

デジタル・サンプリング方式 標準電力量計の開発

■ 後藤 義英
Yoshihide Goto

■ 竹内 利幸
Toshiyuki Takeuchi

■ 高橋 良和
Yoshikazu Takahashi

1 はじめに

東光東芝メーターシステムズ（以下「T2MS」と略記、T2MSは東光東芝メーターシステムズの登録商標第5401335号）は、電力演算方式にデジタル・サンプリング方式を採用した標準電力量計の開発を完了したので報告する。

1.1 標準電力量計について

標準電力量計は、電力量計の精度を確認するための標準器である。電力量の単位Whは、複数のSI単位から導かれるが、交流では、さらに実効値・位相が関係する。交流電力量は、産業界にとって非常に重要な単位であるが、非常に複雑な単位でもある。

このために、(交流)電力量の国家(計量)標準が存在し、日本の電力量の国家標準は、指名計量標準機関である日本電気計器検定所(以下「日電検」と略記)が維持にあっている。

この国家標準の直下に位置し、ワーキング・スタンダードとして産業界への標準供給業務に供される電力量計が、「一級基準電力量計」である。標準電力量計は、計量法に基づく基準器検査に合格することで「基準電力量計」を名乗ることができる。

T2MSは、この「一級基準電力量計」となることができる性能を有した標準電力量計を供給してきた。標準電力量計は誘導形から始まり、時代とともに半電子式となり、現在は完全な電子式に移行した。

さらに、この技術を産業界へも展開しており、同一の技術方式を採用して、①「二級基準電力量計」となることができる一般産業向け^{注1)}標準電力量計、②発電所向けの取引用電力量計(型式承認取得品)、③発電量管理用の高精度電力量計を供給している。

今回開発したデジタル・サンプリング方式は、電子式標準電力量計の第三世代の製品である。

1.2 開発にあたって

現行の標準電力量計は1998年に開発されたもので、入手難の電子部品が増加しているため、モデルチェンジを行うこととした。開発にあたっては、①現時点において最高精度を出しうる技術方式とする、②社会の要求に応える性能・機能を付加する、これら二つを念頭においた。

①の技術方式については、日電検の研究成果である

「サンプリング方式電力量計」の技術供与を受けて開発する。②については、前記の性能を損なわず、ワーキング・スタンダードとしてロバスト性に優れ、取扱いの容易さを追求することとした。

2 従来標準電力量計の技術方式

T2MSの標準電力量計は、常に開発の時点で最高精度を出しうる新技術方式により製品化している。ここでは、電子式以降の各世代の技術方式を簡潔に紹介する。

2.1 高速多重移相時分割方式(第一世代)

電力演算器(乗算器)として、時分割乗算方式を採用したものである。本方式は、計測電流で振幅変調した信号を計測電圧でパルス幅変調(PWM)すると、平均値が電力に比例した大きさの信号になる原理に基づいている。これを、信号の大きさに比例した周波数のパルス列に変換することで、1パルスが電力量の重みを持った「基準パルス」(被試験電力量計との比較に使用するパルス)が生成される。

高速多重移相時分割方式は、PWM周波数を高め、交流各相の電力演算を順次切替えながら行う方式である。記録に留めるべきは、半導体部品が高価で特性も現在ほど良くはない時代において、最少の部品数かつ巧みなアナログ回路技術により誘導形を大きく超える高精度が実現されたことである。PWM制御デジタル部は、専用のワン・チップのカスタムLSIを開発し、基板の小型化に貢献した。

なお、本方式は後に、発電所向けの取引用電力量計に

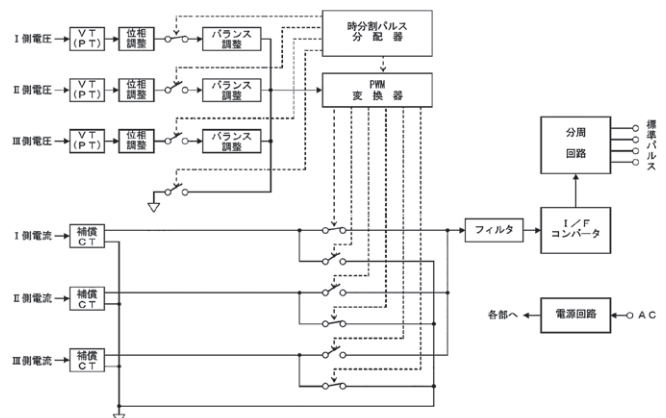


図1 高速多重移相時分割方式のブロック図

も展開され、日本初の電子式電力量計の型式承認を得た。

この「第 814 号特別精密電力量計 SH3A-K11VR 形」は、長きにわたり発電所で使用された。

2.2 自己校正形精密乗算方式 (第二世代)

