

モジュラーデジタイザを使用した電力測定

はじめに：

一般に、デバイスまたは回路のパフォーマンスを評価するには、ライン電力測定が必要です。モジュラーデジタイザ (A/D ボード) は、これらの電力測定を行うことができます。デジタイザ (A/D ボード) は、電圧応答測定器です。適切な電流プローブまたは電流シャントを使用して電流を測定することもできます。

次に、電流と電圧を取得すると、取得した電流と電圧の波形の積に基づいて電力が計算されます。電力は、回路内でエネルギーを転送する速度であり、実電力、皮相電力、無効電力、瞬時電力などの多くの属性で表されます。

このアプリケーションノートでは、モジュラーデジタイザ (A/D ボード) を使用した AC 回路およびデバイスの基本的な電力測定について説明します。

基本的な電力測定：

瞬時電力は、印加電圧と電流の積として計算されます。有効電力 (P) は、ワットで測定された瞬時電力の平均値です。リアクタンス素子 (インダクタまたはコンデンサ) を含む回路は、エネルギーを保存し電力が負荷からソースに流れるように電力の流れを逆にすることができます。これは無効電力 (R) であり、Volt-Amps Reactive または VAR の単位で測定されます。実電力と無効電力のベクトル和は、総電力または皮相電力と呼ばれ、Figure 1 に示されています。

皮相電力 (S) は、実効電圧または実効電圧と実効電流または実効電流の積として計算できます。皮相電力の単位は VoltAmp (VA) です。実電力ベクトルと皮相電力ベクトルで囲まれた角度 (θ) は、電流波形と電圧波形の位相差を表します。その角度のコサイン、有効電力と皮相電力の比は力率 (pf) と呼ばれます。

$$pf = \cos(\theta) = \frac{P}{S}$$

デバイスが純粋に抵抗性である場合、電流と電圧の波形は同相であり皮相電力と実電力は等しく、力率は 1 に等しくなります。無効成分が増加すると力率は低下します。

ライン電圧の測定：

電圧測定にはプローブの使用が必要です。従来のオシロスコープの高インピーダンスプローブは、デジタイザ (A/D

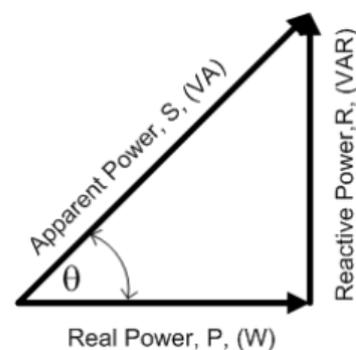


Figure 1 電源コンポーネントのベクトル図

ボード) に使用できます。プローブを考慮して垂直電圧データをスケールリングできる機能は非常に便利です。ほとんどの電力測定にはライン (メイン) 電圧測定が必要であるため、シングルエンドプローブに関連する接地問題を回避するために、これらの測定を差動的に行うことが最善です。デジタイザ (A/D ボード) は、2 つのプローブ入力を受け入れ、差を計算できる必要があります。あるいは、ホットラインとニュートラルラインの電圧を個別に取得し、波形計算を使用して差し引くことができます。これは差動プローブが利用可能な場合です。

ライン電流の測定 :

電流測定を行う最も便利な方法は、適切な電流プローブを使用することです。使用する電流プローブに、測定器とは別のコントロールがあることを確認してください。電流プローブの出力を適切なスケールリングでデジタイザチャンネルに適用して、電流単位でプローブからの信号を表示できます。

デジタイザの選択 :

ほとんどのライン周波数測定は、50~400 Hz の基本周波数で行われるため、デジタイザ (A/D ボード) の帯域幅要件はそれほど大きくありません。伝導性工ミッション試験の実施に関心がある場合、大幅な損失なしに電力基本波の 40 次高調波まで対応する能力が役立ちます。これにより、帯域幅要件が約 20 kHz 以上になります。デジタイザ (A/D ボード) には、電力線の高次高調波をレンダリング

