

E-3

パワーアナライザによる電力測定の基本と応用



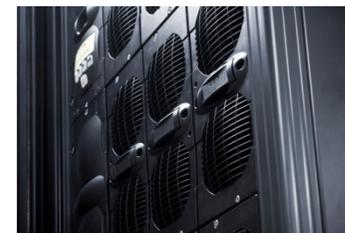
宮崎 強

Tektronix[®]

KEITHLEY
A Tektronix Company

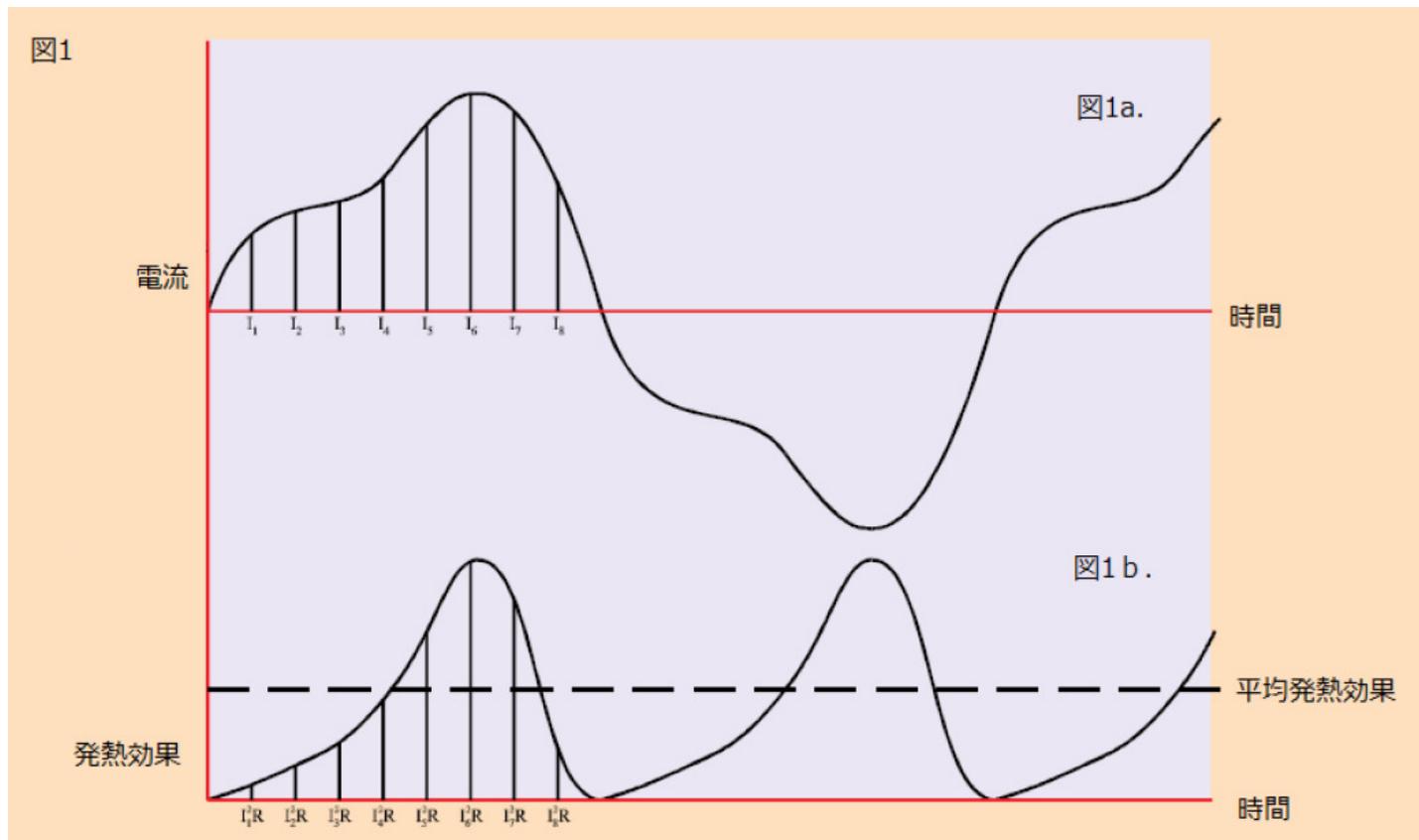
パワー・アナライザのアプリケーション

- 電力変換
- 発電
- インバータ
- モーター駆動回路
- 電動推進力
- 無停電電源 (UPS)
- 周波数変換
- 電気自動車／ハイブリッド自動車
- 高効率照明
- 民生機器／事務機器
- 産業機器
- 医療機器
- 待機電力



AC理論の基礎

- RMS (Root Mean Square Value)、実効値



抵抗Rに流れる電流 I による発熱効果は

$$W = I^2 R$$

AC理論の基礎

抵抗Rに流れる電流 I_n による発熱効果の平均値(電力)は

$$W = \frac{I_1^2 R + I_2^2 R + I_3^2 R \dots + I_n^2 R}{n}$$

平均発熱効果を生じさせる電流と等価の電流 I は

$$I^2 R = \frac{I_1^2 R + I_2^2 R + I_3^2 R \dots + I_n^2 R}{n}$$

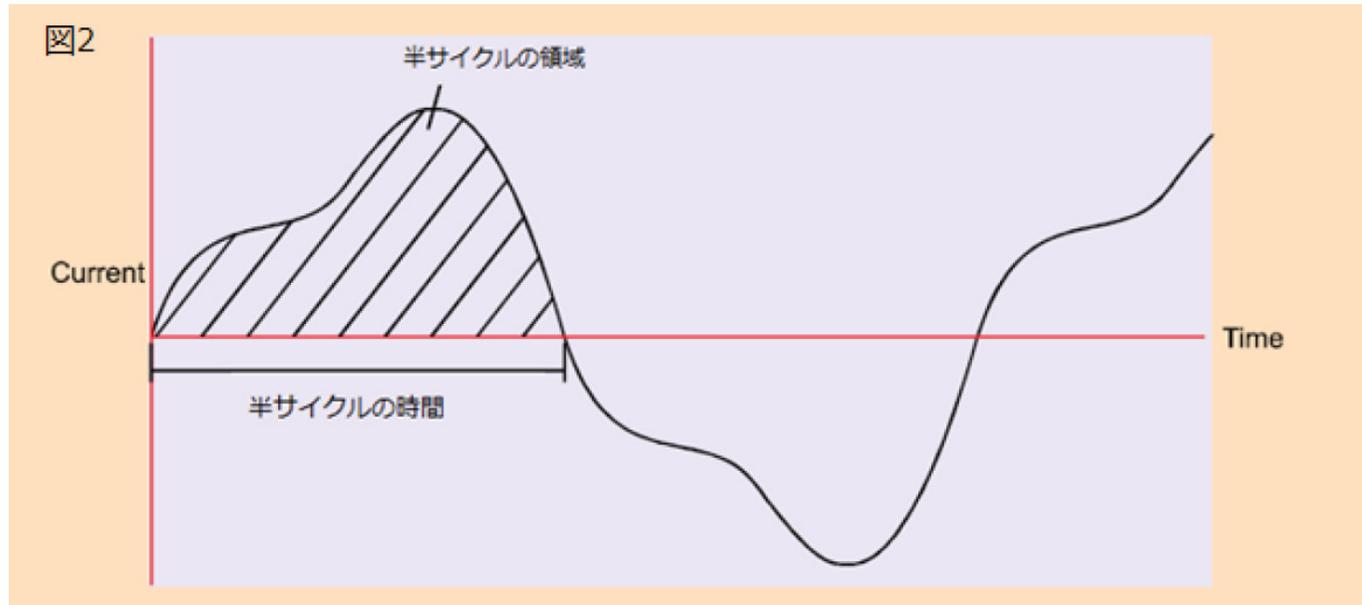
$$I = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 \dots + I_n^2}{n}}$$

= 電流の二乗平均平方根

= 電流の実効値

AC理論の基礎

- 平均値



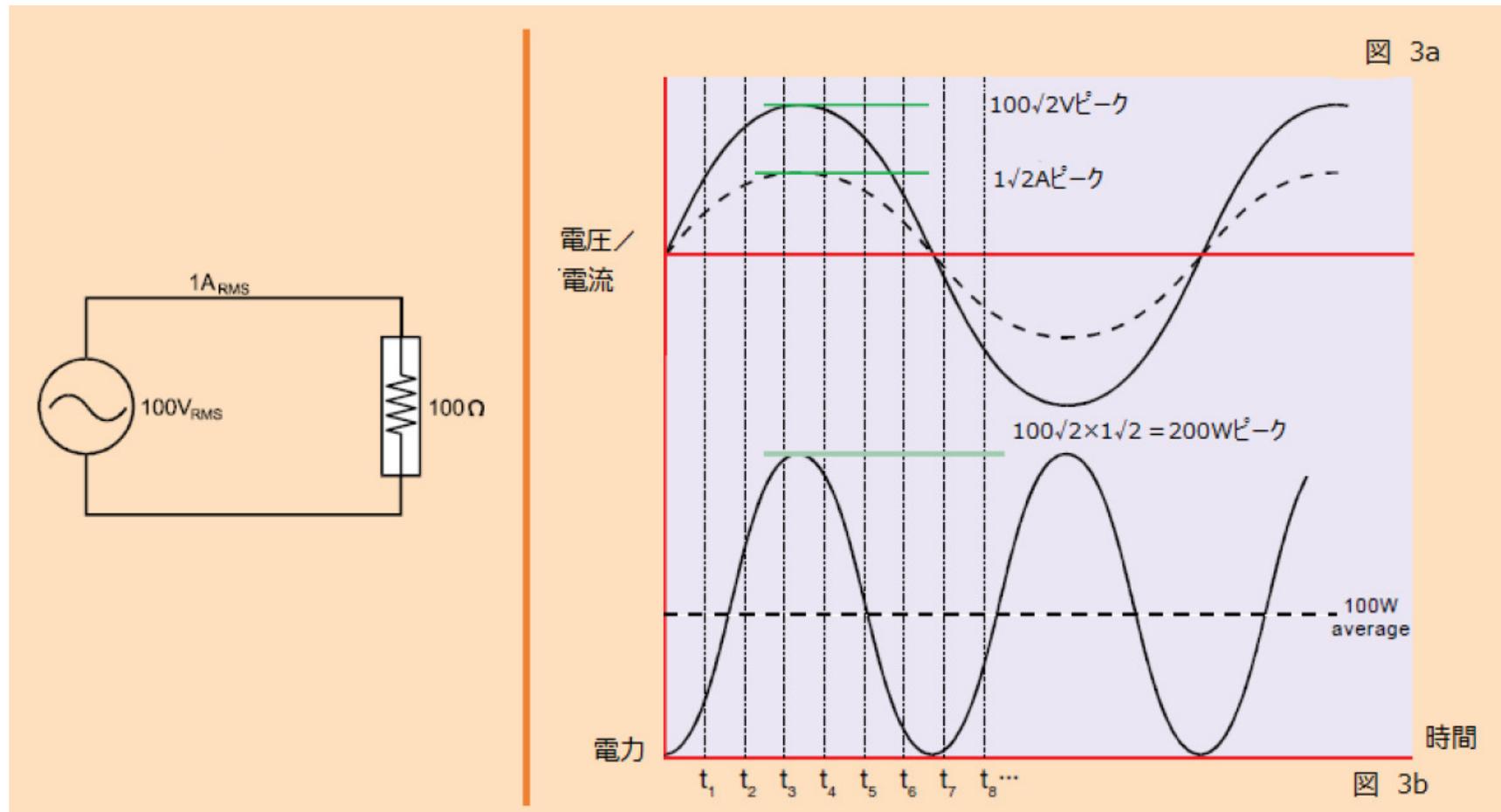
$$\text{平均値} = \text{半サイクルで囲まれた領域} \div \text{半サイクルの時間長}$$

