# ワイアレス通信機能付き多回路電力計測ユニット

Multi-Circuit Power Monitor Unit with Wireless Communication Function

| 塩川   | 明実* ·      | 笠井     | 秀樹*   | • | 茂住     | 厳*    | • | 水野      | 洋二** | • | 湯浅      | 裕明**  |
|------|------------|--------|-------|---|--------|-------|---|---------|------|---|---------|-------|
| Akim | i Shiokawa | Hideki | Kasai |   | Gon Mo | ozumi |   | Yoji Mi | zuno |   | Hiroaki | Yuasa |

ー般家庭における主幹回路や太陽光発電等の電力を計測し,無線接続した別場所のモニタに表示可能 な多回路電力計測システムを開発した。

このシステムの多回路電力計測ユニットにおいては,計測に用いる各電流センサで生じる固有な位相 ずれをソフトウェアで処理することで移相フィルタ回路を不要とし,その構成部品個体差による影響を 低減している。また,住宅用分電盤に接続されている電線等による受信感度の低下に対しては,アンテ ナにダイバーシティー方式を採用することで信頼性の高い通信を実現している。

A multi-circuit power monitor unit has been developed that is capable of measuring the home electrical power in main circuits and solar power output and features wireless communication with a monitor in a separate location.

In the developed power monitor unit, calculating the specific phase shift, which is generated by each sensor used for current measurement, with software has achieved to omit the phase-shift circuit, thus the error caused by the variation of components has been mitigated. Receiver sensitivity degradation caused by wires connected to home distribution panel has been overcome by adopting a diversity antenna, thus highly reliable wireless communication has been achieved.

# 1. まえがき

地球温暖化は着実に進んでおり,このまま進むと異常気 象や感染症の拡大など,深刻な問題が発生すると予測され ている。この地球温暖化への影響度が大きいのが大気中の 二酸化炭素であり,産業革命以降は化石燃料の使用が増え, その濃度も増加しており,世界中で対策が求められている。

このような背景のなか,産業部門では省エネルギー活動 が進み,近年は二酸化炭素の排出量もほぼ横ばいとなって いるが,家庭部門を含む民生部門では年々増加の傾向と なっている。家庭において省エネルギーを進めるには,ま ずエネルギーの使用の実態をつかむために,子供から大人 までだれにでもわかるようにエネルギーの見える化が必要 となる。また,住宅の省エネルギー化は,新築のみならず 既築についてもリニューアルを行うことによって進めてい かなくてはならない<sup>1)</sup>。

しかし既築への対応となると,計測器の設置スペースや 計測器とモニタ間の通信線の施工がしにくい等の問題が あった。 そこで筆者らは、分電盤または分電盤の横に設置された ボックスに内蔵でき、主幹回路だけでなく、「エコキュー ト\*1)」等主要負荷機器や太陽光発電などの複数回路の電 力が計測でき、また計測した情報をワイアレス通信で別置 きのモニタに表示して電力の使用状況が見える化できるワ イアレス通信式多回路電力計測システムを開発した(図 1)。これにより、既築住宅への対応も容易となり、住宅に おける省エネルギーを促進させることが可能となる。

本稿では,ワイアレス通信機能付き多回路電力計測ユ ニット(以下,計測ユニットと記す)の電力計測部と無線 通信部について述べる。

<sup>\*</sup> 情報機器事業本部 情報機器R & Dセンター Research & Development Center, Information Equipment & Wiring Products Manufacturing Business Unit

<sup>\*\*</sup> パナソニック電工電路株式会社 Panasonic Electric Works Denro Co., Ltd.