するのに十分な振幅分解能が必要です。これは 12~16 ビットで十分です。

チャンネル数は、シングルエンドまたは差動測定のどちらを対象とするかによって異なります。差動測定は、各測定に 2 つのチャンネルを組み合わせます。単相の場合、ライン測定では 4 つの入力チャンネルが 2 つの差動チャンネルを生成します。各フェーズで 3 フェーズ測定を行うには、6 つ以上のチャンネルが必要です。3 つの差動電圧チャンネルと 3 つのシングルエンド電流チャンネルを想定すると、9 つのチャンネルが必要です。ほとんどのデジタイザ (A/D ボード) は、バイナリプログレッション (1/2/4/8/16) で 1~16 のチャンネルを提供するため、測定タスクを実行するには、次に高いチャンネル数を選択する必要があります。帯域幅などのサンプルレートは、必要な帯域幅の 4~5 倍より大きくする必要があります。Table 1 は、Spectrum デジタイザ (A/D ボード) または digitizerNETBOX モデルを選択するためのガイダンスを提供します。

Model Family	Interface	Channels	Channel Input	Bandwidth	Maximum Sampling Rate
M2i.47xx	PCIe, PCI	8, 16	Single-ended	0.5 MHz	1.33 MS/s
M2i.46xx	PCIe, PCI	2, 4, 8	Single-Ended Differential	0.1, 0.5, 1.5 MHz	0.2, 1, 3 MS/s
M2i.49xx	PCIe, PCI	2, 4, 8	Single-Ended Differential	5, 15, 30 MHz	10, 30, 60 MS/s
DN2.46x	LXI, LAN	4, 8, 16	Single-Ended Differential	0.1, 0.5, 1.5 MHz	0.2, 1, 3 MS/s
DN2.49x	LXI, LAN	4, 8, 16	Single-Ended Differential	5, 30 MHz	10, 60 MS/s

Table 1 ラインパワー測定と最も互換性のある Spectrum 製デジタイザおよび digitizerNETBOX ファミリ

単相電力測定の例 :

次の例では、小型のライン電源冷却ファンに必要な電力を測定します。測定は、4つのアナログチャンネル、16ビットの解像度、60 MS/sのサンプルレート、30 MHzの帯域幅を備えた digitizerNETBOX モデル DN2.496.04 を使用して行われました。Tektronix モデル P6042 電流プローブと1組のパッシブオシロスコーププローブを使用して、電流波形と電圧波形を取得しました。ライン電流とライン電圧が測定されました。電源線のホットリード線またはニュートラルリード線が接地されないように、線間電圧を差動で測定しました。



Figure 2 は、取得したデータの制御と処理に使用される Spectrum 社の SBench 6 ソフトウェアの測定結果を示しています。



Figure 2 Spectrum 社 digitizerNETBOX DN2.496.04 および SBench 6 ソフトウェアを使用した小型冷却ファンのライン電力の測定。

入力電圧は、Ch2 と Ch3 に接続された2つのパッシブプローブで差動的に測定されます。チャンネルは結合され、上部中央グリッドにチャンネル Ch2 として表示されます。読み取り値は、プローブの減衰を反映するようにスケーリングされます。電流は電流プローブの出力を反映して、下部の中央グリッドの Ch0 に表示されます。このデータは電流プローブの感度によってもスケーリングされるため、電流の垂直単位で読み取ります。電流と電圧の両方のピークツーピーク値と実効値 (rms) は、図の左側の [Info] ペインに表示されます。

瞬時電力は、SBench 6 のアナログ計算を使用して、電流波形と電圧波形を複数計算して計算されます。電力は左端の

グリッドに表示されます。パワーのピークツーピークおよび平均値も[Info]ペインにリストされます。瞬時電力の平均は実際の電力を表し、6.6 ワットとして記録されます。

皮相電力は、線電流と電圧の実効値の積をとることによって計算されます。測定値（121.5 V および 63.2 mA）に基づくと、皮相電力は 7.68 VA です。

これにより、力率を 0.86 として計算できます。一番右の 2 つのグリッドで電流と電圧の波形を水平方向に拡大した図を見ると、電圧波形（右上）が誘導特性を示す電流波形をリードしていることがわかります。正のスローブゼロクロスを示すカーソルは、電圧波形が電流波形の 1.44 ms 前であることを記録します。これは、31 度の位相進みを表します。これは、 \cos^{-1} (pf) または 30.68 度として計算することもできます。力率に基づく計算は、カーソルの配置の不確実性の影響を受けないため、より正確です。