時分割乗算方式はアナログ方式に分類されるが、PWM 動作により離散的である。1 サイクルの PWM 動作で瞬時電力量が確定する。回路固有の周波数要素を持っていることの影響を最小レベルに抑えるため、高速多重移相時分割方式は PWM 周波数を高く設計していた。

これに対して、純粋なアナログ乗算 IC を利用すれば、乗算動作そのものに周波数要素はなく高速な乗算動作が得られる。しかし、アナログ IC にはオフセットやゲインのドリフトがあり、そのままでは高精度な電力量計に使用できなかった。

その一方で、AD コンバータ、DA コンバータ等のデジタル系 IC が普及してきたが、高速なデジタル乗算は速度・分解能が及ばないか、可能であっても大規模な回路が必要という状況であった。

そこで、純アナログ乗算の特長を生かし、ドリフトのような低速の誤差変化は、デジタル補償 (自己校正) でアシストするという発想から開発されたものが、自己校正形精密乗算器である。

本方式は、高精度基準電圧回路、測定と校正の二つの状態を排他的に切り替えられる多重化されたアナログ乗算器、誤差量をデジタル化する AD コンバータ、校正値を演算するマイクロ・コントローラ、デジタル校正値をアナログ化する DA コンバータで構成された。

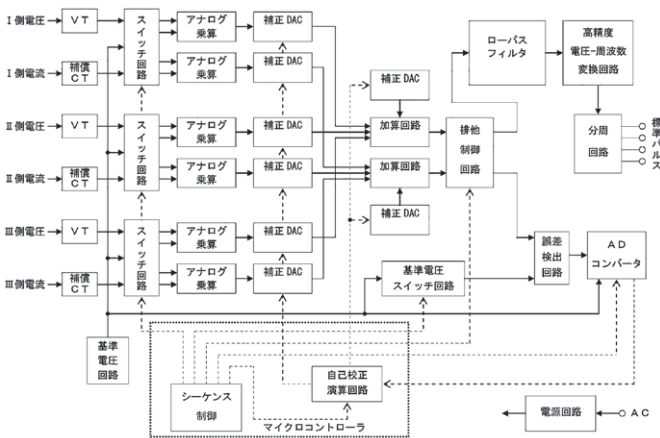


図 2 自己校正形精密乗算方式のブロック図

3 デジタル・サンプリング方式

第三世代となる、デジタル・サンプリング方式電力量計は、電圧信号と電流信号を AD コンバータによるサンプリングで量子化・離散化したのち、デジタル演算処理で電力量を求める。現在のほとんどの電力量計はデジ

タル・サンプリング方式となり、AD コンバータも含めた、ワン・チップ電力量計用 LSI が流通している。これらは、汎用電力量計用として十分な性能と有すると思われる。

しかし標準電力量計には、基本は同様であっても、より高い性能が必要である。

3.1 ブロック図

デジタル・サンプリング方式標準電力量計のブロック図を以下に示す。

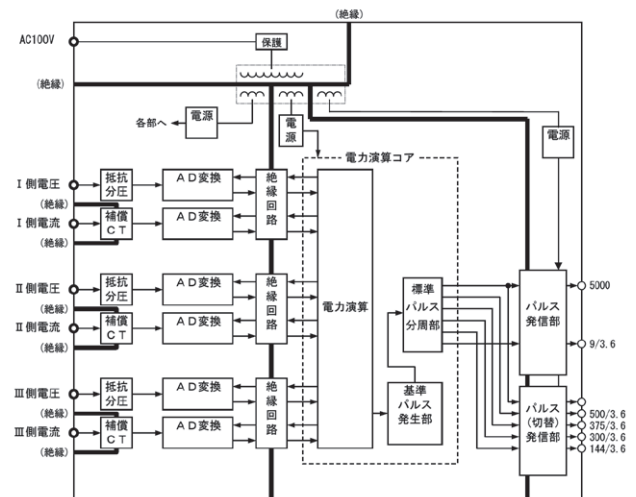


図 3 デジタル・サンプリング方式のブロック図

- (1) 電圧入力部
計器に印加される電圧は、抵抗分圧にて低電圧の信号に変換する。
- (2) 電流入力部
計器に印加される電流は、補償 CT にて低電圧の信号に変換する。
- (3) AD 変換回路
電圧入力部、電流入力部で低電圧に変換された信号を、AD 変換回路でデジタル・データに変換する。
- (4) 絶縁回路
デジタル・データに変換された信号を、電氣的に絶縁し、サンプリング方式電力演算コアに入力する。
- (5) サンプリング方式電力演算コア
サンプリングされたデジタル・データを電力演算し、電力量の重みを持った基準パルスに変換する。
また、基準パルスを分周し、標準パルスを発生する。

