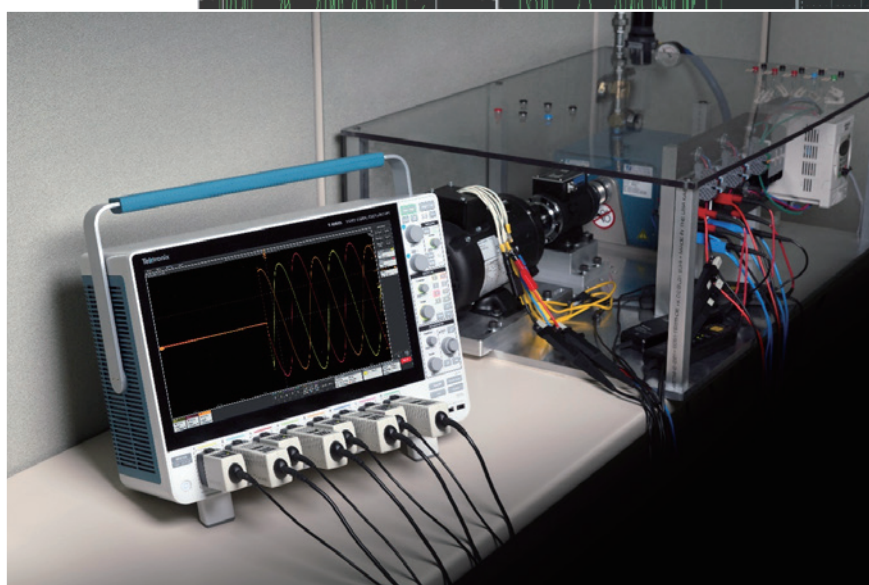


オシロスコープによる 三相モータのドライブ回路測定

入門書



オシロスコープによる三相モータのドライブ回路測定

最近のほとんどのモータ・ドライブ回路システムは、何らかの変調によって周波数すなわちモータの速度を制御しています。ほとんどの場合、PWM (Pulse-Width Modulation、パルス幅変調) 波形を制御することでこのVFD (Variable Frequency Drive、可変速ドライブあるいは可変周波数ドライブ) を実現しています。通常、電力は三相で出力します。これは、電気モータにとって最適な構成であるからです。

三相交流誘導電動機(三相ACモータ)は、電気エンジニアリングの黎明期から産業に大きく貢献してきました。三相ACモータは、信頼性が高く、効率的で、コスト効率がよく、メンテナンスもほとんど不要です。しかし、モータやドライブ回路にはさまざまな種類があります。AC誘導電動機(ACIM)は、ブラシレスDC(BLDC)モータ、永久磁石同期モータ(PMSM)に比べて効率の面で劣ります。ブラシレスDCモータや永久磁石同期モータは、AC誘導モータに比べると効率的で軽量ですが、より繊細な制御アルゴリズムが必要になります。

システムにはそれぞれの特長がありますが、モータ・ドライブ回路はすべてパルス幅変調でモータを駆動する周波数と電圧を変化させます。このPWM波形の変調のため、オシロスコープで安定した測定を行うには困難が伴います。ドライブ回路の出力測定だけでなく、高調波、パワー、力率など、ドライブ回路の入力段の性能検証のための測定も重要になります。センサを使用して機械的出力測定なども実施されます。数多くの信号を取り扱うため、オシロスコープでシステムを詳細に観測するには測定チャンネルを慎重に管理する必要があります。

この入門書では、オシロスコープ上で動作するインバータ・モータ・ドライブ回路解析ソフトウェアを使用して、入力、DCバス、可変速ドライブ回路の出力、さらにはモータの機械測定を安定的、かつ正確に測定する方法について説明します。

この入門書では、以下の項目について説明します。

- 可変速ドライブ回路の基本的な構造
- パルス幅変調(PWM)の基礎
- オシロスコープ・プローブの選定とセットアップ方法
- 適切な結線構成の選定
- 可変速ドライブ回路の測定方法

ー 電気測定

- 入力測定
- DCバス測定
- 出力測定
- DQ0測定

ー 機械測定

- 速度、回転方向、加速度

この入門書では、インバータ／モータ・ドライブ回路解析ソフトウェアをインストールした、テクトロニクス8チャンネル・オシロスコープである5シリーズBMSO(ミックスド・シグナル・オシロスコープ)を使用してこれらの項目を測定しています。

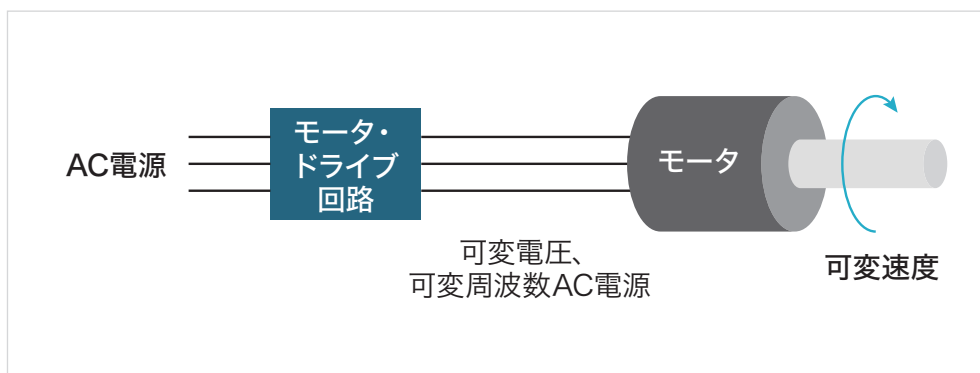


図1.モータ・ドライブ回路は、変調信号をモータに入力することで速度とトルクを制御する

PWMモータ・ドライブ回路の動作原理

パルス幅変調方式は、ブラシ付DCモータ、AC誘導モータ、ブラシレスDCモータ、永久磁石同期モータなど、数多くの種類のモータ・ドライブで使用されています。PWMで周波数と電圧を変化させてモータを駆動します。

PWMドライブの動作原理は何年も前から理解されてきましたが、パワー半導体、制御電子機器、マイクロプロセッサの進歩とコスト削減により、このようなドライブ方式が広範囲に普及しました。さらに、ACモータの優れた信頼性とDCモータの優れた効率と制御性を実現するベクトル制御により、さらに普及は加速しています。ブラシレスDCモータ、永久磁石同期モータは、産業分野だけでなく、パワー・ツール、家電、電気自動車など、さまざまなアプリケーションでブラシ付DCモータやAC誘導モータから置き換わっています。

三相可変速ドライブ回路のブロック図を図2に示します。

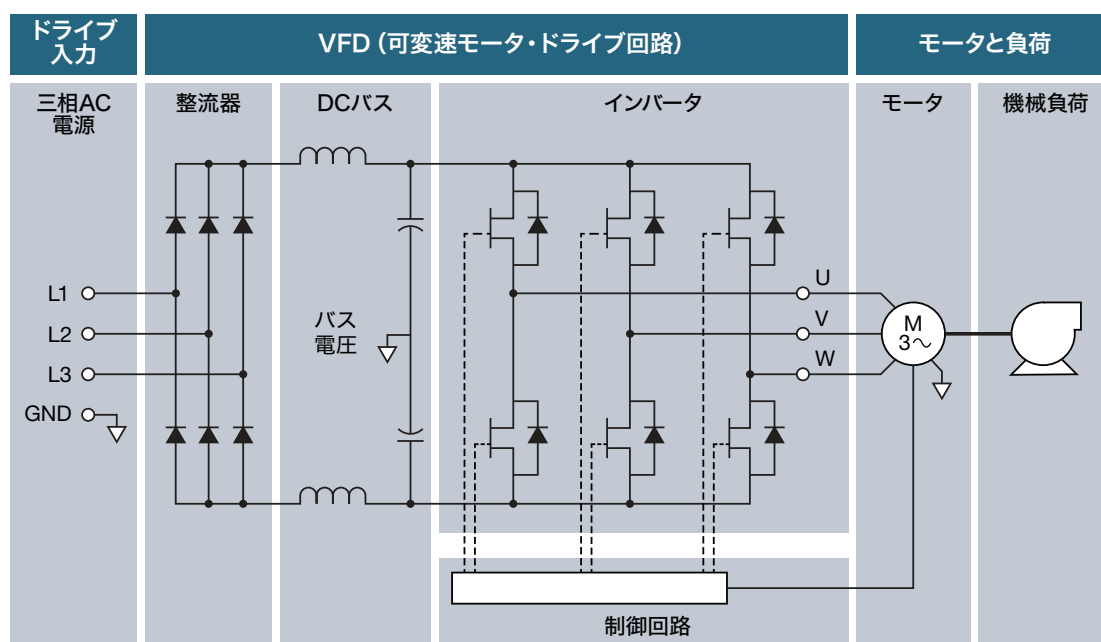


図2. 機能ブロックごとの三相モータ・ドライブ回路

PWMドライブ回路の入力は、DC、単相AC、または三相ACの電源で供給されます。図2は、産業機器で一般的な三相電源によるVFDを示しています。三相電源は整流、フィルタリングされてDCバスとなり、ドライブ回路のインバータ部に電源を供給します。インバータは、3ペアの半導体スイッチ（MOSFET、GTO、パワー・トランジスタ、IGBTなど）とダイオードで構成されています。スイッチの各ペアは、モータの各相への電源を出力します。この基本構造はいくつかの種類のモータに適用できますが、制御電子回路はフィードバックや複雑さの点で大きく異なります。次に、モータ駆動で使用するPWMの一般的な方式を簡単に説明します。

6ステップ／台形波駆動

この駆動方式はブラシレスDC (BLDC) モータで使用されます。ブラシレスDCモータは小型で効率性に優れており、DCモータの恩恵が得られるにもかかわらず消耗するブラシがありません。比較的シンプルな6ステップ、または台形波状のPWMで電氣的に整流できます。代表的なPWM波形を以下に示します。

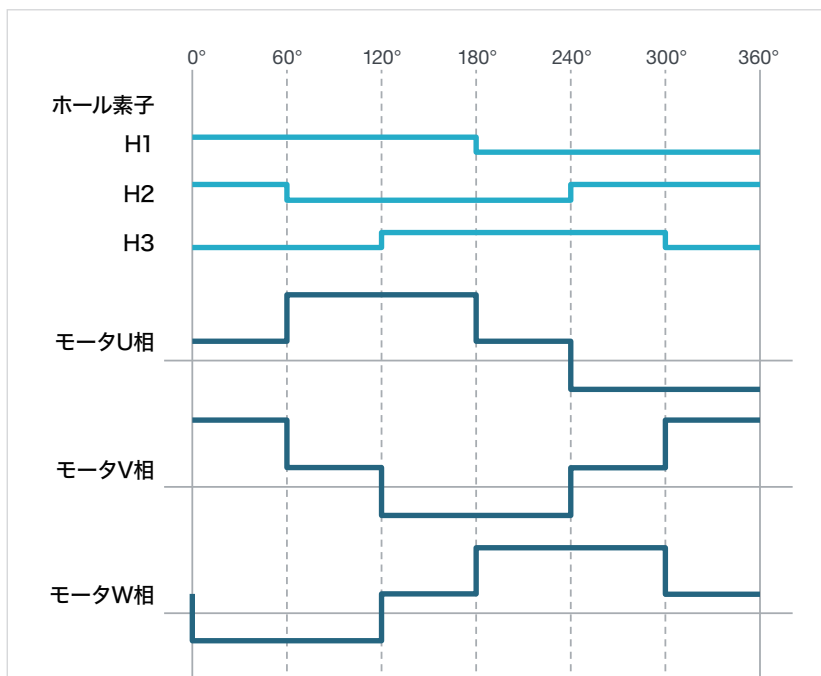


図3. ホール素子はシンプルな6ステップ・コントローラにフィードバックを送る。ドライブ出力U、V、Wはモータのステータ（固定子）に出力される

スカル駆動

AC誘導モータを駆動する単純なVFDでは、モータを駆動するPWM波形の基本周波数を変化させることで速度を制御します。十分なトルクを維持するため、駆動制御システムはPWM波形の電圧と基本周波数の比率を維持させます。これをスカル駆動と呼びます。