全波整流した波形の平均値を計算し、実効値 = 1.11 × 平均値の関係を使用しているマルチメータでは、純粋な正弦波以外では、正しい読値を得られない。

$$\begin{aligned} \text{正弦波の波形率} &= \pi / (2\sqrt{2}) \\ &\approx 1.11 \end{aligned}$$

AC理論の基礎

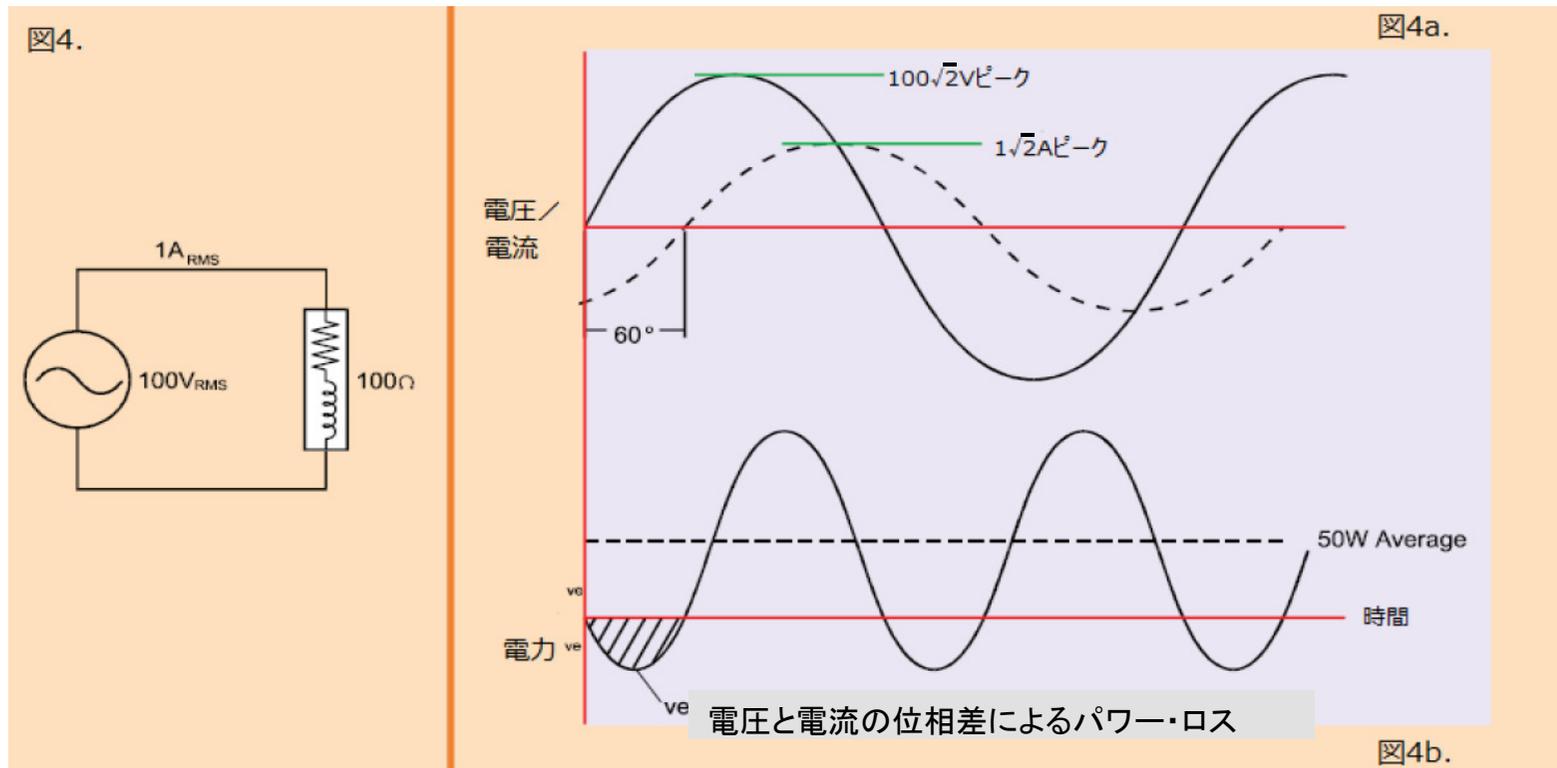
- 有効電力(W)と皮相電力(VA)、Real Power とApparent Power



