

プリント基板型電流センサを用いた電力計測

Electric Power Measurement using the Printed Circuit Board Type of Rogowski Coil Current Sensor

塩川 明実
Akimi Shiokawa

遠藤 淳平
Junpei Endo

宮村 雄介
Yusuke Miyamura

吉田 博
Hiroshi Yoshida

要 旨

新構造のロゴスキーコイル型電流センサを用い、全分岐回路の電力計測可能な住宅分電盤を開発した。電流センサは、プリント基板に形成した独自のコイルパターンで形成し、外乱磁界による耐ノイズ性を向上させた。また、センサの信号処理回路として、低ノイズ型CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 計装アンプを内蔵したカスタムICを開発した。電力演算用マイコンと同期動作させることにより、多回路計測可能な高精度の電力演算システムを構成し、複数のコイルパターンと処理回路をプリント基板に一体化設計して小型化を図った。これらにより、電流センサ、および電力計測回路部を分電盤内部に組み込むことができ、従来の電力計測システムで必要であった電流センサの施工を省くことができる。

Abstract

We have developed a new residential power distribution panel which can measure electric power at all branch circuits by using new Rogowski coil current sensors. This current sensor consists of a unique coil pattern formed on a printed circuit board, and it can achieve improved noise immunity performance by making use of a disturbance magnetic field. Furthermore, we developed a custom Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) IC with a low-noise instrumentation amplifier as a signal processing circuit of the sensor. We gave the electric measurement system an integrated design by carrying out synchronous operation with a microcomputer, and miniaturized the measurement circuit board. This electric power measuring system is easy to construct, and makes it possible to measure all the branch circuits of a residential power distribution board.

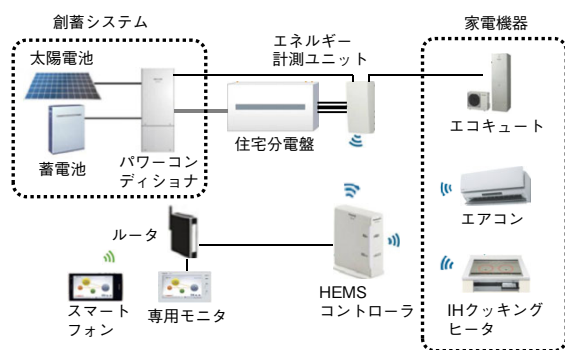
1. はじめに

省エネへの関心が高まるなか、HEMS (Home Energy Management System) の普及が加速し、より低価格での電力の見える化[1]の要求が強まっている。HEMSは、第1図に示すような機器で構成され、単なる無駄を省く省エネではなく、快適性を保ちつつ家全体のエネルギー利用効率を高め、インターネットと接続されることによりさまざまなサービスが提供される検討がなされている。

エネルギーの見える化のなかでも、電力の計測は特に重要で、家全体での計測にとどまらず、部屋ごとやエアコンなどの負荷機器ごとといった分電盤の分岐回路ごと

での計測が必要とされている [2]。従来のHEMS機器は、電流センサにCT (Current transformer) を用いていた [3] が、個別に施工が必要であるという課題があった。

これらの課題を解決するために、HEMSの用途に適した分電盤の全分岐回路を計測するプリント基板型の電流センサを用い、全分岐回路の電力演算を行うことができる多回路型の電力計測技術を開発した。この電力計測技術により低価格で電流センサ施工が不要で、全回路の電力計測が可能な電力計測システムを実現することができた。本稿では、そのプリント基板型電流センサを用いた多回路型の電力計測技術について解説し、技術優位性について示す。



第1図 HEMS構成

Fig. 1 Home energy management system

2. HEMSにおける電力計測目標

第1表に、電力計測部としての計測目標仕様を示す。

家庭内の電力計測における省エネ支援機器として、(一財)省エネルギーセンターでは電力計測が可能なモニタを「省エネナビ」として登録する制度がある。この「省エネナビ」への機器の登録条件として、電力計測精度が「 $\pm 5\%$ 以内であること」と明記されている[4]。本稿における電力計測精度もこの条件を満足する設定とした。

