

高効率モータドライブの効率評価における位相補正の有用性

近藤 秀春, 山浦 千明, 斉藤 志弥, 小林 宏企

1. はじめに

近年, 国際的な地球温暖化防止を背景に, 電気自動車や産業用途に利用されるモータドライブシステムは注目を集め, その高効率化が進められている. モータドライブシステムの効率・損失評価では, 正確な電力測定が必須であるが, そのためにはいくつかのノウハウを理解しておくことが大切である.

本稿では, インバータ出力波形の特徴に着目して考察し, インバータ出力電力を正確に測定するために必要な電力測定器の要件を示す. この要件を満たすために, 電流センサの位相誤差に着目した, パワーアナライザによる位相補正を紹介する. また, インバータ効率の実測比較によって, 電流センサの位相補正の有用性を検証したので報告する.

2. インバータ出力波形の特徴

インバータの出力電力は, 基本波周波数成分(〜2kHz)とその高調波成分, およびスイッチング周波数(5k〜100kHz)とその高調波成分が主な要素である. その中で支配的なのは基本波周波数成分である. Fig.1 に, 一般的なモータドライブシステムにおける, インバータ出力の線間電圧波形と線電流波形, およびその FFT 結果を示す. また, 測定対象の詳細を Table.1 に示す.

電圧の FFT 結果に着目すると, 線間電圧の PWM 波形の主成分である基本波とその高調波, そしてスイッチング周波数とその高調波成分が観測される. およそ 2MHz まで, 0.1%fs.以上のスペクトルが存在する.

電流波形も, 基本波とその高調波, そしてスイッチング周波数とその高調波成分が観測される. しかし, 100kHz 以上では観測されるスペクトルが 0.1%fs.を下回っており, 周波数が高くなるにつれて電流レベルが急激に小さくなる. その理由は, インバータに負荷とし

て接続されるモータの等価回路 (Fig.2) によって説明ができる. モータ巻線は抵抗とインダクタンスが直列接続された R-L 負荷と考える事ができる. 従って高周波になるにつれインピーダンスが高くなるため電流は流れにくくなる.

同様に, R-L 負荷における電力の力率 $\cos \theta$ に着目すると, 基本波やその高調波など, 周波数が低い場合は力率 1 に近いが, スwitchング周波数やその高調波成分など, 高周波では誘導性リアクタンスが支配的となるため, 電流は遅れ位相となり, 電力は低力率となる.

Fig.3 に, インバータ出力の電圧・電流波形をスイッチング周波数領域まで時間軸を拡大(下段)して示す. 電圧波形は矩形波, 電流波形は三角波となり, 互いの位相関係は, 前述したとおり電流が遅れ位相の低力率であることが観測できる.

以上, インバータ出力有効電力の主成分と特徴をまとめ, Fig.4 に示す.

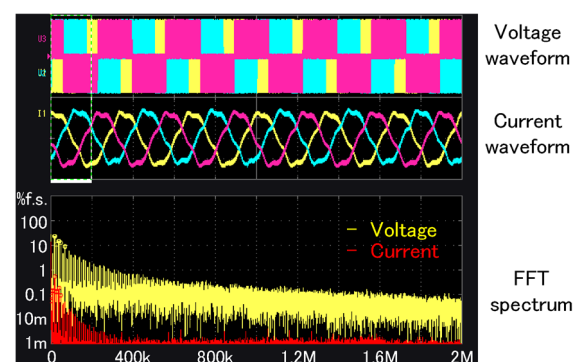


Fig.1 インバータによりモータを駆動した際の波形, FFT 結果. パワーアナライザ PW6001 にて測定

Table. 1 測定対象のスペック

Inverter		Motor		
Switching element	Switching frequency	Inductance	Resistance	Rated power output
SiC-MOSFET SCH2080KE (ROHM)	20 kHz	3.6 mH	0.9 Ω	120 W

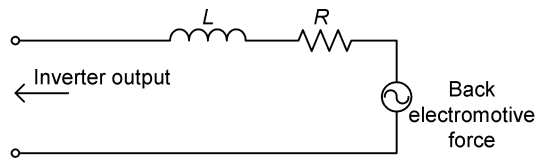


Fig. 2 モータの等価回路(1相分)