抵抗負荷の場合の電力

AC理論の基礎

- 有効電力 (W) と皮相電力 (VA)、Real Power と Apparent Power

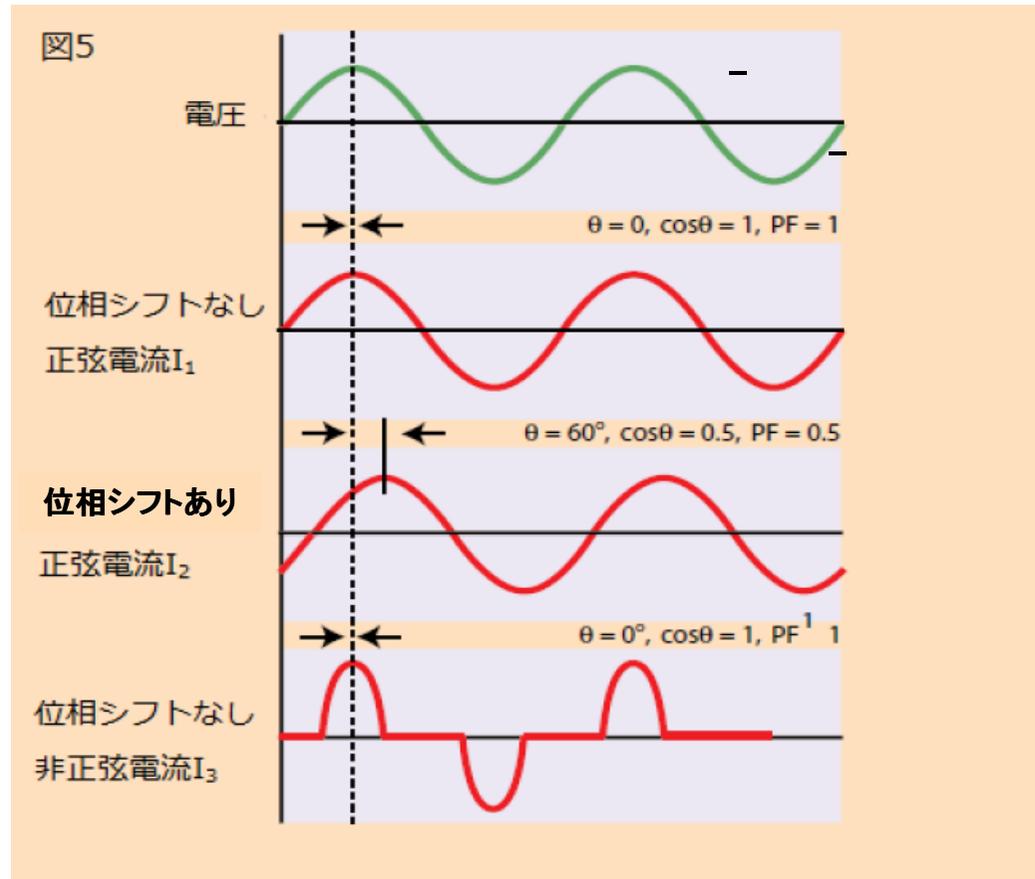


誘導性負荷を含む場合の電力

$$\text{皮相電力} = V_{\text{RMS}} \times I_{\text{RMS}}$$

AC理論の基礎

- 力率



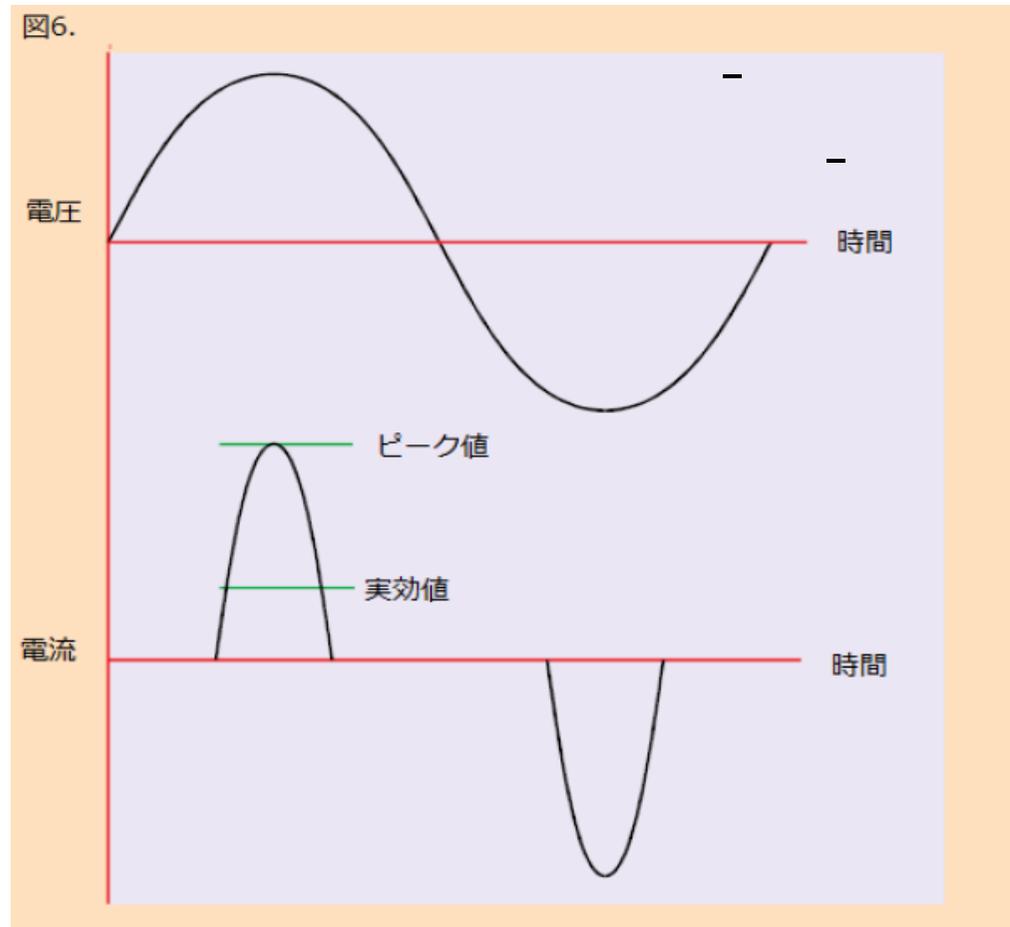
$$\text{力率} = \text{有効電力} \div \text{皮相電力}$$

電流、電圧が正弦波の場合は $PF = \cos\theta = \cos 60^\circ = 0.5$

(正弦波以外では $\cos\theta$ にならない)

AC理論の基礎

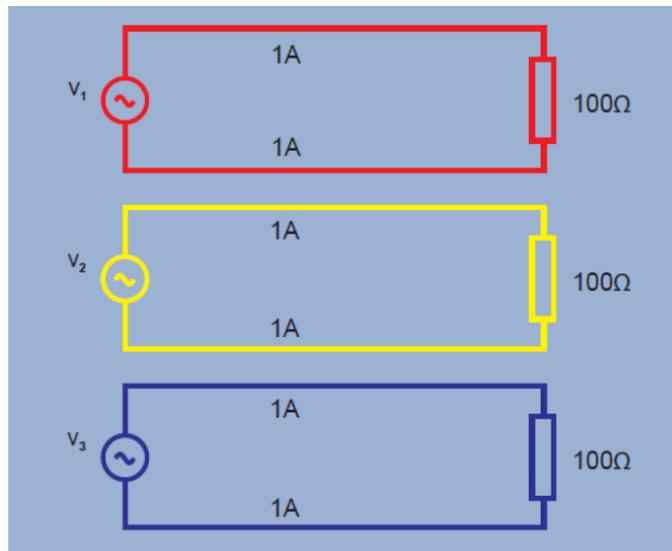
- クレストファクタ



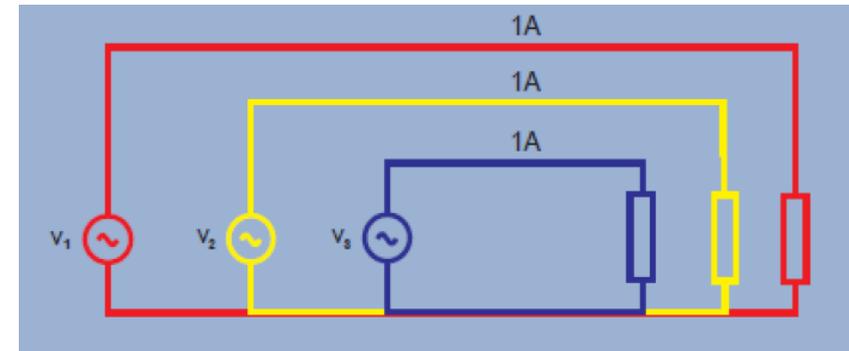
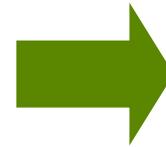
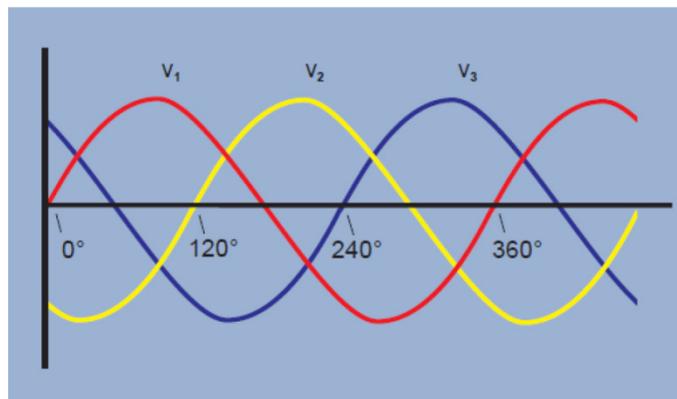
$$\text{クレストファクタ} = \text{ピーク値} \div \text{実効値}$$

三相交流システム

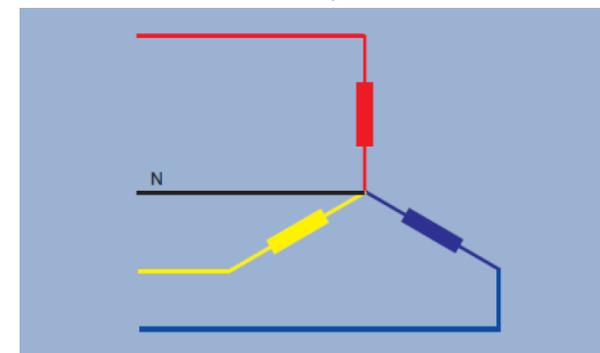
- 三相システムのスター結線 (Y結線)



