

高精度電力計と波形測定器の長所を併せ持つ 「プレジジョンパワースコープ PX8000」

PX8000 Precision Power Scope with Features of High-accuracy Power Meter and Waveform Measuring Instrument

伊東 修 ^{*1}	鈴木 悟 ^{*1}
Osamu Itou	Satoru Suzuki
柳生 浩 ^{*2}	川住 和雄 ^{*1}
Hiroshi Yagyuu	Kazuo Kawasumi

インバータやモータ、リアクトル損失の測定を、波形レベルで解析可能な高精度電力計プレジジョンパワースコープ PX8000 を開発した。本器の主な仕様は、基本精度が 0.2%、電圧測定帯域が DC および 0.1 Hz ~ 20 MHz (-3dB, Typical)、電流測定帯域が DC および 0.1 Hz ~ 10 MHz (-3 dB, Typical) である。波形測定器の機能である、多彩なトリガ、ヒストリ、統計処理、波形パラメータ演算機能等を備える。さらに、低力率での測定精度向上のため、データレイテンシ調整機能、電流センサの遅延を補正するデスキュー機能を搭載した。本稿では、電力測定専用開発した電力測定エレメントと、位相補正を実現した技術を中心に述べる。

Yokogawa developed the PX8000 precision power scope, a high-accuracy power meter, which can measure reactor losses in inverters, motors and the like, by analyzing waveforms. The major specifications of the instrument are as follows: basic accuracy is 0.2%, voltage measurement bandwidth is DC and 0.1 Hz to 20 MHz (-3dB, Typical), and current measurement bandwidth is DC and 0.1 Hz to 10 MHz (-3dB, typical). The PX8000 offers the functionality usually provided by a waveform measuring instrument, such as a variety of triggers, tracking, statistical processing, and waveform parameter calculation functions. Furthermore, to improve measurement accuracy at low power ratios this product comes with a de-skew function for correcting signal delays from the current sensor and a data latency adjustment function. This paper describes the PX8000, focusing on a newly developed element dedicated for power measurement and technology for phase correction.

1. はじめに

パワーエレクトロニクス技術の発展に伴い、電気エネルギー変換のあらゆる分野で、マイクロコントローラによるエレクトロニクス制御が行われている。そして、測定器に対しても従来とは異なる電力測定技術、解析機能が求められるようになってきている。

電力測定用途として一般的に広く使用されている電力計は、比較的緩やかに変化する測定対象には適しているが、短時間で急激に変化する動的特性の評価や、駆動周波数が高い測定対象に対しては必ずしも適していない。一方、オシロスコープは高速波形の観測をするためのも

のであり、電力を精度よく測定するには設計されていない。また、トレーサビリティ（AC 精度が必要）の観点から電力測定には電力計が使用される。今回開発した PX8000（図 1）は、これら 2 つの測定器のそれぞれの長所を備えた「プレジジョンパワースコープ」である。従来の測定器では困難だった、急速な動きを伴う機器や、高い周波数で駆動される機器の高精度な電力測定が可能となっている。



図 1 PX8000 の外観

*1 横河メータ&インスツルメンツ 第一技術部

*2 横河メータ&インスツルメンツ マーケティング部

2. 電力測定エレメントの開発

PX8000 は、既存の波形測定器である DL850⁽¹⁾ をベース製品として開発した。DL850 でも電圧測定、電流プローブを用いた電流測定、及び電力測定は可能である。しかしながら、電力計で必須となる精度規定には対応していない。また、電流の直接入力や電圧／電流の位相を合わせ込む機能も搭載していない。PX8000 は、DL850 の入力モジュール部の 2 スロットへ、高精度な電力測定エレメント（電圧モジュール＋電流モジュールのセット）を組み込む形とし、CPU 周辺、波形処理用の FPGA (Field Programmable Gate Array)、筐体、ファームウェアの一部を再利用することで、開発工数を約 50% 削減した。したがって、本開発の中心は電力測定エレメントの開発となる。

市場からは、高速サンプリング化、広帯域化が要求されている。そこでサンプリングは、インバータ測定等で求められる 100 MS/s (メガサンプル/秒) とした。これは従来機種種の 20 倍である。また、電圧測定帯域は従来機種種の 4 倍の 20 MHz、電流測定帯域は従来機種種の 2 倍の 10 MHz を実現した。

