

パワーエレクトロニクス分野における 高精度電力測定のための電流測定技術

依田 元, 小林 宏企, 滝口 真也

1 はじめに

パワーコンディショナの電力変換効率測定, インバータ・モータの効率測定, リアクトルの損失測定など, パワーエレクトロニクスの分野では様々な場面で高精度な電力(電流と電圧)の測定が求められている。

本稿では, 特に電流測定技術に議論の焦点を絞り, 古くから独自の技術で電流センサと電力計(パワーアナライザ)の両方を開発してきた弊社のノウハウの一部を紹介する。

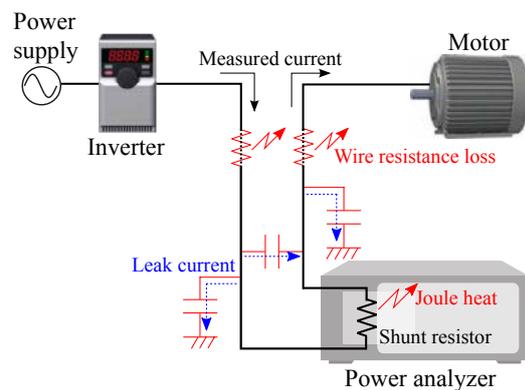
2 電流の測定方式について

パワーアナライザによる電流測定は, 一般的に直接結線方式 (Fig.2.1(a)) と電流センサ方式 (Fig.2.1(b)) のうちのいずれかにより行われる。以下, それぞれの特徴を示す。

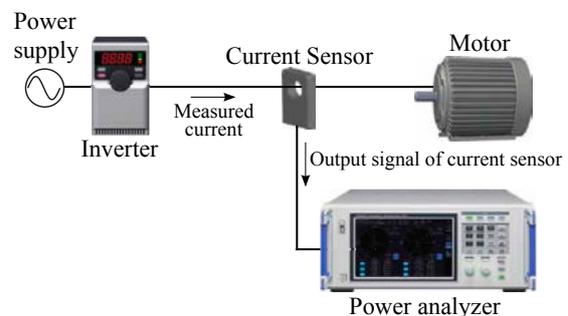
2.1 直接結線方式

直接結線方式は, 測定対象の配線をパワーアナライザまで引き回して直接電流を測定する方式である。この方式は, 測定の原理自体が非常に単純で, かつ電力計単体で電流の測定が可能という利点があるため, 古くから使用されている。しかし, 電流配線を引き回し, パワーアナライザの電流入力部を測定対象の回路に挿入することになるがゆえに, 以下の欠点がある。

- i) 測定時の測定対象の状態が実際の稼働状態と異なる。
- ii) 引き回した配線の配線抵抗による損失が増加する。
- iii) 配線間および配線-GND 間に容量結合が生じ,



[a] Direct connection method.



[b] Current sensor method.

Fig. 2.1 直接結線方式 [a] と電流センサ方式 [b].

高周波の漏れ電流が増加する。

例えば, 上記 ii) について, AWG6 の線材を 5 m 引き回したとすると, 配線抵抗は約 6.5mΩ になる。測定対象の電流が 30A だとすると, 配線抵抗による損失は, 5.85W にもなる。5.85W という値だけでその大小の判断はできないが, 測定対象の電力値によっては, この損失分を無視することはできない。

また、直接結線方式では、一般的にシャント抵抗を使って電流の検出を行う。このシャント抵抗方式には、次のような欠点が存在する。

- i) シャント抵抗に電流が流れると、電流の2乗に比例したジュール熱が発生する。このジュール熱は計器損失となる上、自己加熱によってシャント抵抗自体の抵抗値を変化させてしまうため、測定精度が悪化してしまう。
- ii) 発生するジュール熱を抑えるため、抵抗値の小さいシャント抵抗を使用することもできる。しかし、抵抗値の小さいシャント抵抗では、わずかに含まれる誘導成分を無視することができず、周波数特性が悪化してしまう。

これらは全て、電流、電力の測定精度を大きく悪くさせてしまう要因となるため、大電流を測定するには注意が必要である。

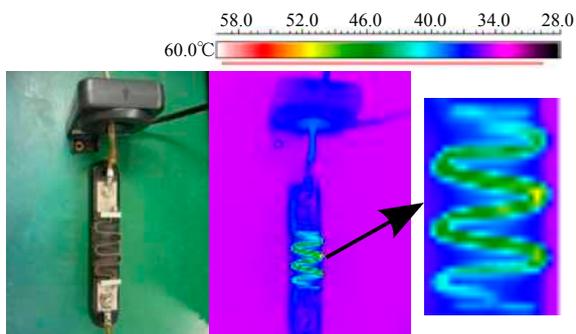


Fig. 2.2 シャント抵抗の自己加熱.