制御回路は、スイッチ・ペアごとのパルス幅を変調することで、互いに120°ずれた、3つの低周波正弦波を発生させます。

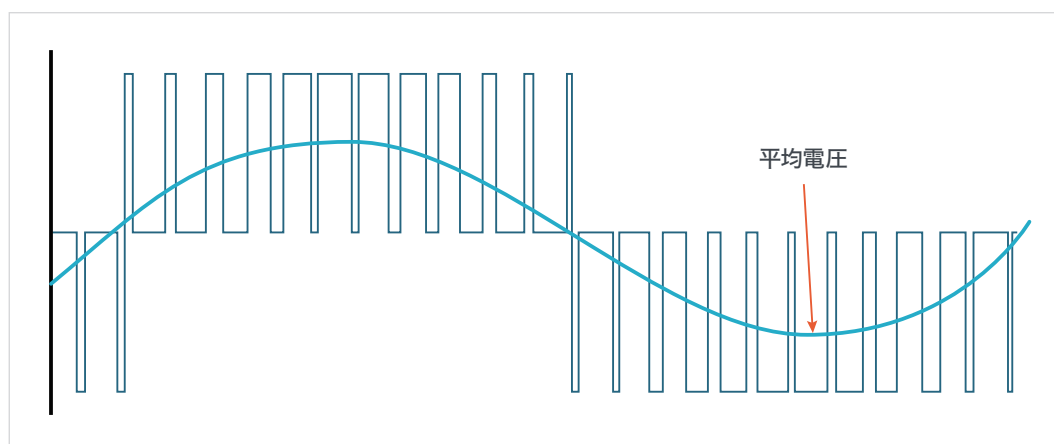


図4. A相、B相間のパルス幅変調波形の平均線間電圧（平均相間電圧）は正弦波である

モータ巻線にかかる平均電圧は、ほぼ正弦波になります。モータ巻線の他の2つの線も、互いに 120° ずれた同様の平均電圧になります。

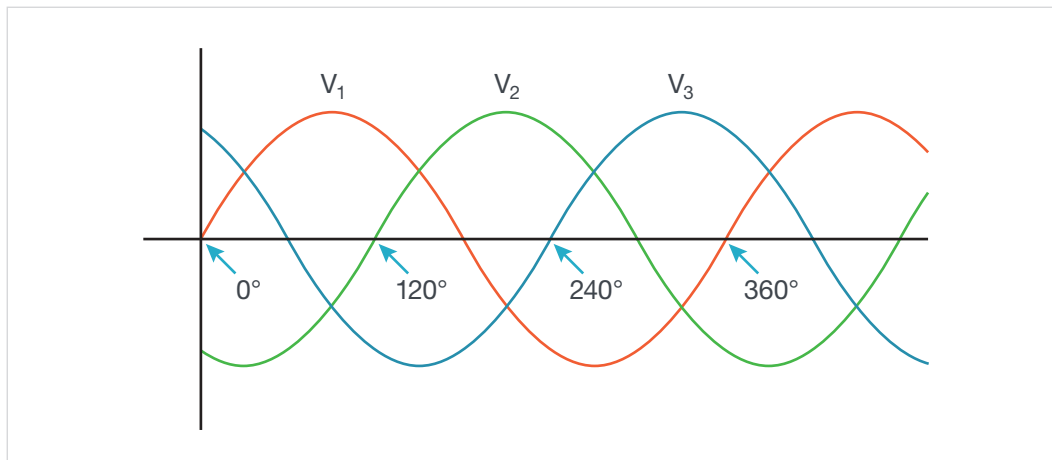


図5. 時間を横軸にとった三相の電圧信号

ほとんどの場合、モータはインバータの出力電圧に対するインダクタと見ることができます。インダクタは高い周波数で大きなインピーダンスを持つため、モータに流れるほとんどの電流はPWM出力波形の低周波成分になります。このため、モータに流れる電流の形状はほぼ正弦波になります。

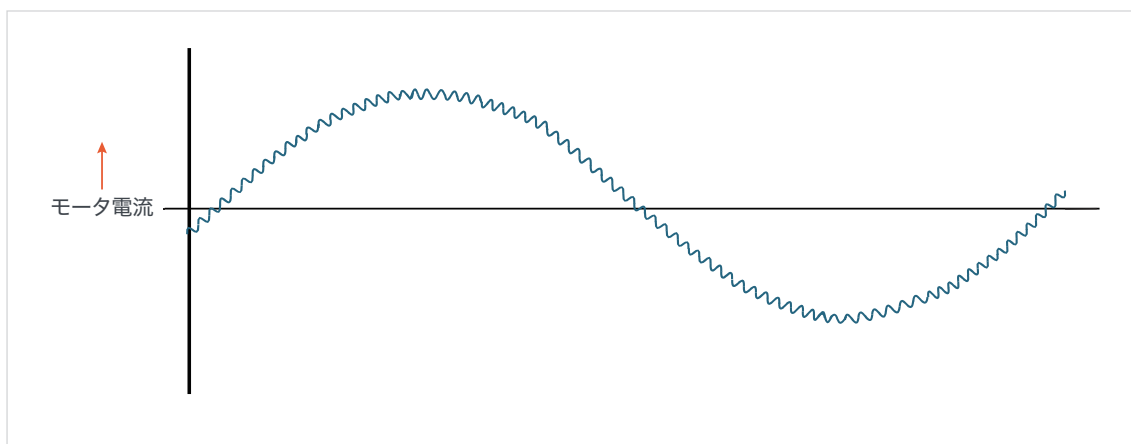


図6. モータは誘導負荷であり、急激な電流変化を抑えるため、モータに流れる電流はほぼ正弦波になる

変調波形の振幅と周波数を制御し、V/Hzの比を制御することにより、PWMドライブは求められる速度でモータを駆動するための三相電力を供給できます。

ベクトル駆動／磁界方向制御

AC誘導モータ、同期モータの優れた駆動方式がベクトル駆動技術です。スカル駆動に比べて柔軟性があり、効率に優れていますが、より複雑です。

ベクトル駆動は、正弦波形状の電流で駆動するという点ではスカル駆動と似ていますが、ベクトル駆動ではよりスムーズな動作、すばやい加速、優れたトルク制御が可能になります。この制御システムでは多くの場合、磁界方向制御 (Field-Oriented Control) を使用し、この点でスカル駆動に比べて非常に複雑になります。

ベクトルD、Qは直交ベクトルであり、振幅はモータのトルクと磁束に関係します。

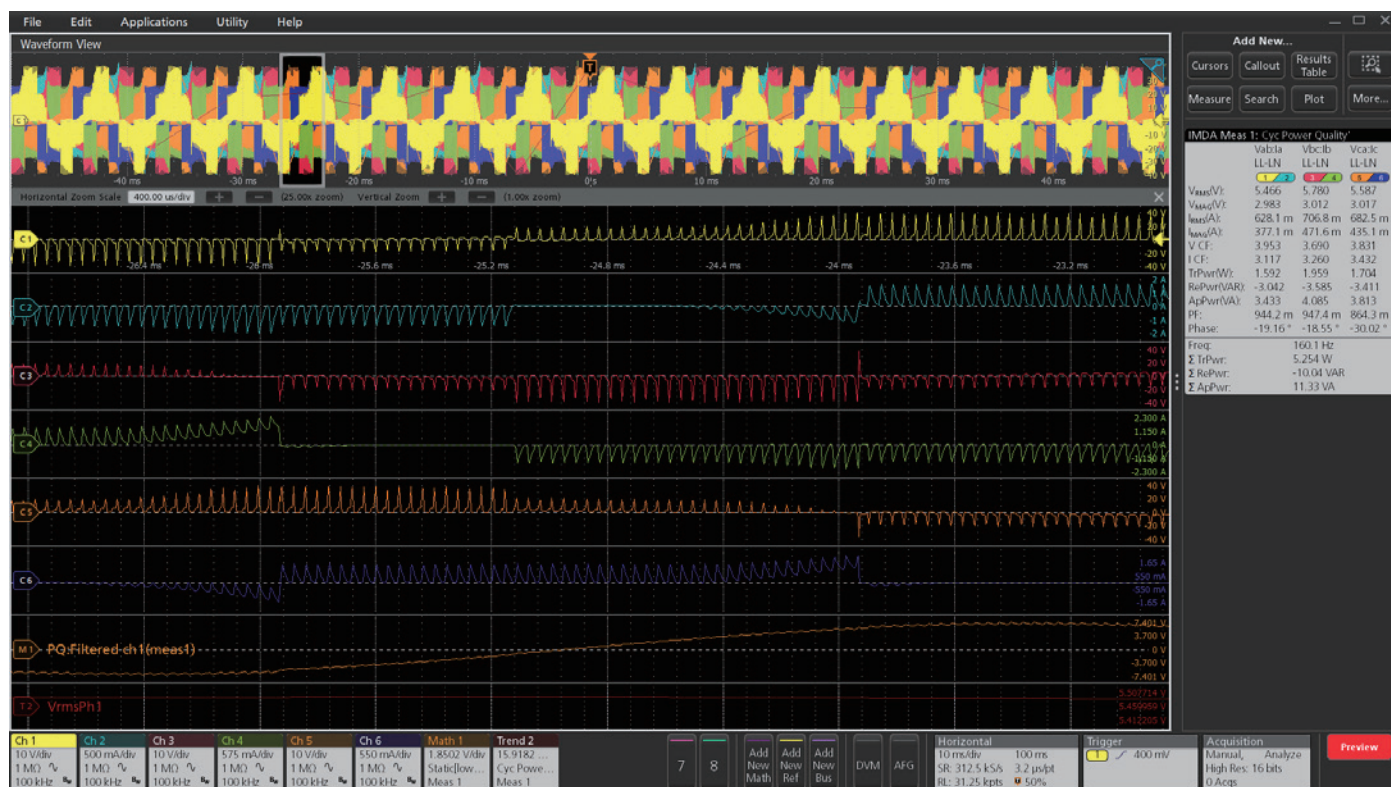


図7. ベクトル制御 (磁界方向制御) では、複雑なPWM波形を使用する

制御システムは、システムと同期をとるためにロータ (回転子) の位置を測定する必要があります。主にこの測定には、ホール素子または直交エンコーダ・インタフェース (QEI) などのセンサを使用します。(制御システムがモータの逆起電力でロータの位置を検出するというセンサレス・システムが使用される場合もあります。) 制御では、クラーク／パーク変換でD、Qの振幅を計算し、この値を制御ループのセットポイントとして使用します。

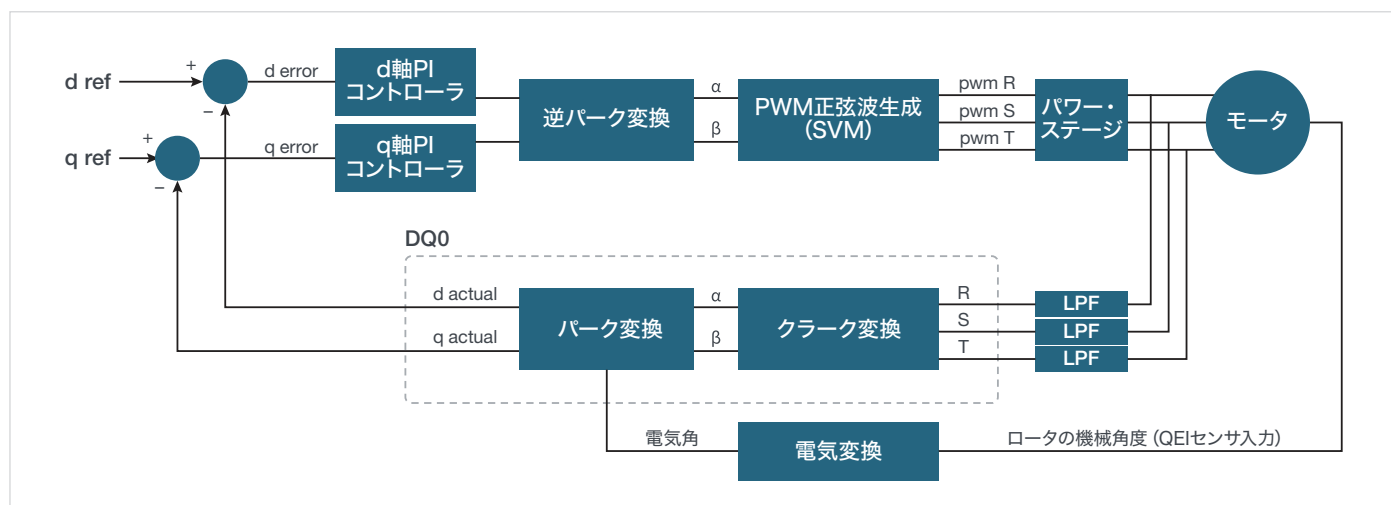


図8. ベクトル制御システムのブロック図

VFD システムへの接続方法

オシロスコープ・プローブの選定

可変速 (可変周波数) ドライブ・システムのパワー測定では、電圧プローブと電流プローブが必要になります。モータ・ドライブ測定におけるオシロスコープ用電圧プローブの選定では、以下の項目に注意する必要があります。

