日置技報 Technical Notes

AC/DC カレントセンサ CT6872/CT6873

中沢 宏紀 *1

要　旨

AC/DC カレントセンサ CT6872/CT6873 は，DC から 10 MHz までの広い測定周波数帯域を実現した 50 A/200 A 定格の貫通型電流センサーである．ここに製品の概要，特長，構成，特性，および計測事例について解説する．

1. はじめに

全世界的な脱炭素社会の実現に向けた活動が進む中で，機器の高効率化や省エネルギー化への取り組みの重要性が増している．自動車業界では，近い将来に全車種を電気自動車（EV）にすることを目標とする国や自動車メーカーもあり，関連技術の開発が加速している．

EV の開発において，電費や消費電力を正確に計測するためには高精度な電流の測定が必須である．それに加えて，インバーターなどへの新たな半導体素子（SiC/GaN）の適用などによるスイッチング周波数の高周波化に伴い，電流計測を担う電流センサーには広い周波数帯域と高い耐ノイズ性能が要求されている．

AC/DC カレントセンサ CT6872/CT6873 は，DC から 10 MHz まで（従来比 10 倍）の広い測定周波数帯域を持ちながら，高いコモンモードノイズ除去比（CMRR）を実現し，ノイズ環境下でも正確で再現性の高い電流計測が実施できる．図 1 に CT6872/CT6873 の外観を示す．

CT6872

CT6873

図 1　外観

2. 概要

CT6872 は 50 A 定格，CT6873 は 200 A 定格の貫通型電流センサーである．インバーターなどの入出力電流の計測に対応するため，従来製品の AC/DC カレントセンサ CT6862/CT6863 に対して基本確度，周波数帯域，および耐ノイズ性能を向上させた．いずれも高水準の性能を有しており，幅広い測定対象および測定環境下でも高精度でかつ安定した電流計測ができる．

CT6872/CT6873 はセンサーの各種データ（位相補正値，定格電流，センサー形名，製造番号など）を内部メモリーに保持しており，パワーアナライザ PW8001 への接続時には自動でそれらが PW8001 に認識される．測定の準備に時間を割くことなく電流センサーの性能を最大限に引き出すことができる．

*1　AE ユニット

© 2022 HIOKI E.E. CORPORATION　日置技報

3. 機能・特長

3.1 高確度かつ広い使用温度範囲

CT6872/CT6873 は，高い振幅確度（DC：±0.032%，50 Hz/60 Hz：±0.037%）と高い位相確度（50 Hz/60 Hz：±0.05°）を実現した．−40°C から 85°C までの幅広い周囲温度範囲で使用でき，自動車用モジュールなどの評価試験に最適である．

3.2 広い周波数帯域

ゼロフラックス型電流センサーにおいてトップクラスの周波数帯域（DC ～ 10 MHz）を有している．高周波電流を高精度で計測でき，PW8001 と組み合わせることで高周波や低力率の電力も正確に測定できる．

3.3 高い耐ノイズ性能

筐体の内部に金属膜を施すことにより，センサー部と回路部を測定対象および周辺の電線から遮へいしている．これにより，低周波から高周波まで高い CMRR（DC ～ 1 kHz：150 dB 以上，100 kHz ～ 1 MHz：100 dB 以上）を実現した．高周波で動作するパワーエレクトロニクス機器が近接する環境では，測定対象ならびに周辺の電線および機器からコモンモード（同相電圧）ノイズが電流センサーに印加される．このため，CMRR が比較的低い一般的な電流センサーでは測定値が不安定となることがある．一方で，CT6872/CT6873 では広帯域にわたり優れた CMRR を有しているため，測定環境の影響を受けずに再現性のよい計測ができる．

3.4 パワーアナライザとの通信機能

CT6872/CT6873 に搭載したメモリー（I2C-EEPROM）により，PW8001 への接続時に位相補正データ，定格電流，センサー形名，製造番号などが自動で PW8001 に認識される．従来は位相補正値を手動で入力する必要があったが，自動認識により，設定忘れや入力ミスが発生せず，より正確な電力演算ができる（図 2）．

4. 構成

4.1 測定原理と回路構成 [1)]

図 3 に回路構成を示す．従来製品である CT6862/CT6863 と同様にフラックスゲート方式を用いたゼロフラックス型電流センサーを構成している．フラックスゲート方式とは，磁性材料の磁束密度−磁場（B-H）特性の非線形性を利用した磁界検出方法である．一般的に地磁気の方位検出などに用いられ，高感度で温度安定性が非常に高い磁気検出方法である．

図 2　電流センサー自動認識機能

巻線内部の磁性材が飽和域に達するようにフラックスゲートに高周波の励磁電流（f Hz）を流しておく．この状態で測定対象に測定電流が流れたとき，コアに発生した磁束によって巻線に生じる電圧波形の変化を差動検出する．この検出信号を励磁電流と同期した信号（2f Hz）で同期検出することにより，測定電流にほぼ比例した出力信号を得ることができる．しかし，フラックスゲートは磁性材が飽和する大きな磁界影響下では高い感度を得ることができなくなる．感度を上げるために，ゼロフラックス方式と呼ばれる負帰還回路と組み合わせることで，200 A までの電流測定を可能とした．検出回路には高精度抵抗および複合アンプ構成の採用によって，回路部の温度安定性と長期安定性を高めている．