(a) 計測ユニット

図1 ワイアレス通信式多回路電力計測システム

# 2. 開発目標と技術課題

## 2.1 開発目標

計測ユニットの電力計測部および無線通信部の開発目標 を**表1**に示す。

|          | 項目     | 仕様                             | 備考              |  |  |
|----------|--------|--------------------------------|-----------------|--|--|
|          | 主幹部    | 1 ¢ 3 W 100 A 分割式CT            |                 |  |  |
|          | 太陽光発電部 | 1 ¢ 2 W 100 A 貫通式CT            |                 |  |  |
| 計測       | 外部発電用  | 1 ¢ 2 W (AC 200 V) 100 ACT     | 「エコキュート」用       |  |  |
| 江禄       | 測定回路数  | 8                              |                 |  |  |
|          | 計測精度   | ±5 %(力率 1)<br>(定格の 5 ~100 %)   |                 |  |  |
| 通信<br>仕様 | モニタ間   | 特定小電力無線(429 MHz)<br>(見通し100 m) | 通信頻度<br>1 回/5 s |  |  |
| 寸法       |        | 50×225×49 (mm)                 |                 |  |  |

表1 開発目標

#### 2.2 技術課題

開発目標の達成には、次の技術課題がある。

(1) 電力計測部

電力計測を行う場合. 電圧と電流を計測する必要があ るが、電流センサ(以下、CTと記す)の出力には位相 ずれが生じる。この位相ずれは電力計測に誤差を発生さ せるため、従来は移相フィルタ回路を別途設けて補正し ていた。しかし、この移相フィルタ回路は約60個の電 子部品で構成されており、その個体差の影響を排除する 必要がある。

(2) 無線通信部

マルチパスによる受信レベルの変動や、住宅分電盤に 内蔵することによってアンテナが周辺の影響を受け、受 信レベルが劣化して通信距離を満足できなくなる。そこ でこれらの影響による劣化を防ぐ必要がある。

次章より、それぞれの課題に対する解決策について述べ る。

## 3. 多回路電力計測部

## 3.1 従来の電力演算回路ブロック

図2は、従来の8回路の計測が可能な電力演算部のブ ロック図である。電圧検出回路部(減衰器,移相フィルタ)、 電流検出回路部 (CT,回路切替器,可変増幅器),そして 電力演算を行うマイクロコンピュータで構成される<sup>2),3)</sup>。



図3に移相フィルタ回路を示す。移相フィルタ回路は、 OP アンプ,コンデンサ,マルチプレクサ,抵抗等から構 成されている。CT は定格電流ごとに位相ずれが異なるた め, 各 CT に合わせて位相補正を行っている。さらに, 高 調波電流に対する移相フィルタの周波数特性も考慮してい る。



図3 移相フィルタ回路

#### 3.2 位相ずれ量と電力演算誤差の関係

表2に、CTの定格電流別の位相ずれを示す。たとえば、 50 A CT の場合、位相の進みが 1.85°である。このときに 力率が 0.5 の場合. 電力演算の誤差率は 5.59 %となり影響 が大きい。

電力計測精度の目標値を満足させるためには、計測回路 部の部品およびセンサの出力ばらつきや位相ずれ、マイ

クロコンピュータでの積和演算による誤差を考慮すると、 CT の位相ずれによる誤差率を 0.3 %以下とする必要があ る。

| CT定格(A) | 5     | 50    | 100   | 250   | 400   | 600   |  |  |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|--|
| 位相ずれ(°) | +0.12 | +1.85 | +0.93 | +0.81 | +0.22 | +0.20 |  |  |
|         |       |       |       |       |       |       |  |  |

#### 3.3 電圧・電流AD変換の時間差取込式位相ずれ補正

従来の移相フィルタ回路による位相ずれ補正機能は,電 圧と電流を位相ずれに相当する時間差を設けて取り込み処 理する方法によっても達成できる。

その考え方を図4に示す。CT の位相ずれ特性が進み位相の場合,図のように電流の検出信号がCT の位相ずれ分進む形となる。



図4 CTによる位相ずれ

電力演算を行う際,電流と電圧の AD 変換を連続して行うが,CT の位相ずれの時間と電流と電圧の AD 変換の時間差(△t)を同じとすれば,実質上,電流と電圧の値を同時に取得したことになる(図5)。

