

電流プローブ CT6710/CT6711

横田 修^{*1}

要 旨

電流プローブ CT6710/CT6711 は、電流－出力電圧変換レート（以下、出力レートと記す）を 3 レンジ搭載し、低電流から大電流まで観測できる、広い周波数帯域を実現したクランプ式の電流センサーである。ここに製品の概要、機能・特長、構成、諸特性、および計測事例について解説する。

1. はじめに

当社は、波形観測機器に直接接続して電流波形を観測できる、広帯域特性を持つクランプ式（非接触）の電流プローブを開発してきた（クランプオンプローブ 3273-50/3274/3275/3276、電流プローブ CT6700/CT6701）^{1) 2)}。これらの製品は、電力制御回路、電子機器などにおける各部の電流波形の観測に利用されている。

近年、電気製品、電子機器、携帯情報端末などにおいて、エネルギー使用効率の向上、消費電力の低減など、省電力化が一層進んでいる。その中で、低電流観測用に高出力レートのプローブが要望されていたため、電流プローブ CT6700/CT6701 を開発し、これに应运してきた。さらに省電力化が加速し、消費電流はさらに小さくなっている。電流プローブには、より微小な電流を精度よく観測できる特性が望まれている。また、近年のパワー・スイッチング・デバイスの高速化・大電流化への開発が目覚ましく、低電流だけでなく通常の負荷電流も併せて測定する機会も増加している。従来製品は単レンジ構成であり、電流プローブの測定範囲を広くすることができなかった。そのため、測定対象の電流や用途に合わせて、複数の電流プローブを用意する必要があった。省電力化の一端を担う電流波形の観測においては、低電流から通常の負荷電流まで測定範囲が広く、広帯域特性を持ち、低ノイズの電流プローブが望まれている。

このような市場のニーズに応えるため、高感度から低感度まで 3 レンジを搭載した CT6710/CT6711 を開発した。図 1 にその外観を示す。これにより、低電流から大電流まで、広帯域の電流を低ノイズで観測できるようになった。



図 1 外観

2. 概要

CT6710/CT6711 は、従来製品である CT6700/CT6701 と比較して、10 倍の出力レートの 10 V/A を実現した。さらに、10 V/A、1 V/A、0.1 V/A の 3 つのレンジを搭載し、低ノイズで広帯域特性を持つ電流プローブである。

出力レートを高くして低電流波形を観測できるようにするためには、電流プローブの低ノイズ化が必須である。そのためには、電流プローブ内部で発生するノイズを抑える必要がある。CT6700/CT6701 は、電流プローブの主なノイズ発生源である検出素子の特性を向上して低ノイズ化を図り³⁾、1 mA 程度の低電流波形を観測できる S/N 比を実現した。CT6710/CT6711 でもこの検出素子を採用し、さらに 10 倍の出力レートを伝送回路と能動素子により構成し、低ノイズと広帯域を両立させた。また、伝送回路を切り替え、10 V/A、1 V/A、0.1 V/A の 3 レンジ構成を実現している。全出力レートにおいて、直流から 120 MHz（CT6711）までの広帯域特性を持ち、さまざまな電流波形の観測に使用できる。

機能面では消磁・自動ゼロ調整や警告機能を搭載して、利便性が向上している。また、波形観測機器の BNC 入力端子には、簡単かつスムーズに CT6710/CT6711 の出力端子を接続できる。

^{*1} イノベーションセンター AE ユニット

3. 機能・特長

3.1 低電流波形を観測できる高出力レート

最大の特長は高い出力レートと S/N 比である。当社従来製品の最高出力レートは 1 V/A であった。近年の省電力化に伴い、電気機器など測定対象の動作電流が 1 mA 以下になってきている。このような低電流の観測において、従来製品の出力レートでは電流 1 mA 測定時の出力電圧は 1 mV であった。出力レートが低いと、微小な電流波形は波形観測器のノイズフロアに埋もれてしまい、高い S/N 比での観測が困難である。

CT6710/CT6711 の最高出力レートは従来比 10 倍の 10 V/A であり、ノイズレベルも低いことから、さらに低い電流波形を観測できる。

3.2 広帯域特性

直流も含めて広い周波数応答特性を持ち、過渡応答、突入電流などの高速応答波形、あるいは、さまざまな周波数成分を含む電流波形の観測に使用できる。

周波数帯域は以下の仕様を規定している。

- CT6710 : DC ~ 50 MHz (−3 dB)
- CT6711 : DC ~ 120 MHz (−3 dB)

3.3 10 V/A, 1 V/A, 0.1 V/A の 3 レンジ構成

当社電流プローブの従来製品はすべて単レンジであった。CT6710/CT6711 は、従来製品の 0.1 V/A (3273-50/3276) と 1 V/A (CT6700/CT6701) に、新たに 10 V/A を追加した 3 レンジを搭載している。

従来は測定対象や電流レベルに応じて複数の電流プローブを使用していたが、CT6710/CT6711 は 1 台で対応できる。

3.4 消磁・自動ゼロ調整

CT6700/CT6701 で搭載した消磁・自動ゼロ調整機能を CT6710/CT6711 にも搭載している。

1 回のキー操作で消磁に続いてゼロ調整を実施でき、操作が簡単である。また、キーを押す時間を短くすれば、ゼロ調整だけを実施できる。

センサー部は磁気コアやホール素子で構成されている。大電流を測定したり、温度が変化したりすると、磁気コアの帯磁や素子のオフセット電圧が変化し、電流プローブ出力のゼロ点が変化する。そのため、測定前には、消磁を行った後に、出力値を観測しながらゼロ調整をする