4.2 構造

図 4 に CT6872/CT6873 の構造図を示す．CT6872/CT6873 は樹脂筐体内部に金属膜を施すことにより，従来製品の CT6862/6863 と比較して非常に高い耐ノイズ性を実現した．また，センサーには対向配置分割コイルを採用することで，周波数帯域を拡大した．高温環境下でも高精度な計測ができるよう，内部の放熱構造についてシミュレーションを活用して設計した．高い測定確度を実現しながら使用温度範囲を従来製品の−30°C から 85°C よりも広い−40°C から 85°C までに拡大した．

© 2022 HIOKI E.E. CORPORATION　日置技報

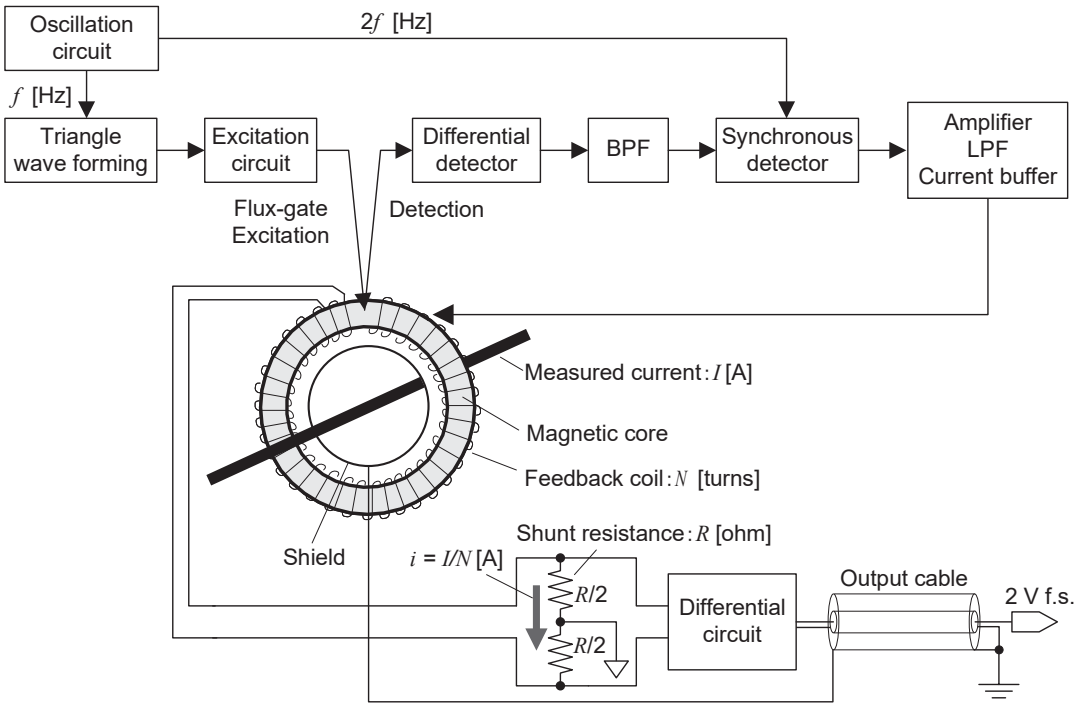


図 3　回路構成

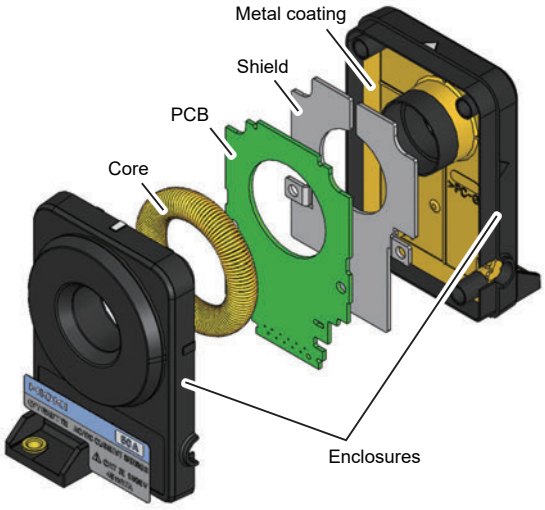


図 4　構造図

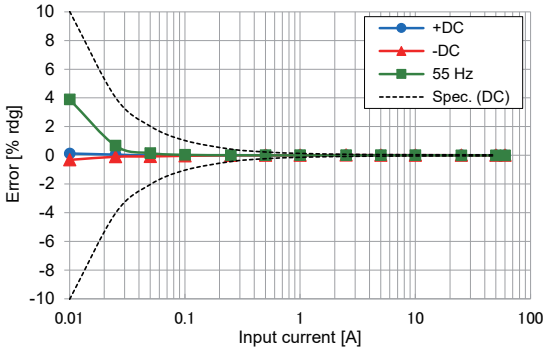


図 5　CT6872 直線性

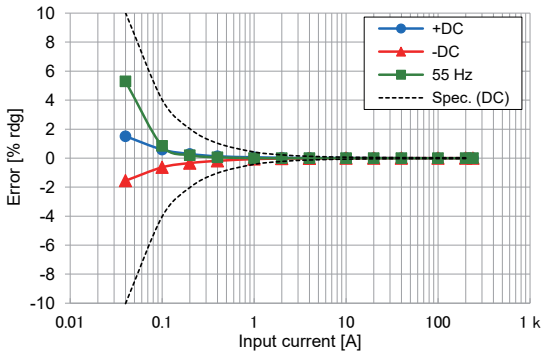


図 6　CT6873 直線性

5. 特性

5.1 直線性

図 5 と図 6 に直線性を示す．ゼロフラックス方式の負帰還回路により，優れた直線性が得られている．また，ミリアンペアオーダーの低電流も数パーセントの誤差で測定でき，特に DC 低電流の測定精度が高い．