- モータ・ドライブ測定では、比較的高い電圧を測定します。例えば、480VAC の三相モータ・ドライブの DC バス電圧は一般的に約 680VDC です。接続するプローブで使用するプローブ・チップ、アクセサリの定格電圧を確認する必要があります。
- コモンモード電圧も比較的高い電圧になります。グラウンドに対してフローティング測定になるため、グラウンド基準のプローブは使用できません。信号が、プローブのコモンモード電圧定格以下であることを確認することが重要です。
- 測定対象となる周波数はほとんどの場合 200MHz 以下であるため、通常の測定ではこの周波数帯域のプローブで十分です。
- プローブは、さまざまな測定作業に対応したものを選定する必要があります。

以上を考慮した場合、パワー・エレクトロニクスのインバータ・サブシステム、駆動入出力、制御システムの測定における汎用の電圧プローブとしては、一般的に高電圧差動プローブが推奨されます。

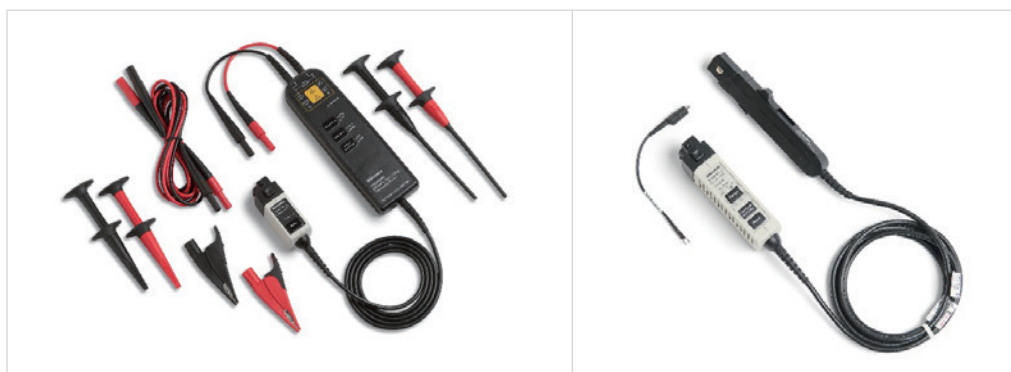


図9. テクトロニクスの THDP0200 型差動プローブ、TCP0030A 型 AC/DC 電流プローブなどは、多くの VFD 測定アプリケーションに適している

注：グランド基準の受動プローブは、各相と中性点間の電圧測定（相電圧測定）であっても使用できません。中性点の端子は通常はグランド電位にはないため、プローブとオシロスコープのアース・グランド間に大きな電流が流れる原因になります。これは危険であり、感電や、DUT、オシロスコープ損傷のおそれがあります。

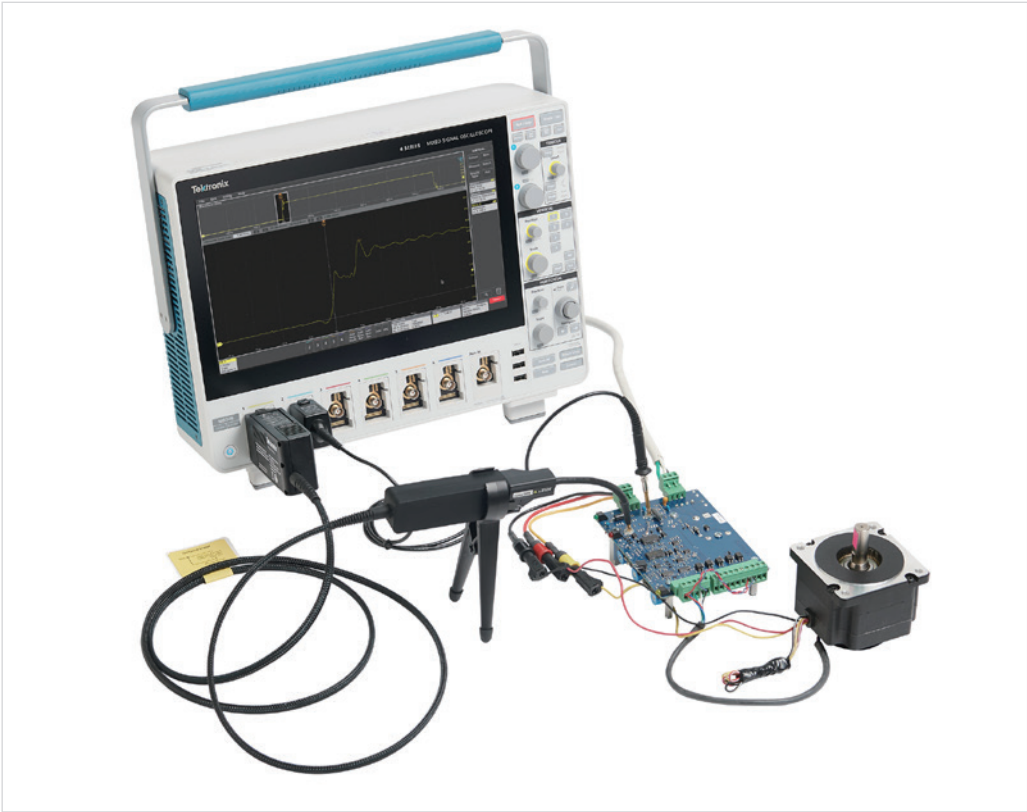


図10. IsoVu光アイソレーション型差動プローブには、非常に高いコモンモード除去比、最大差動入力電圧2500V、最高周波数帯域1GHzという性能がある

モータ・ドライブ・アプリケーションのための推奨プローブの例：

型名	概要
高電圧（差動）プローブ THDP0100/0200型	THDPシリーズは、さまざまなパワー・エレクトロニクス・インバータ、モータ・ドライブ・サブシステムの非グランド基準、およびフローティング測定に適した汎用プローブです。アース・グランドに対して数百Vのフローティング電圧条件下でも測定ができ、モデルによっては最大6000Vの差動電圧を測定できます。周波数帯域が100MHzと200MHzのモデルが用意されています。
光アイソレーション型差動プローブ IsoVu TIVPシリーズ	IsoVuには、非常に高いコモンモード除去比があります。これは、スイッチング回路の正確なハイサイドVGS測定に最適であり、SiC、GaNのアプリケーションで使用されます。 さまざまなプローブ・チップが用意されています。MMCXチップには、250Vまでの優れたシグナル・インテグリティがあります。スクエア・ピン・チップは、2.54mm (0.100in) ピッチで最大600Vに対応可能なものと、5.08mm (0.200in) ピッチで最大2500Vに対応可能な2種類があります。
電流プローブ TCP0030A型、TCP0150型	AC/DCの電流測定用プローブです。TCP0030A型は120MHzを超える周波数帯域があり、5Armsレンジ、30Armsレンジが選択できます。TCP0150型では、最大150Armsの大電流が測定できます。

オシロスコープ・プローブの設定

パワー測定を行う前に、重要ないくつかの手順が必要です。電流プローブはデガウスおよび0 A自動調整を実施し、更にすべてのプローブは正確な測定結果を得られるようにデスキューする必要があります。

電流プローブは測定前にデガウスおよび0 A自動調整を実行し、プローブの磁気コアの残留磁化を除去することが重要です。残留磁化があると正確な測定になりません。デガウスおよび0 A自動調整は、プローブ・ジョーからすべての導体を外し、押しボタンによって実行します。テクトロニクスのTCP0030A型などの電流プローブは、使用前にデガウスおよび0 A自動調整を実行するよう、自動的に注意喚起します。

デスキューは、任意の2つの異なるオシロスコープ・チャンネル間のプローブ、プローブ・ケーブルを含む、さまざまな伝搬遅延を補正する手順です。VFDシステムのさまざまな測定では位相の関係が重要となるため、この手順は欠かせません。基本的な手順は、同期した信号を2つのチャンネルに入力し、信号が合うように各チャンネルの遅延を調整します。テクトロニクスは、この手順のためのパワー測定デスキュー・フィクスチャ（部品番号：067-1686-xx）を用意しています。

電流プローブを接続する場合、プローブの矢印の向きに注意する必要があります。電流プローブを負荷のライン側に接続する場合は、矢印は負荷に向ける必要があります。電流プローブを負荷のリターン側に接続する場合は、矢印は負荷とは反対側に向けます。

プローブ選定の詳細とパワー測定のセットアップについては、[オシロスコープによる電源の正確な電圧測定のためのプロービング技術 \(英文\)](#)、[オシロスコープによる電源の正確な電流測定 \(英文\)](#) を参照してください。

結線方法

多くの場合、VFDの入力と出力は三相を使用します。しかし、商用、住宅、または自動車ドライブ・システムで使用されるVFDの中には、単相のACまたはDCで電源供給されるものもあります。また、三相システムはスター（またはY）、デルタの2種類の方法で結線、モデル化することができます。結線方式により、パワー解析で使用される計算方法が異なるため、正しい結果を得るためには正しい結線方法を理解、選択することが重要になります。この結線方法は、モータ駆動の入力と出力の両方に適用されます。図11は、テクトロニクスの特定のオシロスコープにおけるIMDAソリューションで対応可能な結線方法を示しています。



図11. IMDAソフトウェアによる、ドロップダウン・リストでの入力結線方法の選択

単相接続

単相 - 2線 (1V1I)

2チャンネルが必要で、一つは電圧であり、もう一つは電流です (図12)。トータル・パワーは $P=V \times I$ になります。単相のAC、DCは同じセットアップを使用します。

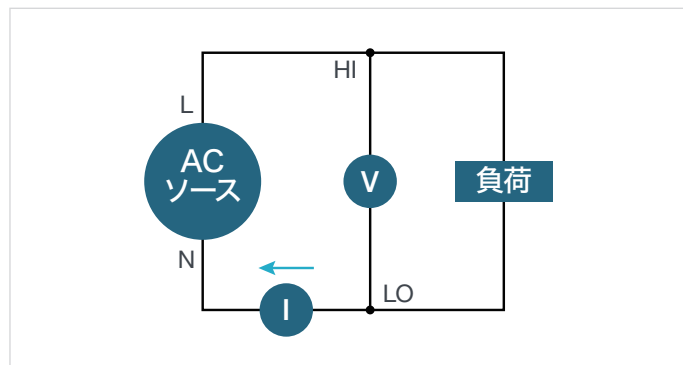


図12. 単相、2線AC測定。DCソースも同じセットアップを使用する

単相 - 3線 (2V2I)

単相3線方法はほとんど見かけないモータ駆動アプリケーションですが、北米の住宅アプリケーションにあり、1つの240V、2つの120V電源が可能で、それぞれの脚で異なった負荷を担うことがあります。このようなソースの測定では、2つの電圧チャンネルと2つの電流チャンネルが必要です。トータル・パワーは、 $V \times I$ (負荷1+負荷2) になります。

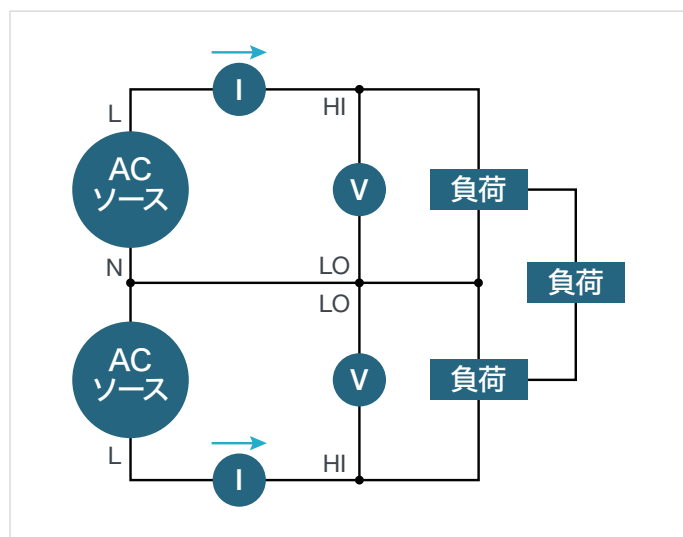


図13. 単相、3線方法は産業環境ではまれだが、民生、商用照明では一般的である

三相接続

2つの電圧チャンネルと2つの電流チャンネル (2V2I) で三相、3線システムを測定

モータ駆動では、主に3線出力を使用します。この場合は、オシロスコープの2つの電圧チャンネルと2つ電流チャンネルを使用するだけで正確に測定できます。(モータ駆動の入力ではもっぱら4線システムを使用します。) 電源と負荷を3線で接続する場合、トータル・パワーの測定には少なくとも2つの電力計が必要になります。図14に示すように、2つの電圧チャンネルと2つの電流チャンネルが必要です。電圧チャンネルは線間（相間）で接続し、一つの線（相）を基準とします。負荷と電源はデルタまたはスターの結線にできますが、三相3線接続では、その間に中性点を持つことはできません。この場合、負荷に供給されるトータル・パワーは2つの電力計で測定できます。(次のページの項目もご参照ください。)

