

同時サンプリングADCを備えた 高性能マルチチャンネル電力線 モニタリング

Colm Slattery 著 (colm.slattery@analog.com)

はじめに

電力事業が急速に拡大したことにより、既存の送電網と配電網を拡充して新しい変電所を建設するというニーズが世界的に増大しています。マイクロプロセッサ技術の進歩とサポート・スタッフのコストの増大が大きな要因となって、高精度の統合自動化システムを使用した高電圧の自動変電所の開発が電力会社によって進められています。

変電所は、電圧レベルによって、2つのカテゴリに分類できます。「高電圧」と呼ばれているのは、500kV、330kV、一部の220kVの変電所で、220kVの終端変電所、110kV、35kVの変電所は「中電圧または低電圧」に分類されます。高電圧（送電）変電所は、広大な屋外の変電所です。低電圧（配電）変電所は、都市部に位置する屋内のシステムであり、高密度の負荷を処理します。

現在のシステムの標準的な精度レベルは0.5%ですが、信号処理技術の改善により、次世代のシステムでは0.1%未満の高精度を達成することが可能になります。この改善は、主として高性能の同時サンプリングA/Dコンバータ（ADC）を使用することにより得られるものです。つまり、これらのADCによって、将来のシステムで必要となる分解能と性能が得られるということです。

システム・アーキテクチャ

図1は、標準的な3相測定システムの波形です。各電力位相は、電流トランス（CT）と電圧トランス（PT）によって表されます。システム全体は、このようなペア3組から構成されています。任意の瞬間におけるシステムの平均電力を算出するには、各トランスの出力からいくつかのサンプルをすばやく採取し、その採取したデータに対して離散型フーリエ変換（DFT）を実行し、さらに必要な乗算と加算を実行します。

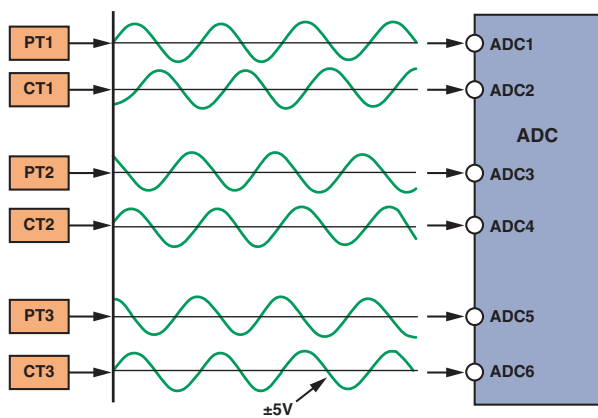


図1. 標準的な3相システムの波形

ADCは、3つのCT出力と3つのPT出力から32セットの同時サンプルを採取し、その結果をRAMに格納します。次にシステムは、6つの出力すべてに対してDFTを計算し、その結果を実数+虚数の形式（ $A + jB$ ）で示します。以下に示すように、トランスごとに大きさと位相の情報を計算できます。

$A + jB$ と $C + jD$ がCT1とPT1の実数と虚数の項であるとする、大きさ（ M_i ）と位相（ P_i ）は、次のようになります。

$$M_1(CT1) = \sqrt{A^2 + B^2}, \quad P_1(CT1) = \tan^{-1}(B/A) = \psi$$

$$M_2(PT1) = \sqrt{C^2 + D^2}, \quad P_2(PT1) = \tan^{-1}(D/C) = \theta$$

PT1/CT1のペアを通過する電力は、次のようになります。

$$\dot{U}_1 = M_1 \times M_2 \cos(\psi - \theta)$$

PT2/CT2とPT3/CT3のペアを通過する電力についても同様の計算を行うことで、 $\dot{U}_2$ と $\dot{U}_3$ が得られます。システムの平均電力の合計は、電力の3つの項を加算して算出します。

$$\text{総電力} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_3$$

この方法は、DFTと上記の計算を使用して、ある単一周波数におけるシステムの電力を求めています。DFTの代わりに高速フーリエ変換（FFT）を実行すると、高調波やその他の高周波成分のデータを得ることができ、システム損失や不要ノイズの影響など、さらなる情報を計算できるようになります。