© 2022 HIOKI E.E. CORPORATION　日置技報

5.2 周波数特性

図 7 から図 10 に周波数特性（振幅，位相）を示す．位相−周波数特性には自動位相補正機能（PW8001 に採用）を用いた際の特性も示している．確度が規定されている 1 MHz までの帯域では数パーセント以内の優れた振幅平坦性を実現した（約 10 MHz の帯域まで，ゲインが−3 dB 以内である）．パワーアナライザ PW6001/PW8001 に接続して位相補正機能を用いた場合，1 MHz まで 1% 程度の振幅誤差と 1° 程度の位相誤差で測定ができる．高周波領域での電力解析をより正確に計測できる．

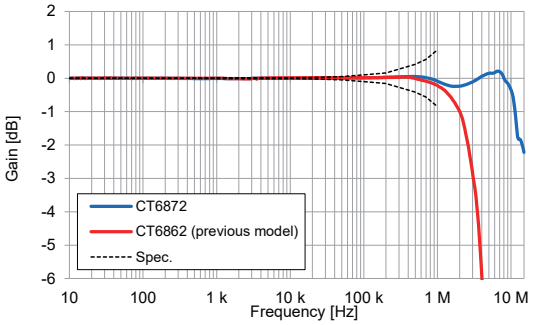


図 7　CT6872 振幅 - 周波数特性

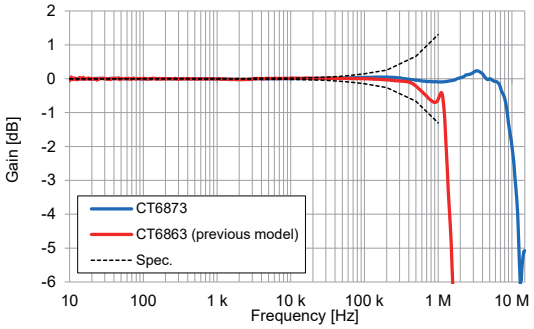


図 8　CT6873 振幅 - 周波数特性

5.3 温度特性

図 11 から図 14 に温度特性（オフセット，感度）を示す．使用温度範囲を超える−60°C から 110°C までの範囲では安定した特性である．仕様で規定した温度係数を考慮しない場合においても，基本確度（DC：±0.032%，50 Hz/60 Hz：±0.037%）を満たす実力を有している．フラックスゲート方式を用いたことにより，ホール素子を用いた一般的な電流センサーと比較して高い温度安定性を有する．また，自己発熱によるオフセットと感度の変化も非常に小さいため，使用前のウォーミングアップも不要である．

5.4 同相電圧の影響

図 15 および図 16 に同相電圧の影響を示す．図中に従来製品の特性と製品仕様を併記した．CT6872/CT6873 は筐体に金属膜を成膜することで，従来製品に対して同相電圧による影響を低減した．コモンモードノイズが大きく，高速でスイッチング動作をするインバーターなどがセンサーに近接する環境での測定においても，再現性のよい高精度な計測ができる．

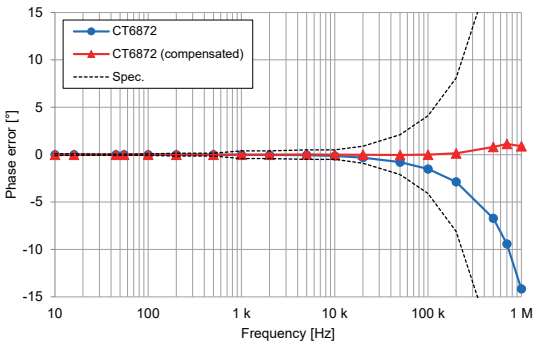


図 9　CT6872 位相 - 周波数特性

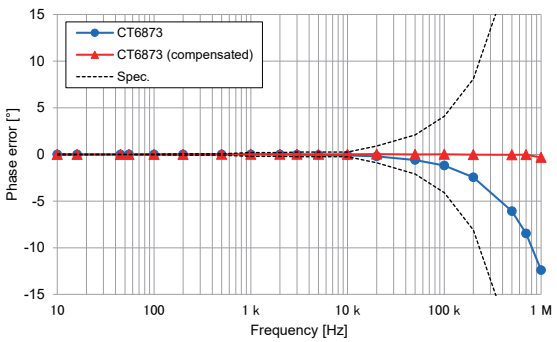


図 10　CT6873 位相 - 周波数特性

5.5 導体位置の影響

図 17 から図 20 に DC および AC（55 Hz，100 Hz）電流測定時の導体位置の影響を示す．対称性の良いコア構造により感度への影響量は非常に小さく，測定導体の位置によらず再現性の高い測定ができる．