ラインハーモニクス：

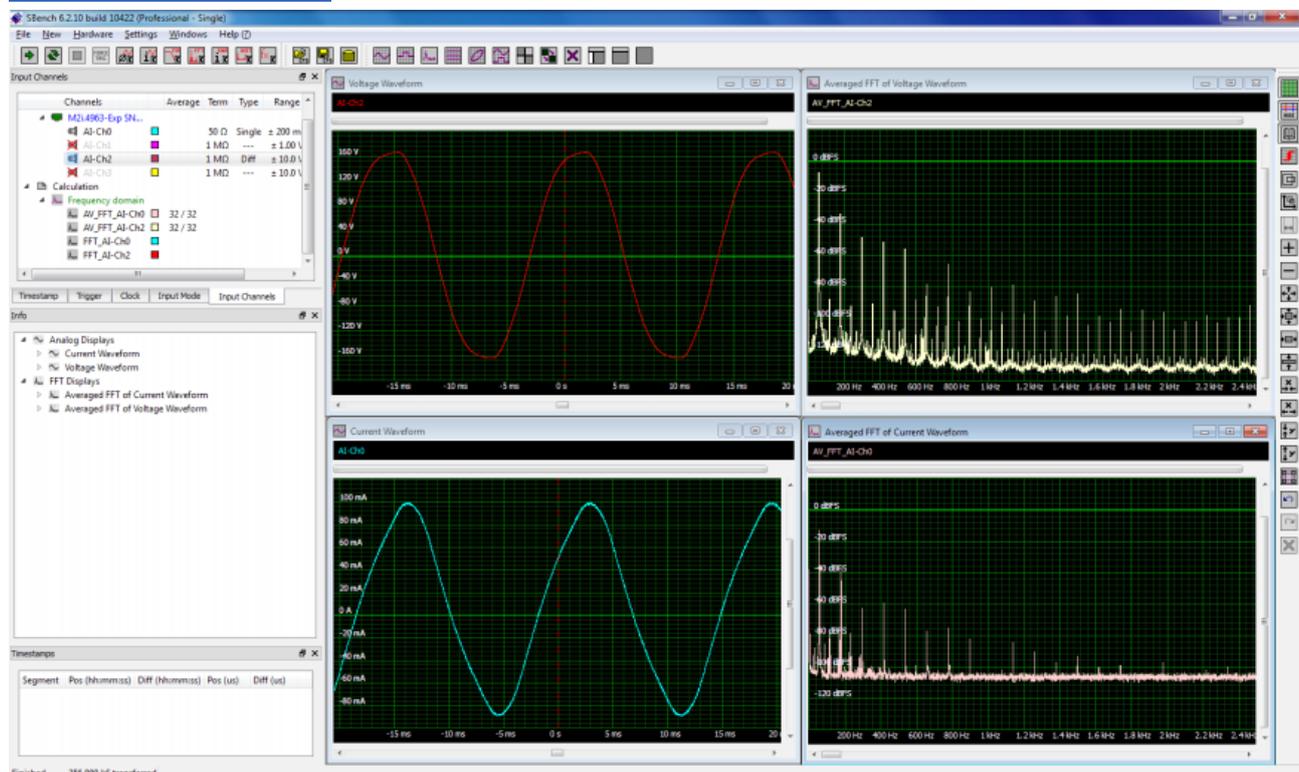


Figure 3 FFT を使用したライン高調波解析。電圧スペクトルは右上にあり、電流スペクトルは右下にあります

電流と電圧の波形を取得したら、Figure 3 によって解析を周波数領域に拡張できます。Figure 3 は、ライン電流（左下）とライン電圧（左上）の両方の波形の平均スペクトルを示しています。線間電圧スペクトルには、より高次の高調波があります。奇数次の高調波が最も顕著です。現在のスペクトルの全体的な高調波成分は低くなっており、それも主に奇数次高調波です。

三相電源 :