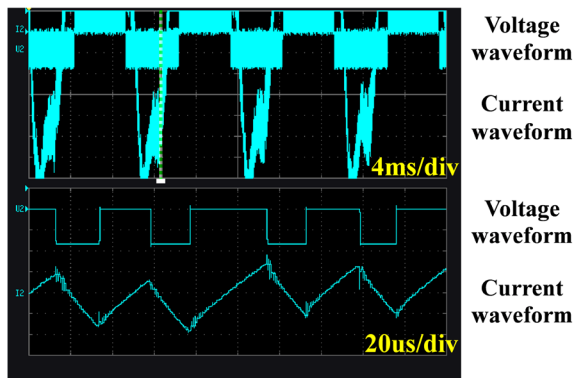


Fig. 3 インバータ出力波形拡大

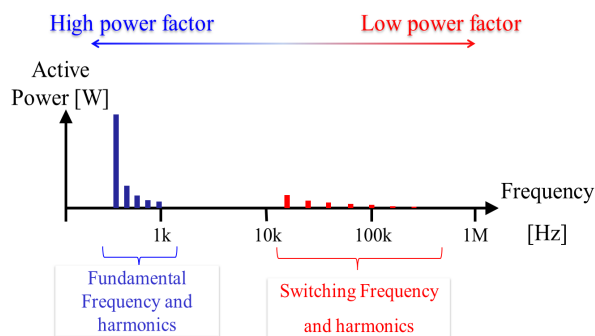


Fig. 4 インバータ出力有効電力の主成分と特徴

3. インバータ出力の高精度測定に求められる性能

ここでは、インバータ出力電力を正確に測定するために必要な電力測定器の要件について述べる。前述の特徴から、インバータ出力電力は、高力率である基本波とその高調波成分に加え、低力率であるスイッチング周波数とその高調波成分の有効電力を正確に測定することが重要である。

Fig.5 に、力率の違いにおける位相誤差と有効電力誤差の関係を示す。高力率に比べ、低力率では、測定系の電圧・電流間の位相誤差が有効電力に及ぼす影響量大きい。従って、スイッチング周波数とその高調波成分の有効電力の正確な測定には、広帯域までフラットな振幅特性だけでなく、広帯域までフラットな位相特性が特に重要となる。Fig.3 のように矩形波電圧と三角波電流から成る電力成分の場合、0.1%の精度で効率を測定する際に必要なフラットな

振幅・位相の帯域は、スイッチング周波数の 5 倍～7 倍程度と考えられる¹⁾。

フラットな振幅・位相性能を判断する指標となるのが、ゼロ力率時の有効電力周波数特性である。Fig.6 に、HIOKI パワーアナライザの機種毎のゼロ力率時の有効電力周波数特性例を示す。なお、この特性例はパワーアナライザ単体の特性である点に注意されたい。

PW6001 は、スイッチング素子に SiC を用いたインバータ測定を想定し、1MHz までフラットな特性である。

PW3390 はスイッチング素子に IGBT を使用したインバータの測定を想定し、150kHz までフラットな特性である。インバータ出力の高精度測定を目的として、先代モデルである 3390 から性能向上を図っている。

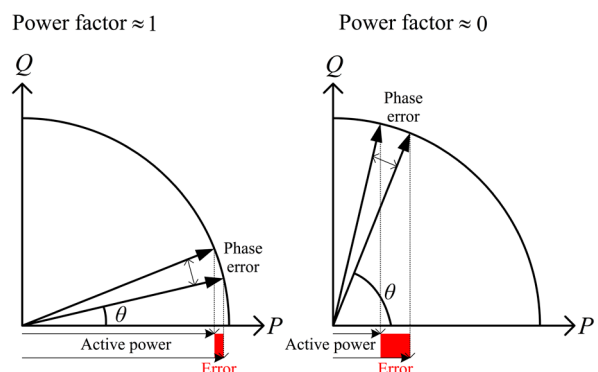


Fig. 5 力率の違いにおける位相誤差と有効電力誤差の関係

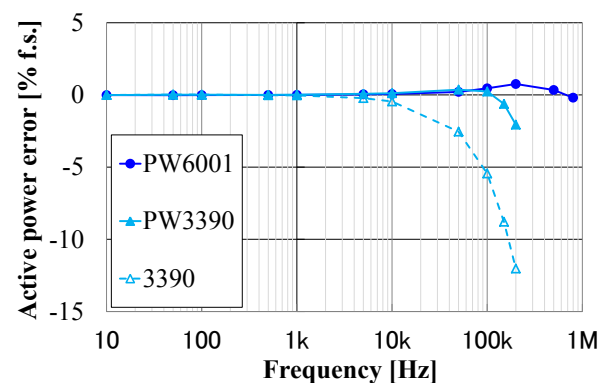


Fig. 6 HIOKI パワーアナライザのゼロ力率時の有効電力周波数特性例

4. 電流センサの位相補正

パワーアナライザによる高精度電力測定において、およそ 5A を超える電流は電流センサで測定するのが一般的である²⁾。従って、高周波までフラットな振幅・位相特性をもつ電力測定システムを実現するには、