© 2022 HIOKI E.E. CORPORATION　日置技報

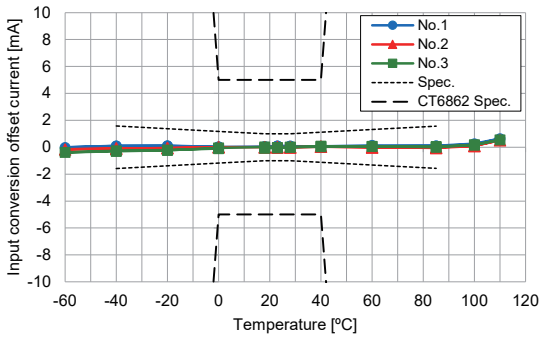


図 11　CT6872 オフセット - 温度特性

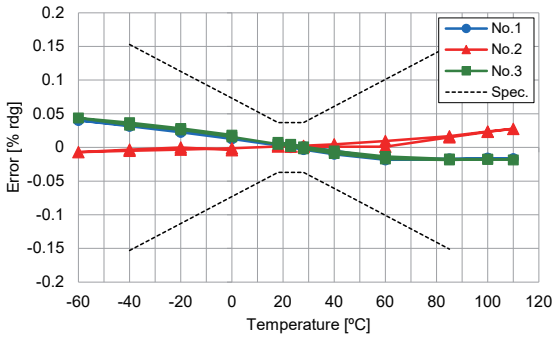


図 12　CT6872 感度 - 温度特性

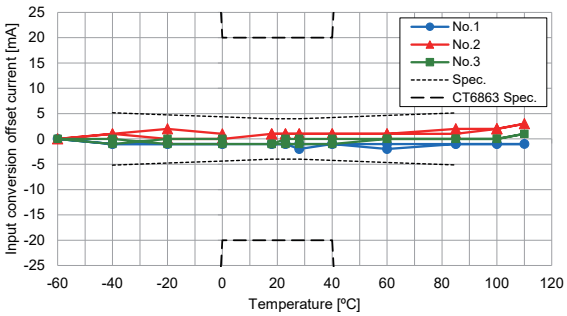


図 13　CT6873 オフセット - 温度特性

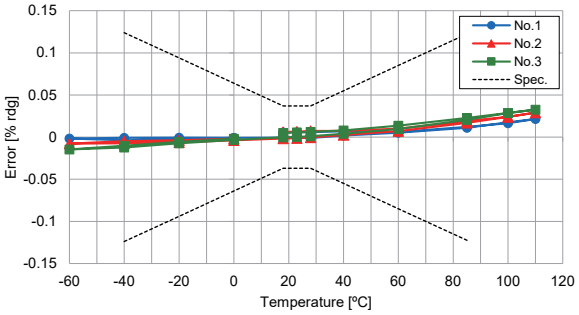


図 14　CT6873 感度 - 温度特性

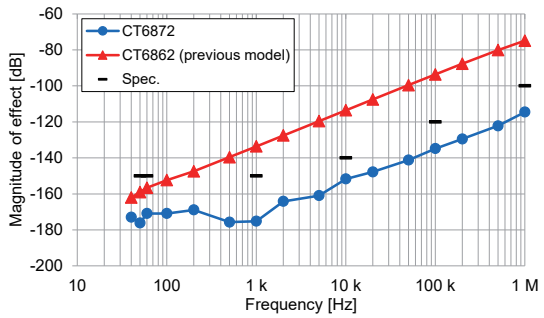


図 15　CT6872 同相電圧の影響

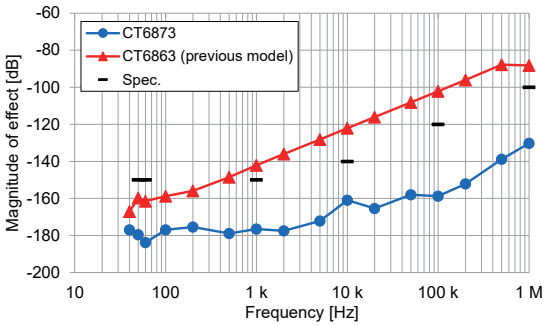


図 16　CT6873 同相電圧の影響

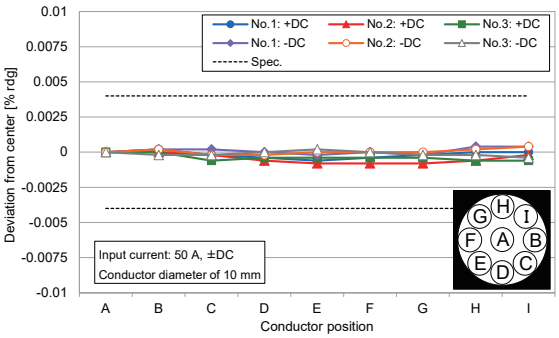


図 17　CT6872 導体位置の影響（DC）

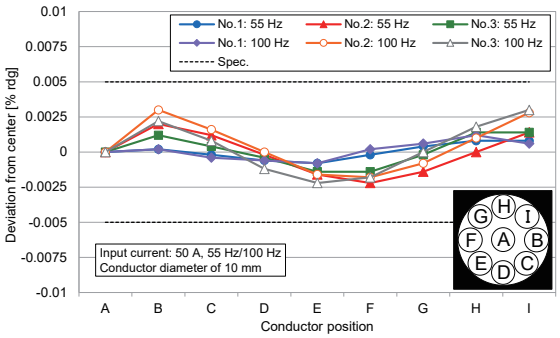


図 18　CT6872 導体位置の影響（55 Hz，100 Hz）

© 2022 HIOKI E.E. CORPORATION　日置技報

5.6 近接電線の影響

図 21 に各センサーの筐体に電流を近接させた際の影響を示す．55 Hz の電流が流れる電線が近接したときの影響を見ると，対称性の良いコア構造により影響量は小さい．周波数が高くなるにしたがい影響量は大きくなる．しかし，一般的なインバーターの基本波周波数の上限である 2 kHz 近辺までの影響量は 0.1% 程度以下で，高精度な計測に及ぼす影響は軽微である．