2.1 高速サンプリングを実現するための光伝送技術

100 MS/s を達成するために、DL850 の高速 100 MS/s 12 bit 絶縁モジュール 720210 で開発した光伝送による絶縁 (isoPRO 技術／高速 & 高耐圧絶縁テクノロジー) を用いた。これにより、1000 Vrms の高電圧の絶縁が可能になった。図 2 に PX8000 の光伝送部、図 3 に電力測定エレメントの絶縁部のブロック図を示す。



図 2 PX8000 光伝送部

2.2 電力測定エレメント

PX8000 は、DL850 をベース製品としているが電力計としての性格上、下記の仕様変更を行った。

- 耐ノイズ性 (パルスノイズ耐量) の向上
- ショット抵抗を内蔵することによる内部消費電力 (最大 2.5 W/1 エレメント) の増加
- ゼロクロス回路 (波形中心点の検出回路) の追加
これらの仕様を満足するため以下の対策を行った。
- 耐ノイズ性改善のため、印加ノイズの流入経路の解析を行い光伝送部をはじめとする各部のシールド強化及び回路に影響を与えないノイズ経路の確保
- 内部発熱を効率的に排出するため、放熱経路の解析を行い、排熱ファンの取り付け機構及び放熱経路の改善
- ゼロクロス回路の安定動作のため、前段に入力を遮断する回路を追加
- ゼロクロス回路は AC 結合のため、内部のキャリブレーション動作 (内部回路のオフセットの測定) による電圧変動の影響を受け、入力にオフセットがある場合などは、静定に時間がかかり正しいゼロクロス点の検出ができなくなる。そのため、ゼロクロス回路の前段に入力を遮断する回路を設けキャリブレーション