120度シフトした3つの単相システム

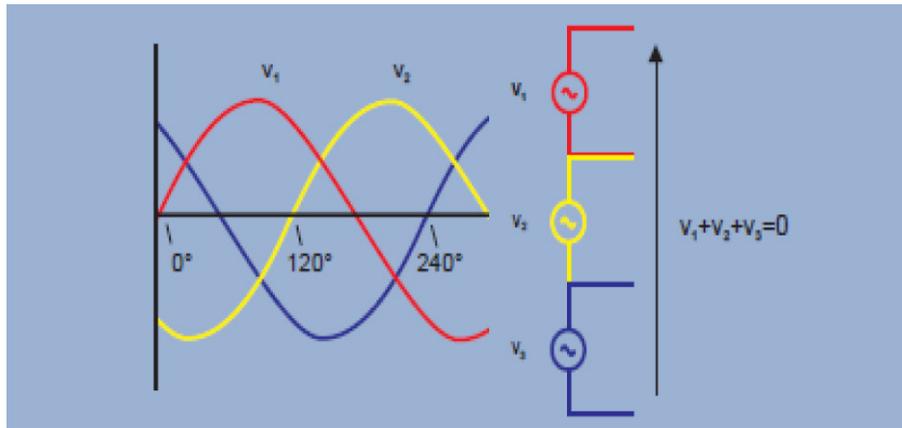


スター結線

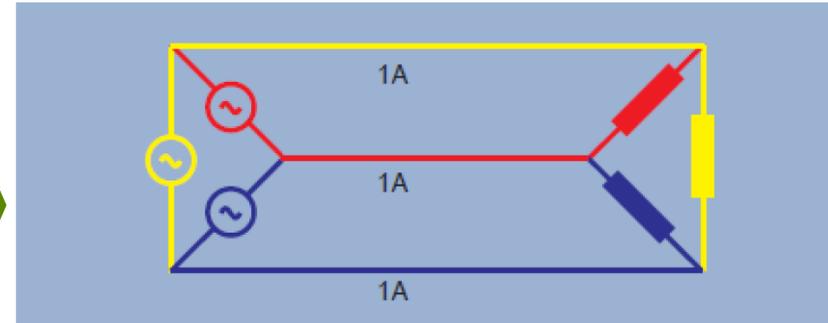


三相交流システム

- 三相システムのデルタ結線

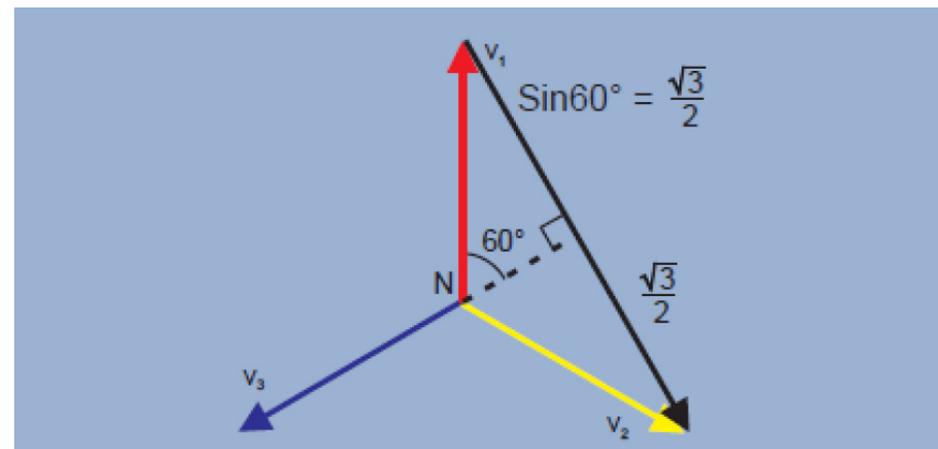


120度シフトした3つの単相システム



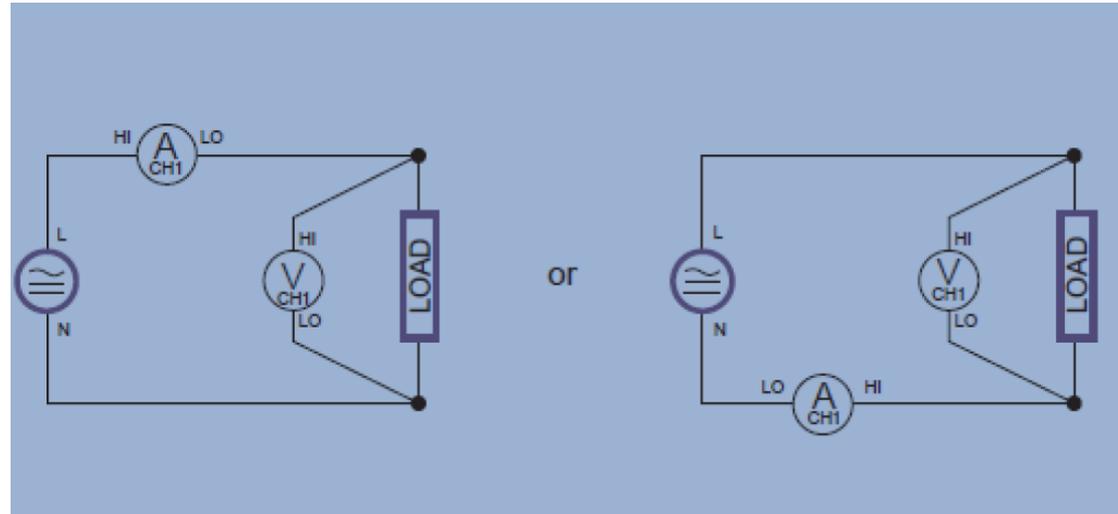
デルタ結線

相間電圧 = $\sqrt{3}$ × 相電圧
(三相のバランスがとれている場合)

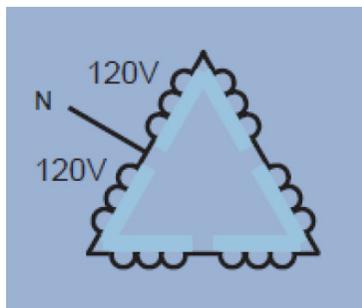


パワーアナライザによる単相システムの測定

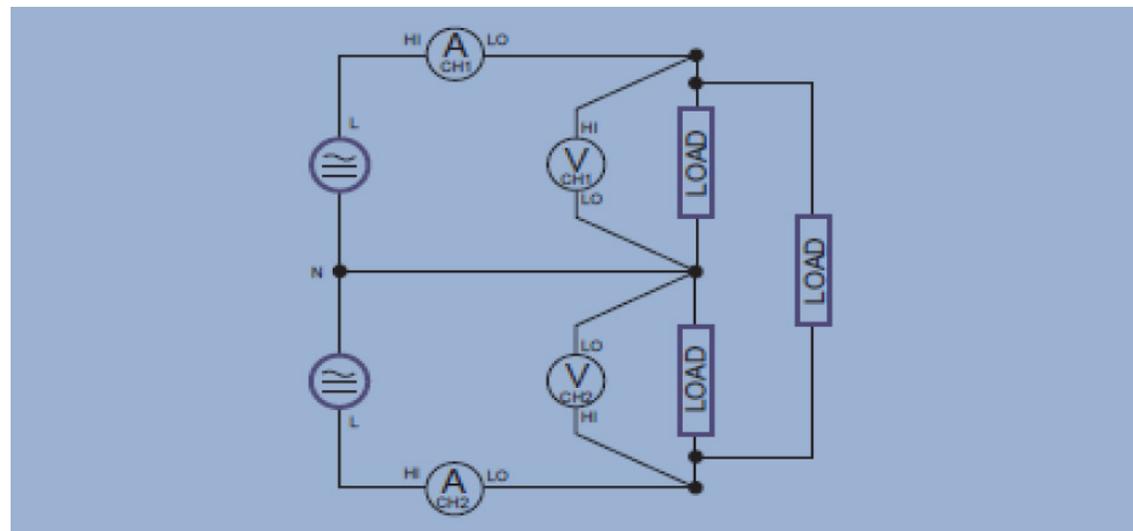
- 単相2線接続の測定



- 単相3線接続の測定
- 2チャンネルで測定

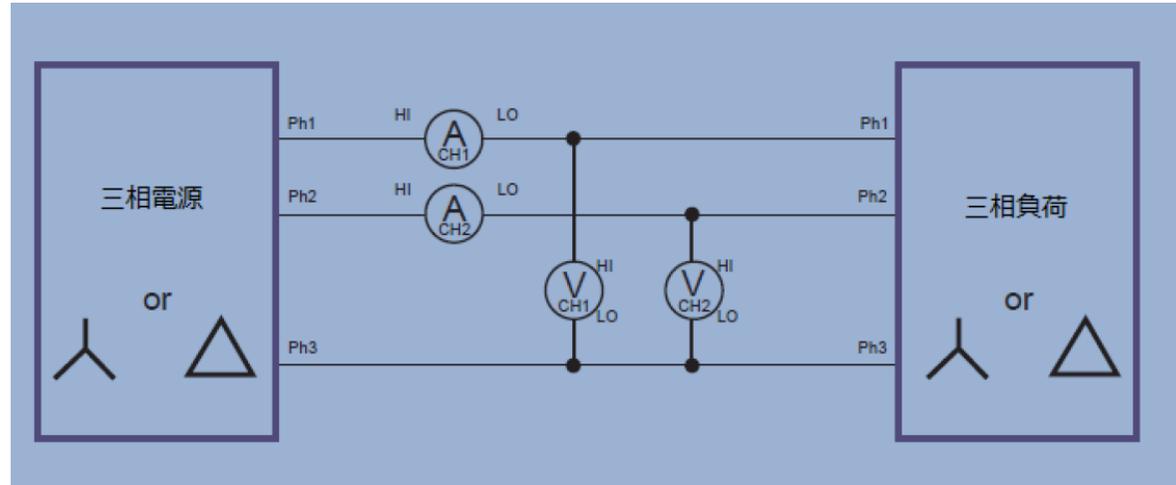


Δシステムのセンター・タップ



パワーアナライザによる三相システムの測定

- 三相3線接続の測定
 - 2チャンネルで測定



- 三相Yシステムを2チャンネルで測定する原理

パワーメータ 1 の読み = $i_1 (V_1 - V_3)$

パワーメータ 2 の読み = $i_2 (V_2 - V_3)$

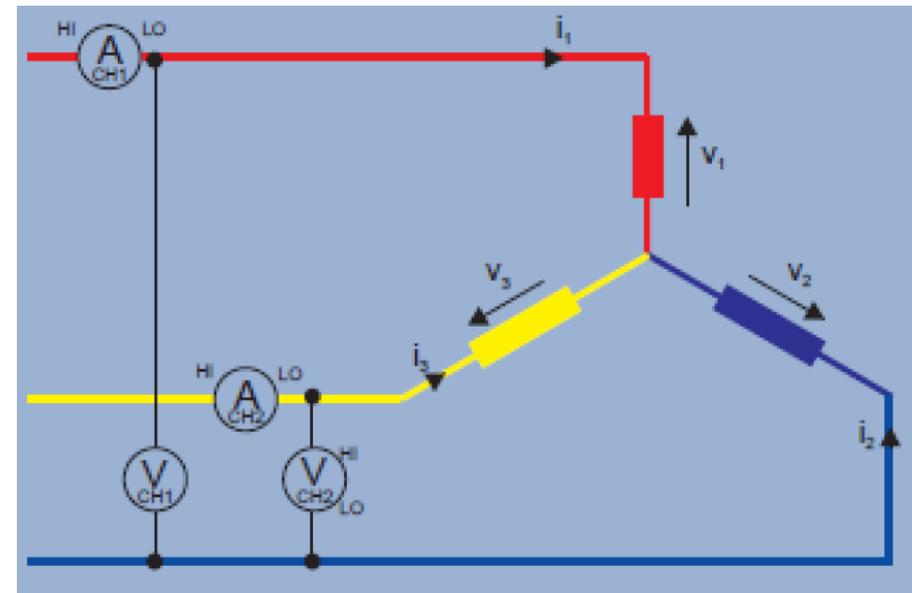
W1 + W2 の読みの合計 = $i_1 V_1 - i_1 V_3 + i_2 V_2 - i_2 V_3$

= $i_1 V_1 + i_2 V_2 - (i_1 + i_2) V_3$

(キルヒホッフの法則により、 $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ 、したがって

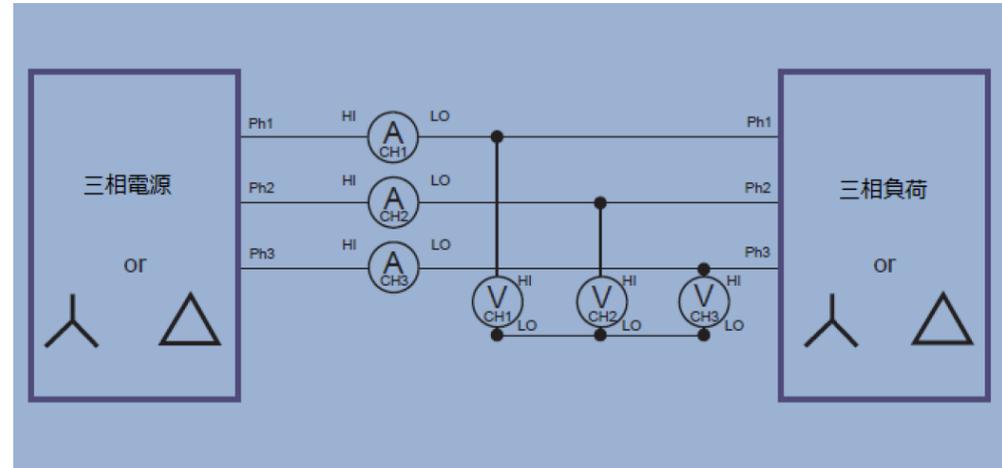
$i_1 + i_2 = -i_3$)