パワーアナライザ単体の特性だけでなく、パワーアナライザと電流センサを組合せた状態で前述の性能を満足する必要がある。

しかし、一般に電流センサは、センサの磁気コアや回路の特性から、高周波領域において位相誤差が徐々に増加する傾向がある。さらにセンサ機種の違いによって誤差の大きさも異なる。Fig.7 に HIOKI の高精度電流センサの位相特性例を示す。

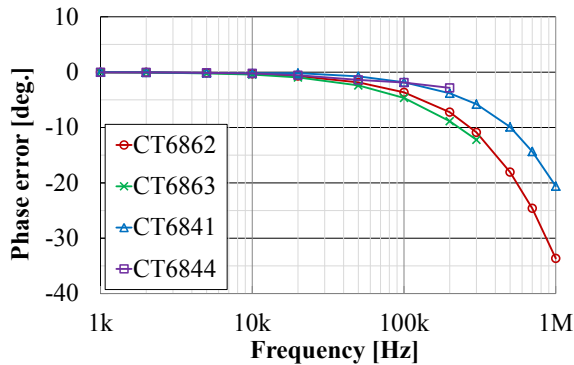


Fig.7 電流センサの位相-周波数特性

この課題を解決するためには、HIOKI のパワーアナライザ PW6001とPW3390に搭載されている、電流センサの位相補正機能を利用する。位相補正は、電流センサに固有の位相誤差情報を使ってこれを補正することで、高周波領域の位相特性を向上し、電力測定誤差を低減する機能である。

位相補正機能は、バーチャルオーバーサンプリング技術を用いることにより、実際のサンプリング周波数より 400 倍高い周波数に相当する高い時間分解能で、サンプリング波形のデスキュー処理をリアルタイムに演算処理する。波形を時間の概念で遅延補正することで、全帯域において位相補正の効果が得られる。

HIOKI は高精度電流センサを自社開発しており、設計および製造プロセスの最適化、厳しい生産管理によって、センサ各機種の位相特性を把握している。位相補正で使用する電流センサに固有の位相特性情報は、HIOKI パワーアナライザの取扱説明書に記載している。この位相特性情報を使って、Fig.7 の電流センサについて位相補正を行った結果を Fig.8 に示す。適切な位相補正がなされた結果、高周波領域の位相特性が大幅に向上する。

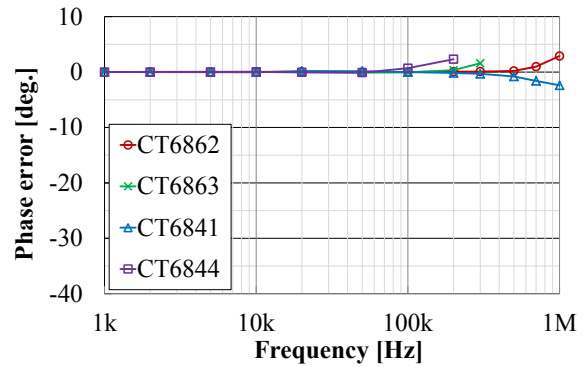


Fig.8 位相補正後の位相-周波数特性

5. インバータ効率の実測比較

前記 Table.1 に示した SiC インバータを測定対象とし、HIOKI のパワーアナライザ 3 機種でインバータ効率を実測比較した。測定条件を Table.2 に示す。なお PW6001, PW3390 はそれぞれ位相補正の ON/OFF 両条件で測定を実施した。

効率および損失の測定結果を Fig.9 に示す。PW6001, PW3390 とともに位相補正 OFF 時の効率が 3390 に比べて 0.1%~0.15%程大きな値を示している。この要因は、ゼロ力率時の有効電力周波数特性の性能向上 (Fig.6) によるものと推測する。