必要があった。CT6710/CT6711 ではこれらの操作を 1 回のキー操作で完了できる。さらに、CT6700/CT6701 より消磁・自動ゼロ調整シーケンスを改善して処理速度を上げているため、素早く消磁・自動ゼロ調整ができる。

3.5 警告機能

CT6710/CT6711 には次の警告機能を搭載している。

- オーバーロード (入力定格超過)
OVERLOAD LED が高速で点滅
- 中継ボックス内部の温度超過
OVERLOAD LED が高速で点滅
- ジョーのロック解除
JAW UNLOCKED LED が点灯

異常を検知すると LED ランプが点滅または点灯し、ユーザーは異常に気づくことができる。

3.6 保護モード

CT6710/CT6711 は 3 レンジで構成され、レンジごとに最大定格電流が規定されている。想定外の入力、誤使用などで、規定電流レベルを超過したまま測定対象にクランプしたプローブを放置されることが想定される。このような測定を継続した場合、電流検出抵抗などが発熱し、機器の故障、やけどのおそれがあり危険である。CT6710/CT6711 は基板に温度 IC を搭載して内部温度を監視している。規定の温度を超えた場合、発熱が最も低い内部構成に直ちに移行して発熱量を抑える保護モードを搭載している。

3.7 脱着が簡単な出力端子

CT6700/CT6701 に搭載している BNC 機構を採用し、出力端子は、波形観測機器の BNC 入力端子に簡単に脱着できる。接続するときはターミネーションボックスを押し込むことによりロックされる。外すときはレバーを引きながらターミネーションボックスを引けば、ロックが外れる。

また、BNC 入力端子側のシェル部には、バヨネットロックのために一對の突起物 (スタッド) が設けられており、波形観測器ごとに向きが異なる。このスタッドが水平または垂直方向のどちらの向きに固定されている場合でも、ターミネーションボックスの向きを変えずに接続できる。

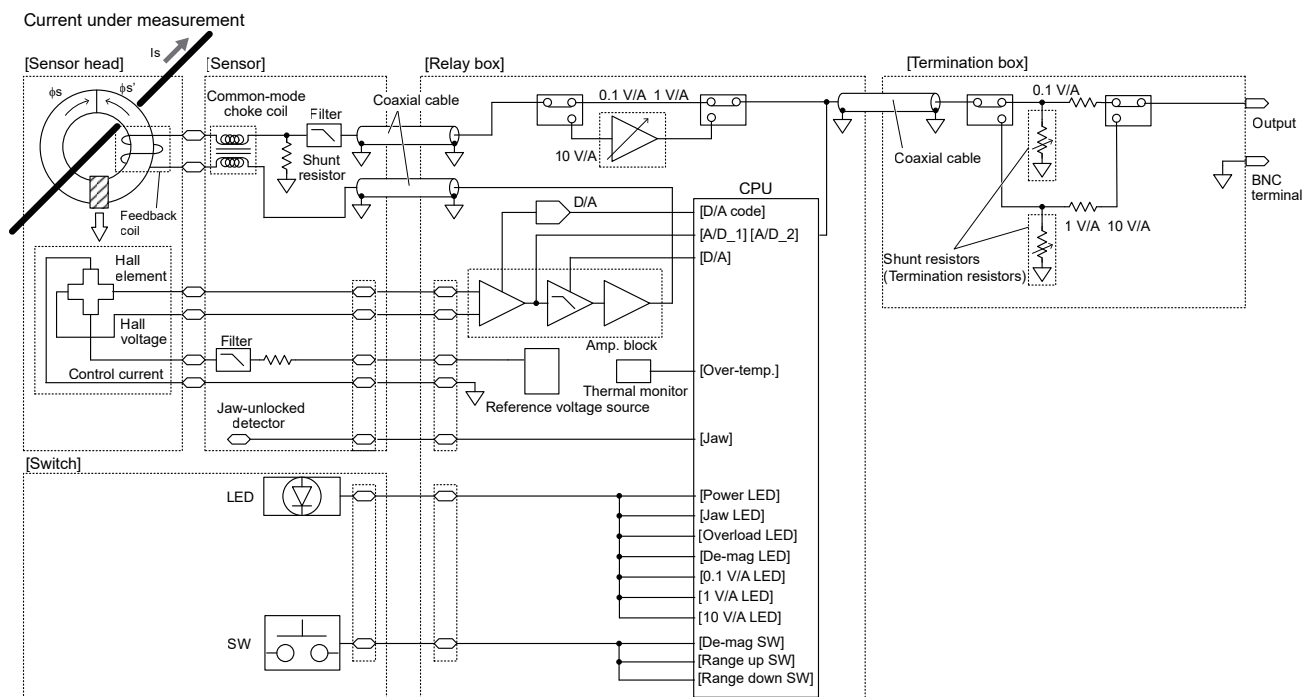


図2 回路ブロック図

4. 構成

4.1 回路構成

CT6710/CT6711 の回路ブロック図を図2に示す。

(1) 動作原理

CT6710/CT6711 は 3273-50/3274/3275/3276/CT6700/CT6701 と同様、薄膜ホール素子を使用した AC/DC ゼロフラックス方式の電流プローブである (図3)。ゼロフラックス方式では磁気回路を含めて負帰還回路が形成されているため、動作磁束レベルを極めて小さく抑えることができる。したがって、磁気コアの非直線性の磁気特性による影響を小さく抑えることができる。そのため、直線性、測定範囲、感度、周波数特性などにおいて優れた特性を持っている⁴⁾。