Fig.2.2 には、 $2\text{m}\Omega$ のシャント抵抗に 20A の電流を流した時の自己加熱の様子を示した。比較のため、配線には弊社の 50A 定格の電流センサ CT6862 を接続している。シャント抵抗はジュール熱による自己加熱によって、 50°C 程度まで温度上昇していることが分かる。一方、電流センサはジュール熱や、それに伴う自己加熱はほとんどなく、計器損失やセンサ自体の温度特性による測定精度への影響もわずかであることが分かる。

以上の議論から、直接結線方式は、電子機器の待機電力測定や LED 照明の消費電力測定のように、

シャント抵抗のジュール熱による影響が十分小さい、微小電流 ($\sim 1\text{A}$ 程度) の測定には非常に有効である。

2.2 電流センサ方式

電流センサ方式は、測定対象の配線に電流センサを接続し、センサの出力信号（電流あるいは電圧）をパワーアナライザに入力して電流を測定する方式である。電流センサ方式であれば、測定時の測定対象の状態は実際の稼働状態のままであり、かつ大電流測定時の自己加熱もわずかであるため、測定精度への影響もない。

およそ 5A を目安として、それよりも大きな電流を高精度に測定するには、直接結線方式に比べ電流センサ方式の方が適しており、パワーエレクトロニクス分野では一般的に電流センサ方式が用いられている。

Fig.2.3 には、直接結線方式と電流センサ方式のそれぞれが、高精度で測定可能な電流値の範囲と周波数帯域を示した。ここで、図中の範囲外だからといって必ずしもそれぞれの方法で測定不能というわけではないことに注意されたい。

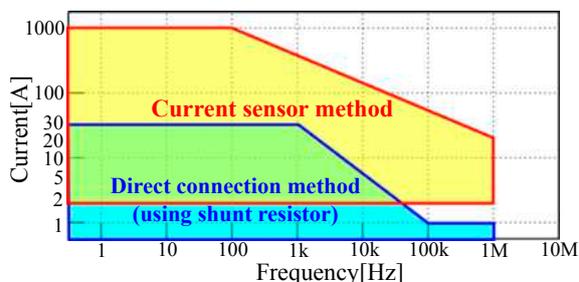


Fig. 2.3 直接結線方式と電流センサ方式の高精度で測定可能な電流値の範囲と周波数帯域（図中の範囲外であっても、必ず測定不能というわけではないことに注意されたい）。

3 電流センサ方式で高精度に電力測定を行うためには

前述したように、 5A を超える電流は電流センサ方式で測定するのが一般的である。電流センサ方式には、直接結線方式のような欠点が無いとはいえ、

高精度に電流を測定するためにはいくつか注意すべき点が存在する。本章では、電流センサ方式で高精度に電力測定を行うための注意点を示す。

3.1 適切な電流センサの選定

電流センサ方式で高精度かつ再現性の高い電力測定を行う上で前提となるのは、適切な電流センサを選定することである。具体的な選定の基準としては、まず、下記の2点が挙げられる。

- i) 電流センサの定格電流値が測定対象となる電流の大きさに適合している。
- ii) 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可能な周波数帯域に含まれている。

さらに、上記2点に加えて、

- iii) 測定可能な周波数帯全域に渡って電流センサの測定精度が規定された上で、精度自体が十分に良い。
- iv) 電流センサの出力ノイズや温度特性、導体位置の影響、外部磁界の影響、帯磁の影響、同相電圧の影響などの誤差要因が全て規定された上で、十分に小さい。

といったことも、電流センサを選定する上で、十分に注意する必要がある。特に、iii) について、一般的な電流センサは精度規定が DC および 50/60Hz に限定され、その他については代表的な特性を示すに留めている場合も多いため、注意が必要である。

センサ方式で電流測定を高精度に行うためには、パワーアナライザに加え、電流センサも十分な性能を具備する必要がある点に注意されたい。

3.2 電流センサを含めた電力測定システム全体の最適化

電流センサ方式で高精度に電力測定を行うためには、前節で記した、適切な電流センサを選定するだけでは不十分であり、加えて、電流センサを含めた電力測定システム全体を最適化する必要がある。というのも、いくら電流センサが測定対象の電流を高精度に検出しても、センサの出力信号がパワーアナライザに伝送されるまでに劣化してしまえば高精度な電流測定はできないためである。

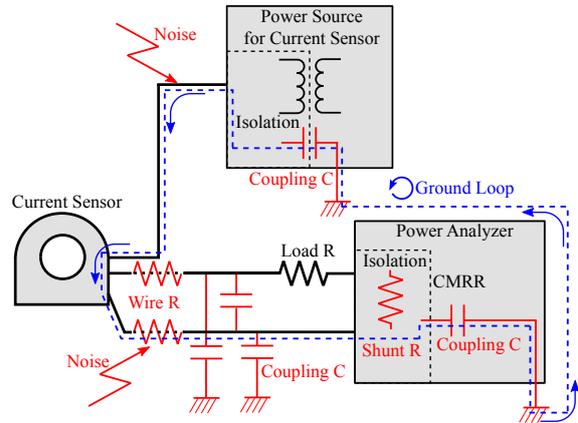


Fig. 3.1 一般的な電力測定システム。

Fig.3.1 には電流センサを含めた一般的な電力測定システムを示した。なお、前述したように、電流センサには電流を出力信号とするものと電圧を出力信号とするものが存在する。一般に、電圧出力に比べて電流出力のセンサを使用することが多いため、ここでは電流出力のセンサを使用することを前提として議論を進める。