三相電力は、発電、送電、および配電の多相 AC 配電システムの一つです。大型モーターやその他の重い電気負荷に電力を供給するために使用されます。3 相システムは通常、電力伝送に使用する導体材料が少ないため、同等の電圧レベルの同等の単相または 2 相システムよりも経済的です。単相 AC 電源には 2 本の導体が必要です。3 相電源は、1 本の余分な導体を使用することで 3 倍の電力を送信できます。これは、送信コストが 50%増加すると、送信電力が 200%増加することを意味します。

三相接続用語 :

Figure 4 に示す 3 相モーターなどの 3 相接続は、WYE (上図) または DELTA (下図) 構成で接続されます。WYE 接続の電圧 V_{an} 、 V_{bn} 、および V_{cn} は、相電圧と呼ばれます。 V_{ab} 、 V_{bc} 、および V_{ac} とマークされた電圧は線間電圧です。電流 I_a 、 I_b 、および I_c は相電流です。負荷によって消費される総電力は、WYE 接続の個々の相電流-電圧積の合計です。太字のテキストはベクトル演算を示していることに注意してください。

$$P_t = I_a * V_{an} + I_b * V_{bn} + I_c * V_{cn}$$

通常、電力は相電圧ではなく線間電圧を使用して計算されます。

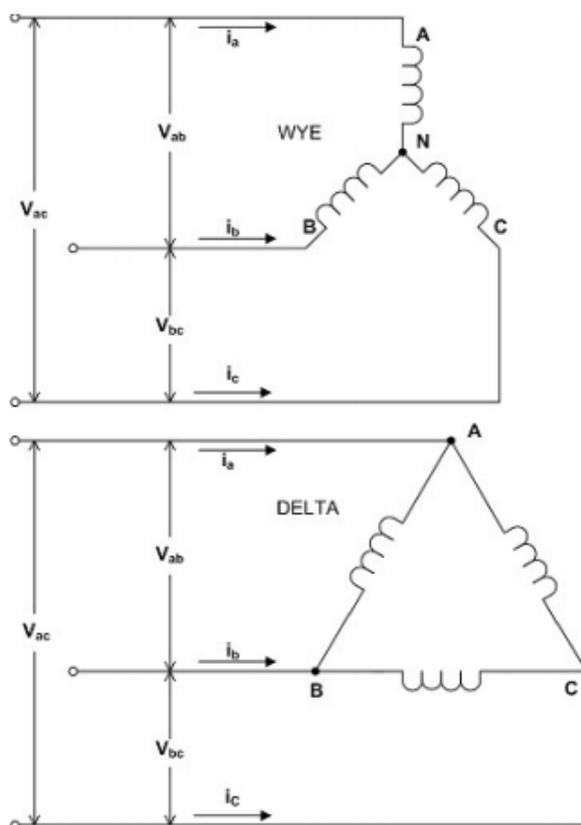


Figure 4 モーターおよび負荷の両方の接続を示すモーター（負荷）の 3 相接続

Figure 5 は、相電圧、相電流、および線間電圧のフェーザ図を示しています。電圧計算はベクトル的に実行されます。平衡システムの線間電圧の大きさは、相電圧の 3 倍に等しくなります。相電圧が線間電圧より 30 度先行することに注意してください。これは、相電圧から線間電圧を計算するために使用されるベクトル減算の結果です。高電圧差動プローブは、ラインおよび相電圧の測定に使用され、信号に 100 : 1 の減衰を適用します。その結果、デジタイザ入力での相電圧は 1.69 V ピーク (3.38 Vpk-pk) です。÷100 プローブの使用により、これらの電圧は 100 倍にスケールされます。これにより、相電圧が 169 Vpk (338 Vpk-pk) として報告されます。これは 120 Vrms です。

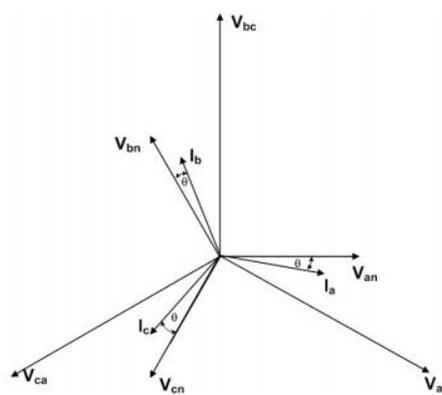


Figure 5 WYE 接続モーターのフェーザ図

線間電圧は相電圧の3倍、つまり $208\text{ V} \pm \text{rms}$ です。これは、米国の名目上の三相電圧です。上記を確認するには、デジタイザ (A/D ボード) で相電圧を取得してから、線間電圧を計算します。これを Figure 6 に示します。