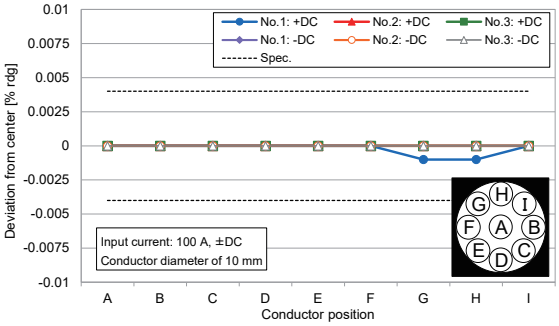


図 19　CT6873 導体位置の影響（DC）

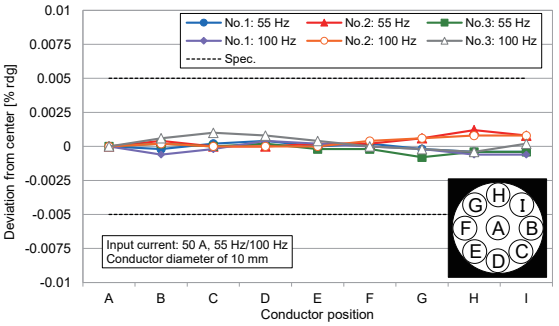


図 20　CT6873 導体位置の影響（55 Hz，100 Hz）

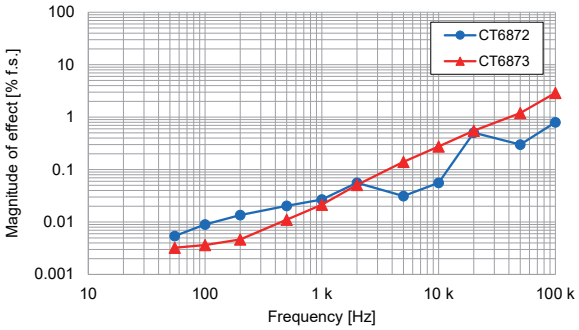


図 21　近接電線の影響

6. 計測事例

6.1 マルチストリング型 PCS の評価

カーボンニュートラルを実現するため，今後ますます太陽光発電システムの普及が期待される．太陽光発電システムの発電量を最大化するため，マルチストリング型パワーコンディショニングシステム（PCS）の開発が進んでいる．PCS は，ストリングごとに最大の電力を生み出すための動作点を制御する．一般的な PCS に比べて回路数が増えるため，評価試験ではより多くのポイントの測定が必要となる．図 22 に評価試験の構成例を示す．PW8001 を 2 台使用して，最大 16 チャネルの電力を同時に測定する場合で，一次側（PV 出力：DC 電流）に CT6872 を 13 台，二次側（インバーター出力：AC 電流）に CT6873 を 3 台接続した．

6.2 走行中ワイヤレス給電システムにおける採用事例 [2) 3)]

東京大学の藤本・清水・藤田研究室は，走行しながらワイヤレス給電ができる次世代電気自動車を精力的に研究している．道路に埋め込まれた送電コイルと車両に搭載された受電コイルとの間でどれだけ効率よく電力を伝送できるかどうかが，より長い航続距離の実現および実用化の重要な課題の一つである．

今回の実測事例では，磁界共振結合方式による 85 kHz を基本周波数とした走行中給電システムにおいて，送受電コイルと共振コンデンサーをそれぞれ直列に接続する Series-Series（S-S）方式が用いられている．S-S 方式共振回路に，PW6001 と AC/DC カレントセンサ CT6862-05 および CT6872 で送受電実験を行った（図 23）．電圧波形および電流波形がきれいに記録されている．電圧波形の FFT 結果から矩形波特有の奇数次成分が観測され，電流波形の FFT 結果から約 85 kHz 成分が観測されている（図 24）．また，CT6872 を使用した方が効率が約 1.5% 大きくなった（表 1）．これは，CT6862-05 の周波数帯域が DC から 1 MHz（－3 dB）までに対し，CT6872 の周波数帯域が DC から 10 MHz（－3 dB）までであることから，CT6872 がより高い周波数成分も測定できていることが要因と考えられる．ちなみに、当該研究室において、総合 DC/DC 変換効率は、20 kW において 95% 以上の報告がなされている。