電流センサの出力信号をパワーアナライザに劣化することなく伝送するための条件としては、

- i) センサ用電源の電源品質が良好であり、GNDの取り方が適切であること。
- ii) ケーブル間およびケーブル-GND間の結合容量が小さく、耐ノイズ性が高いこと。
- iii) パワーアナライザの電流入力部の周波数特性が良好で、発熱が小さく、絶縁性能 (CMRR が高く、漏れ電流が小さい) が高いこと。また、耐ノイズ性が高く、GNDの取り方が適切であること。

といったことが挙げられる。

一般に、電流センサ、センサ用電源、パワーアナライザはそれぞれメーカーが異なり、ケーブルの種類や配線方法はユーザの裁量に委ねられているというのが現状である。このような状況下で、上記の条件を全て満たし、電流センサの出力信号が劣化することなくパワーアナライザに伝達していること、実際

に電流を高精度に測定できていることを保証することは、電流センサメーカーにも、パワーアナライザメーカーにも、ましてやセンサ用電源メーカーにも非常に困難であることは言うまでもない。

一方、弊社は電流センサとパワーアナライザの両方を古くから独自の技術で開発し、電力測定システムを構成する全ての要素を1社単独で提供する、世界で唯一の計測器メーカーである。弊社の電力測定システムの特徴は下記の通りである。

- i) 電流センサは電圧出力タイプであり、測定可能な周波数帯全域に渡って確度が規定されている。
- ii) パワーアナライザの電流入力を電圧出力タイプの電流センサ専用とし、センサの出力電圧レベルとパワーアナライザの電流入力部への入力電圧レベルを最適化している。
- iii) パワーアナライザにセンサ用電源が内蔵されており、センサに供給される電源品質は、弊社での確度規定時と必ず同一となる。なお、弊社のパワーアナライザは、センサ用電源と GND を一致させるとともに、グラウンドループの要因を除去するといった、測定の精度や再現性を向上させるための工夫が施されている。
- iv) センサの出力ケーブルとしてシールド線を使用し、ノイズ対策を行うとともに、センサ出力のゲイン調整を行って、ケーブルによる微小な電圧降下分を相殺している。

さらに弊社では、電流センサとパワーアナライザを組み合わせて、社内および第三者認証機関にて、測定確度の評価やノイズ試験を行っている。Fig.3.2 には、弊社の電流センサ (CT6862, CT6863, 9709, CT6841, CT6843, 3274) とパワーアナライザ (PW6001) を組み合わせた電力測定システムのイミュニティ試験が第三者認証機関で実際に行われた時の様子を示した。

このように、システム全体が最適化されるように1つ1つの構成要素を設計するとともに、構成要素を組み合わせたシステム全体での評価を実際に行うことによって、弊社は世界最高水準の電力測定シ

テムをお客様に提供している。

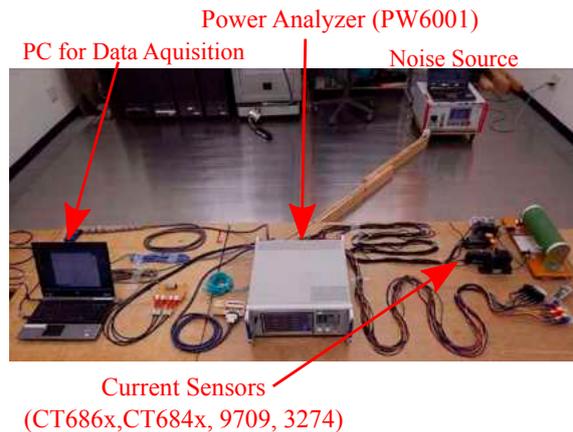


Fig. 3.2 第三者認証機関での弊社の電力測定システムのイミュニティ試験の様子。

4 おわりに

本稿では、パワーエレクトロニクスの分野において様々な場面で求められている高精度電力測定について、特に電流測定技術に議論の焦点を絞り、古くから独自の技術で電流センサとパワーアナライザの両方を開発してきた弊社のノウハウの一部を簡単に紹介した。紙面の都合上、本稿ではその詳細まで立ち入れなかった内容や、そもそも触れることさえ出来なかった内容も数多く存在する。こういった情報は今後も引き続き、読者の皆様に提供していきたいと考えている。