システム要件

変電所は、場合によっては何百ものトランスが必要です。測定した電圧と電流を調整して、トランスのフルスケール出力レンジ（±5Vまたは±10V）が電力線のフルスケール出力性能をはるかに超えるレンジとなるようにしています。通常、電力線（特に電流測定）はこのレンジの5%未満で動作しており、標準的なトランス出力は±20mVのレンジ内にあります。これ以上の大信号はめったに発生しませんが、発生した場合は通常、システム障害となります。

このような小信号を正確に測定するには、信号対ノイズ（S/N）の優れた高分解能ADCが必要となります。また、使用するマルチチャンネルADCが同時サンプリング機能を備えていることも必要です。現在利用可能なシステムは14ビット性能を備え（たとえば、4チャンネルAD7865の14ビット・クワッドADC）、真のバイポーラ信号を受け取って、80dBのSNRを実現しています。ただし、10kSPSのサンプリング・レートで分解能が16ビットの、より高性能なマルチチャンネルADCのニーズが増大しつつあります。3相の電流と電圧を正確に測定するためには、ADCが同時に6チャンネルをサンプリングでき、小信号を測定するためにSNRが優れていることも必要になります。1つのシステムで多数のADCを使用する場合は、低消費電力も重要となります。

これらの要件をすべて満たしたデバイスの例としてAD7656があります。このデバイスは、シングル・パッケージに、低出力の16ビット、250kSPSの逐次比較型ADCを6つ搭載しています。図2に示すように、AD7656は工業用CMOS（iCMOS®）プロセスで製造されたもので、高電圧デバイスにサブミクロンCMOSとコンブリメンタリ型バイポーラの技術を組み合わせています。iCMOSによって、高電圧動作が可能ならさまざまな高性能アナログICを製造できるようになりました。従来のCMOSプロセスを使用したアナログICとは異なり、iCMOSのICはバイポーラ入力信号を難なく受け取ることができ、性能の向上、さらに消費電力とパッケージ・サイズ的大幅な低減を実現します。

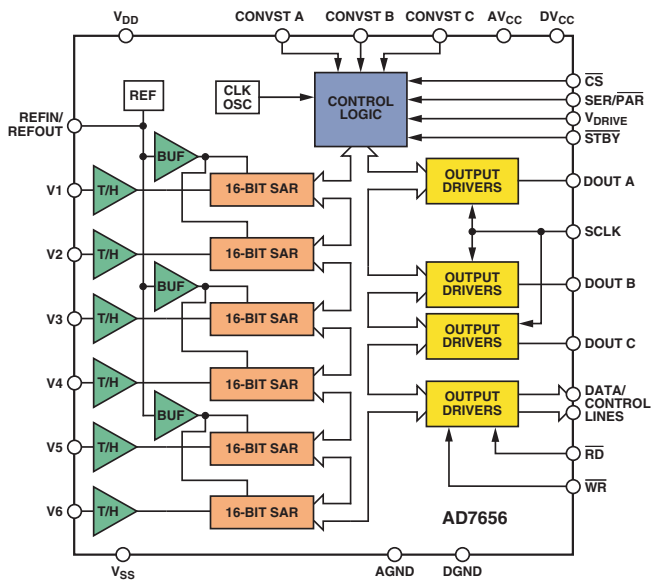


図2. AD7656は、6つの同時サンプリングADC、電圧リファレンス、3つのリファレンス・バッファ、発振器を備えています。

図3に示すように、SNRが86.6dBのAD7656は、トランスからの小さなAC出力を測定するために必要な性能を備えています。アップデートレートが250kSPSであるため、リアルタイムFFTの後処理に必要な高速データ・アキュイジション設計が容易に行えます。トランスからの±5Vと±10Vの出力をゲイン調整やレベルシフトを行わずそのまま受け入れることができ、デバイス当たりの消費電力は、最大でわずか150mWです。これは、ボードに多くのADCチャンネルを搭載する必要がある際の重要な事項となります。システムによっては、1つのボードに128ものチャンネル（22の6チャンネルADCと同数になります）を必要とする場合があるため、消費電力はきわめて重要な仕様となります。