たとえば, **50 A CT** では位相の進みが 1.85°あることから, 電源周波数が **60 Hz** の場合は, △t を 85.6 µs として 電流, 電圧の順で取り込めばよい。



#### 3.4 AD変換の時間差の制御目標

CTには貫通式と分割式の2種類があり、分割式のほう

14 パナソニック電工技報 (Vol. 59 No. 3)

が位相ずれは大きい。分割式 CT の場合は,約3°のずれ が発生する。そこで設計上,最大4°までの位相ずれを考 慮すると,位相ずれの時間は最大185 µs(電源周波数60 Hz 時)となる。したがって,この時間範囲内で△tの制 御を行う。△tの設定分解能は,電力演算精度への影響を 前述の0.3%以下に抑えるため,5.5 µs 以下で設定できる ものとする。

このように, ⊿tの制御が可能なアルゴリズムをソフト ウェアで実現する。

#### 3.5 多回路電力演算アルゴリズム

計測する 8 回路の電力演算を可能とするため,演算処理 としては,各 CT を所定のサンプリング周期にて順次回路 を切り替え,電流と電圧を AD 変換取得し,各値を積和演 算する。演算処理の負荷を軽減するため,回路 1~4と回 路 5~8 で所定の周期期間を割り当て,交互に AD 変換, 電力演算を行う<sup>2)</sup>。

#### 3.6 2回路並列処理の電力計測アルゴリズム

電力計測を従来のように逐次処理する場合,電流と電圧 の AD 変換および積和演算等を所定時間(⊿ tk)内に完了 する必要がある(図 6)。

しかし, △tk がシステム設計上 130 µs と設定されてい るのに対して, △t は最大 185 µs まで大きくなる可能性が あり, この方法では電力計測が完了しなくなる。



そこで筆者らは、この問題を解決するため、複数回路の 計測を並列処理するアルゴリズムを考案した。具体的には、  $\Delta t$ の最大値である 185  $\mu$ s よりも大きくなる 2 回路分の時 間 260  $\mu$ s (2 ×  $\Delta$  tk) で、2 回路分の電流と電圧 AD 変換 と積和演算の順序を工夫する。

図7に, その手順を示す。接続するCTの位相ずれ特 性に応じて, 回路1においては⊿t1, 回路2では⊿t2の AD変換の時間差が設定される。回路1の⊿t1の時間内に 回路2の計測を開始して並列処理することで、目標とする 260 µs 以下で2回路分の計測が可能となる。



図7 2回路並列処理で計測する場合

#### 3.7 電力演算精度の評価

2回路並列処理の電力計測アルゴリズムの計測精度の評価を行う。CTは比較的位相差が大きい50A定格の分割式を使用する。

計測の結果,力率0.5のときでも電力演算誤差率2.5 % 以下であることが確認できた。

#### 4. 高信頼性無線通信

屋内環境では、電波の反射や透過により複数の電波が受 信点で重なる現象(マルチパスフェージング)が発生する。 また、計測ユニットが分電盤やリニューアルボックスに内 蔵されることで、周辺設備の影響を受けて方向によっては アンテナ利得が劣化する現象が発生する。

これらに対し,複数のアンテナを利用するダイバーシ ティー方式により改善を図る。ダイバーシティーは計測ユ ニットに実装し,受信時に動作させ,より受信レベルの高 いアンテナを選択する。

#### 4.1 周辺設備の影響

周辺設備の影響とは、ブレーカ、これに接続される電源 線、CTケーブルなど、設備の構成要素による影響のこと である。図8に、改善前の分電盤背面の電源線による影響 事例を示す。ブレーカに接続される電源線のアンテナ放射 パターンに与える影響が大きく、分電盤背面方向にはヌル 点が発生している。



図8 分電盤組込時のアンテナへの影響例

#### 4.2 ダイバーシティー

アンテナの放射パターンは,現場の周辺環境により変 る。給電点が異なるアンテナは周辺設備の影響による放射 パターンがそれぞれ変るため,ダイバーシティーで補間し 合って対応できる。