(2) 回路構成の特長

回路構成の特長は以下のとおりである。

- 消磁・自動ゼロ調整機能の搭載
- さまざまな警告機能を内蔵
- 低ノイズの負帰還回路
- 複数の出力レートを実現する回路構成
- 負帰還系と出力系の分離による発熱対策
- 広帯域特性を実現する信号伝送回路

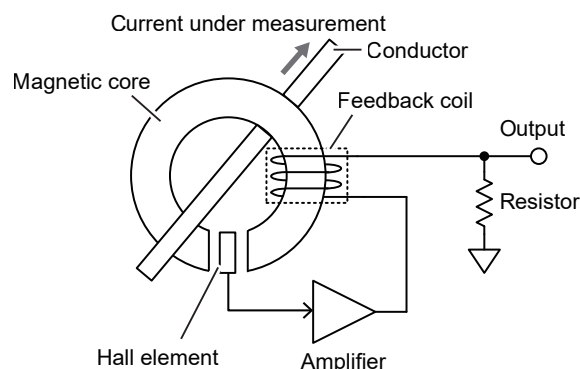


図3 動作原理図

CT6710/CT6711 の最大の特長である3つの出力レートは、次の2つの複合により実現できた。

- 電流検出抵抗を大電流用と低電流用とで切り替え
- 高速増幅器により出力信号を増幅

CT6710/CT6711 は最大1 A 程度の帰還電流を必要とするため、回路で発生する熱損失も大きい。機器の温度上昇を抑えるために、主要な発熱源となる負帰還回路系と電流検出抵抗を分離した構成にしている。

また、外来電磁ノイズ、被測定系からの外来ノイズ電圧などの対策として、シールド構造、フィルタリング、グラウンド処理などを最適化している。

電流プローブ CT6710/CT6711

(3) 負帰還回路

負帰還回路の構成は、従来製品（CT6700/CT6701）とほぼ同じである。

(4) 伝送回路

広帯域特性を実現するためには、ケーブルなど伝送線路の特性インピーダンスとの整合を考慮し、終端抵抗値を設計しなければならない。しかし、センサーヘッドが3レンジで共通のため、センサー内部の巻線のターン数を変えずに出力レートを切り替える必要がある。つまり、終端抵抗を切り替えなければならず、インピーダンスの整合ができないレンジが存在してしまう。これを改善するために、伝送特性への影響が大きい高域周波数帯だけのインピーダンス整合回路を設け、広帯域でフラットな周波数特性を実現した。

また、3レンジ間の周波数特性をそろえることで、レンジ間の誤差を小さく抑えた。これにより、ステップ応答などに代表される過渡応答観測で、どのレンジでも同様な波形を取得できる。

(5) デジタル回路

CT6710/CT6711は簡単なキー操作で、消磁・自動ゼロ調整機能の実行、および電流レンジの切り替えができる。また、各レンジの定格入力電流を超えた場合に警告するためのオーバーロード検知機能、ジョーがロックされていないことを警告するためのジョーロック解除検知機能を併せて搭載している。

● 消磁・自動ゼロ調整機能

DEMAG/AUTO ZERO キーを長く押す(約1秒)ことで消磁と自動ゼロ調整を続けて実行できる。また、短く押すことで自動ゼロ調整だけを実行できる。いずれも、3つすべてのレンジに対して実行されるため、どのレンジで実行してもよい。

(a) 消磁機能

大電流を測定したときに、磁気コアが帯磁し測定値のオフセットが生じるため、この帯磁を除去する機能である。帯磁を除去するには十分なレベルの消磁信号を磁気コアに注入する必要があるため、負帰還増幅回路中のアナログスイッチで一時的に負帰還を切断し、30 A レンジで消磁電流を発生している。

(b) 自動ゼロ調整機能

CPU に内蔵されている A/D コンバーターに

よって基準となるゼロレベルを測定し、出力レベルがゼロになるように D/A 変換器出力を制御することで自動ゼロ調整を行っている。3つすべてのレンジのゼロ調整と消磁を短時間で行うために、実行シーケンスを最適化している。

● オーバーロード検知機能（定格超過）

従来製品（CT6700/CT6701）と同様のオーバーロード検知機能を採用している。過入力時に OVERLOAD LED が高速で点滅することでユーザーに注意を喚起する。

● オーバーロード検知機能（温度超過、保護機能）

測定レンジの誤設定などで、レンジの定格を超える電流の測定を継続したときや、高温環境での連続測定により、機器の温度が高くなることが想定される。機器の故障を防ぐために、機器内部の温度を温度 IC で監視し、規定の温度を超えた場合に LED が高速で点滅する。さらに、電流測定を継続することで温度が上がり続けることを防ぐため、測定動作を発熱が最も低い内部構成に直ちに移行し、発熱量を抑える保護機能を搭載している。

● ジョーロック解除検知機能

従来製品（CT6700/CT6701）と同様のジョーロック解除検知機能を搭載している。

ジョーがロックされていない場合は、JAW UNLOCKED LED が点灯し、ジョーがロックされると LED が消灯する。

4.2 センサーヘッド部

電流検出部である上下センサーヘッドの構造は従来製品（CT6700/CT6701）と共通で、フェライトコア、その空隙部に搭載した薄膜ホール素子、巻線、シールドケースなどから構成されている。