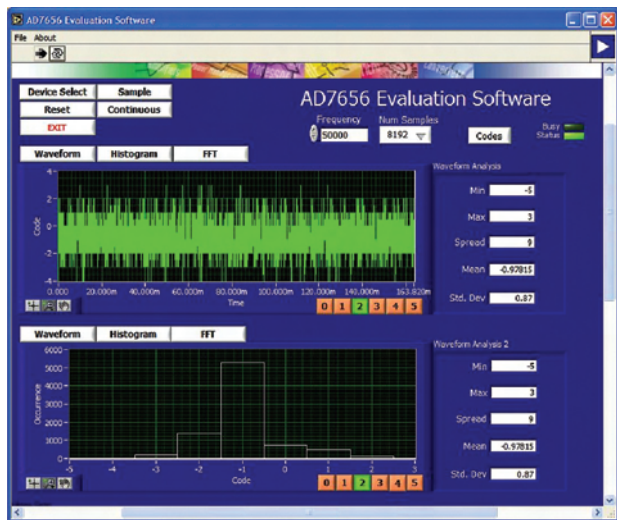


図3. ピークtoピーク・ノイズは、電力線モニタリング・アプリケーションではきわめて重要な仕様です。ここでのAD7656のピークtoピーク・ノイズは、8192のサンプルに対してわずか6コードです。

ADC以外の要件

電力線測定システムの全体を図4に示します。ADCはシステムの心臓部ですが、高性能なシステムを設計する際は、その他多くの要因を考慮する必要があります。電圧リファレンスと入力アンプもシステム性能にはきわめて重要であり、また、リモート通信では絶縁が必要となる場合があります。

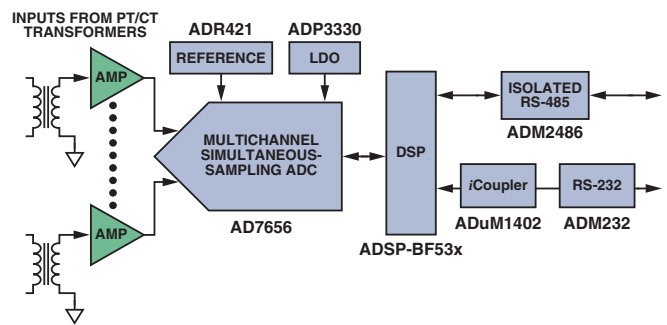


図4. 電力線モニタリング・システム

ADCリファレンスについて

ADCの内蔵リファレンス（内部リファレンスを備えたデバイスの場合）と外部リファレンスのいずれを使用するかは、システム要件によって決まります。複数のADCを1つのボード上で使用する場合、外部リファレンスが最適です。共通リファレンスは部品間のリファレンスのばらつきを解消でき、それと共にレシオメトリック動作を利用できます。

一般に、リファレンスの温度変動を低減するには、低ドリフトのリファレンスも重要になります。簡単な計算を行えば、ドリフトの重要性を理解でき、また、内部リファレンスを使用するかどうかを判断することができます。10Vフルスケール入力の16ビットADCの分解能は、152μVになります。AD7656の内部リファレンスのドリフト仕様は、最大で25ppm/℃（標準で6ppm/℃）です。50℃の温度範囲に対して、リファレンスは1250ppm、すなわち約12.5mVだけドリフトする可能性があります。ドリフトが重要なアプリケーションでは、ADR421（1ppm/℃）などの、低ドリフトの外部リファレンスを選択することを推奨します。1ppm/℃のリファレンスのドリフトは、50℃の温度範囲に対してわずか0.5mVです。