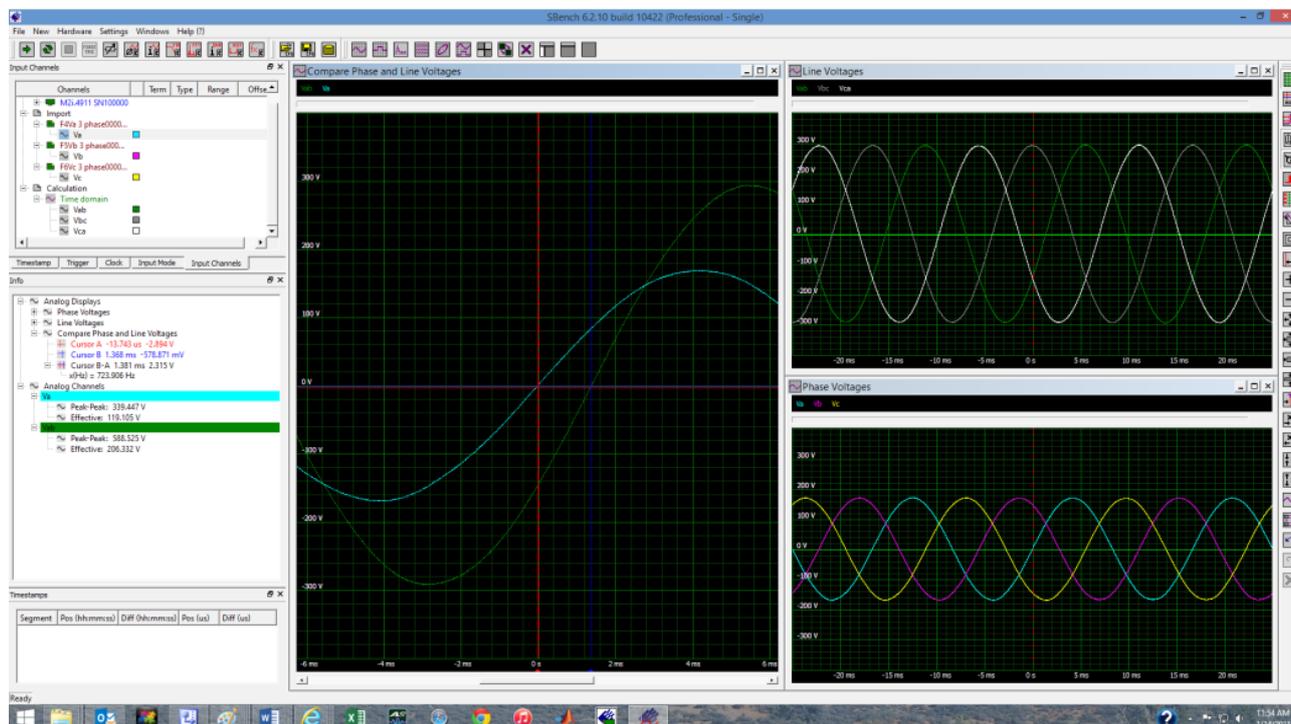


Figure 6 線間電圧と相電圧の比較

チャンネル Va、Vb、Vc は測定された相電圧です。Vab、Vbc、Vca は計算された線間電圧です (公称 586 Vpk-pk)。一番左のグリッドのズームトレースのカーソル測定で確認されるように、相電圧とそれに隣接する線間電圧の位相差は 30 度です。線間電圧 Vab は、相電圧 Va に対して、 16.67 ms の周期から 1.38 ms 遅れています。線間電圧の位相差は 120 度です。Figure 5 の電流フェーズは、相電圧からの一般的な位相差 θ で示されています。この角度 θ は、モーターの巻線に組み込まれる可能性のある無効成分を表します。この実験では、純粋な抵抗性負荷を使用して、 θ が 0 度になります。