これらの部品を使用して磁気コア部分を組み立て後、シールドケースに収めてエポキシ樹脂を充填し、硬化している。その後、上下センサーヘッドの突き合わせ面を研磨している。

4.3 開閉機構とターミネーション部

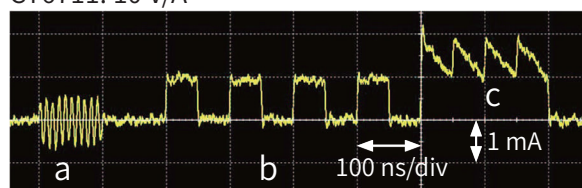
センサー部の構成および開閉機構、ターミネーション部は従来製品（CT6700/CT6701）と共通である。

5. 諸特性

5.1 低電流の観測波形

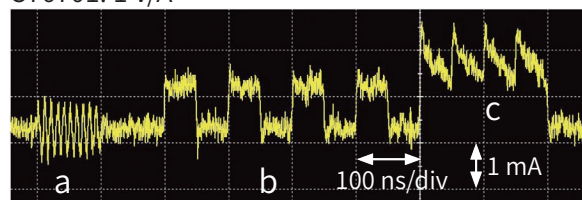
図4に、CT6711の10 V/Aレンジおよび従来製品（CT6701）による微小電流波形の観測波形を示す。CT6701では、出力レートが1 V/Aであるが、入力aの観測波形はデジタル・ストレージ・オシロスコープ（DSO）のノイズフロアに埋もれてしまっている。DSOの帯域を狭く設定することでノイズを低減できるが、応答性を悪化させてしまう。一方、CT6710/CT6711の10 V/Aレンジでは出力レートが10倍になるため、DSO側の測定感度を1/10に下げることができ、DSO自体のS/Nが改善される。すなわち、測定電流波形がノイズフロアに埋もれることがないため、DSOの帯域を狭く設定する必要が減り、微小・高周波の電流波形を観測できる。このようにCT6710/CT6711とDSOの組み合わせで、微小電流を観測できる。

CT6711: 10 V/A



DSO range: 10 mV/div

CT6701: 1 V/A



DSO range: 1 mV/div

入力 a : 1 mA p-p 100 MHz 正弦波
 入力 b : 1 mA p-p 10 MHz 矩形波
 入力 c : 2 mA p-p 20 MHz のこぎり波

図4 低電流の測定例

5.2 周波数特性

図5にCT6710の周波数特性、図6にCT6711の周波数特性を示す。3レンジ間の誤差が小さく、広い周波数帯域を持っている。

5.3 リニア特性

図7から図9に、CT6711の入力電流に対する出力電圧のリニア特性を示す。

- 出力レート 0.1 V/A（図7）

10 Aまで良好なりニア特性である。10 A以上のリニア特性は、センサーヘッドの構造に起因し、10 Aまでの特性と異なる。これは、CT6710/CT6711の最大の特長である高出力レートの有効性を高めるため、微小電流測定時の再現性と外部磁界の影響低減を重視した構造にしたことによる。

- 出力レート 1 V/A および 10 V/A（図8、図9）
 DC, AC ともに入力電流レベルに依存せず、良好なりニア特性である。

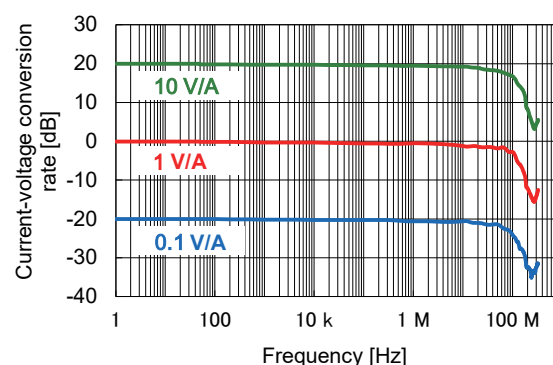


図5 周波数特性（CT6710）

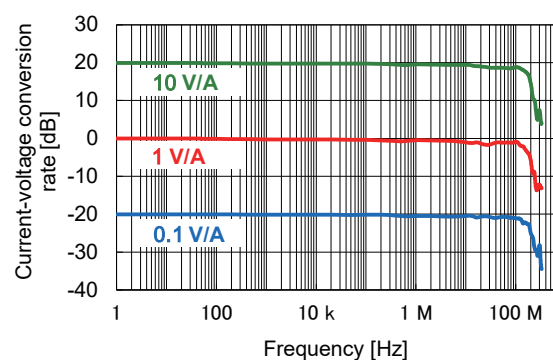


図6 周波数特性（CT6711）

電流プローブ CT6710/CT6711

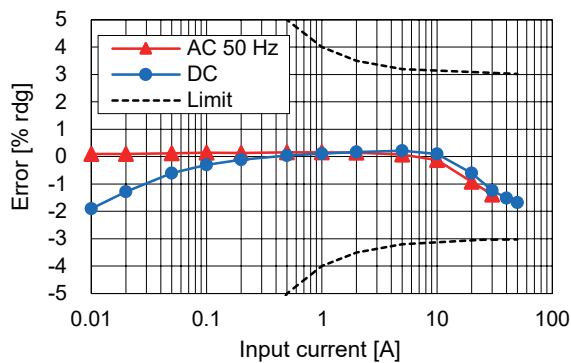


図7 リニア特性例 (CT6711 0.1 V/A)