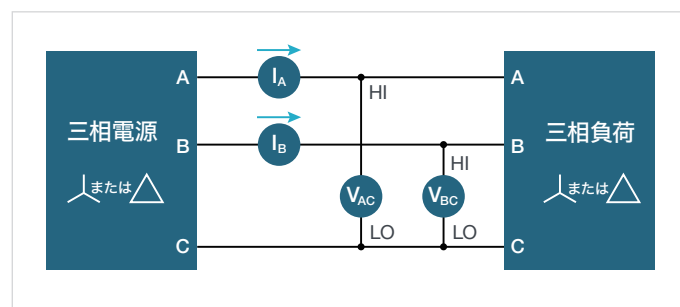


図14. 三相、3線、2電力計による方法

図14に結線図を、図16には2V2I接続の測定のためのIMDAによる設定画面を示しています。Select Linesの設定項目は、電圧基準となる相を設定します。この例では、電流はA相とB相で、電圧はC相を基準にしてA相とB相を測定します。すなわち、測定値は V_{AC} 、 V_{BC} 、 I_A 、 I_B になります。この例では、有効トータル・パワー、三相電力 ($\Sigma TrPwr$) は、次のように求められます。

$$\text{瞬時電力、} P1 = V_{AC} \times I_A$$

$$\text{瞬時電力、} P2 = V_{BC} \times I_B$$

$$\Sigma TrPwr = P1 + P2$$

4チャンネル・オシロスコープによる 三相システムの測定

ブロンデルの定理によると、N線式のシステムで各線に対する電圧を測定した場合、トータル・パワーは (N-1) 個の電力計で測定できます。

例えば、スターまたはデルタの3線システムでは、トータル・パワーは2つの電圧チャンネルと2つの電流チャンネルで求めることができます。スター結線による例を図15に示します。キルヒホッフの法則によると、システム的全電流は、2つの電流がわかっていれば求められます。システムの電圧は、3番目の線に対する2つの線を測定することで求められます。

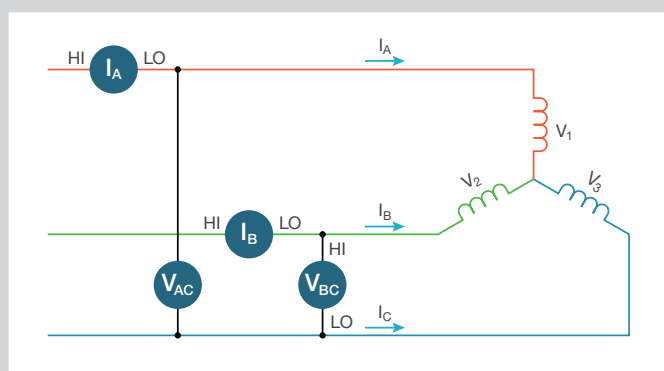


図15. 3線スター・システム (中性点なし) において、
2電力計法で三相システムを測定する例

電力計で測定される瞬時電力は、瞬時電圧サンプルと瞬時電流サンプルの積になります。

電力計1は i_A 、 v_{AC} から求められます。

$$p_1 = i_A (v_{AC}) = i_A (v_1 - v_3)$$

電力計2は i_B 、 v_{BC} から求められます。

$$p_2 = i_B (v_{BC}) = i_B (v_2 - v_3)$$

$$p_1 + p_2 = i_A (v_1 - v_3) + i_B (v_2 - v_3) = i_A v_1 - i_A v_3 + i_B v_2 - i_B v_3$$

$$p_1 + p_2 = i_A v_1 + i_B v_2 - (i_A + i_B) v_3 \quad (\text{第1法則})$$

キルヒホッフの電流法則では、

$$i_A + i_B + i_C = 0 \text{ であるため、} i_A + i_B = -i_C \quad (\text{第2法則})$$

第1法則で $(i_A + i_B)$ を置き換えると、

$$p_1 + p_2 = i_A v_1 + i_B v_2 + i_C v_3 \text{ となり、3つの線すべてのトータル瞬時電力となります。}$$

このように、3線システムのトータル・パワーは、2つの電圧チャンネルと2つの電流チャンネルを使用して2つの電力計を構成することで求められます。

出典：Blondel, A.; Measurement of the Energy of Polyphase Currents; [Proceedings of the International Electrical Congress](#); August 1893; American Institute of Electrical Engineers



図16. 2電力計法による3線システムの設定例。電流はA相とB相で測定し、C相を基準にしたA相とB相の電圧を測定する

3つの電圧チャンネルと3つの電流チャンネル(3V3I)で三相、3線システムを測定

3線システムのトータル電力は2台の電力計があれば測定できますが、3台使用すれば有利な場合があります。3電力計法では、6つのオシロスコープ・チャンネル(3つの電圧、3つの電流)が必要になります。3V3Iの構成では、個々の線・中性点間の電圧、各線(各相)のパワーが求められます。これは、2電力計法ではできないことです。

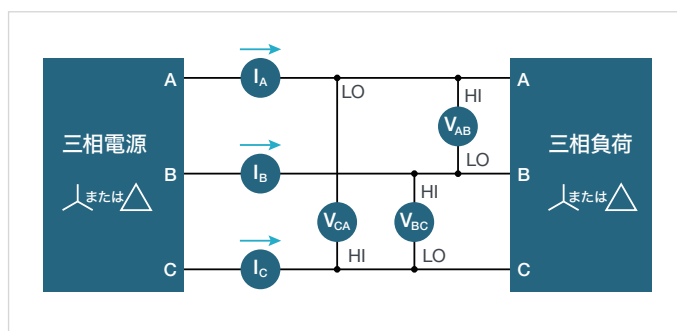


図17. 3つの電圧チャンネル、3つの電流チャンネル(3台の電力計)による三相、3線システムの測定

3V3Iで測定する3線システムの場合、IMDAソフトウェアにはライン間(L-L)電圧をライン(L-N)電圧(ラインと中性点間の電圧)に変換する設定があります。この三相3線システムには物理的な中性点はありませんが、瞬時ライン間電圧から瞬時ライン電圧(ラインと中性点間の電圧)を求めることができます。

$$V_{AN} = \frac{V_{AB} - V_{CA}}{3}$$

$$V_{BN} = \frac{V_{BC} - V_{AB}}{3}$$

$$V_{CN} = \frac{V_{CA} - V_{BC}}{3}$$

このポイントごとのLL-LN変換は、単一の基準点に対するすべての電圧を表し、各線の電圧と電流の位相関係を補正します。LL-LN変換の位相補正は、変換のオン、オフによるフェーズ図の位相関係でわかります。LL-LN変換をオンにすると、相電圧(線と中性点間の電圧)と相電流(線電流)を乗算することで瞬時電力が求められます。例えば、負荷に供給される真のトータル・パワー、三相電力(ΣTrPwr)は、次のように求められます。

$$\Sigma \text{TrPwr} = (V_{AN} \times i_A) + (V_{BN} \times i_B) + (V_{CN} \times i_C)$$

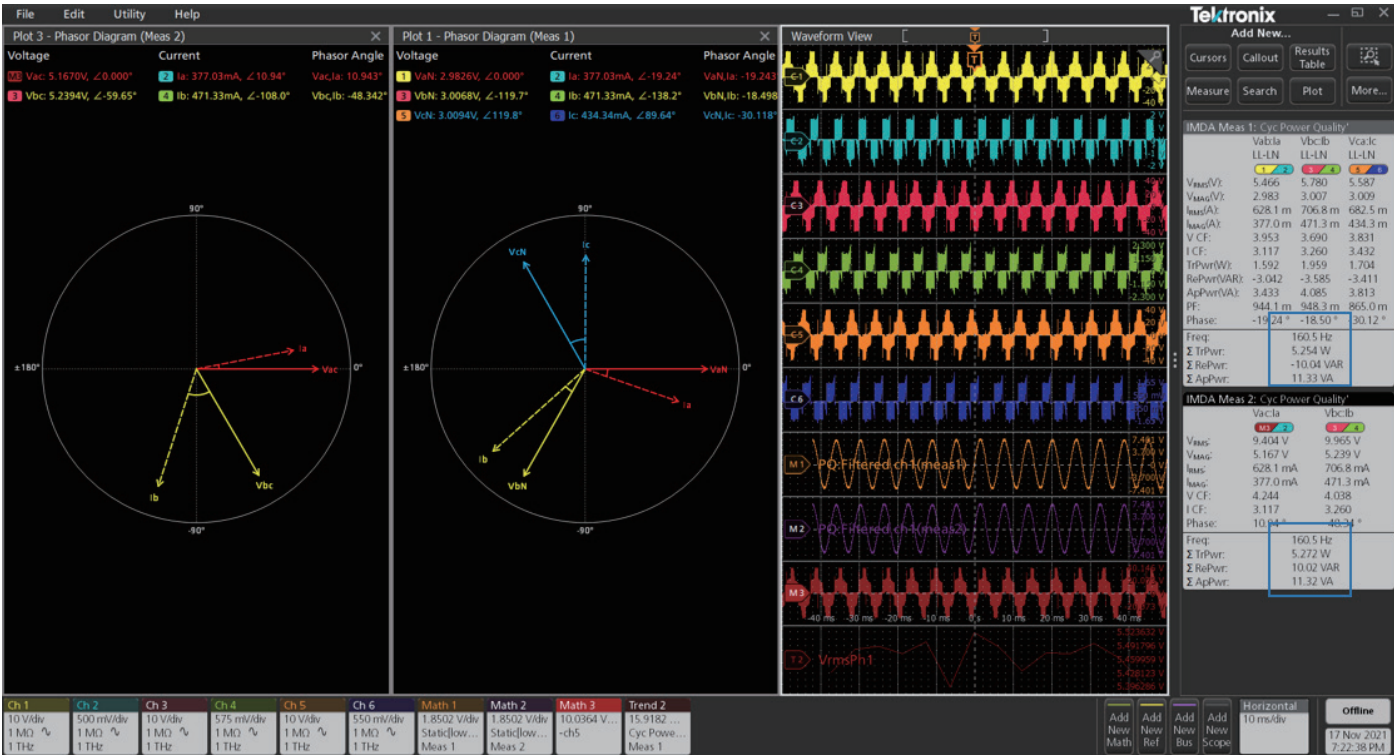


図18. LL-LN変換を有効にした3V3I構成では、線(相)ごとの有効電力、無効電力、皮相電力、さらにすべての線(相)の合計(三相電力)が表示される。測定された合計の電力は、2電力計法(2V2I)による値に匹敵する

3つの電圧チャンネルと3つの電流チャンネル(3V3I)で三相、4線システムを測定

三相電源と三相ドライブ回路間、または三相ドライブ回路とモータ間で中性点接続を使用するシステムのトータル・パワー測定では、3つの電圧チャンネル、3つの電流チャンネルが必要になります。このような4線システムの例を図19に示します。電圧はすべて中性点を基準に測定します。線間電圧は、ベクトル演算によって相電圧の振幅と位相から正確に計算できます。トータル・パワー(三相電力)は、 $\Sigma \text{TrPwr} = P1 + P2 + P3$ として求められます。

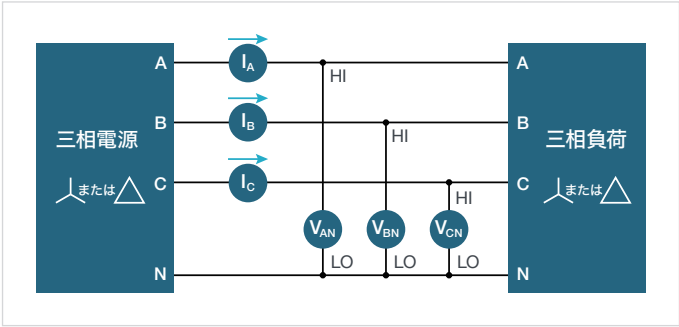


図19. 三相、4線(3電力計法)

