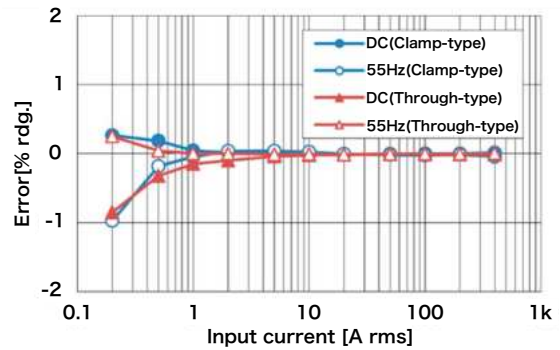


Fig. 7 Linearity.

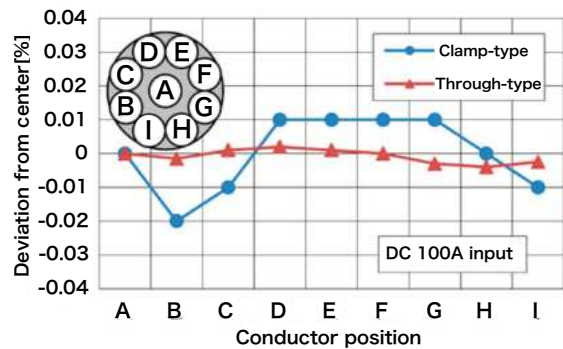


Fig. 8 Effects of conductor position.

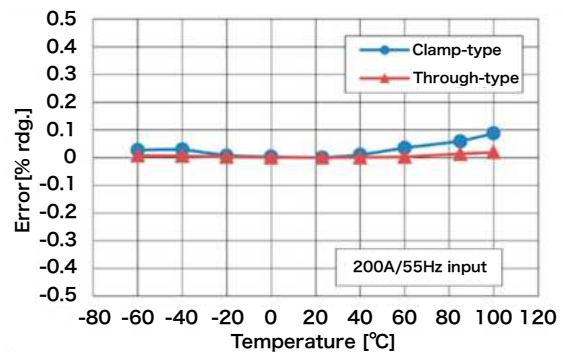


Fig. 9 Gain-temperature characteristics.

小限に抑えるような分割構造を取り、貫通式のように磁気コア全周で均一な構造を意識した設計による。

また、当社のクランプ式電流センサは性能だけでなく、操作性も重視した設計であり、開閉操作からセンサ部のロックまでの動作を片手で簡単に行うことができる。さらに、様々な環境試験でも使用できるように $-40^{\circ}\text{C}\sim+85^{\circ}\text{C}$ までの広い温度範囲での使用ができる製品である。高温環境下になる自動車のエンジンルーム内のような過酷な環境下でも問題なく使用可能である。

さらに、当社の提供する電力計は電流センサ専用設計となっている。そのため、電力計から直接電源供給することや、電流センサの自動識別が可能であり、電力計と組み合わせた高精度広帯域な電力測定に最適である。

8 広帯域クランプ式電流センサ

当社の広帯域電流センサは、前述した高精度電流センサと比較して測定帯域が広く、ノイズレベルが低いという特長がある。その中でも当社の提供する最も高い電流-出力電圧変換レート（以下出力レートと記す）と周波数帯域 (Fig.11) を持つ CT6701 (Fig.10) は、過渡応答電流波形や突入電流などの高速応答波形、またはさまざまな周波数成分を含む微小電流波形の観測に最適な電流センサである。

広帯域電流センサは前述したように、薄膜ホール素子を使用したゼロフラックス方式の AC/DC 電流センサである。そのキーデバイスであるホール素子は自社生産による薄膜ホール素子である。従来機種よりノイズを大幅に低減した薄膜ホール素子を採用することで、出力レート 1 V/A （従来機種の 10 倍）と低ノイズ性能を実現している。Fig.12 に従来機種との測定波形の比較を示す。これにより、小型モータをはじめとした自動車電装部品に流れる制御電流波形を mA オーダーで、より精細に観測することができるようになった。また、 $120\text{ MHz}(-3\text{ dB})$ という広帯域を持つことからオシロスコープ等の波形観測器に接続して、さまざまな周波数成分を含む

電流波形の観測が可能である。例えば、電力の変換やモータの制御に使用されるスイッチング回路の制御電流や負荷電流の観測に使用され、高速スイッチングを行う半導体デバイスのターン ON/ターン OFF 電流波形や、リップル波形などの観測が可能になる。



Fig. 10 Wideband current sensor CT6701.

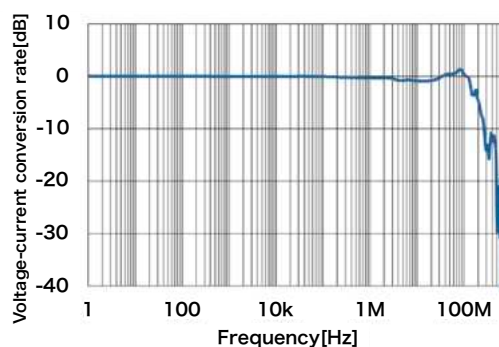


Fig. 11 CT6701 amplitude-frequency characteristics (typical).

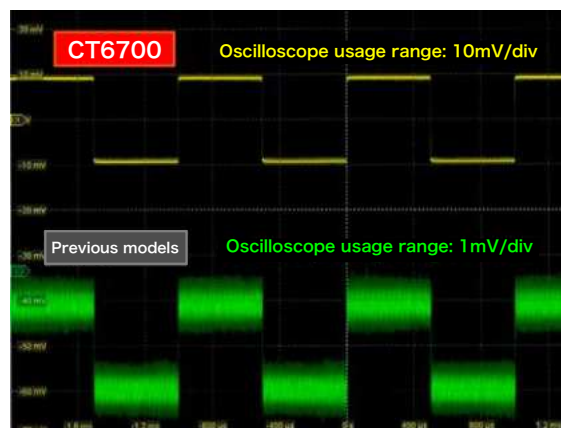


Fig. 12 20 mAp-p waveform (comparison with previous Hioki model).

9 おわりに

本稿では、当社が40年以上開発を続けている電流センサに焦点を絞り、ゼロフラックス方式の検出原理、電流センサ選定の際の重要ポイント、使用時の注意事項、特性の一部について紹介した。高精度、広帯域な電流測定が求められるパワーエレクトロニクス分野において、電流を測定する際の参考になれば幸いである。

HIOKI

日置電機株式会社

本社 TEL 0268-28-0555 FAX 0268-28-0559
〒386-1192 長野県上田市小泉 81

お問い合わせは 本社コールセンターへ



0120-72-0560

TEL 0268-28-0560 FAX 0268-28-0569

(9:00 ~ 12:00, 13:00 ~ 17:00, 土・日・祝日を除く)

<http://www.hioki.co.jp> Email: info@hioki.co.jp