W1 と W2 の読みの合計 = $i_1 V_1 + i_2 V_2 + i_3 V_3$ = 瞬時電力の合計

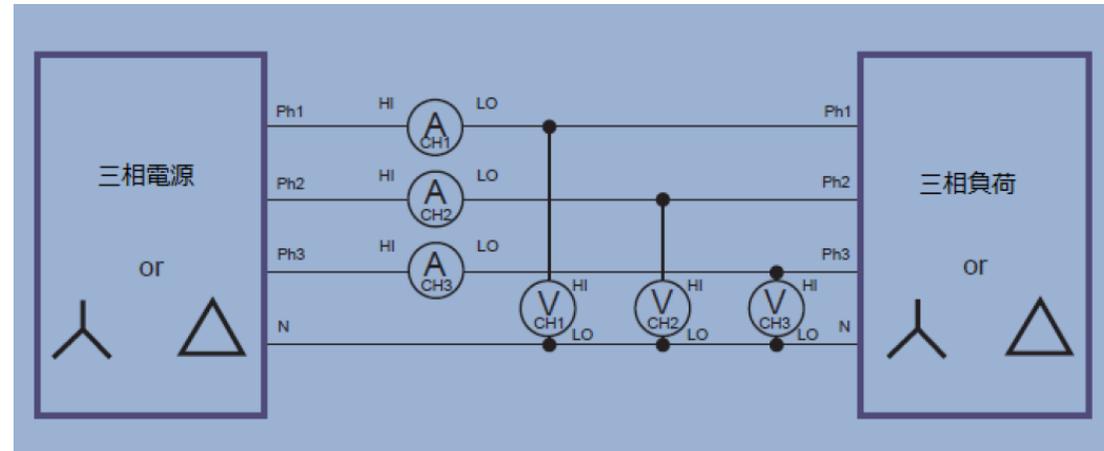


パワーアナライザによる三相システムの測定

- 三相3線接続を仮想中性点を使用して3チャンネルで測定
 - 各相の電力と相電圧
(中性点から各相への電圧)
を直接測定できる



- 三相4線接続
 - 3チャンネルで測定



線数がNの場合、(N-1)チャンネルのパワーアナライザが必要

パワー・エレクトロニクスの評価ソリューション

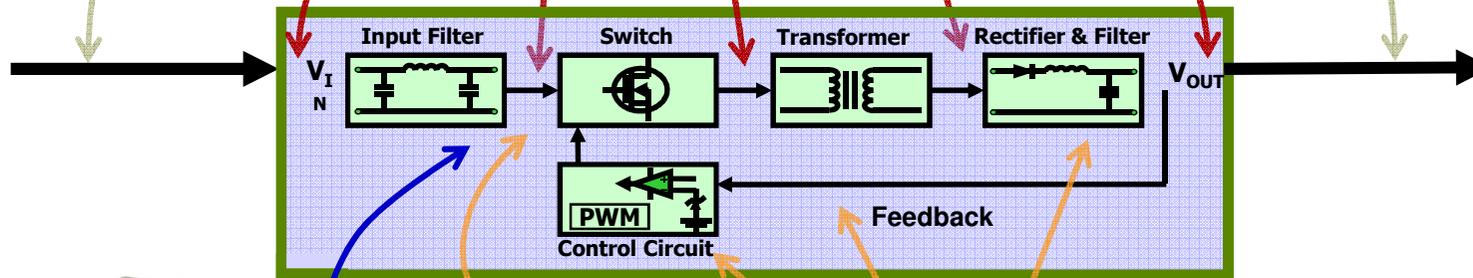
新製品



Tektronix PA4000型パワー・アナライザ



Tektronix オシロスコープとパワー・プローブ



Tektronix MDO4000



Keithley パラメトリック・カーブ・トレーサ、ソース・メータ / SMU

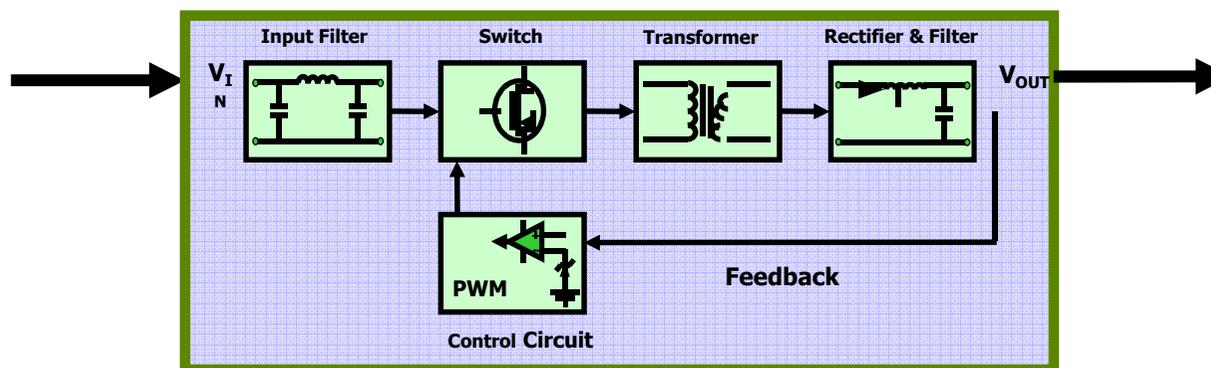
パワー・アナライザによる解析

入力

- 電圧および電流入力
- ライン・ハーモニクス
- フリッカ
- 有効電力
- 無効電力
- 力率

出力

- 三相電圧および電流
- 変換効率
- 有効電力
- 無効電力
- 力率
- 位相角



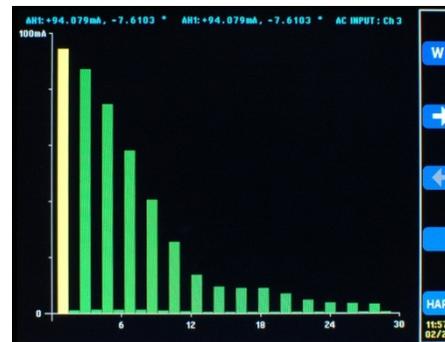
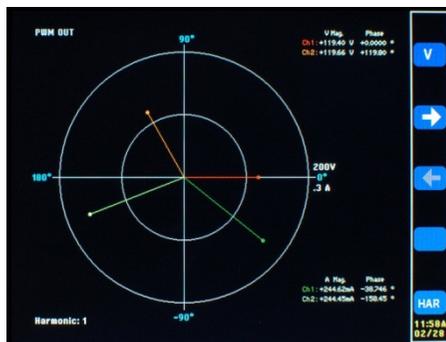
- 高確度測定
- 規制規格へのコンプライアンス試験あるいはプリコンプライアンス試験
 - 効率(省エネルギーラベリング制度)
 - 待機電流 (IEC63201)
 - 高調波 (IEC61000)

パワー・アナライザ PA4000型による電力測定



■ システム性能と特性評価

- 高精度パワー測定
 - 電圧、電流、皮相電力、無効電力、有効電力、力率、位相角、高調波、積算電力など
- 三相システム、単相システムあるいはDC
- 電力変換効率
 - 例：DC-DCコンバータの変換効率測定
 - MATHの数式設定例： $(CH1:W / CH2:W) * 100$
- 高調波およびフリッカ
- 規制規格へのプリコンプライアンス・テスト (IEC61000, IEC63201, 他)



Ch1	PWM OUT Ch2	Sub	AC INPUT Ch3
Watt	22.755	3.5988	26.354
Vrms	138.85	139.03	138.94
Arms	241.63	241.03	371.33
VA	33.551	33.569	89.364
VAr	24.654	33.375	85.389
Freq	26.449	26.449	----
PF	0.6782	0.1072	0.2949
Vcl	2.2337	2.2066	----
Accf	1.3584	1.4328	----
Vthd	1.9678	1.8139	----
Althd	3.3732	2.9895	----

PA4000型の特長

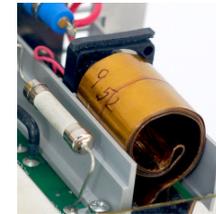
妥協のない高い測定確度

- 業界初のスパイラル・シャント技術 (Spiral Shunt™) (特許申請中)
 - － 広範な電流レベル、周波数、環境温度に対して安定した測定を実現
- クレストファクタ10でも高い測定確度

$$\text{クレストファクタ} = \frac{\text{ピーク値}}{\text{実効値}}$$

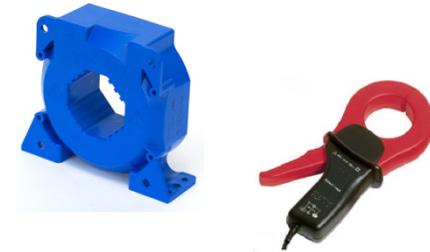
- － コンデンサ・インプット機器では、大きなピーク電流が流れる
 - － 力率改善回路付きであっても、起動直後は整流負荷状態のため、大きなピーク電流が流れる
 - － 軽負荷時のPWMモータ・ドライブ波形ではクレストファクタが高くなる
- 高い測定確度：基本測定確度 0.04%
 - 周波数帯域1MHz
 - ノイズや変動のある被測定信号に対しても安定した周波数トラッキング

現実回路の高クレストファクタ信号、ノイズの大きい信号でも高い測定確度



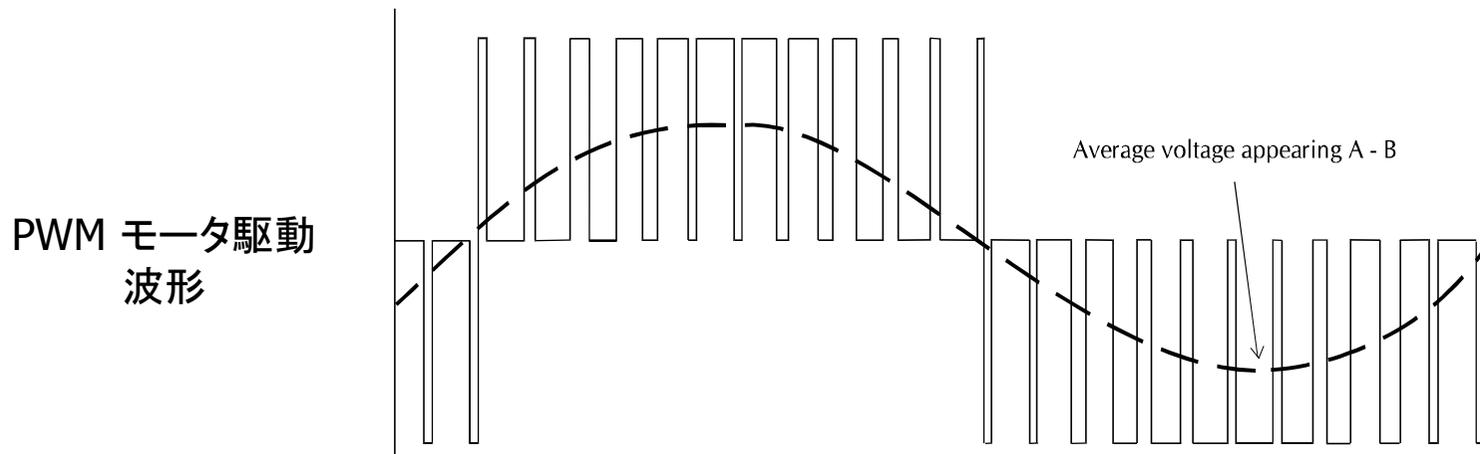
μWからkWクラスの測定機能を標準装備!