© 2022 HIOKI E.E. CORPORATION　日置技報

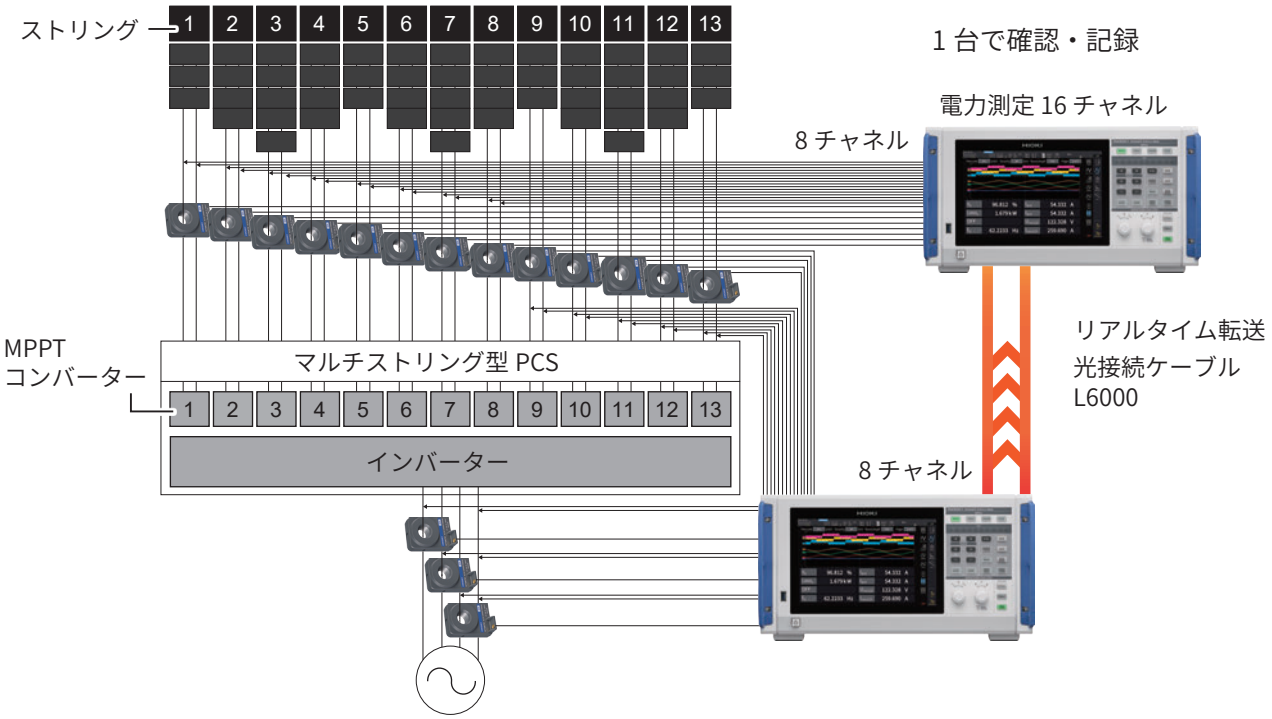


図 22　マルチストリング型 PCS の評価

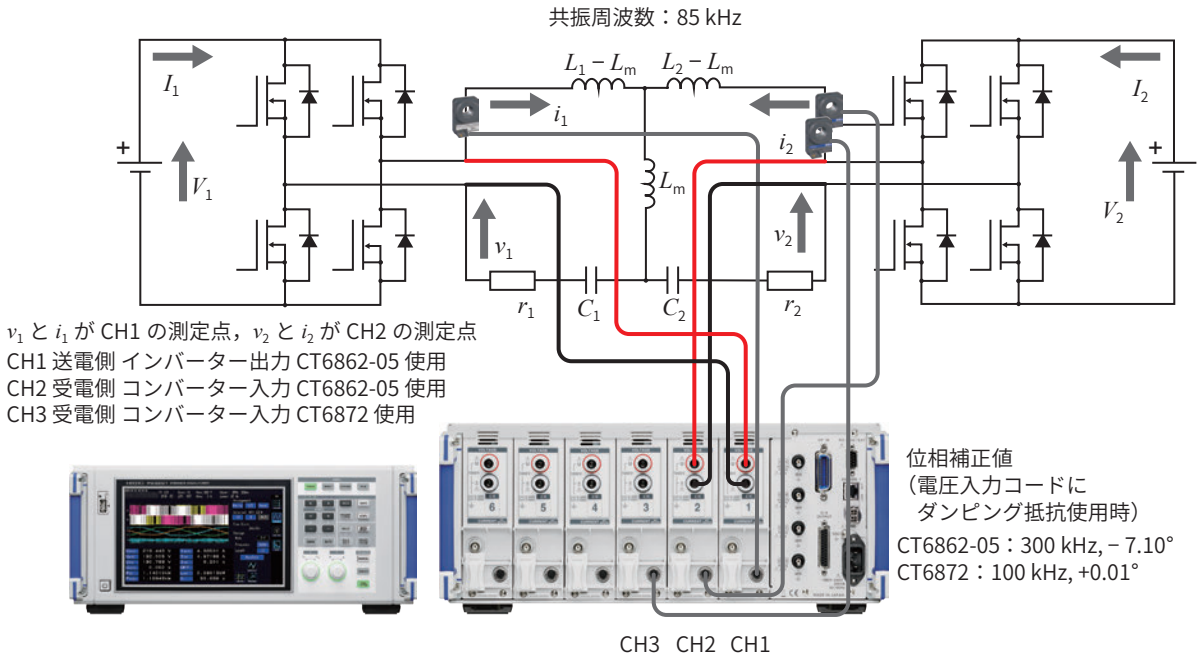


図 23　S-S 方式共振回路における実験構成

© 2022 HIOKI E.E. CORPORATION　日置技報

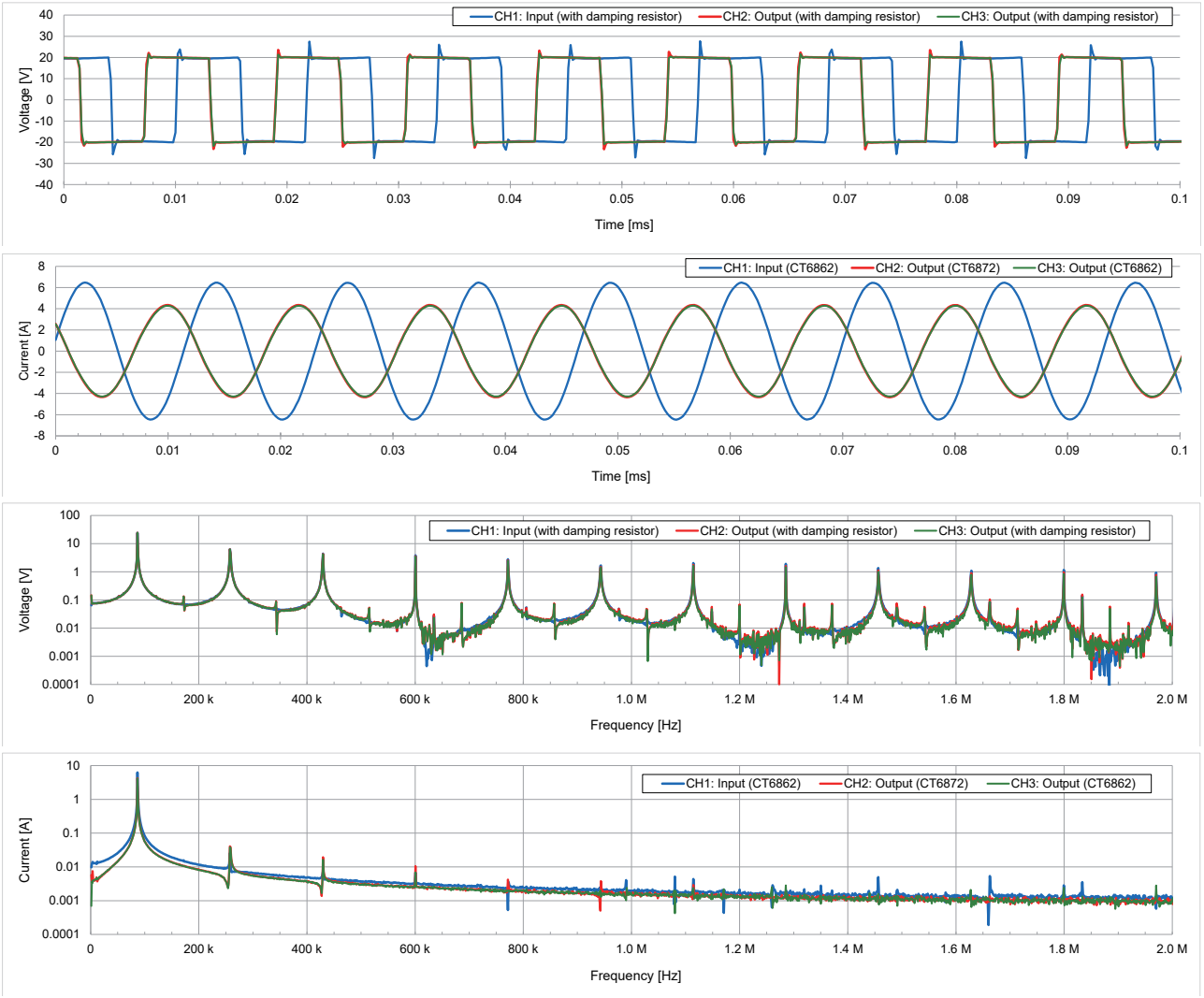


図 24　送受電実験結果（電圧波形，電流波形，および FFT 解析結果）