VFDシステム・ブロックの測定

VFDシステムの機能ブロックごとに、さまざまな測定、測定方法があります。ブロックごと（入力、DCバス、出力、モータ）の代表的な測定項目、5/6シリーズMSOのIMDA解析ツールでの設定などを説明します。

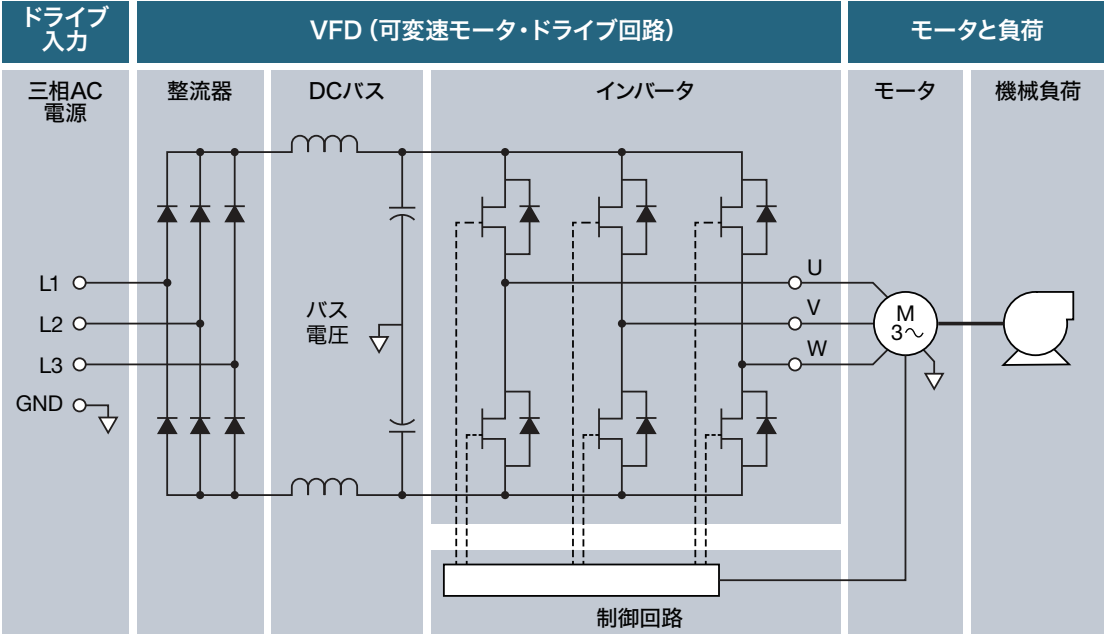


図20. ドライブ入力、DCバス、出力、モータごとにさまざまな測定項目がある

三相オートセット

IMDAソフトウェアには三相オートセット機能があり、選択された結線方法に基づいて、電圧波形入力、電流波形入力の各チャンネルのスケールを自動設定できます。オシロスコープの垂直軸、水平軸、アキュイジション、トリガのパラメータは、選択されたすべてのパワー測定項目において適切な結果が得られるように、最適に自動設定されます。この機能により、特にVFD出力のPWM波形測定を非常に簡単にセットアップできます。

入力(ライン)測定

ほとんどの産業用、重工業用のVFDは三相入力です。小型のドライブ回路では、単相電源を使用することがあります。特に電気自動車および、その他のバッテリー駆動のアプリケーションでは、ドライブ回路はもっぱらDC電源を使用します。IMDAパワー解析ソフトウェアは、これらすべての設定に対応しています(「結線方法」の項を参照)。IMDA測定パッケージでは、電源品質測定(Power Quality)と高調波測定(Harmonics)のグループを使用して、三相ドライブ回路の電力消費、電力回路網システムにおけるドライブ回路の影響を定量化します。

電源品質

電源品質測定のグループには、ドライブ回路の消費電力特性評価が含まれています。同じ測定項目は、ドライブ回路の出力でも使用できます(「出力測定」の項を参照)。図21は、電気解析(Electrical Analysis)の電源品質測定を示しています。電源品質測定を選択すると、フェーザ図、波形、測定バッジが表示されます。PQエネルギーとパワー演算波形は、設定した結線で表示されます。パワー波形は、各相の電圧、電流波形を乗算する演算アルゴリズムで作成されます。

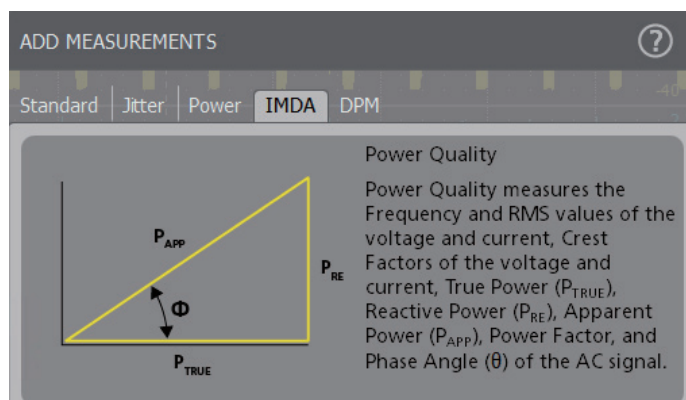


図21. テクトロニクスのIMDAソフトウェアでは、測定は電源品質、高調波、リップル、効率に分けられる。DQ0測定、機械測定はオプションで利用可能

電源品質測定は、プローブと結線方式が正しいことを確認するのに役立ちます。一つ、または複数の電源測定項目が負の値になる場合は電流プローブをチェックし、負の電力の値を示すチャンネルで反対方向に接続されていないか確認します。三相システムではフェーザ図を確認します。通常では、電圧は相間で120°ずれて同じになります。

フェーザ図: 図22に示すフェーザ図は丸い図形で電圧および電流の振幅と相間の位相角、および各相における電圧と電流間の位相角を表します。理想的には、バランスのとれた三相ベクトルでは、各相の振幅は等しく、相間の位相は正確に120°ずれます。

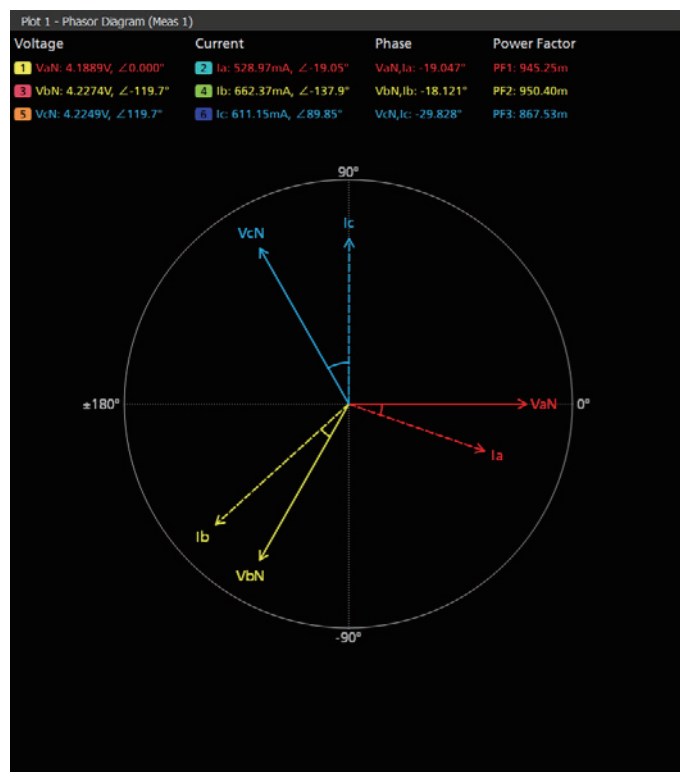


図22. フェーザ図は、すべての相の電圧および電流の関係を示す。システムのバランス、電圧と電流間の位相シフト(容量性が誘導性か)が一目でわかる

フェーザ図(図22)から、以下に示す各相の項目がわかります。

- 基準相電圧(図22のVaN)に対する位相角および電圧実効値
- 基準相電圧に対する電流の位相角および電流実効値
- 各相における電圧と電流間の位相角
- 力率

オシロスコープによる三相モータのドライブ回路測定

電源品質の測定バッジ (図23に例を示す) には、さまざまな測定項目が表示されます。この例では、3V3Iにおける各相のさまざまな測定項目が表示されています。

- **V_{RMS}**：整数のサイクル数で測定した相電圧の実効値。相電圧の数は結線方式で異なります。
- **V_{MAG}**：モータの動作周波数で測定された相電圧の振幅。動作周波数は電圧信号の基本波周波数であり、FFTを適用することで求められます。
- **I_{RMS}**：整数のサイクル数で測定した相電流の実効値。相電流の数は結線方式で異なります。
- **I_{MAG}**：モータの動作周波数で測定された相電流の振幅。動作周波数は電流信号の基本波周波数であり、FFTを適用することで求められます。
- **クレスト・ファクタ (VCF、ICF)**：電圧実効値、電流実効値に対するピーク電圧、ピーク電流の比。(正弦波のクレスト・ファクタは1.414)。
- **有効電力 TrPwr** は、次のように求められます。

$$TrPwr = \frac{1}{T} \int (v(t) \cdot i(t)) dt$$

離散領域では、次のように求められます。

$$TrPwr = \frac{1}{N} \sum ((v(n) \cdot i(n)))$$

n=1、2...Nをとり、Nはサンプル数。

有効電力 (P) は負荷の抵抗部に供給される実際の電力であり、Wの単位で測定されます。純粋な正弦波の場合のみで、有効電力 = $V_{RMS} \times I_{RMS} \times \cos(\varphi)$ であり、 φ は電圧、電流の波形間の角度になります。

- **皮相電力 (ApPwr)** は、次のように求められます。

$$ApPwr = V_{RMS} \times I_{RMS}$$

ここで、 V_{RMS} と I_{RMS} は電圧と電流の波形から計算されます。

単位はVAです。

MATH1/パワー波形での実効値計算とは一致せず、正しい結果にならないことにご注意ください。

- **無効電力 (RePwr)** は、次のように計算されます。

$$RePwr = \sqrt{(ApPwr^2 - TrPwr^2)}$$

単位はVARです。

- **力率 (PF)** は、次のように求められます。

$$PF = \frac{TrPwr}{ApPwr}$$

2つの電力の比であるため、力率には単位がありません。この計算は基本周波数だけでなく、測定されたすべての周波数成分を対象にするため、位相の余弦使用よりも正確な結果が得られます。

- **位相角 (Phase)** は、次のように計算されます。

$$Phase = \cos^{-1} \left(\frac{TrPwr}{ApPwr} \right) = \cos^{-1}(PF)$$

単位は° (度) です。力率計算の方法と同様に、測定したすべてのスペクトラムを対象にします。どのような多相システムにおいても、電源品質の測定結果は次のような合計値になります。

どのような多相システムにおいても、電源品質の測定結果は次のような合計値になります。

- **周波数 (Freq)** は、ローパス・フィルタリングされたエッジ・ソースの周期から計算されます。
- **有効電力の合計 (STrPwr)** は、すべての相の有効電力の合計になります。
- **無効電力の合計 (SRePwr)** は、すべての相の無効電力の合計になります。
- **皮相電力の合計 (SApTrPwr)** は、すべての相の皮相電力の合計になります。