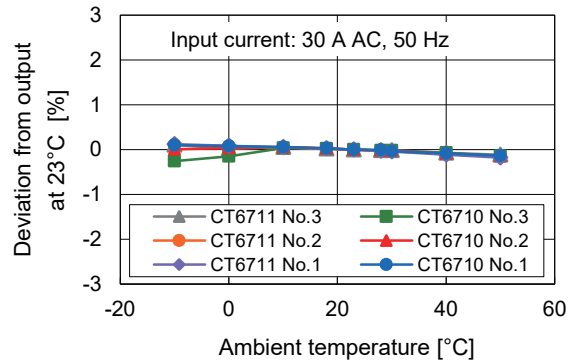


図10 感度の温度特性例 (0.1 V/A)

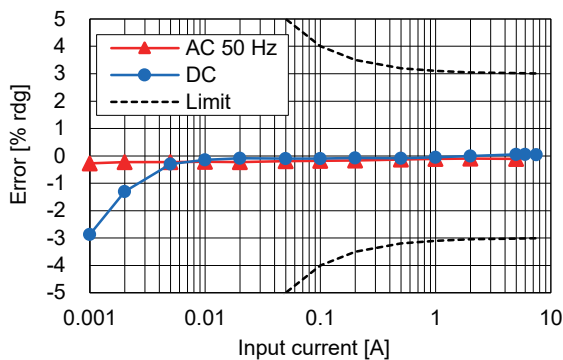


図8 リニア特性例 (CT6711 1 V/A)

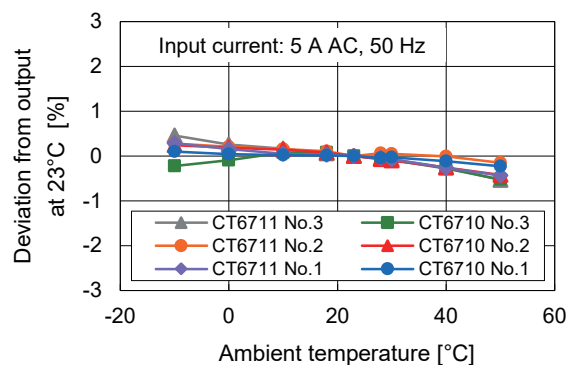


図11 感度の温度特性例 (1 V/A)

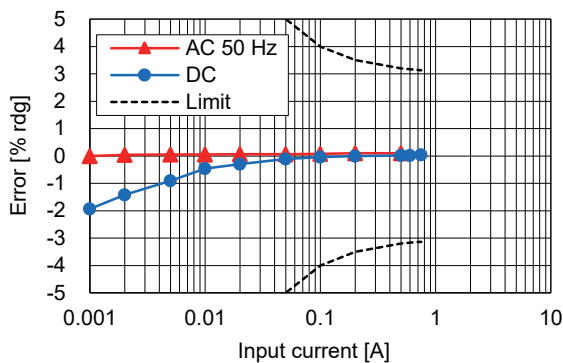


図9 リニア特性例 (CT6711 10 V/A)

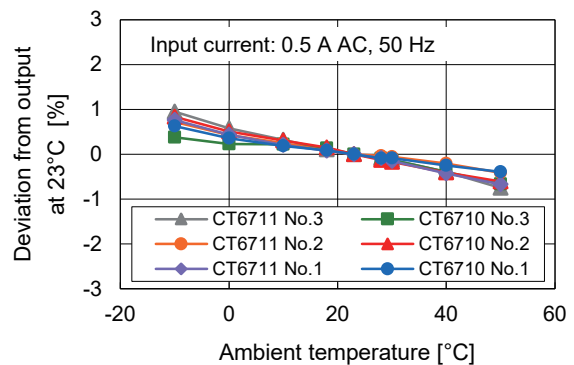


図12 感度の温度特性例 (10 V/A)

5.4 感度の温度特性

CT6710/CT6711の感度(出力レート)は、図10、図11、図12のように周囲温度の影響を受けて変化する。

5.5 導体位置の影響

図14、図15、および図16に導体位置の影響を示す。図中のAからGまでの文字は、図13に示したクランプ窓中における導体の位置を表す。2次巻き線を工夫したことにより、導体位置による測定値への影響は小さい。

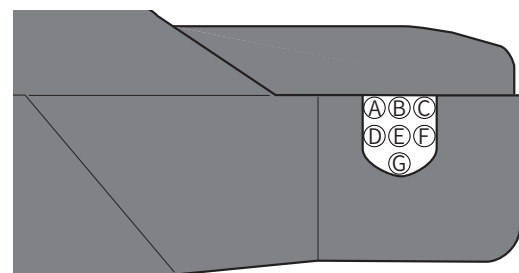


図13 導体位置

電流プローブ CT6710/CT6711

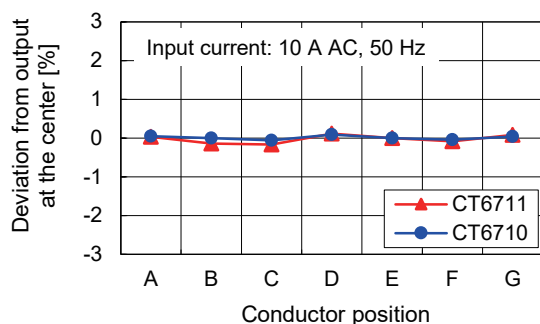


図 14 導体位置の影響 (測定例 0.1 V/A)