計測が開始可能な最小電力は、LED電球1個分の点灯／消灯を確認できるレベルとして5Wとした。

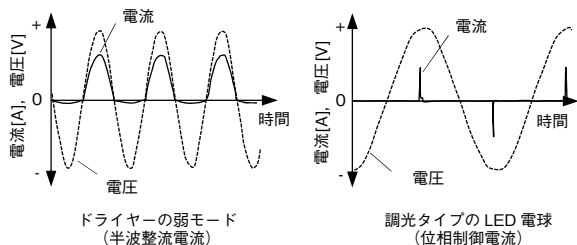
第1表 電力計測目標仕様

Table 1 Specification of watt meter

項目	仕様	備考
電力計測精度	±5 % (定格の5%~100%)	「省エネナビ」登録条件を参考
計測開始電力	5 W	LED電球1個相当
高調波機器対応	高次歪(ひずみ)電流(30次以上の高調波), 半波整流電流	調光型LED電球, ヘアドライヤー 弱モードなど
組み込み場所	分電盤の分岐回路, 配線器具(コンセント, テーブルタップなど)	住宅分電盤の場合, 最大40回路程度

近年、負荷機器内部の制御回路が複雑化しており、特に調光型LED電球の負荷電流は30次以上の非常に高い周波数を含む高調波電流が流れることがわかっている。また、ヘアドライヤーの弱モードなどにおいては、第2図に示すように半波整流された負荷電流が流れる。このように負荷機器の電流にはさまざまな波形形状、周波数成分を含む電流が流れ、電力計測は、これらの負荷機器でも計測できるようにする必要がある。

電力を計測する対象(機器)としては、分電盤の主幹回路や分岐回路の全回路の電力計測が可能なシステムを考える。



第2図 高調波負荷電流波形の例

Fig. 2 Harmonic current wave form

3. 電力計測システムの構成

3.1 従来の多回路型電力計測システム

電力計測は電圧と電流の積和演算で求まるが、構成要素としては、負荷機器に流れる電流を計測する電流検出部、線間の電圧を計測する電圧検出部、電圧と電流を積和演算する電力演算部から構成される。具体的には、電流と電圧のそれぞれのアナログ信号を所定のサンプリング周期でAD変換し、各値を乗算し積算するものであり、電力演算部は汎用のマイコンを用いソフトウェアにて演

算することが多い。

分電盤の分岐回路のような、多くの回路を計測できる電力計測システムを考える場合、各電流検出部で計測された信号の処理方法として、次の2構成が考えられる。1つは、各電流検出部からの出力信号をアナログ信号線で引き回して集約し、電力演算部で一括してAD変換し電力演算する構成。もう1つは、電流検出部にて、信号をデジタル化し、電流検出部と電力演算部間をデジタル伝送して電力演算部に送信する構成である。

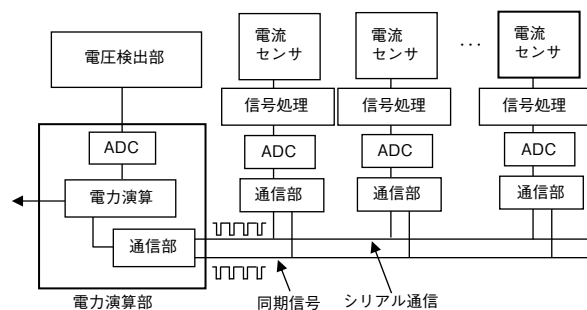
一般的に、前者の方がよく用いられるが、計測する回路数が多い場合、各電流検出部からの信号線の本数が多い、信号線の引き回しや、誤接続が課題となる。

3.2 本開発の電力計測システム

本開発では、上記観点から、第3図に示すように、後者のデジタル伝送方式を採用する。

本方式は、電流検出回路数が増えてもデジタル伝送による多重化が容易で、信号線を少なくできるメリットがある。また、デジタル処理による耐ノイズ性も期待できる。

一方、デジタル伝送の計測システムは、電力演算を行う際、電圧信号と電流信号のAD変換のタイミングを±10 μ秒以内に制御する必要がある。



ADC : Analog to Digital Converter

第3図 デジタル伝送式多回路電力計測システム

Fig. 3 Watt meter measurement system with serial communication

この課題を解決するため、同期信号を電力演算部から出力し、この同期信号に合わせて、各電流検出部でAD変換を実行するシステムとした。

[1] 電圧検出方式の選定

一般家庭における電源は、電力会社より、単相3線式100 V, 200 Vが供給される。この高い電圧を電力演算回路で演算可能な数百mV程度の電圧レベルまで降圧する手法として、PT (Potential Transformer) 式、抵抗分圧式がある。