表 1 送受電実験結果（数値演算結果）

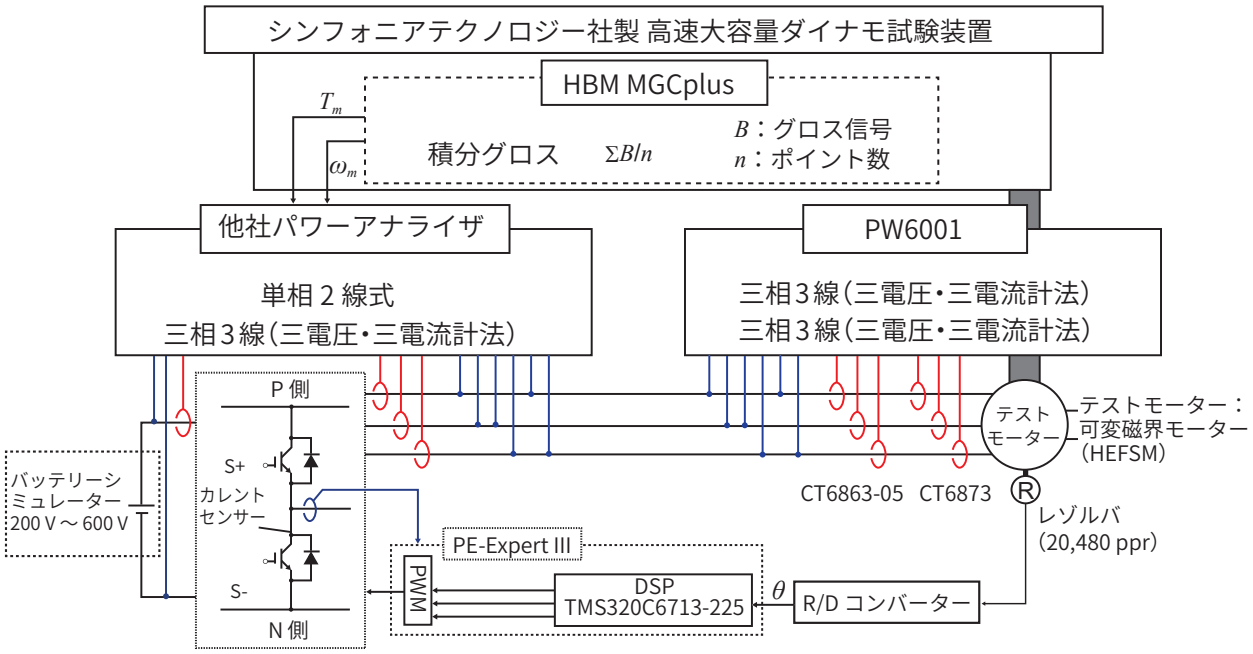
測定項目（使用電流センサー）	電圧 Uac [V]	電流 Iac [A]	電力 P [W]
送電側：S（CT6862-05）	19.677	4.577	61.310
受電側：R1（CT6872）	19.760	3.090	54.668
受電側：R2（CT6862-05）	19.654	3.043	53.767
比率：R1/S	100.4%	67.5%	89.2%
比率：R2/S	99.9%	66.5%	87.7%