更に、位相補正 ON 時の効率が OFF 時に比べ 0.1%~0.15%程大きな値を示している。ここで、Fig.9 測定時の DC 入力電力 P4 と PWM 出力電力 P123 を Fig.10 に示す。PW6001, PW3390 とともに P4 が位相補正 ON/OFF で変化がないのに対し、P123 が位相補正 ON 時に OFF 時と比べて 0.1%~0.15%程大きな値を示している。これら結果より、CT6862 電流センサの遅れ位相誤差の低減 (Fig.7 と Fig.8) による効果が P123 の測定値において認められた。

Table.2 測定条件

Item	Model		
	PW6001	PW3390	3390
Input (DC)	Wiring	1P2W	
	Current Sensor	CT6862	
	Phase Correction	OFF / ON (-10.96deg@300kHz)	N/A
Output (PWM)	Wiring	3P3W3M	
	Current Sensor	CT6862×3	
	Phase Correction	OFF / ON (-10.96deg@300kHz)	N/A
	Fundamental Frequency	100Hz	
Power Analyzer Frequency Band	~2MHz	~200kHz	~150kHz

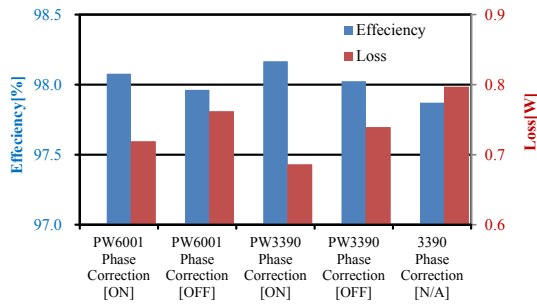


Fig.9 インバータ効率・損失の機種間比較

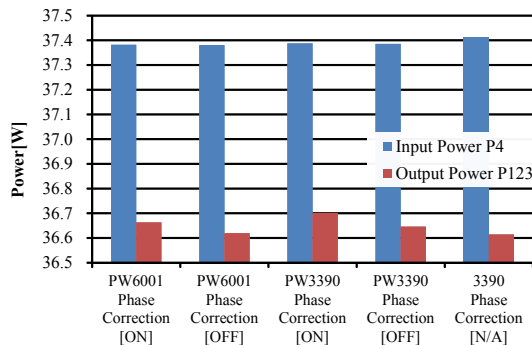


Fig.10 インバータ入出力電力の機種間比較

最後に Fig.9 の損失の比較結果より、PW6001、PW3390ともに位相補正 ON 時の損失が 3390 に比べて 0.1W (12%相当)程小さな値を示している。本実験は小型モータを負荷に測定したが、例えば 10kW、効率 95%のインバータの場合、損失 12%の差は電力換算で 60W に相当し、熱設計に関わる大きな差となる。

高効率モータドライブシステムにおいて、0.1%レベルの効率や 1W レベルの損失を正しく評価するためには、電力測定システム全体で適切な振幅・位相特性で測定することが重要な要素の一つである。本実験により電流センサの位相補正が有効であることが明らかになった。

今回測定したインバータはスイッチング周波数 20kHz であったため、PW6001、PW3390ともに周波数帯域が十分であり、測定結果に大きな違いが見られなかった。スイッチング周波数が更に高周波化した場合には、PW6001 と PW3390 との測定結果に差が出てくると予想される。

6. まとめ

本稿では、インバータ出力電力に着目し、正確に測定するために必要な電力測定器の要件を示した。要件を満たすため、電流センサの位相補正が大切なノウハウの一つであることを示し、その有用性を実測

比較によって確認した。パワーエレクトロニクスの分野では、モータドライブシステム以外にも高周波かつ低力率な電力を測定する機会³⁾が多く存在する。その際にもこの位相補正は有効なノウハウとして役立つことが可能である。今後も引き続き、読者の皆様に情報を提供していきたいと考えている。

参考文献

- 1) Hayashi, K, "High-Precision Power Measurement of SiC Inverters" Bodo's Power System, September 2016, pp.42-47.
- 2) Yoda, H, *et al.* "Current Measurement Methods that Deliver High Precision Power Analysis in the Field of Power Electronics" Bodo's Power System, April 2016, pp.38-42.
- 3) Hayashi, K, "Measurement of Loss in High-Frequency Reactors" Bodo's Power System, February 2017, pp.18-22.