PT式の場合、絶縁可能であるが部品が大きくなる。一方、抵抗分圧式は、高抵抗で電圧を分圧する方式で、チップ抵抗を用いて構成可能であることから、こちらが採用されることが多く、本電圧検出部においても抵抗分圧式を採用した。

〔2〕電流検出方式の選定

負荷電流を検出する電流センサは、CT、シャント、ログスキーコイルが用いられる。

設計上の扱いやすさからCTがよく用いられるが、鉄心によるコアを形成するの必要があり、電流センサが大きくなり、機器内蔵の際の妨げになることがある。

本開発では、通電回路との絶縁が取れ、かつ、薄型化が可能なログスキーコイル型電流センサを選定して検出を行った。詳細については第4章で述べる。

〔3〕電力演算部の方式

電力演算部は、電圧と電流を所定のサンプリング周期で量子化し積和演算する。

電力演算部には、電圧検出部、および電流検出での出力ばらつきに対応するため、製造工程でソフトウェアによるゲイン補正処理を行い精度調整する機能、計測結果を上位側に渡す通信処理機能を有する。

4. ログスキーコイル型電流センサ

4.1 ログスキーコイルの原理、特長

本電力計測システムのポイントとなるログスキーコイル型電流センサ（以下、RCセンサ）について詳述する。RCセンサは、交流の電流を検出するセンサで、進みコイルと戻しコイルから構成される空芯のトロイダル状の巻き線コイルである（第4図）。進みコイルと戻しコイルを有することにより、ログスキーコイルの内径を貫通する電線から発する磁界のみを検出する。ログスキーコイルの外側に配置される電線によるいわゆる外部磁界に対しては、進みコイルの出力と戻しコイルの出力が打ち消され、出力されない特長を有する。

$$E = \mu_0 NS(dI/dt) \dots\dots\dots (1)$$

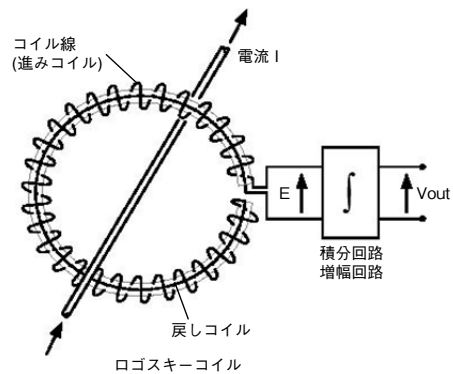
E：RCセンサ出力電圧

μ_0 ：真空の透磁率，N：単位長さ巻数

S：コイル断面積，I：通電電流

RCセンサの出力Eは(1)式で表され、通電電流の微分値(dI/dt)に比例して出力されるため、積分回路と組み合わせることで電流検出が可能となる。

RCセンサはCTと異なり、空芯のため磁気飽和がないので大電流計測が可能である特長を有する。



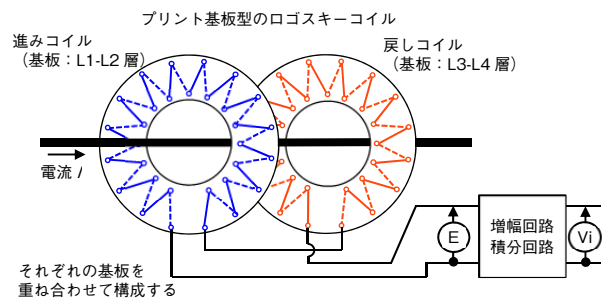
第4図 RCの原理構成

Fig. 4 Principle of rogowski coil

4.2 プリント基板型RCセンサ

ログスキーコイルは、コイル線を巻いて構成する巻き線式のほかに、プリント基板にコイルパターンを形成して構成することも可能である。巻き線式の場合はコイルの巻きムラによる外部磁界の影響や、生産性が悪いといった課題がある。一方、プリント基板（以下、PCB）では、コイルパターンの再現性、加工性がよく、外部磁界の影響を打ち消す効果の向上が期待できる[5]。