図9に事例として,計測ユニット単体の場合と,分電盤 組込時の周辺設備の影響を受けた場合における,二つのア ンテナの放射パターンを示す。受信レベルが高いほうを選 択し続ければ,周辺設備の影響の問題を解決できる。



図9 周辺設備の影響と放射パターンの事例

ダイバーシティーには大別して,切替型,選択型,合成 型の3種類がある。

切替型は,アンテナ数にかかわらず無線部回路が一つで 済みもっとも低コストであるが,切替先のアンテナの受信 レベルが低くなる場合がある。

また,合成型は通信の信頼性が高いが,移相器が要るこ とや信号処理が複雑なことなどから高コストとなる。一方, 選択型も通信の信頼性が高いが,アンテナ数と同数の無線 回路が必要なため高コストとなる。

そこで筆者らは、高信頼性と設備に適する低コストなダ イバーシティーを実現するため、無線回路が一つでありな がら、パケット単位でモニタからの信号を受信した時点で 二つのアンテナからの信号出力を比較して有利なほうを選 択する、独自の「プロアクティブ方式」を提案する。本方 式の特徴は次の3点であり、図10にアンテナの選択と切 替のタイミングを示す。

(1)相関検出により自機へのパケットを正しく検出し、他システムからの通信による誤判断を回避する。

(2) パケットごとにアンテナを選択するため, 壁や家具の

影響による短区間変動と,人の移動やドアの開閉による 瞬時値変動の両方に対応する。

(3) 選択の判定は、ユニークワード(UW)の相関検出と RSSIとのハイブリッド方式による。



図10 ダイバーシティー用受信信号と切替タイミング

この方式は、ユニークワードを四つ設けることにより、 いつ通信データが送られてくるかわからない非同期通信で も確実にアンテナ選択が可能である。具体的には、通信デー タ本文の直前に付加されているプリアンブルとユニーク ワードの前に、さらに3組のプリアンブルとユニークワー ドを設けており、受信側では最初にユニークワードを検出 するまではプリアンブルとユニークワードの受信に要する 時間の2倍の周期でアンテナを切り替え、検出後は1倍の 周期に戻して切り替える。

このように動作させることで、基本的にはどのタイミン グで受信しても3組のプリアンブルとユニークワードでア ンテナ選択が完了する。なお、4番目のプリアンブルとユ ニークワードが本来の役割、すなわちビット同期とフレー ム同期を行う。

### 4.3 アンテナ

ダイバーシティーは外付けのヘリカルアンテナと内蔵の ホイップアンテナを使用し,図11のように構成する。2 本のアンテナの間隔は約1/4 λで,給電ポイントがその 分異なる。分電盤内の計測ユニット取付金具や,計測ユニッ トの電源線長および位置も見直し,各アンテナが周辺影響 を受けにくいように配慮する。



図11 アンテナ構成

## 4.4 周辺設備の影響に対する改善効果

電波暗室内で, 各アンテナ単体とダイバーシティー動

16 パナソニック電工技報 (Vol. 59 No. 3)

作時における分電盤周囲 360°の受信レベル値を測定する。 計測ユニットを内蔵した分電盤を回転させて、パケット を送信し続けながら連続受信状態でのアンテナ指向性を図 12に示す。この図から、周辺影響を受けた各アンテナに 対し、つねに受信レベルの高いほうのアンテナを選択して いることがわかる。



図12 ダイバーシティー効果検証

#### 4.5 フェージングに対する効果

ダイバーシティーのフェージングに対する効果を評価す る。木造住宅よりもフェージング環境が厳しいコンクリー ト住宅を想定し,壁床がコンクリートの部屋においてアン テナ1本の場合とダイバーシティー動作時の場合の受信信 号レベル発生確率を測定し,累積確率を求める。