アンプの選択

電力線モニタリング・アプリケーションのアンプを選択する際の考慮すべき点は、低ノイズと低オフセットです。

ドライバ・アンプで生成されるノイズをできるだけ低く保持し、ADCのSNRと遷移ノイズ性能を維持する必要があります。低ノイズのアンプは、小さなAC信号を測定する場合にも有効です。全温度範囲に対する、アンプの総オフセット誤差（ドリフトを含む）は、必要な分解能より少なくする必要があります。OP1177/OP2177/OP4177のアンプ・ファミリーは、優れたノイズ性能（8.5nV/√Hz）と低オフセット・ドリフトを兼ね備えています。たとえば、OP1177のオペアンプでは、最大60μVのオフセットと最小0.7μV/℃のオフセット・ドリフトが規定されています。最大オフセット・ドリフトは、50℃の動作範囲に対して35μVであるため、オフセットとオフセット・ドリフトによる全体誤差は95μV、すなわち0.0625LSB未満になります。

電力線モニタリング・アプリケーションの場合、特に最大128チャンネルを1つのボード上で測定することがあるため、電力を考慮に入れることが重要となります。OP1177ファミリーの電源電流の消費は通常、アンプ当たり400μA未満です。

以下の表は、電力線モニタリング・アプリケーション用に推奨されるアンプのいくつかを比較したものです。

製品番号	ノイズ (nV/√Hz)	標準 オフセット 電圧 (mV)	最大 オフセット 電圧 (mV)	電源電流 (mA)	パッケージ
OP4177	8.0	15	75	0.4	TSSOP、 SOIC
ADA4004	1.8	40	125	1.7	LFCSP、 SOIC
OP747	15	30	100	0.3	SOIC

ADC電源の生成

ADCにはアナログとデジタルの両方の電源が必要です。5Vのデジタル電源はほとんどのシステムが備えています。5Vのアナログ電源を備えているシステムは多くありません。アナログとデジタルの両方の回路に同じ電源を使用することは、不要なノイズがシステムにカップリングするおそれがあるため、通常は避けるべきです。バイポーラの±12V電源が利用できる設計の場合、ADP3330などの低コストの低ドロップアウト・レギュレータ(LPO)を使用すると、温度、負荷、ラインの変動に対して1.4%の精度を有する、高品質な3Vまたは5Vの電源を生成できます。

通信

1つの変電所内の多くのシステムは、リモートのメイン・システム・コントローラ（通常は電氣的に絶縁されています）との通信が必要です。LEDとフォトダイオードを用いたフォトカプラ・ソリューションは、チップ・スケールのマイクロトランスを使用する*iCoupler*®デジタル・アイソレータに置き換わりつつあります。*iCoupler*デバイスは、一般に使用される高速フォトカプラよりもデータレートが2~4倍速く、また、わずか50分の1の電力で動作するため、それに応じて消費電力が低下し、信頼性が向上し、さらにコストが削減されます。統合化ソリューションでは、これらの利点に加えて、ボードのスペース削減とレイアウトの簡略化という利点も生まれます。ADuM1402 4チャンネルのデジタル・アイソレータは、最大2.5kVの絶縁を備え、最大100MSPSのデータレートに対応します。

RS-232は、複数のシステムの接続に使用されることが多いため、各システムとバスとの間の絶縁が不可欠になります。デジタル・アイソレータはRS-232規格に対応していないため、トランシーバとケーブルの間で使用することはできず、トランシーバとローカル・システムの間で使用されます。ADuM1402 *iCoupler* デジタル・アイソレータ、ADM232L RS-232 トランシーバ、絶縁電源を組み合われば、グラウンド・ループが解消され、サージ被害から効果的に保護できるようになります。

RS-485プロトコルを使用するシステムの場合、シングルチップの絶縁RS-485トランシーバADM2486を利用できます（図5）。最大20Mbpsのデータレートに対応可能で、絶縁定格は2.5kVです。