三相電力測定：

Figure 7 に、WYE 接続負荷 (ここで、相電圧 (Va、Vb、Vc)、相電流 (Ia、Ib、Ic)、相電力損失 (Pa、Pb、Pc) を示します。相電圧と線間電圧の両方にアクセスできます)。相電圧に関連する相電流を掛けると、結果は各相の瞬時電力になります。瞬時電力の平均値は、実電力成分です。3つのすべての位相電力測定値の合計が、負荷の総有効電力です。

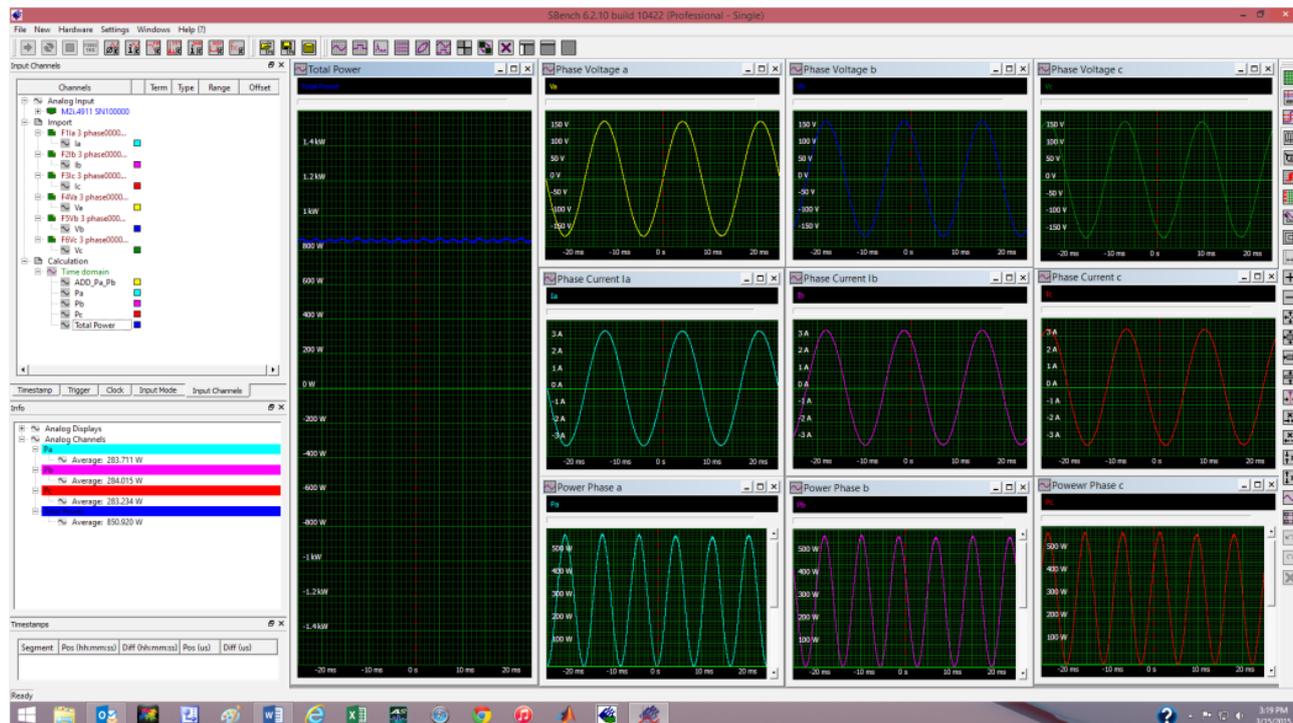


Figure 7 この単純な例では、3つのすべての相電圧と3つの相電流を使用して相電力を計算します。

この測定は、3ワットメーターの電力測定と呼ばれます。外部差動プローブを使用して電圧を測定してこの測定を行うには、6つのチャンネルが必要です。シングルエンドのプローブを使用する場合、チャンネルの数は9に増加します。このタイプの測定では、デジタイザ (A/D ボード) 構成で最大 16 チャンネルを指定できる柔軟性が大きな利点です。相電圧は、Figure 7 の一番上の行に示されています。中央の行に相電流が表示されます。位相パワーは下の行に表示されます。3相すべての電力波形の合計は、「Total Power」というラベルが付いた一番左のグリッドに表示されます。総電力は比較的一定であることに注意してください。左側の[Info]ペインに表示されるパラメータは、個々の位相電力波形の平均値と合計電力を読み取ります。3つの相電力測定の前平均値の合計は、平均総電力に等しくなります。合計電力の測定結果は850.9ワットです。