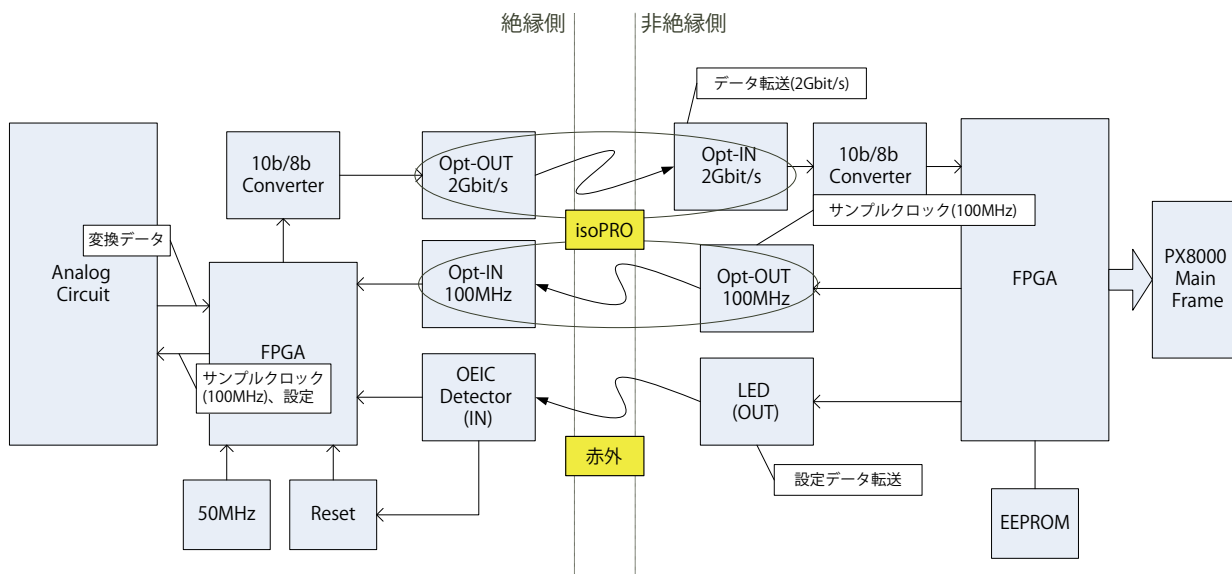


図 3 電力測定エレメントの絶縁部のブロック図

ーション動作による電圧変動の影響を受けないように対策した。

2.3 電圧・電流周波数特性

図4は電圧・電流モジュールの周波数特性である。インバータ等の高速化に対応するため周波数特性(-3dB点)を広帯域化している。

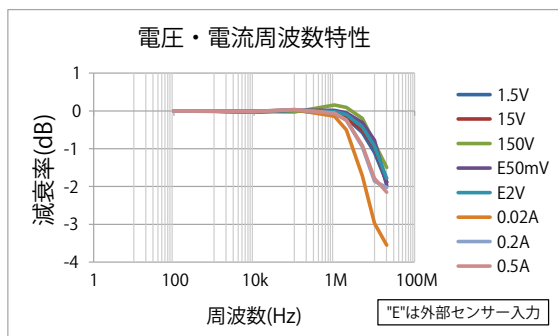


図4 電圧・電流周波数特性

2.4 電流端子の形状

従来、電力計の電流入力端子はバイディングポストを使用し使用者が金属部に接触可能であった（電圧側はプラグインタイプの安全端子（オスタイプ）を使用しているため金属が露出しておらず接触の可能性はない）。また従来器の端子は背面にあり簡単にアクセスできなかったが、PX8000では端子が側面にあるため、使用者が端子部に簡単にアクセスできる。そこで安全面の観点から、電流端子に関してもプラグインタイプの安全端子（メス）を採用した。メスタイプの採用により、電圧端子と電流

端子間での誤挿入が防止できる。図5に端子形状を示す。



図5 入力端子形状

（黒／赤端子が電圧入力，黄色端子が電流入力）

2.5 データレイテンシ調整機能

開発のベースとなったDL850用の波形測定用入力モジュールである720210は、電源投入タイミング、または、FPGA処理開始のタイミングによって、以下の組み合わせで、データレイテンシのズレが発生することが分かっている。

- 複数の電力測定エレメント間
- 電力測定エレメント内の電圧入力モジュールと電流入力モジュールの間
- 測定レンジ間

これらのデータレイテンシのずれが高周波測定時の電力値に対して大きな誤差要因となる。この問題を解決するため、以下のような対策を講じた。

データレイテンシのズレは、起動時の機器初期化タイミングで決まり、毎回同じ量とは限らないため、あらかじめ合わせこむことができない。そこで、起動後のデータレイテンシのズレが確定した時点で各モジュールのデ

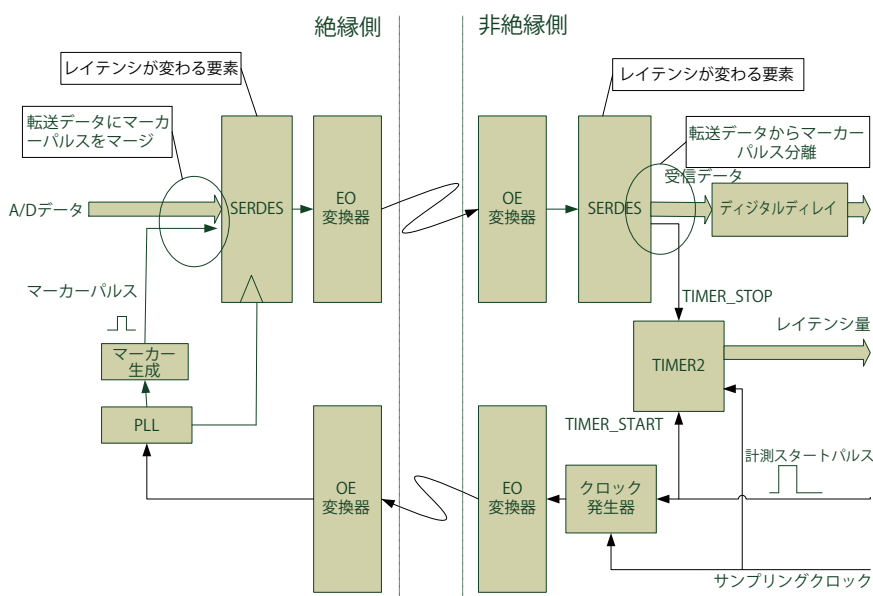


図6 レイテンシ計測原理

ータレイテンシ量を測定し、最も大きなデータレイテンシ量を持つモジュールに他のモジュールのレイテンシ量を合わせこむことで、位相誤差を最小にする。レイテンシの最小単位時間は 10 ns である。よって、10 ns 分解能での合わせこみが必要である。