PCB型RCセンサも、進みコイルと戻しコイルを形成する必要がある。進みコイルと戻しコイルを両面基板でそれぞれ構成し、基板を張り合わせ、4層プリント基板として形成したRCセンサを、第5図に示す。このPCB型RCセンサに外部電線を近接させ、外部磁界による影響を検討した。

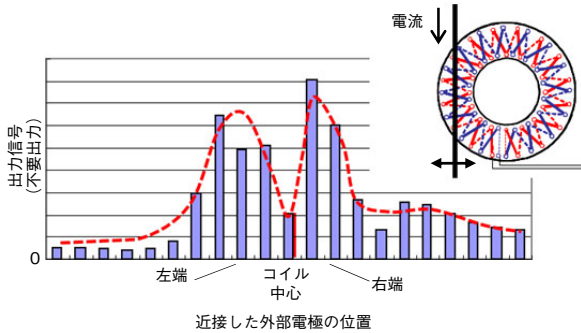


第5図 RC原理に基づくプリント基板試作コイル

Fig. 5 Traditional rogowski coil with printed circuit board

実験の結果、特にコイルの外周付近に電線を近接させた場合に影響が大きく、センサに貫通した電流通電時の出力の6.3%という大きな不要出力が見られた（第6図）。これは、進みコイルと戻しコイルの位置が、それぞれのコイルの基板の厚さ分ずれていることにより、外部磁界

による進みコイルと戻しコイルで検出されるそれぞれの出力が同じにならず、その差分が不要出力として出力されたものとする。進みコイルと戻しコイルは、基板の厚み方向に対して、そのコイルの中心位置を同位置に配置することが必要である。



第6図 外部電線を近接させた電流磁界による影響
Fig. 6 Influence of external current magnetic field

分電盤にこのRCセンサを内蔵する場合、RCセンサの直近に数十Aといった大きな電流が流れることがあり、計測する電流以外の磁界の影響を受けないようにする必要がある。

本稿の第2章で述べた分電盤などの機器への内蔵を考慮すると、外部磁界の影響はセンサに貫通した電流通電時出力の0.1%以下に抑える必要がある。

また、PCBにRCセンサを形成する場合、パターン設計上の制約からコイルの巻き数には上限があり、十分な出力を得ることができない。

RCセンサをPCBにて構成する場合、以下のような課題がある。

- ・ PCBにおいて、進みコイルと戻しコイルで外部磁界を打ち消すパターン構造が必要
- ・ コイルの出力電圧が、数 μ V程度で非常に微小であり、信号処理回路は、低ノイズ型増幅回路が必要

これらの課題の解決策について詳述する。

4.3 耐外部磁界コイルパターン設計

PCBで構成するRCセンサにおいて、外部磁界に強いコイルパターンの設計の考え方は、以下のとおりである。

- (1) 全周にわたり、貫通穴の中心軸を対象に同一パターンを繰り返す
- (2) 任意の位置から発せられる外部磁界において、進みコイルと戻しコイルの各々において、それぞれの磁束の鎖交する面積を同じとする
- (3) コイルの出力端から増幅回路までの外部磁界の影

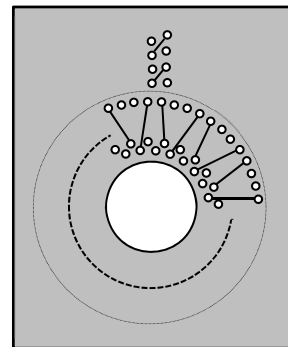
響を最小化する

この条件を満たしたRCセンサのコイルパターンを第7図に示す。

このRCセンサコイルは、4層のPCBで形成され、進みコイルだけではなく、戻しコイルもトロイダル状のコイル形状にし、進みコイル、戻しコイルを交互かつ中心軸を一致させて配置したコイル構造である。

S/Nを向上させるためには、コイルのターン数を増やす必要があり、コイルの内周部分において、スルーホールを交互にずらす工夫により、スルーホールを密集させ、コイルのターン数を増やした。