複数波が存在するマルチパス環境においては,受信信号 レベル発生確率は仲上・ライス分布式である式(1),式(2) に従う<sup>4)</sup>。

$$\mathbf{p}(\mathbf{r}) = \frac{\mathbf{r}}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\mathbf{r}^2 + \mathbf{v}^2}{2\sigma^2}\right) \mathbf{I}_0\left(\frac{\mathbf{r}\mathbf{v}}{\sigma^2}\right) \tag{1}$$

$$\mathbf{K} = \frac{\mathbf{v}^2}{2\sigma^2} \tag{2}$$

p(r):確率密度関数
r:受信電力
σ<sup>2</sup>:多重波成分の平均電力
v:直接波の振幅
I<sub>0</sub>(x):第一種変形ベッセル関数
K:ライス係数(直接波と散乱波の電力比)

また,開発したダイバーシティーの受信信号レベル発生 確率はそれぞれのアンテナの受信レベルがともに受信感度 以下となる確率であるため,式(1)のp(r)を2乗する ことによって得られる。これらの実測値と理論値を正規化 して図13に示す。

この図から、ダイバーシティーの受信信号レベルの累

積確率は理論値にほぼ一致し、従来の選択型ダイバーシ ティー同等の性能が得られていることがわかる。フェージ ングによる受信レベルの変動は住宅において 10 ~ 15 dB 観測されることから、回線設計においてはその分フェージ ングマージンとして考慮する必要があったが、開発した 「プロアクティブ方式」のダイバーシティーでは少なくと もフェージングマージンを5 dB 以内に収めることができ ている。



図13 フェージングに対するダイバーシティーの効果

コンクリートの部屋内の各場所で,個々のアンテナとダ イバーシティー動作時における受信レベル値を測定する。 パケットを送信し続けながら連続受信状態の計測ユニット を直線移動させて得られた受信レベルを図14に示す。こ の図から,フェージング環境においても受信レベルの高い ほうのアンテナを選択していることがわかる。



図14 ダイバーシティー効果検証(フェージング対応)

# 5. あとがき

ー般家庭における主幹回路や太陽光発電等の電力を計測 し,無線接続した別場所のモニタに表示可能な多回路電力 計測システムを開発した。

このシステムの多回路電力計測ユニットにおいては,計 測に用いる各電流センサで生じる固有な位相ずれをソフト ウェアで処理することで移相フィルタ回路を不要とし,そ の構成部品個体差による影響を低減した。

また,アンテナにダイバーシティー方式を採用すること により,住宅用分電盤に接続されている電線等による受信 感度の低下を抑制するとともに,フェージングマージンも 5 dB 以内に収めた。

今後は, AC/DC のハイブリッド配線システムでの計 測システムへと発展させ、さらなる省エネルギーを実現し ていく。

●注 -

\*1) 関西電力(株)の登録商標

#### \*参考文献

- 1) 湯浅 裕明, 西川 誠: エネルギー計測機器 (省エネ支援機器), 建築設備と配管工事, Vol. 8, p. 67-70 (2009)
- 2) 岩見 英司,湯浅 裕明,廣岡 一紀,高橋 和久:省エネルギー支援用の多回路電力チェッカ,松下電工技報,Vol. 52, No. 4, p. 37-43 (2004)
- 3) 永利 英昭, 一村 省互, 西川 誠: 複数系統対応可能な省エネルギー支援用電力量測定システム, パナソニック電工技報, Vol. 58, No. 3, p. 4-9 (2010)
- 4) 関 英男 (訳):現代の通信回線理論, 森北出版 (1995)

## ◆執 筆 者 紹 介



塩川 明実 <sup>情報機器 R & D センター</sup>



笠井 秀樹
情報機器 R & D センター
第一級陸上無線技術士



茂住 厳 情報機器 R & D センター 第一級陸上無線技術士



水野 洋二 パナソニック電工電路 (株)



湯浅 裕明 パナソニック電工電路 (株)