具体的にモジュールでのレイテンシ計測を説明する。**図 6** は、モジュール内でレイテンシ計測の原理を説明したブロック図である。本体 CPU 部から任意のタイミングで、計測スタートパルスが発生させる。TIMER2 がゼロからカウントをスタートするとともに EO, OE 変換器を介して絶縁側に計測スタートの情報が伝達され、マーカーパルスを生成する。これを A/D データと共に非絶縁側に EO, OE 変換器を介して送信し、非絶縁側の SERDES (SERializer/DESerializer) によりマーカーパルスを分離し TIMER2 のカウントをストップする。この時の TIMER2 のカウント値がレイテンシ量となる。レイテンシ量の変動は SERDES 部で生じるので、各モジュールで同様に計測し、各モジュールのレイテンシ量を得る。SERDES 部以外はレイテンシ量が変わらないことが設計及び評価で確認されているので、各モジュールとのレイテンシ量の差が合わせこむべき遅延量に相当する。レイテンシ量を減らすことはできないので、最大のレイテンシ量に合わせるために各モジュールでデジタルディレイを挿入する。

以上の操作により、モジュール間で生じるレイテンシ量のズレをキャンセルできる。さらに測定レンジ間で発生するレイテンシ量のズレを補正するために、ADC サンプルクロック (10 ns) の位相を PLL の位相調整機能 (1/16 周期単位で設定) で微調整する。

以上のレイテンシ調整を行った結果、個体差はあるものの、最終的なレイテンシ量のズレは数 ns 以内に調整される。**図 7** は、サンプルクロック位相調整部のブロック図である。図中の DATAPROC 部は A/D コンバータ (ADC) からのデータを受けて次段の SERDES 部へデータを渡すと共に、レンジ設定に合わせて PLL への位相制御設定を行う。**図 8** に、サンプルクロック位相を変えることで微小なレイテンシ調整が可能であることを示す。

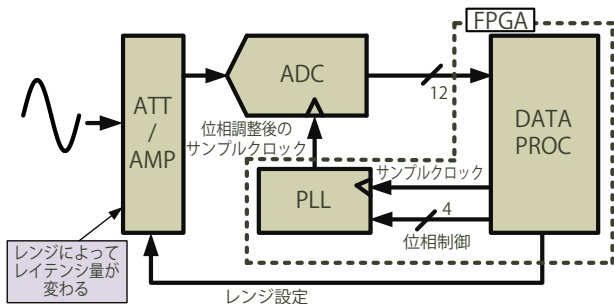


図 7 サンプルクロック位相調整部

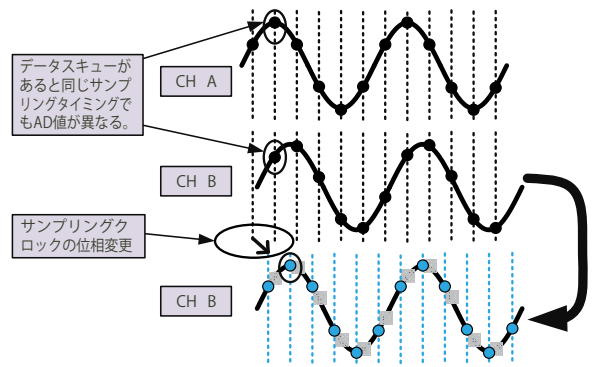


図 8 サンプルクロック位相とレイテンシ調整の原理

3. デスキュー

電圧と電流から電力/インピーダンス/力率などを正しく測定するためには、電圧信号と電流信号を伝達時間差のない状態で測定入力端子に入力する必要がある。先に述べたデータレイテンシ調整機能により測定器自体の伝達時間差は数 ns 以下となり高精度な測定ができる状態になっている。しかし実際には、測定に使用する貫通型 CT (Current Transformer) などの電流センサや電流ピックアップ用の回路、入力端子までのケーブル長などによって電圧信号と電流信号に遅延差が発生する。この物理的誤差要因を手動で調整できる機能が、入力の伝達時間差の補正 (デスキュー) 機能である。使用するセンサやケーブル長により電圧信号と電流信号間に生じる伝達時間差を補正值として設定することにより、より精度の高い測定が可能となる。**図 9** にデスキュー設定画面を示す。

ベース製品である DL850 では、波形演算機能を用いてソフトウェア的に位相をずらすことでデスキューが可能であるが、デスキュー範囲は測定データメモリ範囲の最大 1 M ポイントに制約される。本デスキュー機能によれば、あらかじめ補正值を設定することにより、位相補正された波形データをすべて取り込むことができ、より真値に近い測定が実現できる。