また、センサの出力部分から信号処理回路までのパターンにおいては、外部磁界の影響を抑えるために、ツイストペア状のパターンとした。



第7図 考案したプリント基板型ログスキーコイル
Fig. 7 New rogowski coil using PCB

このコイル構造のRCセンサにより、外部磁界の影響は貫通電流出力時の0.08%以下となり、対象とする内蔵機器における耐外部磁界性を有することができた。

4.4 RCセンサ用信号処理回路 (ASIC)

RCセンサの出力は、電流が微分されたものになるので、電流信号として取り出す場合、積分する回路が必要となる。

積分処理の方策はアナログ回路式とデジタル演算式に大別される。アナログ式の場合、抵抗とコンデンサで構成するため、各素子のばらつき、温度特性などにより、ゲイン、位相特性がばらつき課題があることから、デジタル演算式積分を採用して検討する。

第8図に、信号処理回路ブロックを示す。プリアンプ部、増幅部、AD変換部、フィルタ、そして伝送回路で構成される。

プリアンプ部は、RCセンサの出力信号が数 $\mu\text{V/A}$ と微弱なため、低ノイズ型の増幅回路との組み合わせが必要となる。RCセンサは、PCBのパターンでその出力インピーダンスは約 $5\ \Omega$ 程度であるが、PCBで形成されるため約 $0.4\%/^{\circ}\text{C}$ の温度特性を有する。センサの出力を受けるプリアンプ部は、この抵抗変化による影響を小さくするため十分大きなインピーダンスで受け、かつ入力部のDCオフセットが小さくできる低ノイズ型CMOS計装アンプ回路を採用する。

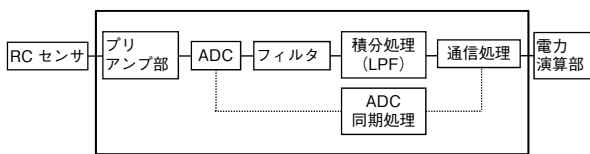
プリアンプ部、増幅部によるアナログ信号処理後、16 bit シグマ・デルタ型ADC (Analog to Digital Converter) により量子化を行い、積分処理を行う。

電圧と電流のそれぞれのAD変換のタイミングを図るため、電力演算部から同期パルスを出力させ、この同期信号に合わせてAD変換を行う。この方式により、電圧信号と電流信号のAD変換のタイミングを合わせることができ、高精度な電力計測が可能となる。

積分演算処理されたデータは、電力演算部へシリアル通信により伝送される。

上記スペックを満足し、分電盤などへの組み込みを容易にするため、ASIC (Application Specific Integrated Circuit) を開発した。

ASICは、110 nmのBiCMOS (Bipolar Complementary Metal Oxide Semiconductor) プロセスを採用し、消費電流を7.5 mA以下に抑えた。これにより、ASICを多数個使用するシステムにおいても電源回路への負担が軽減できるほか、さまざまな機器への内蔵が可能となる。



第8図 ASIC内部の回路ブロック

Fig. 8 ASIC block diagram

4.5 電力演算アルゴリズム

電力演算部は、電流検出部 (ASIC) からの電流計測値をシリアル通信により順次取り込み、電圧、電流の積和演算を行う。

電圧検出部、電流検出部には、電子部品のばらつきなどにより個体差があり、これらは電力計測精度を悪化させる要因となる。電圧検出部の場合、抵抗分圧回路の抵抗値のばらつき、電流検出部の場合、RCセンサのPCBの

厚さのばらつき、ASIC内部の増幅回路のばらつきなどがある。これらのばらつきを補正するため、個々の検出回路ごとにばらつきを補正するための補正係数を設置する。製造工程において、既知の電圧、電流を印加・通電した際のずれ分を補正係数として演算し不揮発性メモリに保存する。通常は、この補正係数を用いて電力演算を行うので、各回路のばらつきは補正され、所定の計測精度を確保することができる。

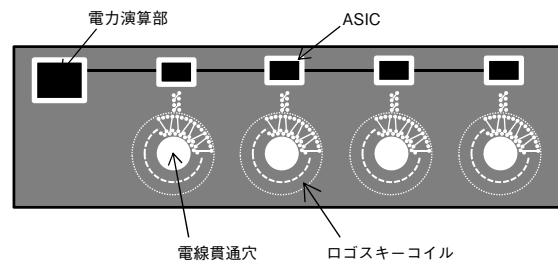
上記電力演算システムにより、目標とする電力計測精度 $\pm 5\%$ を達成することができた。