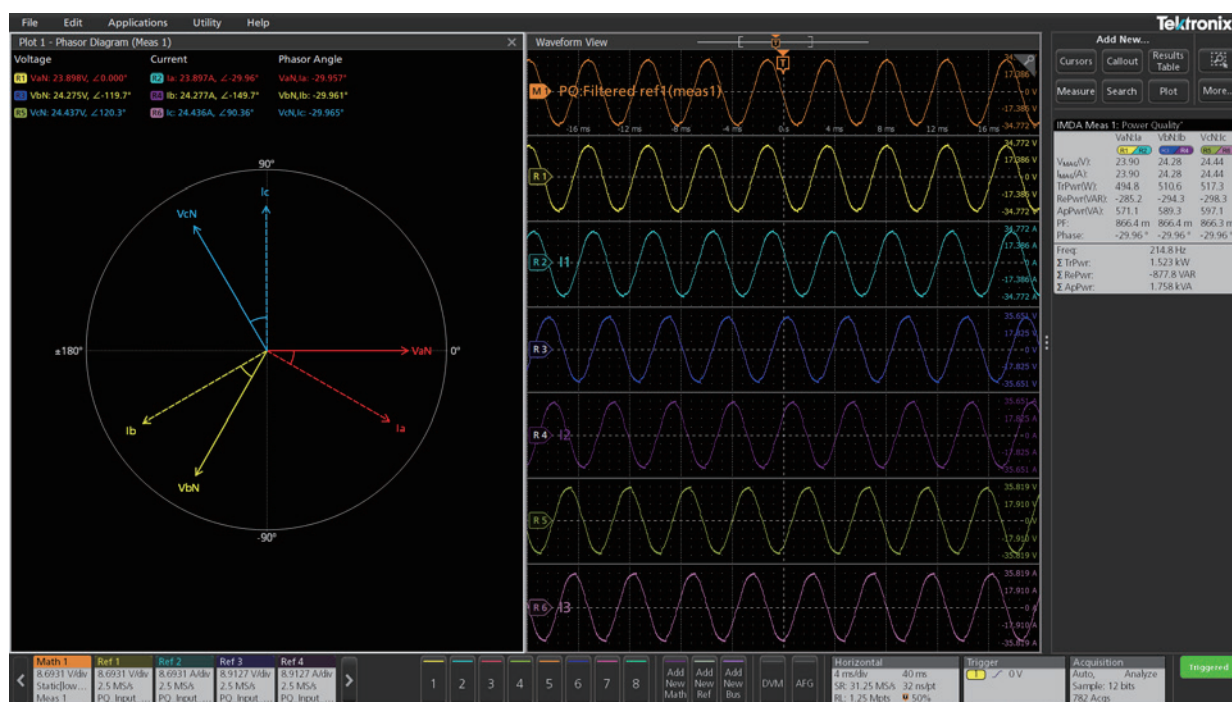


図23. モータ駆動回路、入力（電源）側の電源品質測定の例

高調波

高調波測定では、基本周波数における信号振幅と高調波をプロットし、実効値振幅と信号の全高調波歪（THD）を測定します。測定は、IEEE-519またはIEC 61000-3-2の規格に対して、または独自のリミット値に対して評価できます。例えば、IEC61000-3-12規格の負荷リミットをCSVファイルでロードし、このリミットに対してテストすることができます。テスト結果は、合格／不合格のステータスを示す詳細レポートに記録されます。



図24. 高調波はモータ駆動回路の入出力の両側が測定できる。この例は、駆動回路の三相出力の高調波を示している

DC バス測定

リップルは、DCバスとスイッチング半導体の2つの異なるテスト・ポイントで測定される場合があります。

ライン・リップル：それぞれのAC電圧信号のライン周波数部分の実効値とピーク・トゥ・ピークを測定します。

スイッチング・リップル：それぞれの電圧信号の実効値とピーク・トゥ・ピークを測定します。

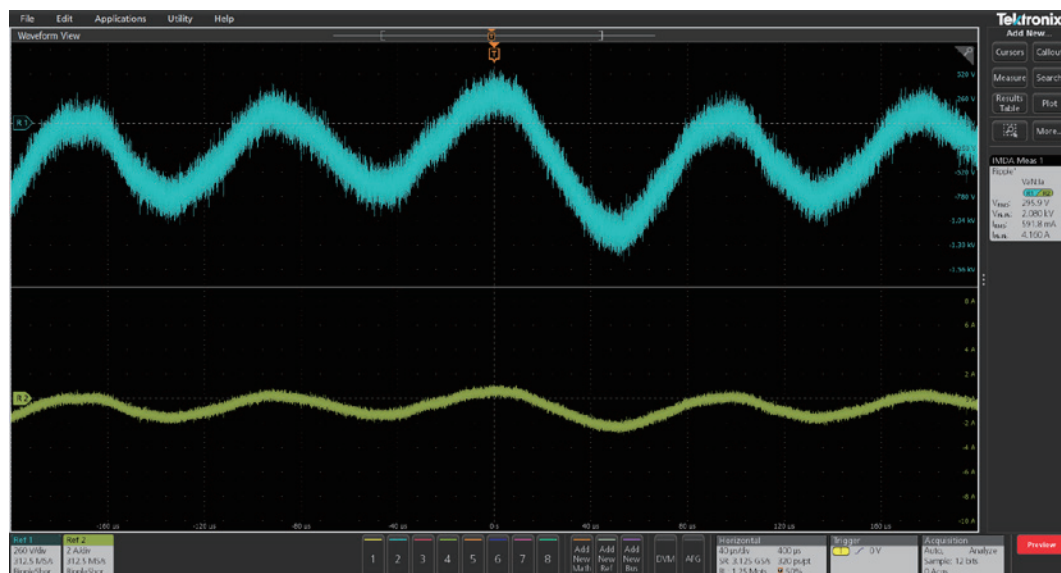


図25. DCバスのリップル

スイッチングの解析

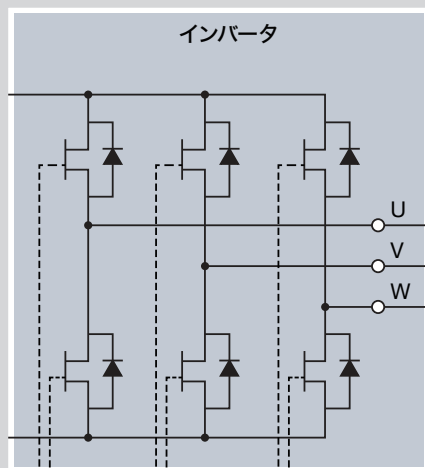


図26. インバータ設計の最適化に役立つスイッチング損失測定

VFDのスイッチング回路の設計、検証では、ドライブ回路のスイッチングに関連する損失を理解する必要があります。Opt. 5-PWR、Opt. 6-PWRでは、スイッチング損失とスルー・レートが測定でき

ます。電圧プローブをスイッチング・デバイスの両端に接続し、電流プローブでスイッチング・デバイスに流れる電流を測定します。複数の測定項目を追加して、それぞれのスイッチング・デバイスを同時に測定することもできます。5/6-PWR解析パッケージでは、以下の項目が測定できます。

スイッチング損失：スイッチング・デバイスのターンオン、ターンオフ、導通領域におけるそれぞれの平均の電力損失またはエネルギー損失を、瞬時電力波形に基づいて測定します。この測定では、電圧、電流波形の各ペアで計算した瞬時電力波形も表示されます。

dv/dt：ベース基準レベル (R_B) からトップ基準レベル (R_T) まで立ち上るとき、または R_T から R_B まで立ち下がる時の電圧変化のレート (スルー・レート) を測定します。この測定では、電圧、電流波形の各ペアで計算した瞬時電力波形も表示されます。

di/dt：ベース基準レベル (R_B) からトップ基準レベル (R_T) まで立ち上るとき、または R_T から R_B まで立ち下がる時の電流変化のレート (スルー・レート) を測定します。この測定では、電圧、電流波形の各ペアで計算した瞬時電力波形も表示されます。

DQ0 (Direct Quadrature Zero、DQゼロ) 変換と測定

クラーク／パーク変換は、磁界方向制御システム実装を簡略化するためによく使用されます。磁界方向制御システムの例を図8に示します。制御システム内では、モータに印加される三相電圧を直交のD、Qベクトルに変換する場合にこの変換が使用されます。この簡略化されたベクトルは、目的の速度を維持するために、容易にスケーリングし、統合することができます。逆変換することで、インバータでパルス幅変調を行うためのドライブ信号を作成することができます。

このD、Qベクトルは、FPGAなどのデジタル信号処理ブロックの奥深くにあり、直接測定できない場合があります。IMDAソフトウェアは、オプションのDQ0解析機能により、簡単な設定で三相出力の電圧または電流からDとQの測定値を導くことができます。これにより、制御システムの調整の効果をすばやく、簡単に確認できます。

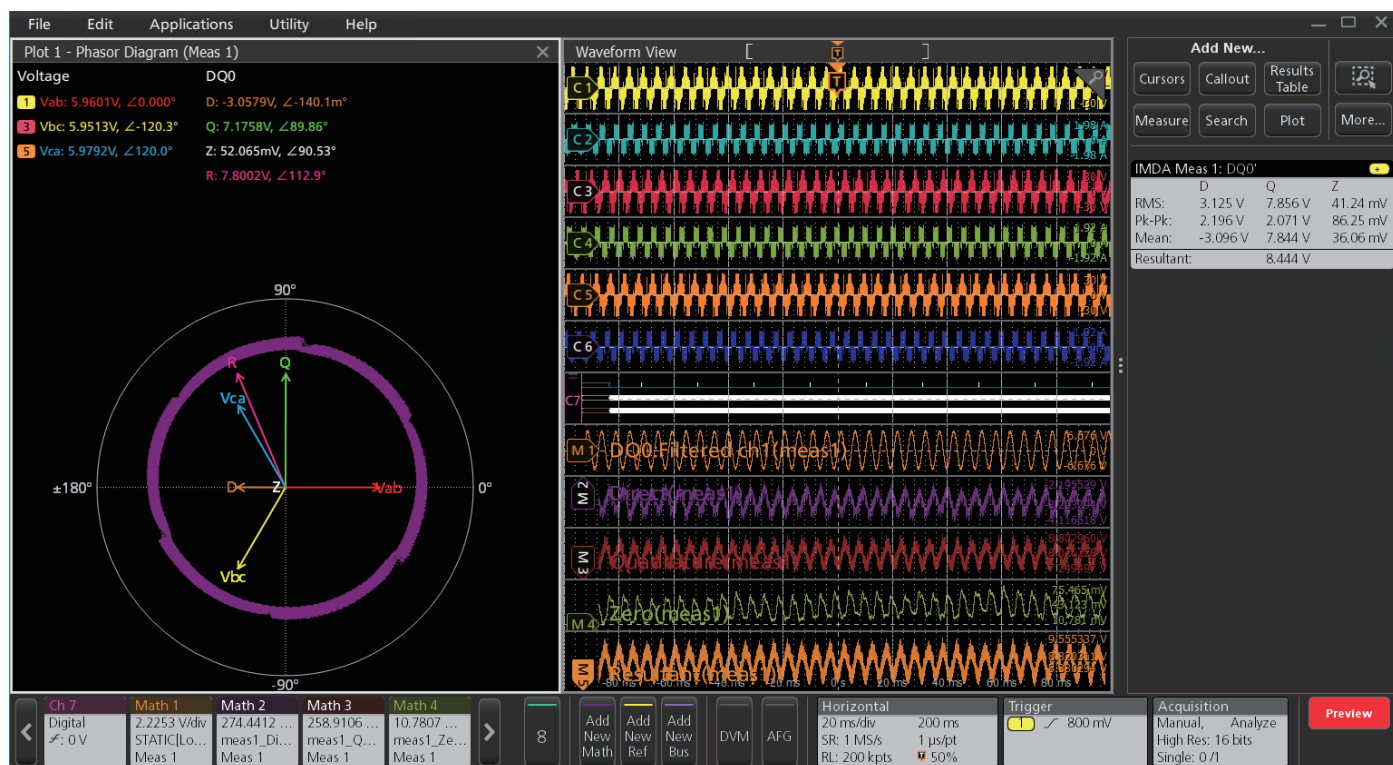


図27. 直交エンコーダ・センサによるモータ速度と回転方向フィードバックで得られる、Dベクトル、Qベクトル、結果ベクトル(R)を示すDQ0フェーザ図の例

解析ソフトウェアは、D、Qだけでなく、結果ベクトル(R)も表示します。Rは、DとQの各サンプル点におけるDとQの斜線ベクトルを計算して求めます。Rベクトルは、QEI指標パルス(Z)で決まる0°から始まります。インクリメンタル角度は、エンコーダの1回転あたりのパルス数(PPR)とモータの極ペアに基づいてQEIで計算されます。Rベクトルの回転を観察することで、制御システムがモータをスムーズに駆動しているかどうかを確認できます。整流の数も確認できます。図27のRベクトル・プロットには6つの歪み点があり、これは6つの整流ステップがあることを示しています。図28は、DQ0測定におけるソース設定の例を示しています。ソースと結線だけでなく、ローパス・フィルタも設定でき、すべてのソースに適用するかエッジ・クオリファイアのみに適用するかを選択できます。これは、EMIおよびスイッチング・ノイズによるノイズの低減に役立ちます。

IMDA MEAS 1 ?