3.2 技術ポイント

- (1) AD 変換回路
デジタル・サンプリング電力量計のサンプリング方式電力演算コアは、必要な分解能と高速演算性能を確保し、理論に忠実な演算機能を実現すれば、ほぼ完全かつ経年的にも変化しない性能を確保できる。

よって、デジタル・サンプリング電力量計の性能は、電力量計の電圧・電流入力部から AD 変換までのハードウェアの性能にかかっている。プリント基板においても、サンプリング方式電力演算コアは一つの LSI の中に集積され、プリント基板上のハードウェアは、電圧・電流入力回路、AD 変換回路、電源回路、計器内のインターフェース回路がほとんどを占めることになる。

これらの回路は、日電検の知見を参考に、取引用電力量計等への展開も考慮し、T2MS にて部品選定から始めた設計となっている。

- ・AD コンバータ IC は最重要部品の一つで、その性能を十分に検討し、実機評価を経て決定した。

- ・計器の電圧入力回路は、これまでは性能の優れるトロイダル・コアの VT を採用していた。しかしわずかに残る位相角誤差もデジタル・サンプリング方式にとっては大きな誤差となるため、抵抗分圧方式を採用した。

- ・計器の電流入力回路は、初代の電子式標準電力量計から使用実績のある、補償 CT 方式を引き続き採用した。

- ・電圧、電流入力回路から AD コンバータまでの回路については、AD コンバータの性能を十分に引き出すアナログ回路設計を行った。

- ・電圧入力回路を抵抗分圧方式としたため、安全確保の観点から必要な箇所に電氣的絶縁を施した。

(2) AD 変換誤差への対応

AD 変換において、アナログ値をデジタル値に変換する過程で量子化誤差が発生する。これは信号対ノイズ比 SNR で表され、理論的に以下の式で表すことができる。

$$SNR = 1.76 + 6.02 n \text{ [dB]} \quad n: \text{量子化ビット数}$$

かりに $n = 16$ として試算すると、信号を 0 dB とすれば、量子化雑音は -98.08 dB となるが、実際の AD コンバータ素子の性能、周辺回路の影響等を受けて性能は劣化する。今回の開発では、これらの影響を可能な限り抑える設計を行った。

また、電力量計は、基本的に測定電流のレンジが広く、軽負荷電流時においても精度の高いことが求められる。この要求は、省エネ社会にあって今後さらに強いものとなって行くであろう。

電力量計の誤差は、軽負荷電流時には増大する。この影響を避けるため、標準電力量計は定格電流でのみ使用するのが一般的である。しかしこのような設計では、取引用電力量計に展開できない。この問題についても設計的な対策を折り込むことで、軽負荷電流域まで連続平坦な誤差特性を有したものとした。

(3) サンプリング方式電力演算コア LSI

電力量計のデジタル部にマイクロ・コントローラが普及する以前は、フル・カスタム LSI やゲート・アレイ LSI によるハードウェア・ロジック専用 LSI を積極的に採用してきた。

フル・カスタム LSI は、特定機器専用に設計したロジック回路を作りこんだものである。ゲート・アレイ LSI は、基本ゲートを多数配置した汎用のウェハをあらかじめ用意し、これに任意の配線を施すことで、専用ロジック LSI を作成できるもので、セミ・カスタム LSI とも呼ばれた。

これにより、フル・カスタム LSI に比べれば、専用の LSI を実現しやすくなった。

デジタル・サンプリング方式では、高速な並列演算処理を必要としており、マイクロ・コントローラによるソフトウェア処理には難があった。回路規模を大きくすればソフトウェア処理も可能であると思われるが、消費電力とコストは増大する。ソフトウェアに依らないハードウェア・ロジック回路が再度必要となった。

このような中、ゲート・アレイ LSI に代わって、FPGA (ユーザー側でプログラム可能なゲート・アレイ LSI) が実用的に使用できるようになった。当初は、ゲート・アレイの試作評価用として使用された FPGA であるが、その利便性が注目されると、多様な製品の要求に適合できるよう、それぞれの特長を持った品種を選択できるようになった。

日電検はサンプリング方式を FPGA に実装し、T2MS は、この性能を損なうことなく量産製品に必要な機能を追加搭載することができた。

(4) 試作とその評価

デジタル・サンプリング方式の個々の要素から組み上げると、FPGA の採用など、T2MS にとって初めてとなった本開発は、優れた性能を量産設計で再現することと外乱耐性の確保を両立することに時間を費やした。