- 最大測定電圧: $1000 V_{RMS}$ 、 $2000V_{peak}$
- 2つの内蔵スパイラル電流シャントを標準装備
 - $30 A_{RMS}$ シャントにより $30A_{RMS}$ 、 $200 A_{peak}$ まで対応
 - $1A_{RMS}$ シャントにより微小電流向け高分解能に対応
 - 高精度の外部電流トランスデューサ(オプション)にて、より大電流に対応
 - 1000A対応の高精度CT(CT-Sシリーズ)
 - 装着が容易なクランプ・タイプのCLシリーズ
 - 1台で様々な被測定回路に対応
- 高速オートレンジ
 - 変化する信号に対して、測定データの欠落なく高速追従



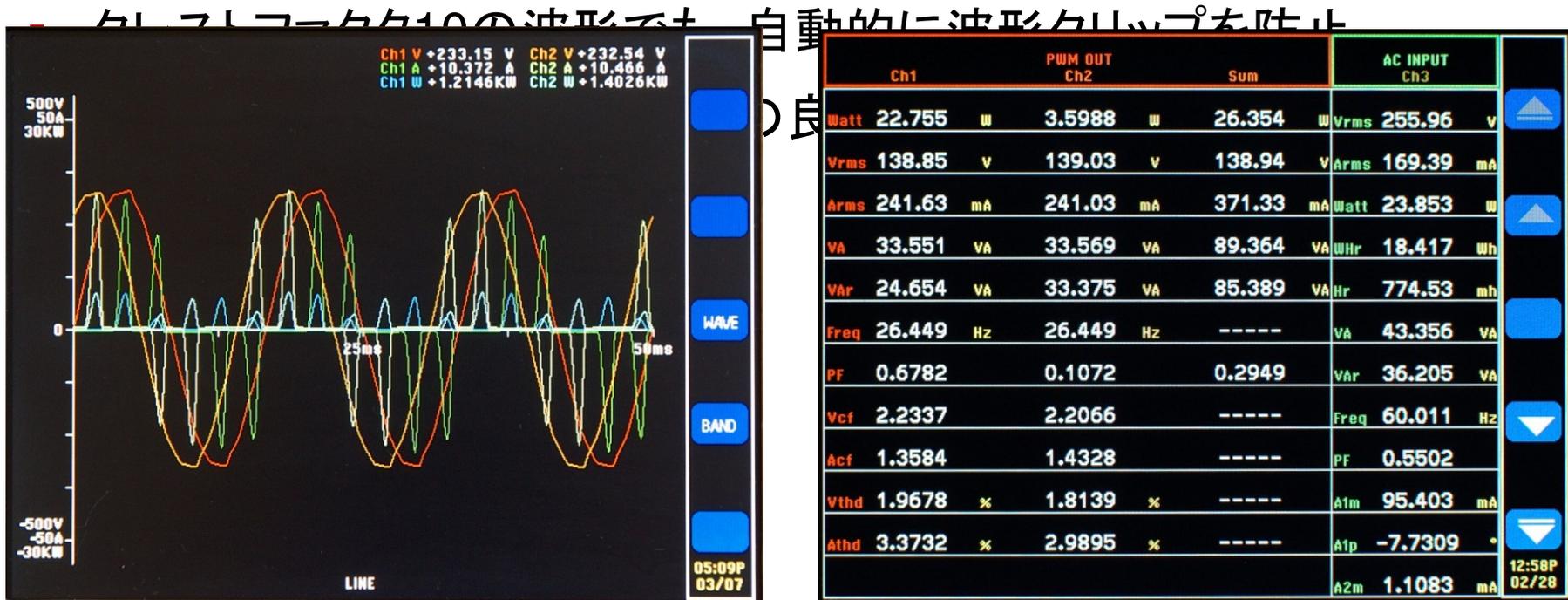
アプリケーションに応じた最適のテスト・モード

- PWM モータ駆動テスト・モード
- 待機電流テスト・モード
- 電子バラスト・テスト・モード
- 積分モード



三相3線接続によるPWMモータ・ドライブ・システム測定例

- 2チャンネルで三相システムを測定
- 自動的に三相合計の値も計算して表示
- 内蔵スパイラル・シャントにより、PWMドライブの入力電流を高確度測定



波形歪みの測定

- 波形歪みの測定
 - Athd(全高調波測定)の定義とAdf(歪率測定)の定義の違い

$$V_{thd} = \frac{1}{V_{ref}} \sqrt{\sum_{min\ harm}^{max\ harm} (Vh_n)^2} \times 100\%$$

and

$$A_{thd} = \frac{1}{A_{ref}} \sqrt{\sum_{min\ harm}^{max\ harm} (Ah_n)^2} \times 100\%$$

Athdは指定した次数までの高調波歪み測定。
DistortionメニューのRange設定で次数を指定

ホワイト・ノイズや高調波以外の周波数成分は
含まない。

歪率測定

$$V_{df} = \frac{1}{V_{ref}} \sqrt{V_{rms}^2 - Vh_{01}^2} \times 100\%$$

and

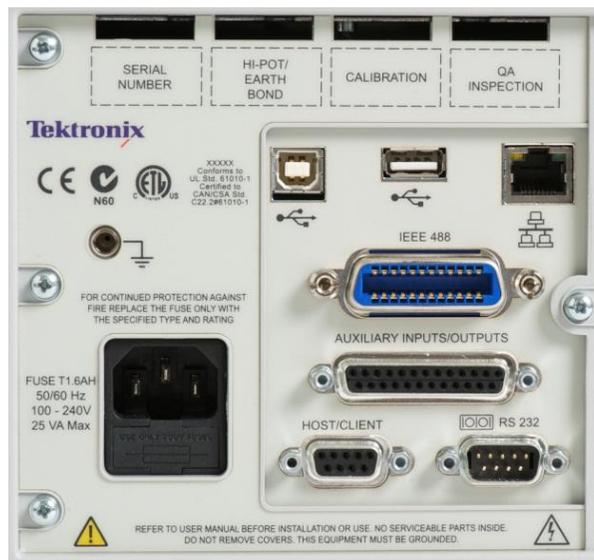
$$A_{df} = \frac{1}{A_{ref}} \sqrt{A_{rms}^2 - Ah_{01}^2} \times 100\%$$

Vdfは基本波および高調波成分以外のスペクトラムや
ホワイト・ノイズも含む

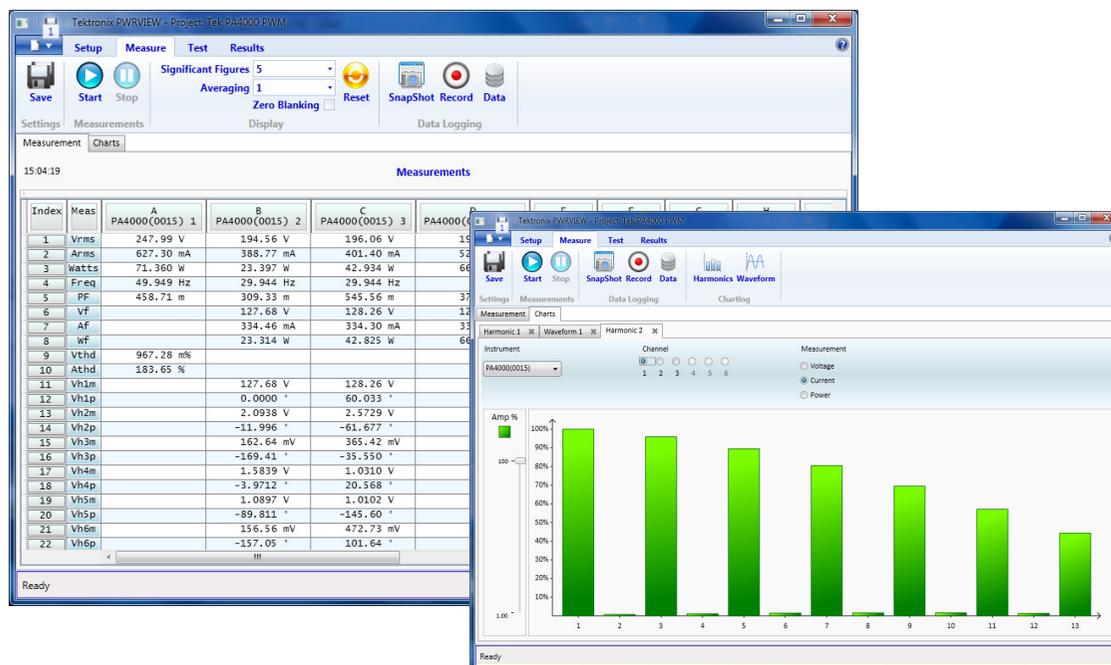
PA4000型はどちらの測定もできる

外部通信インタフェースと解析／データ収集ソフトウェア

- USB、Ethernet および RS-232 を標準装備(GPIB はオプション)
- 全面パネルのUSBポートにより、測定データをUSBメモリにロギング
- 測定データの外部PCへのダウンロード、テスト／解析とレポート作成用PCソフトウェア PWRVIEW