DQ0 >

SOURCE SETUP

Source Settings Configuration

Global Local Input Output

Input Wiring 3 Phase-3 Wire (3V3I) >

Connection Line-to-Line ☐ Convert L-L to L-N

Voltage Source Current Source Edge Qualifier

Vab Ch 1 > Ia Ch 2 > Ch 1 >

Vbc Ch 3 > Ib Ch 4 >

Vca Ch 5 > Ic Ch 6 >

Low Pass Filter Cutoff Frequency(Fc)

1st Order > 500 Hz

Apply LPF on

Edge Qualifier Only All Sources

☒ Calculate electrical theta using sensor input

Sensor Type QEI >

Source

Ph A Ch 7_D3 >

Ph B Ch 7_D4 >

Index Z Ch 7_D5 >

Pulses per Rotation(PPR) 1.25 k

Gear Ratio 1

CONFIGURE >

図28. 直交エンコーダ・インタフェース (QEI) を使用した、システムのDQ0測定のためのオシロスコープ設定の例

出力測定

PWMドライブの出力波形は非常に複雑であり、キャリアによる高周波成分と、モータを駆動する基本周波数による低周波成分がミックスされたものになります。PWM波形は安定したトリガが得られないことがあるため、オシロスコープによる測定が難しい場合があります。

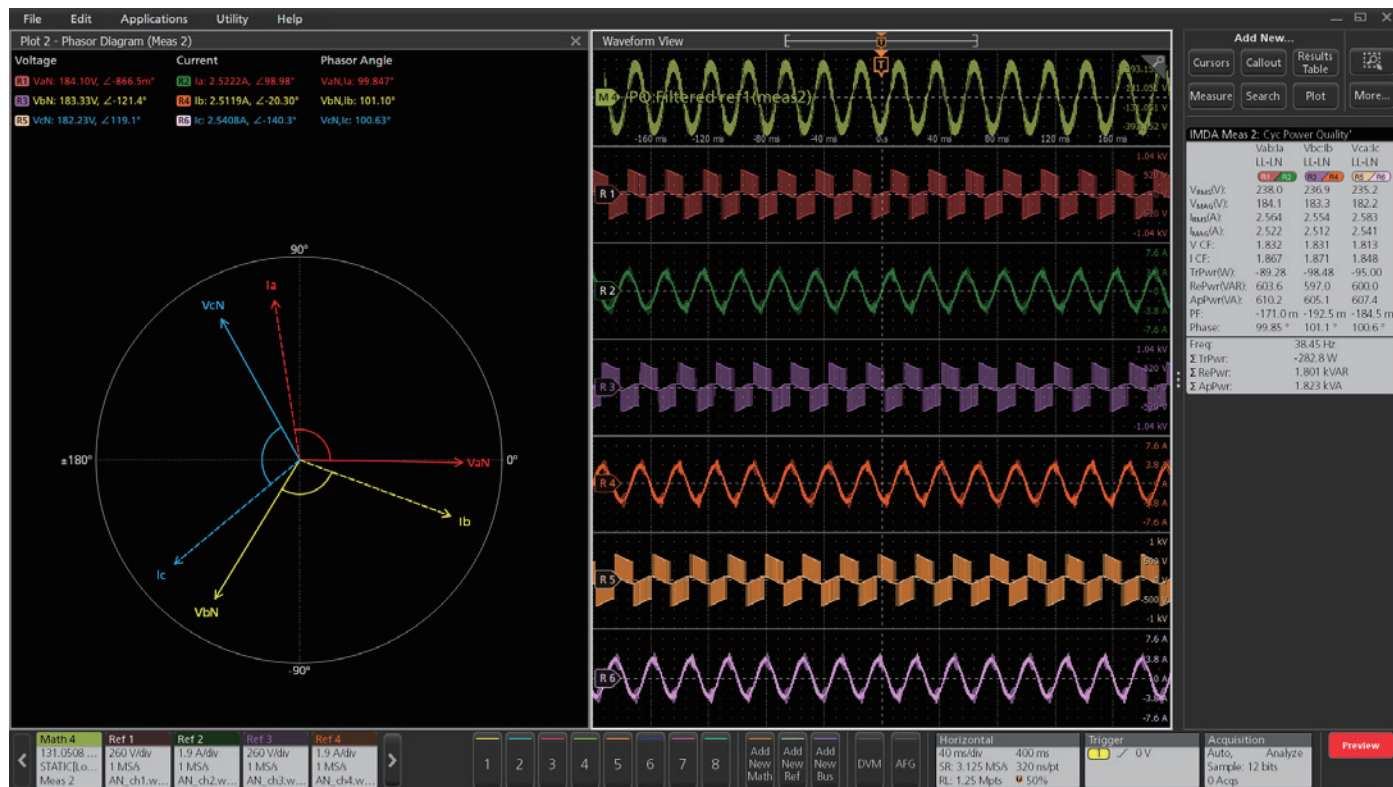


図29. このPWM波形は、数百kHzの周波数のキャリアと、モータが応答する低周波の平均電圧を含んでいる

このような問題は、キャリア波形が低い周波数で変調されるために発生します。したがって、トータルの電圧実効値、トータルの電力などは高い周波数帯域で、しかも出力波形の低周波成分の整数倍のサイクルで測定する必要があります。

IMDAソフトウェアの特長は、PWM波形を安定して測定できることです。「エッジ・クオリファイア」として指定したチャンネルでPWM波形を復調し、「演算チャンネル」としてエンベロープを抽出します。これにより、測定のための正確な同期が可能になります。

VFDの入力に対して使用される電源品質測定、高調波測定と同じ測定が、ドライブの出力に対しても電圧、電流、位相、電力のチェックのために使用できます。電源品質測定と高調波測定については、この入門書の「入力測定」の項で詳細に説明されています。入力と出力の両方の測定で同じ結線方式が利用できますが、単相3線接続は入力のみで利用可能です。

IMDA Meas 1: Cyc Power Quality'			
	Vab:la LL-LN	Vbc:lb LL-LN	Vca:lc LL-LN
	1 2	3 4	5 6
V _{RMS} (V):	5.466	5.780	5.587
V _{MAG} (V):	4.189	4.227	4.225
I _{RMS} (A):	628.1 m	706.8 m	682.5 m
I _{MAG} (A):	529.0 m	662.4 m	611.1 m
V CF:	3.953	3.690	3.831
I CF:	3.117	3.260	3.432
TrPwr(W):	1.592	1.959	1.704
RePwr(VAR):	-3.042	-3.585	-3.411
ApPwr(VA):	3.433	4.085	3.813
PF:	945.3 m	950.4 m	867.5 m
Phase:	-19.05 °	-18.12 °	-29.83 °
Freq:	160.5 Hz		
Σ TrPwr:	5.254 W		
Σ RePwr:	-10.04 VAR		
Σ ApPwr:	11.33 VA		

図30. 電源品質測定グループには、電圧、電流、位相角、有効電力、皮相電力、無効電力、力率を含む、PWM出力の迅速で安定した概要が確認できる

効率測定

効率測定では、入力と出力の電圧と電流のペアの、入力パワーに対する出力パワーの比を測定します。5/6シリーズMSOでは、入力、出力の両方で2電力計法 (V1×I1、V2×I2) が使用されます。これにより、図31に示すように、8つの入力チャンネルで三相の入出力電力を測定できます。