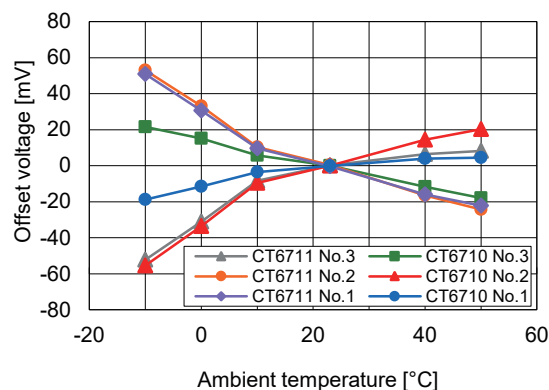


図 17 オフセット電圧の温度特性例 (1 V/A)

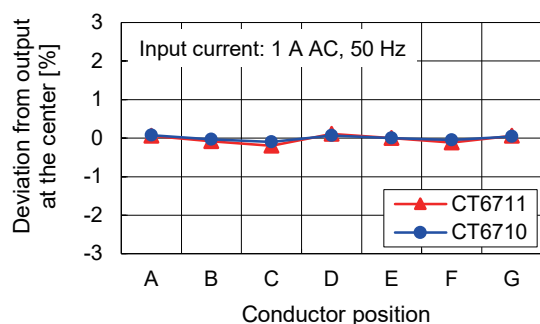


図 15 導体位置の影響 (測定例 1 V/A)

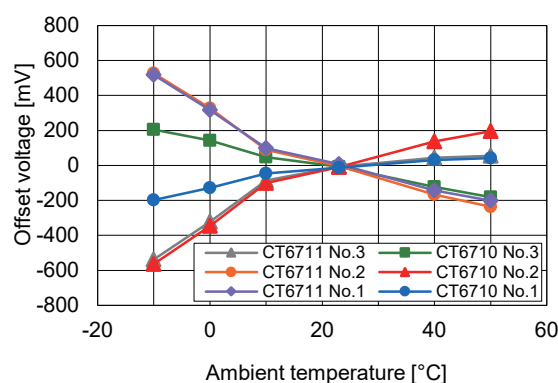


図 18 オフセット電圧の温度特性例 (10 V/A)

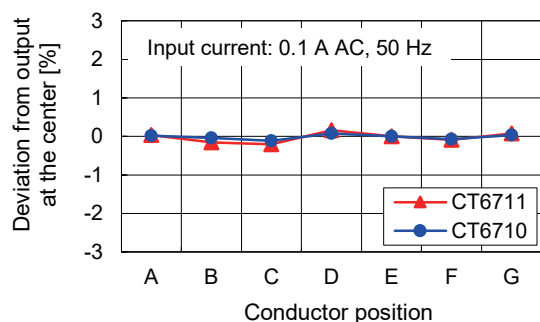


図 16 導体位置の影響 (測定例 10 V/A)

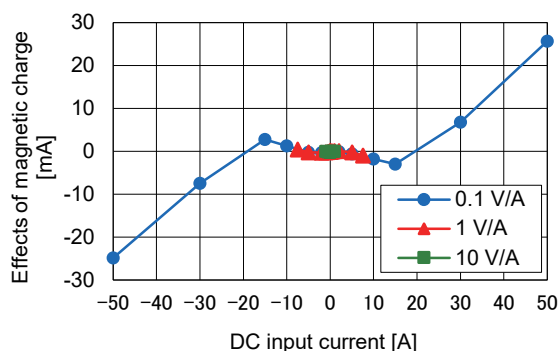


図 19 帯磁の影響 (CT6711 の測定例)

5.6 オフセット電圧の温度特性

オフセット電圧の主な発生原因はホール素子にある。ホール素子は半導体のため温度の影響を受けやすく、その特性は周囲温度によって変化する。図 17, 図 18 に特性例を示す。このオフセット電圧の変動量には個体差があり、ホール素子生成膜の状態に依存する。

5.7 帯磁の影響

磁気コアに使用されている磁性材料はヒステリシス特性を持つため、電流変化後の出力値はその影響を受ける。図 19 に DC 電流印加後の残留オフセット電圧の電流換算値を示す。これが帯磁の影響の例である。

5.8 挿入インピーダンス

図 20、図 21 に挿入インピーダンスの特性例を示す。クランプ式電流センサーも周波数が高くなるにつれ、被測定回路の負荷になることを示している。また、CT6711 は CT6710 と比較して挿入インピーダンスが低い特性を持っている。

5.9 外来ノイズ電圧の影響

図 22 に外来ノイズ電圧（コモンモード電圧）の影響の特性例を示す。クランプ窓部に配置した導体に加えた電圧 E と、それによる出力電圧 V_o との比である。

5.10 外部磁界の影響

図 23 に外部磁界の影響の特性例を示す。出力はすべて電流換算した値である。本測定で印加した磁界強度 H は地磁気の約 10 倍に相当する 400 A/m である。

5.11 周波数ディレーティング

電流測定時には自己発熱により内部や表面の温度が上昇するため、図 24、図 25 のように、周波数によって連続入力ができる最大電流値を定めている。ただし、これは雰囲気温度が 23℃、正弦波電流入力の場合における最大値である。測定電流波形に高周波成分が含まれている場合や環境温度が高い場合には、さらに内部や表面が高温になり、連続入力ができる電流値が小さくなる。