各種通信インタフェースに対応



PWRVIEWの使用例

基本性能



	PA4000 1CH	PA4000 2CH	PA4000 3CH	PA4000 4CH
入力チャンネル数	1	2	3	4
電圧入力レンジ	最大1000 V _{rms} , 2000 V _{peak}			
電圧基本確度	0.04%			
電流入力レンジ	2.5mA _{peak} ~ 200A _{peak} (30 A _{rms} 以下。2種類の内蔵シャント標準装備)			
電流基本確度	0.04%			
測定項目	V _{rms} , I _{rms} , VA, VAR, W, PF, Freq, Whr, VAhr, THD, TIF, 他			
測定周波数帯域	DC - 1 MHz			
自動設定モード	PWM モータ・ドライブ, 電子バラスト照明, 待機電流, エネルギー積分			
外部インターフェース	USB, LAN, RS-232 (オプションでGPIB)			
外部PCソフトウェア	遠隔制御およびデータ取り込み用ソフトウェア PWRVIEW			
無償保証期間	3年			
予定価格	¥1,080,000	¥1,380,000	¥1,680,000	¥1,980,000

ISO9001に準拠し、National Metrology Institute(s) にトレーサした校正証明書は標準添付
測定確度保持のために、1年毎の校正を推奨

基本構成

1. 入力チャンネル数、1、2、3または4chを指定



2. GPIBの有無を指定

3. 外部電流トランスデューサ用電源 ($\pm 15V$)の有無を指定

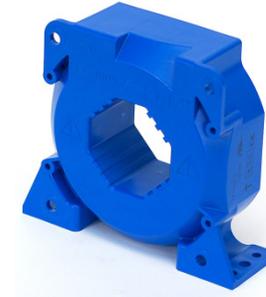
ご購入後のチャンネルの増設は、PA4000をお預かりして工場／サービスにて可能

推奨オプション・アクセサリ – 電流トランスデューサ

30A_{rms}以上の測定向け

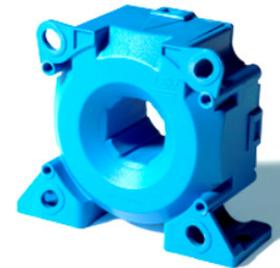
CT-S シリーズ

- 高確度測定用途向け (~0.05%)
- AC / DC
- Fixed-core, 15V 電源オプションが必要 (CT-1000-Sは外部電源が必要)



CT-M シリーズ

- 汎用用途向け (測定確度: ~0.5%)
- AC / DC, ロー・コスト
- Fixed-core, 15V 電源オプションが必要



CL シリーズ

- クランプ・タイプのため、回路への装着が容易
- AC のみ
- 15V 電源オプションは不要



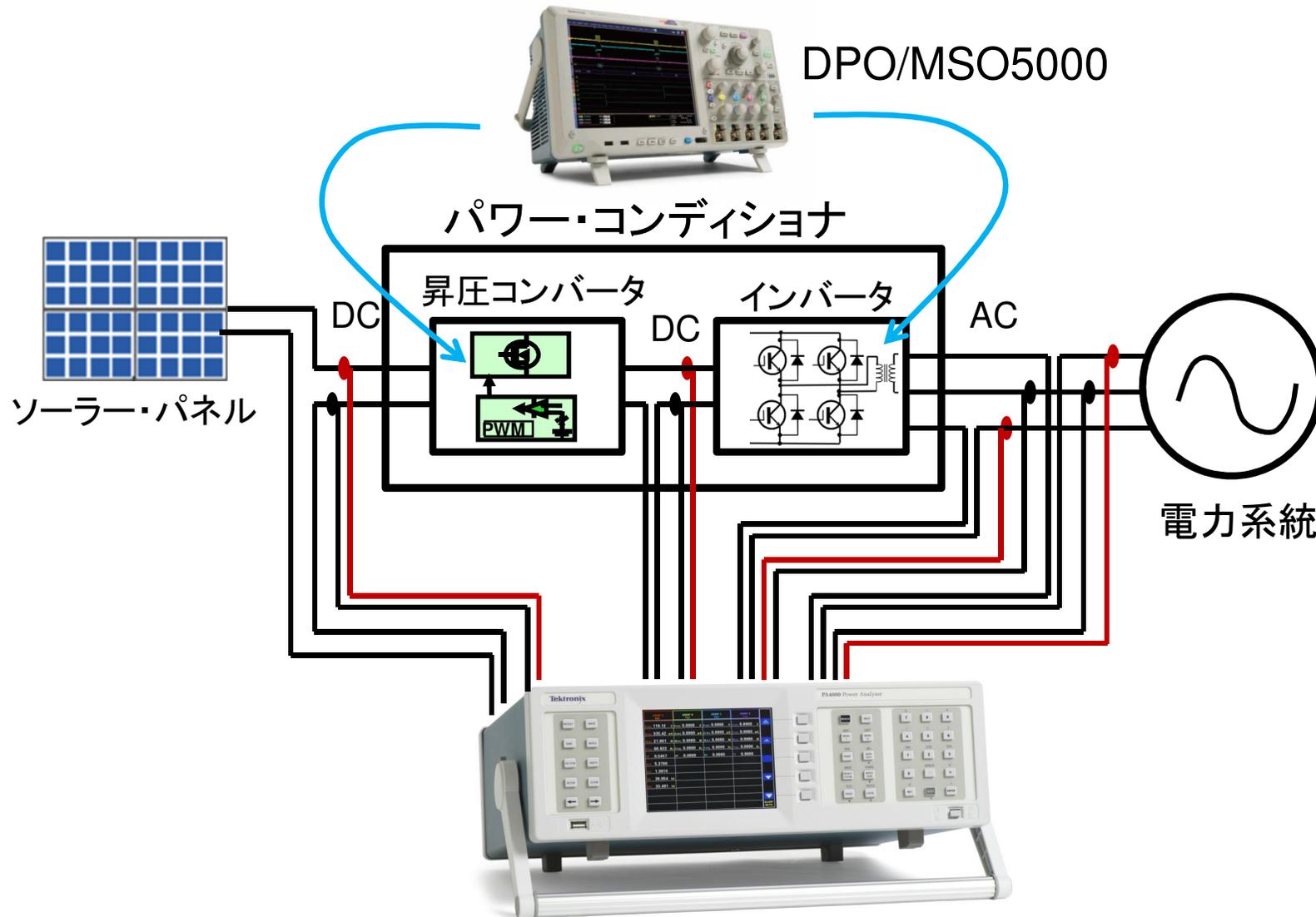
電流トランスデューサ

型名	基本性能
CT-60-S	60Apeak、42Arms 高確度電流トランスデューサ
CT-200-S	200Apeak、141Arms 高確度電流トランスデューサ
CT-400-S	400Apeak、282Arms 高確度電流トランスデューサ
CT-1000-S	1000Apeak、707Arms 高確度電流トランスデューサ

型名	基本性能
CT-100-M	100Arms、200Apeak 電流トランスデューサ
CT-200-M	200Arms、420Apeak 電流トランスデューサ
CT-500-M	500Arms、800Apeak 電流トランスデューサ
CT-1000-M	1000Arms、1500Apeak 電流トランスデューサ