前者は、標準電力量計メーカーとして当然であり、後者は今後の製品展開を考慮した場合に必須の課題であった。

T2MS における優れた性能の確保については、そのほとんどをアナログ回路設計に施した。高速・高分解能デジタルの性能を十分に発揮させるには、アナログ性能が重要である。このため、アナログ回路構造を大きく変更する対策も行った。

外乱耐性についてもいくつかの問題が発生したが、問題事象の真因を追究し、最終的な社内評価では、単独普通級電力量計に加えるような条件にも耐えうることを確認した。

3.3 仕様

表 1 に一般産業向けの標準電力量計の仕様を示す。現行品の KS8C 形 (三相 3 線式)、KS9C 形 (三相 4 線式) との互換性を考慮した仕様としている。

表 1 一般産業向けの標準電力量計の仕様

形 名	KS22C 形	KS23C 形
相 線 式	三相 3 線式	三相 4 線式
定 格 電 圧	110 V	$110/\sqrt{3}$ / 110 V
定 格 電 流	5 A	
定 格 周 波 数	50 Hz または 60 Hz	
基 準 パ ル ス	有効正方向 5,000 pulse/kWs	
標 準 パ ル ス	9 pulse/3.6 kWs (500 pulse/3.6 kWs, 375 pulse/3.6 kWs, 300 pulse/3.6 kWs, 144 pulse/3.6 kWs も選択式で出力可能)	
計 量 動 作 表 示 (LED 点滅頻度)	有効正方向 9 pulse/3.6 kWs 有効逆方向 9 pulse/3.6 kWs 無効遅れ 9 pulse/3.6 kvars 無効進み 9 pulse/3.6 kvars	
パ ル ス 出 力 形 式	VOLT および PHOTO	
パ ル ス 幅	基準パルス：40~100 μ s 標準パルス：デューティ約 50%	
電 圧 回 路 負 担	0.1 VA 以下 / 回路	
電 流 回 路 負 担	0.3 VA 以下 / 回路	
補 助 電 源	AC100 V \pm 10 V, 50/60 Hz	
補 助 電 源 負 担	10 VA 以下	
使 用 温 度 範 囲	10~35 $^{\circ}$ C	
使 用 湿 度 範 囲	15~85% (ただし結露なきこと)	
動 作 温 度 範 囲	0~50 $^{\circ}$ C	
本 体 質 量	約 5 kg	
外 形 寸 法	幅 260 \times 高さ 156 \times 奥行 251 [mm]	



図 4 デジタル・サンプリング方式 KS24 形標準電力量計

図 4 は、今回開発した機能をフル実装した、三相 4 線式・有効/無効 180 度形 4 象限基準パルス出力装備の KS24 形の外觀である。

4 まとめ

T2MS では、デジタル・サンプリング方式を採用した標準電力量計の開発と並行して、これと同一方式である特別精密電力量計および高精度電力量計も開発した。

標準電力量計の性能は、新世代の標準電力量計として使用できる性能が確保できたと考える。

また、特別精密電力量計・高精度電力量計は、標準電力量計の性能を受け継ぎながらロバスト性を確保し、さらに本系列では初めて通信機能を搭載した。引き続き、大電力の公正な計量に使用できる製品を供給できる体制を整えた。なお特別精密電力量計は、2016 年 3 月に型式承認を取得（型式承認番号第 4112 号および第 4113 号）した。

最後に、今回の開発にあたって、多大なるご指導をいただいた、日本電気計器検定所の関係各位に深く感謝の意を表する次第である。

■参考文献

(1) 小金実, 山崎修快, 楠井昭二:「高速多重移相時分割方式を用いた標準電力量計」, 電気検定所技報, 日本電気計器検定所, 株式会社オーム社, 第 15 巻第 1 号, pp.7-23

(2) 橋本昭憲, 安井孝治, 楠井昭二:「自己校正形精密乗算器を用いた単相標準電力量計」, 電気検定所技報, 日本電気計器検定所, 株式会社オーム社, 第 31 巻第 4 号, pp.1-8

(3) 川越順:「サンプリング方式による標準電力量計」, 電気検定所技報, 日本電気計器検定所, 株式会社オーム社, 第 47 巻第 1 号, 2012 年 1 月, pp.1-5

■語句説明

注 1) 一般産業向け: 電力会社向け製品以外の物

後藤 義英

東光東芝メーターシステムズ株式会社
開発部 設計第三グループ 所属

竹内 利幸

東光東芝メーターシステムズ株式会社
開発部 設計第三グループ 所属

高橋 良和

東光東芝メーターシステムズ株式会社
開発部 設計第三グループ 所属