また、CT6710 と CT6711 ではセンサーヘッドが異なり、温度上昇は CT6711 の方が小さい。そのため、最大電流値は CT6711 の方が大きい。

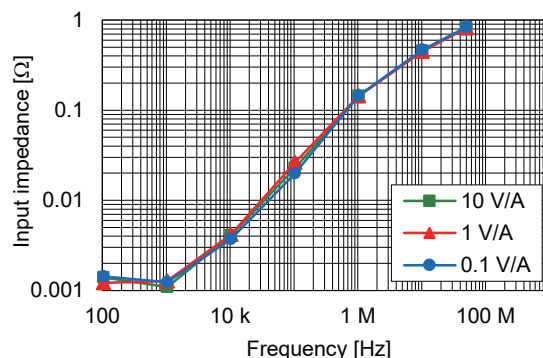


図 20 挿入インピーダンス特性例 (CT6710)

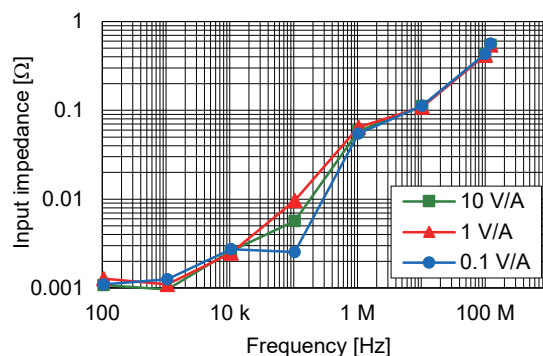


図 21 挿入インピーダンス特性例 (CT6711)

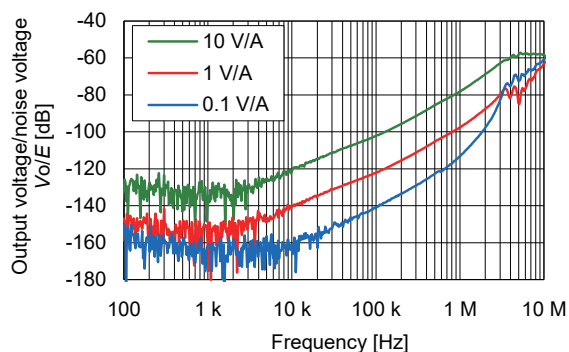


図 22 外来ノイズ電圧の影響 (CT6711 の測定例)

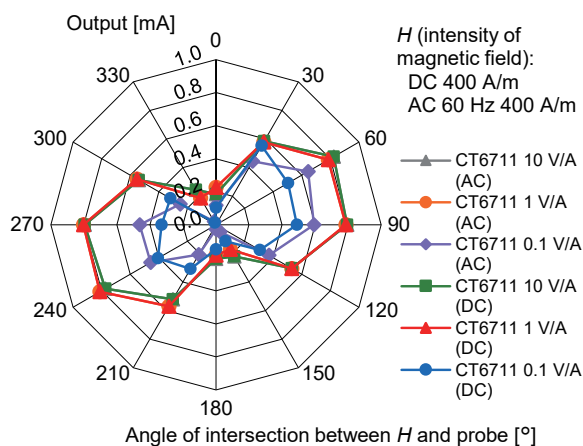


図 23 外部磁界の影響 (CT6711)

6. 計測事例

6.1 ECU・電装系の電流測定

自動車などの電装制御開発では、数 A の各種モーターの駆動電流、数十 A の突入電流、1 mA 程度の微小な制御信号や待機電流などのさまざまな電流を測定する必要がある。CT6710/CT6711 は、3つのレンジを搭載して測定範囲が広いので、1製品で多岐にわたる測定用途に対応できる。

6.2 ウェアラブルデバイスの消費電流測定

バッテリーで長時間動作するデバイスの開発では、アクティブ、スタンバイ、通信などのさまざまなモードの消費電流を測定する必要がある。CT6710/CT6711 は 10 V/A (100 μ A 当たり 1 mV を出力) の高い出力レートを持っており、100 μ A といった微小な電流変化も検出できる。

図 26 に、CT6711 で当社の温湿度センサ Z2011 の消費電流を測定した例を示す。図 27 に、その消費電流を当社のメモリハイコーダ MR6000 で観測した波形を示す。Z2011 は、センサー部で計測した温湿度データをシリアル通信によって測定器に送信している。CT6711 と MR6000 を組み合わせることで、コマンド送信や測定動作における 100 μ A の微小な電流変化も捉えることができる。

低消費電流が求められる機器では、処理動作に応じた消費電流の把握が重要である。CT6711 は、ウェアラブルデバイスの微小な消費電流の計測にも対応できる。

6.3 高速スイッチングデバイスの応答性能

GaN や SiC といった高速スイッチングデバイスの性能評価では、スイッチングノイズに影響されず、電流波形を正確にとらえる広帯域電流センサーが求められる。CT6710/CT6711 は、センサー部を電磁シールドすることで、周囲のスイッチングノイズや電流磁界の影響を受けにくい構造にした。そのため、電流波形を高い S/N 比で観測できる。シャント抵抗を使用した電流検出では、電圧検出プローブを接続する際に誤って測定回路を短絡する危険があるが、電流プローブはクランプ式（非接触）のため、安全に使用できる。

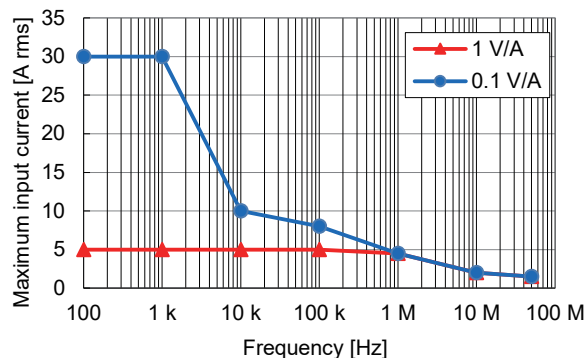


図 24 周波数ディレーティング (CT6710)