型名	基本性能
CL200	0.5A ~ 200A、電流クランプ
CL1200	0.1A ~ 1200A、電流クランプ

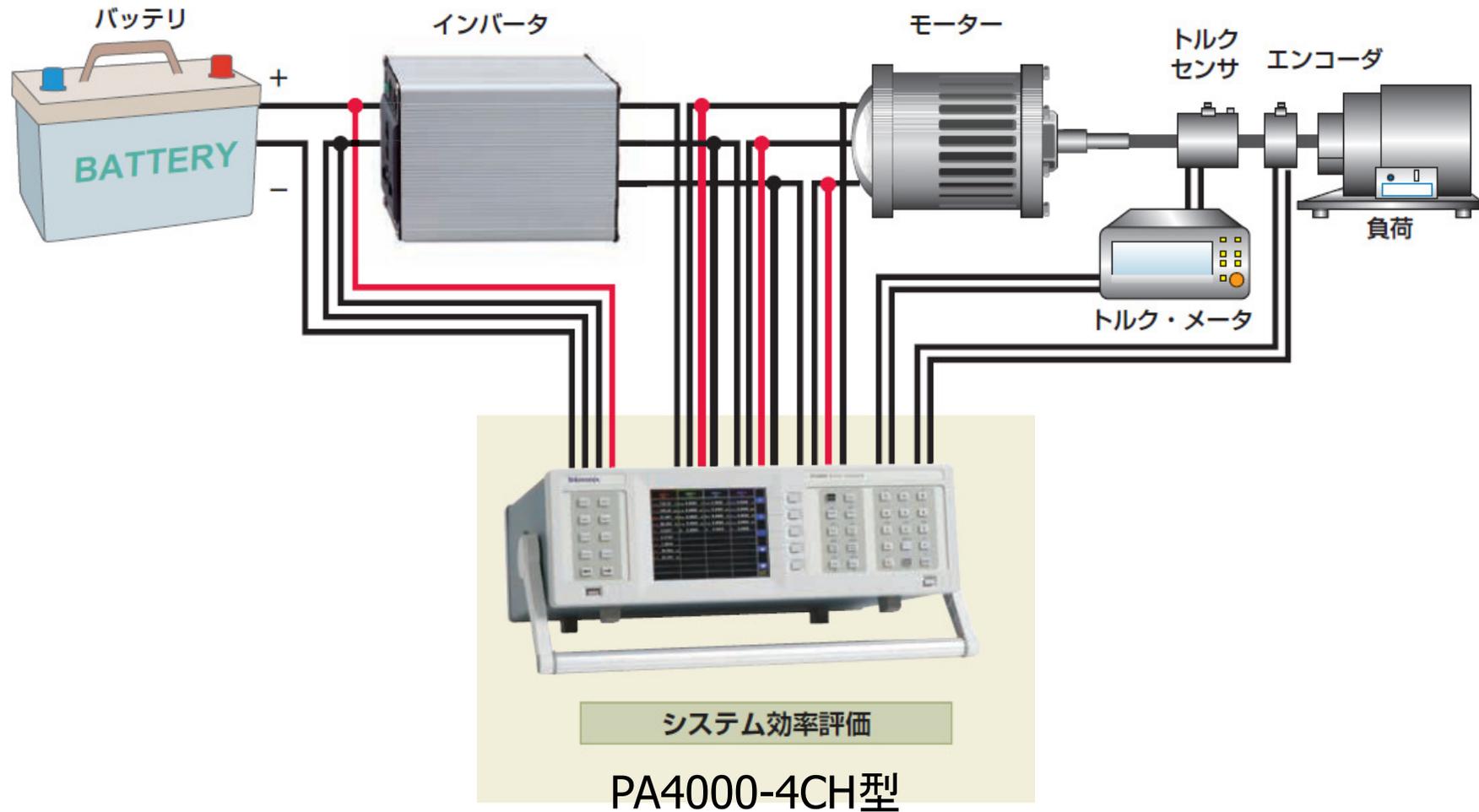
パワー・コンディショナの効率測定



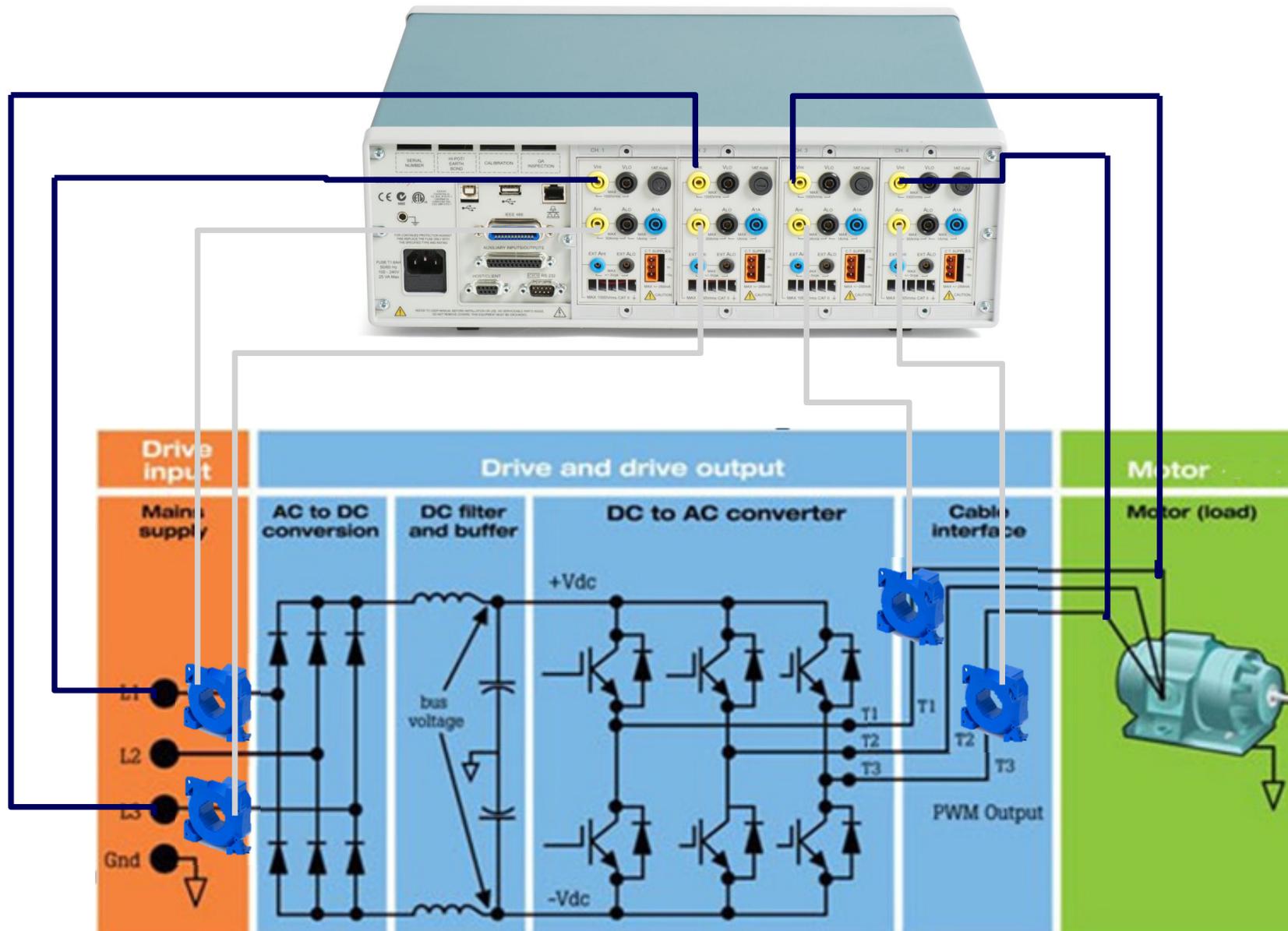
パワー・アナライザ PA4000-4CH型

テクトロニクス/ケーススレー イノベーション・フォーラム2013

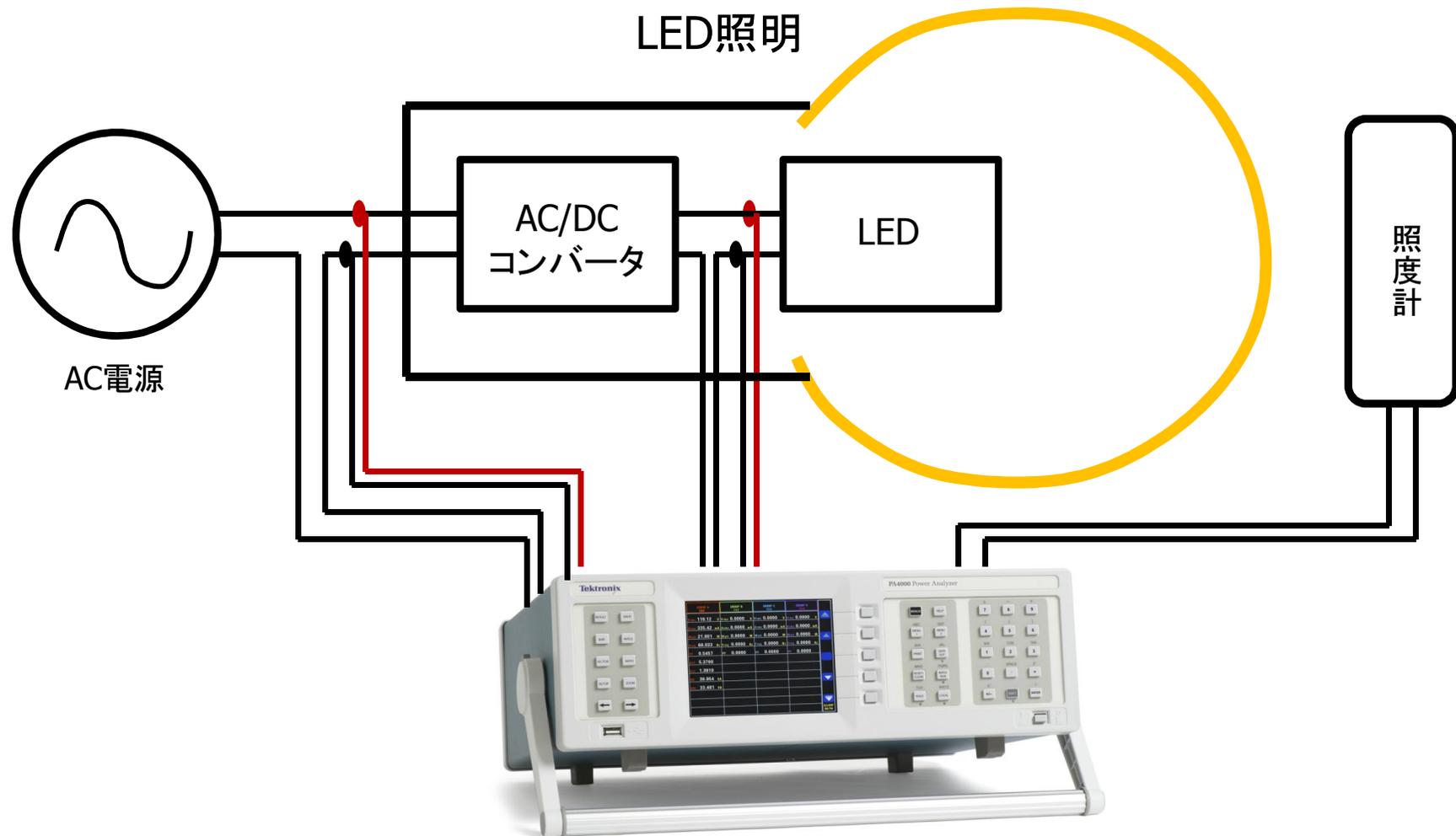
モータ・ドライブ・システムの効率測定(内蔵シャント使用)



三相入力／三相出力インバータの効率測定 (CT使用)



参考:LED照明の電力測定



PA4000-2CH型

PA4000シリーズ・パワー・アナライザの特長

- Spiral Shunt技術により、妥協のない測定確度で高CF波形も測定
 - － クレストファクタ10でも測定確度を保証
- μW から kW まで、標準で広い測定レンジをサポート
- 高調波測定およびモーター解析機能は標準装備
 - － 回転速度、トルクメータ用パルス・カウンタ、アナログ入力も標準装備
- 広範な測定項目をサポート
- LAN、USBおよびRS-232インタフェース、USBメモリへのロギング、PWRVIEW ソフトウェアは標準装備



1台で多目的に使用可能！



本テキストの無断複製・転載を禁じます。テクトロニクス/ケースレーインストルメンツ
Copyright © Tektronix, Keithley Instruments. All rights reserved.

www.tektronix.com/ja
www.keithley.jp/

 **Twitter** [@tektronix_jp](https://twitter.com/tektronix_jp)
 **Facebook** <http://www.facebook.com/tektronix.jp>



テクトロニクス/ケースレー インノベーション・フォーラム2013