図 9 デスキュー設定画面

4. 機能

PX8000 は、電力計の数値表示と、波形解析用の波形表示に加えて、過渡的な電力変動の測定用にさまざまな解析機能を提供する。

4.1 カーソルで指定された区間の演算

図 10 にカーソルで指定された区間の演算画面を示す。取得した波形に演算開始点と終了点を指定することでその区間内の電力値や効率の演算が可能となる。

さらに、正確な電力演算を行うために不可欠な波形のゼロクロスを検出して、カーソルを移動させる、ゼロクロスジャンプ機能をサポートしている。



図 10 カーソルで指定された区間の演算画面

4.2 波形パラメータの自動演算

図 11 に波形パラメータの自動演算画面を示す。カーソルで予め用意された波形パラメータ（最大、最小、平均値、積算値、ピークなど）を指定することにより、各種の高速波形演算が可能となっている。また、履歴機能や統計処理にも対応している。



図 11 波形パラメータ自動演算画面

4.3 高調波測定

図 12 は高調波測定画面である。高調波演算は、高調

波測定用の特別なモードにすることなく、500 次まで対応している。また、高調波演算の開始点をカーソルで指定することが可能となっている。



図 12 高調波測定画面

4.4 測定例

図 13 にプリンタ印刷時の測定画面を示す。

電圧/電流/電力の過渡現象が波形として詳細に観測できる。この中の任意の区間をカーソルで指定することにより、印刷ステータス毎の細かな区間の電圧/電流/電力を測定することができる。従来の電力計では、最短で 50msec 程度の区間の平均電圧/平均電流/平均電力を求めることしか出来なかった。



図 13 プリンタ印刷時の測定画面

4.5 専用の波形パラメータ演算、解析ソフトウェア

PX8000 にはカーソルにより波形の特定区間を指定し、その間の波形を自由に組み合わせることで演算できる、ユーザー定義演算機能がある。この演算機能が扱えるデータ量は全 CH 共通で最大 4 M ポイントとなっている。一方 PX8000 の取得可能な波形データ量は 100 M ポイント /CH となっており、メモリサイズ/観測時間の設定によっては、取得した波形の全ての領域の波形演算が出来ない。全領域の波形演算を可能とするため、Windows 上で動作する専用ソフ

トウェア PowerViewerPlus を開発した。

PC と PX8000 の接続は、Ethernet / USB / GPIB に対応している。PowerViewerPlus では 100 M ポイント / CH のユーザ定義演算に加え、PX8000 で可能なさまざまな解析機能を高速に実行できる。また、PX8000 で取得した波形データを簡単かつ高速に CSV データへ変換が可能である。さらに、PC の画面の大きさを活かし、複数の画面の同時表示が可能である。

図 14 に PowerViewerPlus の画面を示す。

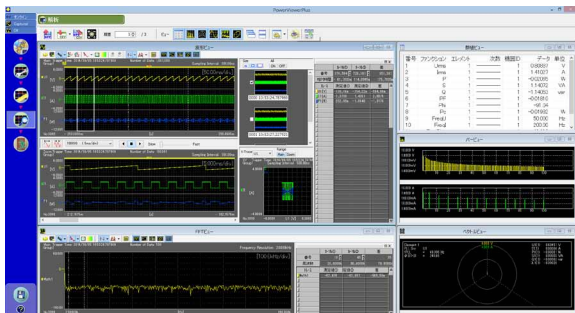


図 14 PowerViewerPlus 画面

5. おわりに

高精度電力測定技術と波形測定技術を高いレベルで融合させ、従来の測定方法では測定できなかった、過渡現象の電圧、電流、電力の測定を実現した。この製品により、電気自動車／ハイブリット自動車のモータの加減速中の電力測定やリアクトルの損失測定が可能になると考える。

PX8000 が、インバータ機器および電気自動車／ハイブリット自動車開発や、さまざまな機器のさらなる省エネルギー化に貢献することを期待する。

参考文献

- (1) 中山悦郎, 山本千秋, “スコープコーダ DL850 リアルタイム演算機能”, 横河技報, Vol. 55, No. 1, 2012, p. 9-14

* isoPRO は、横河電機株式会社の商標です。

* その他、本文中の会社名（商号）、商品名及び名称は各社の商標または登録商標です。