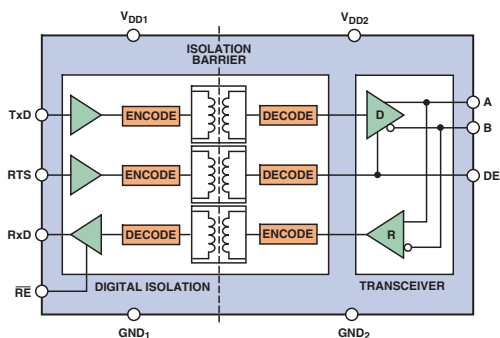


図5. ADM2486は、省コストおよび省スペースの絶縁RS-485トランシーバです。

信号処理

電力線モニタリング・アプリケーションは、複雑な数値計算を行うためのデジタル信号処理(DSP)が必要です。高性能、低コスト、低電力のADSP-BF531 Blackfinプロセッサは、このような複雑なDFTやFFTの計算に理想的なデバイスです。

このBlackfinプロセッサ（高度なオンチップ統合システム）は、CAN 2.0Bコントローラ、TWIコントローラ、2つのUARTポート、SPIポート、2つのシリアル・ポート(SPORT)、9つの汎用32ビット・タイマ(PWM機能では8つのタイマ)、リアルタイム・クロック、ウォッチドッグ・タイマ、パラレル・ペリフェラル・インターフェース(PPI)を搭載しています。これらの周辺機器により、システム内の複数の部品とインターフェース間での通信を可能にします。

ADSP-BF536やADSP-BF537などのBlackfinプロセッサは、IEEE標準802.3 10/100 Ethernet MAC（メディア・アクセス・コントローラ）を搭載しています。これは現在、多くの電力線モニタリング・システムの標準要件になっています。

実際の設計における考慮事項

PCボードを設計する場合、ADCの位置とその周囲に対して特別な配慮が必要です。アナログ回路とデジタル回路は分離し、ボード内でそれぞれまとめて配置するように設計してください。少なくとも1つのグラウンド・プレーンを使用する必要があります。チップにノイズが混入するのを防ぐため、ADCの真下にデジタル・ラインを設置しないでください。ただし、ノイズ混入を防止するため、アナログ・グラウンド・プレーンはAD7656の下を通るようにします。ボードの他の部分へのノイズの放射を防ぐため、クロックなどの高速スイッチング信号を持つ部品は、デジタル・グラウンドでシールドして、アナログ入力付近を通らないようにしてください。デジタル信号とアナログ信号が交差しないようにしてください。ボード内でのフィードスルーの影響を減らすには、近接する別の層のボード・パターンは互いに直角になるように配置します。

ADCの電源ラインはできるだけ太いパターンにしてインピーダンスを下げ、電源ライン上のグリッチによる影響を低減させます。ボード上のAD7656の電源ピンと電源トラックの間には良好な接続が必要です。すなわち、電源ピンごとに1つまたは複数のビアを使用する必要があるということです。また、AD7656に示される電源インピーダンスを低減し、電源スパイクの大きさを軽減するには、デカップリングを正しく行うことも重要です。並列デカップリング・コンデンサ（通常100nFおよび10μF）をすべての電源ピンに配置する必要があります。このとき、これらのピンと対応するグラウンド・ピンのできるだけ近く（理想的には接触させる）に配置してください。

結論

世界中で電力需要が増大したことにより、電力線と送電変電所の数が増大しています。ますます多くの自動モニタリング/障害検出システムが必要となるため、システムが備えるチャンネルも多くなる傾向が強まっています。システム設計者は性能の向上とコストの削減を同時に追求するため、各ボードに複数のADCを搭載し、ボード領域と消費電力を効率的に使用することがきわめて重要になります。

AD7656などの高性能ADCを使用することで、さらに高度なシステム性能を実現できます。6チャンネルと16ビット分解能の高性能ADCは、低消費電力、高SNR、小型パッケージを兼ね備え、次世代の電力線モニタリングのシステム設計のニーズを満たしています。