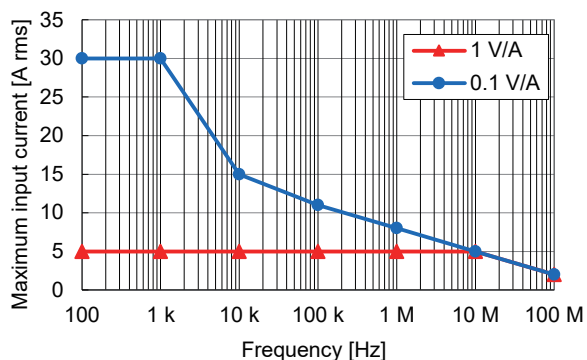


図 25 周波数ディレーティング (CT6711)



図 26 温湿度センサーの消費電流測定例

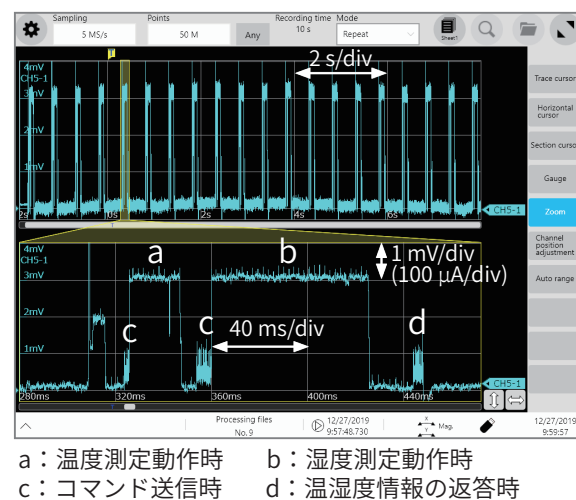


図 27 温湿度センサーの消費電流波形

電流プローブ CT6710/CT6711

図 28 に、ダブルパルス試験の代表的な回路例を示す。図 29 に、図 28 の「Clamp」と示した部分において CT6711 で測定した電流 I_d の波形を示す。スイッチングノイズの影響を抑えつつ、ターンオン、ターンオフ電流の波形を観測できる。

広帯域な電流センサーである CT6710/CT6711 は、高速でスイッチングするデバイスにおいても、高い S/N 比で観測できる。

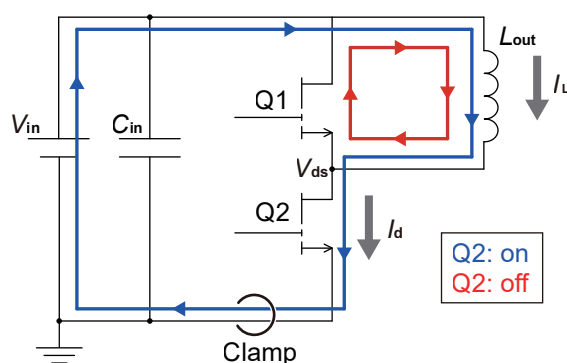


図 28 ダブルパルス試験の回路例

7. おわりに

より低い電流を観測できるようにするため、高い出力レートを含む 3 レンジの広帯域電流プローブを開発した。従来はノイズに埋もれて観測が困難であった微小電流波形の観測を、帯域制限を最小限に抑えながら観測できる。また、測定電流範囲も広いため、ウェアラブルデバイスの微小電流や電子機器の待機電流だけでなく、通常時の消費電流も 1 台のプローブで観測できるようになった。

電子機器などに求められる今後のさらなる省電力化、高効率化に向けた研究および開発において、広く活用されることを期待する。

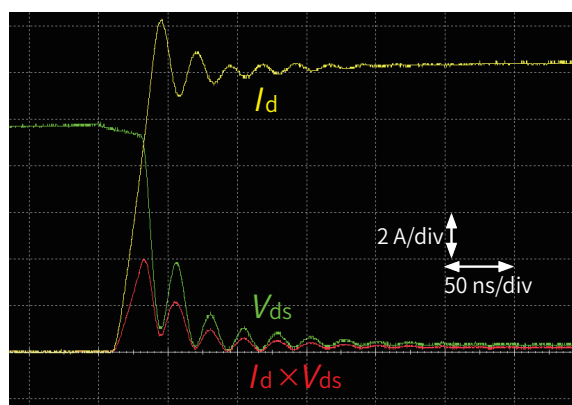


図 29 ターンオン損失の測定例 (CT6711)

小宮山 哲也^{*2}，外谷 彰悟^{*2}，横関 貴史^{*2}，
渡辺 英雄^{*2}，佐野 孝浩^{*3}，平林 明彦^{*3}，
原野 正幸^{*4}，増田 秀和^{*4}

参考文献

- 1) 平林明彦：3276 クランプオンプローブ，日置技報，VOL.25 2004 NO.1，47/51（2004）
- 2) 平林明彦：電流プローブ CT6700/CT6701，日置技報，VOL.37 2016 NO.1，59/66（2016）
- 3) 野村淳士：電流プローブ向け薄膜ホール素子の低ノイズ化，日置技報，VOL.36 2015 NO.1，11/12（2015）
- 4) 鈴木康文：零磁束制御型電流センシングシステムに関する研究，信州大学大学院工学系研究科博士論文（1994）

*2 イノベーションセンター AE ユニット

*3 イノベーションセンター 先行開発ユニット

*4 イノベーションセンター フィールドデザイン課