2ワットメーター方式：

別の手法は2ワットメーター法で、2つの線間電圧と2つの相電流のみを測定する必要があります。

数学的形式で：

$$PT(t) = V_{ac}(t) i_a(t) + V_{bc}(t) i_b(t)$$

これは次のように導出できます。

これは、次の数学的な導出を使用して検証できます。

$$PT = V_a(t) i_a(t) + V_b(t) i_b(t) + V_c(t) i_c(t)$$

ただし、キルヒホッフの現在の法則を使用すると、 $i_a + i_b + i_c = 0$ または $i_c = -i_a - i_b$

$$P_T(t) = V_a(t) i_a(t) - V_c(t) i_a(t) - V_c(t) i_b(t) + V_b(t) i_b(t)$$

$$P_T(t) = V_{ac}(t) i_a(t) + V_{bc}(t) i_b(t)$$

ここで： $V_a - V_c \equiv V_{ac}$ および $V_b - V_c \equiv V_{bc}$

以下に、2つの差動電圧プローブと2つの電流プローブとともに4チャンネルSpectrum デジタイザ (A/D ボード) を使用して実現できる2ワットメータ法の適用例を示します。



Figure 8 2つの差動プローブと2つの電流プローブとともに4つのデジタイザチャンネルのみを必要とする牽引電力計方式を使用した総電力の計算。

個々の相電圧と電流に基づいて総電力を計算する例のように、この方法は2つの線間電圧 (V_{ac} と V_{bc}) と2つの相電流 (I_a と I_b) を使用します。線電圧は上の行に表示され、相電流は中央の行に表示され、個々の電力波形は下の行に表示されます。前と同様に、総電力は「Total Power」とマークされた左端のグリッドに表示されます。各電力波形の平均値または平均値は、左端の情報グリッドに表示されます。この場合も、公称電力は851ワットです。

まとめ：

AC電力測定の基本概念は、瞬時電力、実電力、皮相電力、無効電力の定義を含めてカバーされています。適切な数のチャンネルを備えたデジタイザを使用して、適切な電圧および電流プローブを使用する単相および多相電力システムを測

定できます。デジタイザ (A/D ボード) の汎用性、通信の容易さ、および迅速な情報転送により、AC 電力測定に最適です。Spectrum 製デジタイザ (A/D ボード) は小型でコンパクトであり、さまざまなテスト環境で使用できるように、さまざまなフォームファクタで利用できます。

たとえば、digitizerNETBOX 製品は、イーサネット経由で制御できるように設計されており、リモートでローカルエリアネットワーク (LAN) のどこでも操作できるようになっています。PXI カードは、完全なテストシステムの一部としてモジュール式計測器が混在するアプリケーションで使用できます。PCI カードと PCIe カードは最新のほとんどの PC に直接インストールでき、強力なスタンドアロンテストステーションになります。



Spectrum Instrumentation 社について

Spectrum 社は、Spectrum Systementwicklung Microelectronic GmbH として 1989 年に設立され、2017 年に Spectrum Instrumentation GmbH に改名されました。最も一般的な業界標準 (PCIe、LXI、PXIe) で 500 を超えるデジタイザおよびジェネレータ製品を作成するモジュール設計のパイオニアです。これら高性能の PC ベースのテスト & メジャーメントデザインは、電子信号の取得・生成および解析に使用されます。同社はドイツの Grosshansdorf に本社を置き、幅広い販売ネットワークを通じて世界中に製品を販売し、設計エンジニアによる優れたサポートを提供しています。Spectrum 社の詳細については、www.spectrum-instrumentation.com を参照してください。