6.3 EV 用インバーターモーター評価システムへの採用事例 [4) 5)]

名古屋工業大学の小坂・松盛研究室は自動車駆動用のモータードライブシステムを研究している．同研究室で開発している自動車駆動用ハイブリッド界磁フラックススイッチングモーター（HEFSM）[4)] を対象に PW6001 に AC/DC カレントセンサ CT6863-05 および CT6873 を用いた際のモーター効率測定を比較した（図 25）．大容量ダイナモ試験装置上 [5)] で試験をした．PW6001 で計測したモーターの入力電力（インバーター出力電力）およびモーターの速度・トルクから得たモーターの出力電力から，モーターの効率を算出した．

測定結果とそれらから算出されたモーターの効率を表 2 に示す．HEFSM は，トルクが低い場合は高 Vdc のときに低効率，低 Vdc のときに

© 2022 HIOKI E.E. CORPORATION　日置技報



三相インバーター (MWMES-111087)
PWM キャリア周波数：12.5 kHz

図 25　モーター効率測定における試験構成

表 2 モーター効率の測定結果

インバーター入力 DC 電圧 (Vdc) [V]	速度 [r/min]	トルク [N·m]	インバーター出力 [W] 従来製品 CT6863-05 (1)	インバーター出力 [W] CT6873 (2)	モーター出力 [W] (3)	モーター効率 [%] 従来製品 CT6863-05 (3)/(1)	モーター効率 [%] CT6873 (3)/(2)
200	1200	10	1529	1533	1369	89.5	89.3
600			1535	1548	1365	88.9	88.2
400	4000		4913	4920	4466	90.9	90.8
600			4946	4957	4463	90.2	90.0

高効率となる特性を有している．電力の測定結果も HEFSM の特性どおりになる結果が得られ，電力が安定して測定されていることが分かった．さらに，CT6873 は周波数帯域が 10 MHz であり，従来製品の CT6863-05 の周波数帯域 500 kHz よりも広くなっていることから，インバーターのスイッチング成分による損失増加分が測定結果に反映されていることが分かる．

© 2022 HIOKI E.E. CORPORATION　日置技報

7. おわりに

CT6872/CT6873 は，DC から 10 MHz までの広い測定周波数帯域（従来比 10 倍）を持ちながら，高い CMRR を実現し，ノイズ環境下においても正確で再現性の高い評価ができる．パワーエレクトロニクス機器などのさらなる省電力化や小型化に向けた評価に広く活用され，脱炭素社会の実現に向けた研究開発が促進されることを期待する．

池田 健太 *2，柄澤悠樹 *2，シャ ベイユウ *2，
丸山 貴史 *2，山岸 君彦 *2，原野 正幸 *3

参考文献

1) 山岸君彦 , 池田健太 , 中沢宏紀 : 磁気センサによる非接触高精度電流検出技術 , 電気学会論文誌 E (センサ・マイクロマシン部門誌), VOL.137, NO.8, 223/228 (2017)
2) 清水修 , 永井栄寿 , 藤田稔之 , 藤本博志 , 角谷勇人 , 高橋英介 , 山口宜久 , 谷恵亮 , 佐藤正憲 : コイルをアスファルト内に埋設した磁界共振結合型走行中給電路での電力伝送評価 , 自動車技術会論文集 , VOL.52, NO.5, 1095/1100 (2021)
3) Daisuke Shirasaki, Toshiyuki Fujita and Hiroshi Fujimoto, Novel Synchronous Rectification and Receiving Power Compensation Method for WPT Only by DC Current Sensor, IEEE Journal of EMERGING AND SELECTED TOPICS IN INDUSTRIAL ELECTRONICS, early access. (2022)
4) Takeshi Okada, Takashi Kosaka, Hiroaki Matsumori and Nobuyuki Matsui, Comparative Study on Hybrid Excitation Flux Switching Motors without and with Variably Magnetizable Permanent Magnets for Electrified Vehicle Propulsion, World Electric Vehicle Journal, 12 (2) , 58 (2021)
5) Hiroaki Matsumori, Yuki Makimura, Shoshi Morisita, Yuto Maeda, Takashi Kosaka, Nobuyuki Matsui, Naoto Saito, Yoshinobu Ito and Subrata Saha, Optimum PWM Switching Mode Selection of Dual Inverter-fed Open Winding IPMSM Drive System for High-power Premium Class EV, Proc. of IEEE ECCE, 6318/6324 (2020)

*2　AE ユニット
*3　カスタマーマーケティング部　フィールドデザイン課

© 2022 HIOKI E.E. CORPORATION　日置技報