5. 電力演算システムの応用構成

本稿のRCセンサは、PCBで構成することができるため、下記の特長を有する。

- ・ RCセンサの貫通径を、搭載機器に合わせ設計可能
- ・ 多回路にRCセンサを一体化した基板設計が可能
- ・ 機器内蔵の別の回路基板との共有設計が可能

上記の特長を生かし、複数回路の電流検出部、電力計測部を一体化した電力計測基板ブロックを、第9図に示す。この電力計測基板ブロックは、複数個のRCセンサ、ASIC、そして電力演算用のマイコンで構成される。本電力計測基板ブロックは、厚さ4 mm~5 mm程度に薄型化できるので、分電盤の分岐ブレーカの1次側にも内蔵でき、製造工場での組み込みが可能となる。



第9図 複数の回路を一体化した電力計測回路基板

Fig. 9 Power measurement PCB with rogowski coil sensor

従来構成[3]のCT方式の場合、住宅の施工現場にてCTに電線を貫通させる必要があったため施工時間がかかっていた。本RCセンサでは、この作業が不要となるため、施工時間が短縮されるほか、作業ミスもなくなるといった効果も奏する。

RCセンサのコイルは、前述したように内蔵する機器に合わせた設計ができるとともに、それぞれの機器に最適な計測部の設計が可能となるほか、RCセンサが搭載され

る同一基板上に、無線やPLC (Power Line Communication) などの通信機能を搭載することにより、より多機能な電力計測部を構成することも可能である。

6. まとめ

プリント基板型のログスキーコイルセンサと、低ノイズで信号増幅しデジタル積分処理が可能なASIC、そして汎用CPUを用いて電力演算を行う多回路型電力計測部を開発した。

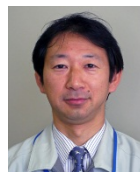
ログスキーセンサを分電盤などに内蔵した際に課題となる外部磁界の影響を独自のコイルパターンにより低減させることができ、分電盤や配線器具、家電機器などへの電力計測が可能となる。

本計測システムを用いることにより、従来電流センサにCTを用いていた際に課題であったCTの施工を削減できるので、施工時間を大幅に短縮することができる。

参考文献

- [1] 経済産業省, “エネルギー白書2006年版,” http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2006pdf/whitepaper2006pdf_2_suisin.pdf, p. 61, 参照 Apr. 21, 2014.
- [2] 笠井秀樹 他, “ワイヤレス多回路電力計測システム,” 電気評論, vol. 97, no. 3, pp. 34-37, 2012.
- [3] 辻本郁夫 他, “創蓄・家電機器連携対応ホームエネルギーマネジメントシステム,” 電気評論, vol. 98, no. 3, pp. 46-49, 2013.
- [4] (一財)省エネルギーセンター, “「省エネナビ」名称使用機器の募集と共同広報のご案内,” <http://www.eccj.or.jp/navi/intro/publicity.html>, 参照 Apr. 21, 2014.
- [5] L. A. Kojovic, “PCB rogowski coil designs and performances for novel protective relaying,” IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet., vol. 2, pp. 609-614, 2003.

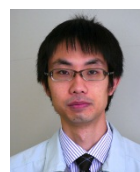
執筆者紹介



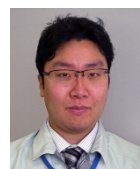
塩川 明実 Akimi Shiohara
エコソリューションズ社
エナジーシステム事業部
Energy Systems Business Div.,
Eco Solutions Company



遠藤 淳平 Junpei Endo
エコソリューションズ社
エナジーシステム事業部
Energy Systems Business Div.,
Eco Solutions Company



宮村 雄介 Yusuke Miyamura
エコソリューションズ社
エナジーシステム事業部
Energy Systems Business Div.,
Eco Solutions Company



吉田 博 Hiroshi Yoshida
エコソリューションズ社
エナジーシステム事業部
Energy Systems Business Div.,
Eco Solutions Company