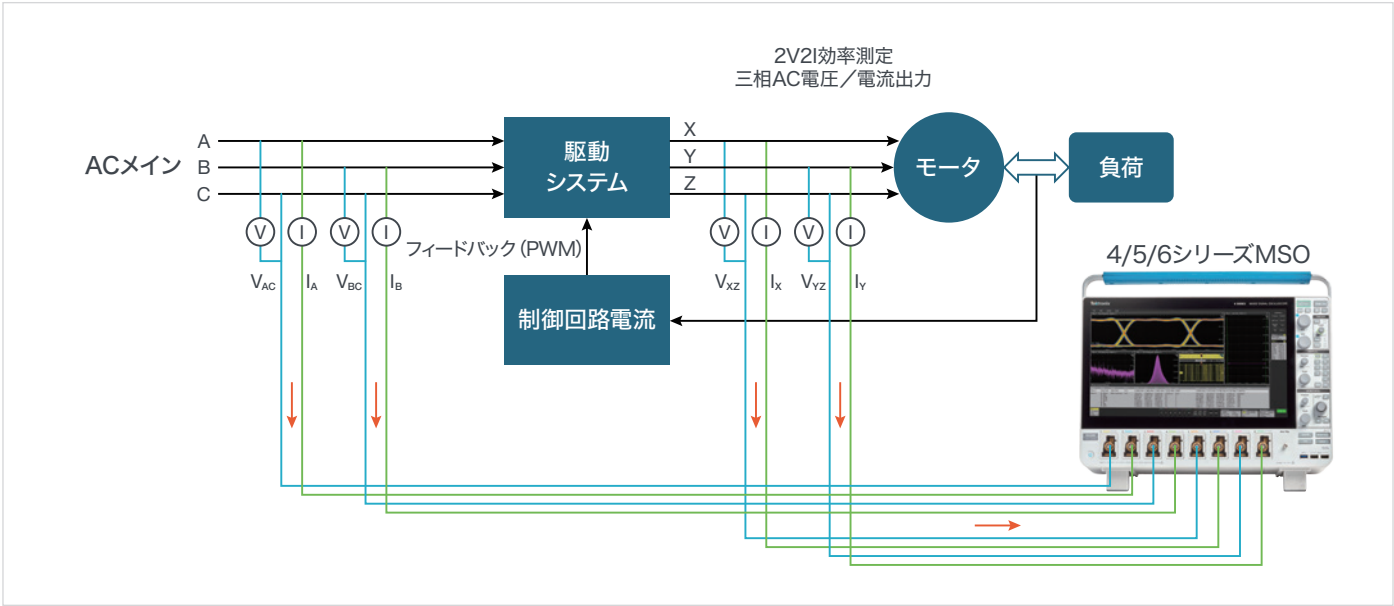


図31. 8つのオシロスコープ入力を使用した、3線入力、3線出力システムの駆動効率測定の例

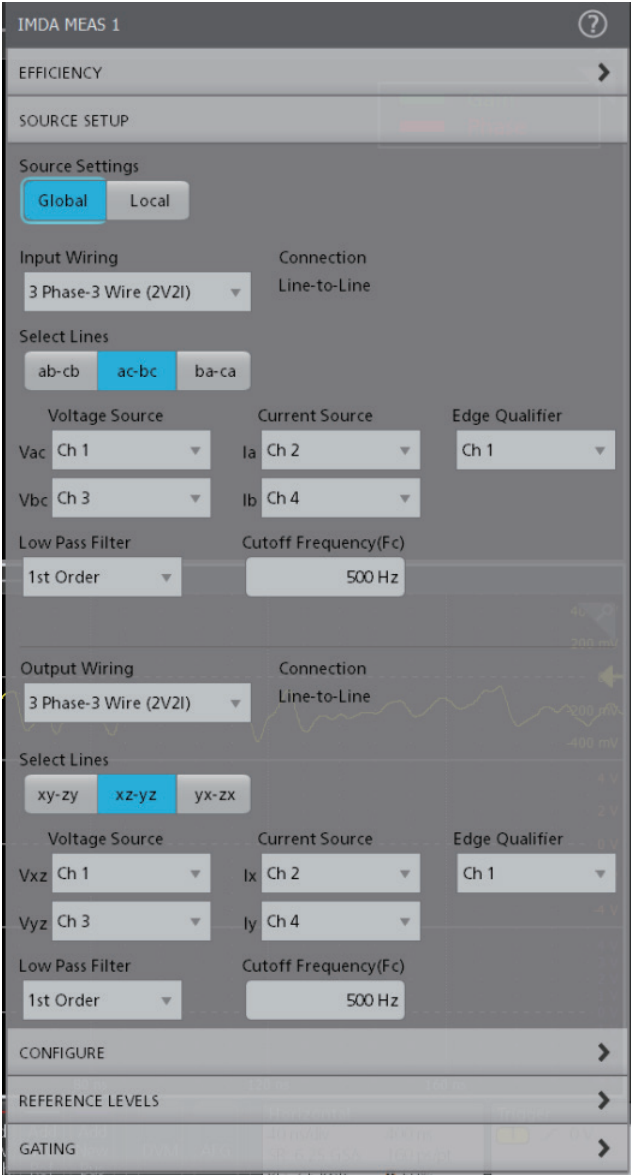


図32. 5/6シリーズMSOを使用した、3線入力、3線出力の効率測定セットアップ

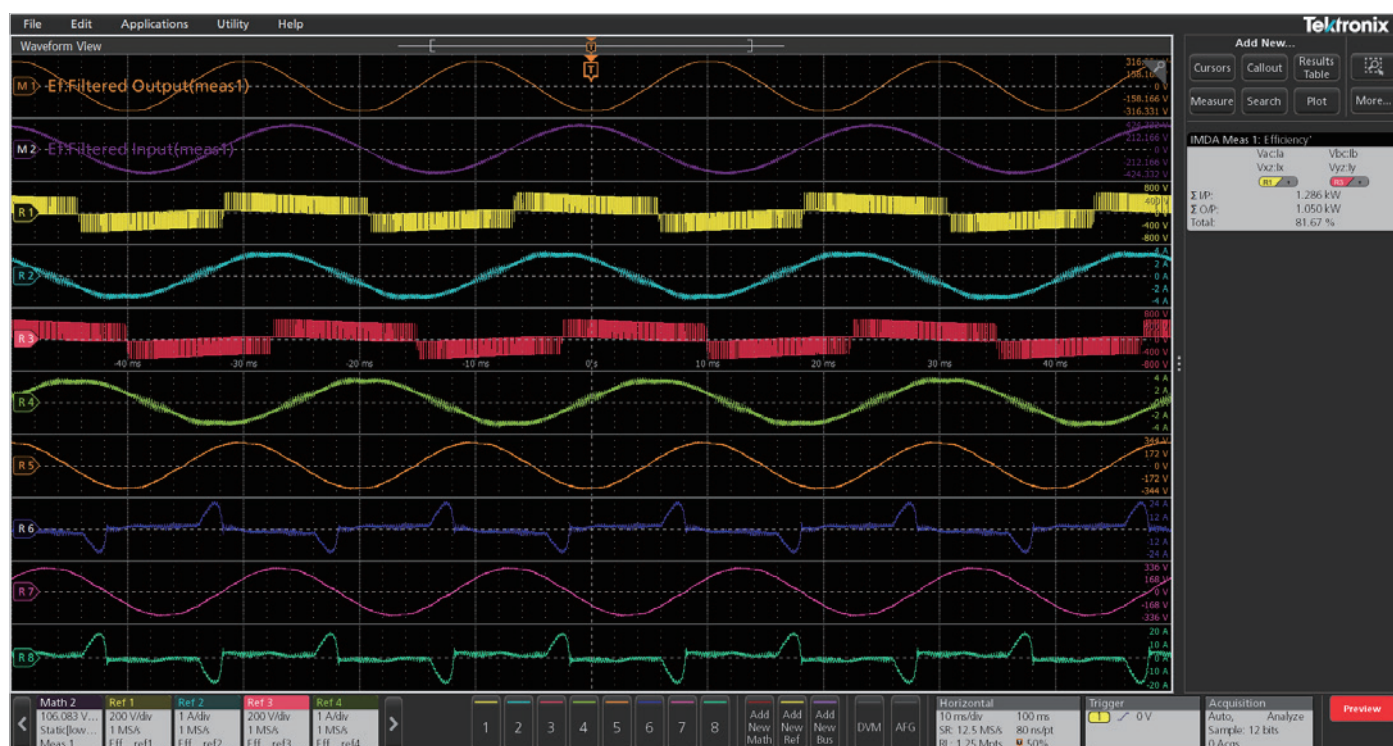
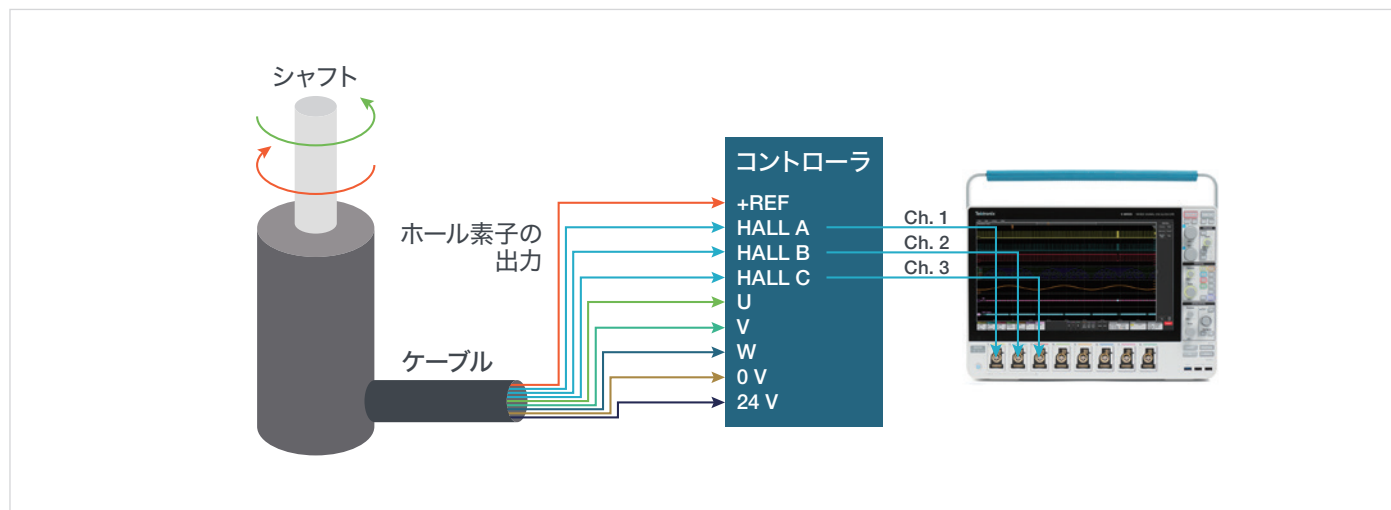


図33. VFDの入出力の両側で2電力計法を使用した効率測定の実例

機械測定

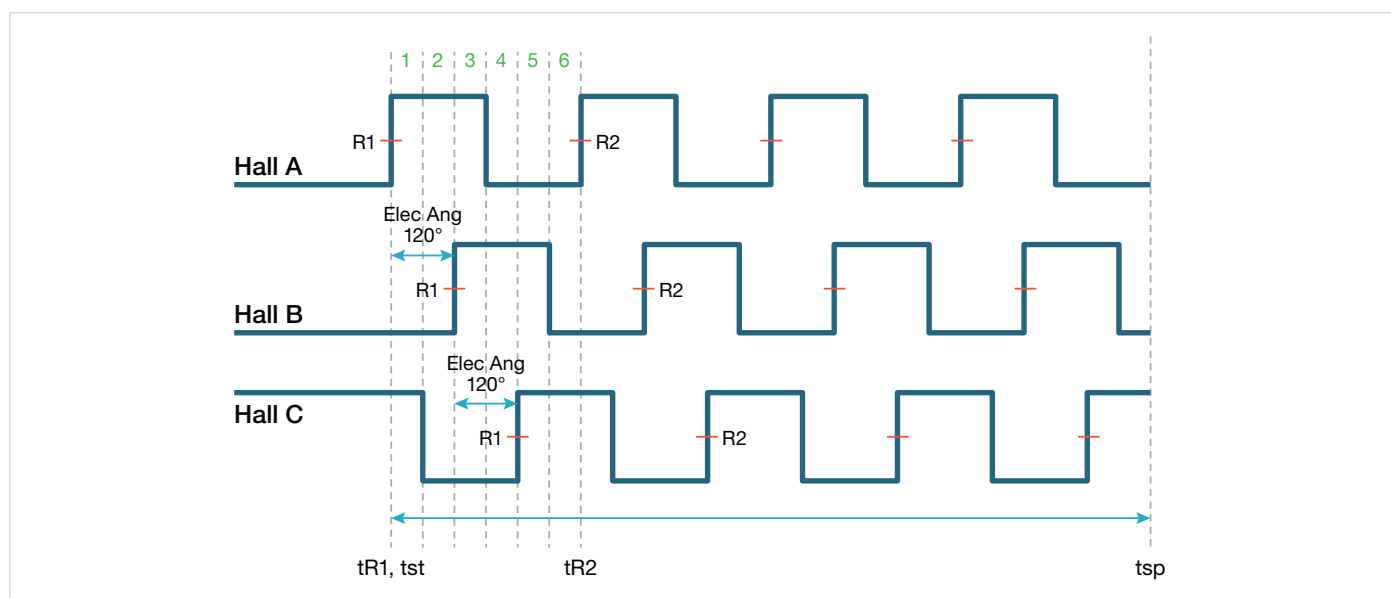
モータの速度は、モータの出力シャフト、またはモータ内部に取り付けたスピード・トランスデューサで測定できます。このトランスデューサは、モータの回転速度に比例した電気信号を出力します。モータの回転速度は1分間の回転数 (RPM、Revolutions Per Minute) で表わされます。機械パラメータの測定では、モータ、制御システムの種類によって異なるタイプのセンサが使用されます。IMDAソフトウェアとOpt. 5/6-IMDA-MECHは、ホール素子、QEI (直交エンコーダ・インタフェース) のセンサに対応しています。

ホール素子



ホール素子を使用することで、制御システムに位置をフィードバックします。例えば、ブラシレスDCモータで使用すると、ロータの位置をモニタして整流を同期します。ホール素子の出力は、速度、加速度、方向の計算で使用されることがあります。回転速度に比例したパルスを出し、3個一組で使用されることがあります。

IMDAソフトウェアでは、モータの回転速度と加速度のプロット用にホール素子の出力を使用できます（図36参照）。測定のセットアップでは、極数とギア比を設定することで回転速度を正確に測定できます。モータの出力パワー、ノイズのレベルに応じて、TPP1000型受動プローブ、またはTHDP0200型あるいはTHDP0100型などの高電圧差動プローブが使用できます。5/6シリーズMSOでは、オシロスコープの任意のチャンネルにTLP058型ロジック・プローブを接続することで、ホール素子の出力パルスを測定することもできます。FlexChannel入力の一つでロジック・プローブを使用すると、それだけで8つのロジック・チャンネルが利用できるため、一つのオシロスコープ・チャンネルで複数のホール素子に対応できます。モータの回転と測定した速度を比較することで、正しく接続されていることを検証できます。



この例では、4極ベアのモータにおける6ステップの整流を示している。機械的な回転の開始ポイントがtstである。回転の終わりがtspである。1回転で4つの電気的サイクルがある。IMDAソフトウェアは、この情報から回転速度、方向、加速度を測定する

回転速度

回転速度は、ロータが1回転する時間（秒）から計算します。回転速度は、1分間あたりの回転数（RPM、Revolution Per Minute）で表されます。

$$\text{回転速度} = \left(\frac{1}{t_{sp} - t_{st}} \right) (60)G$$

ここで、停止時間（ t_{sp} ）と開始時間（ t_{st} ）の差は、ロータの機械的な1回転を表します。図36に示す極数により、機械的な1回転が何回の電気的サイクルになるか決まります。ギア比（G）は、ロータとモータの出力シャフト間の回転ギア比として使用されます。

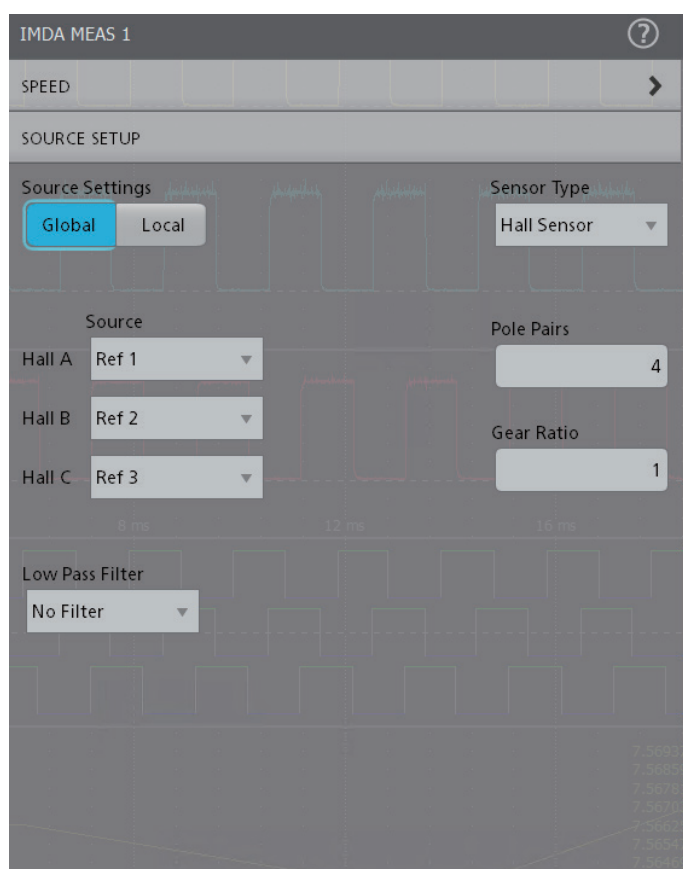


図36. ホール素子を使用したシステムの、オシロスコープによる回転速度測定の設定

回転方向

IMDAソフトウェアは、ホール素子出力の立下りエッジの順番、または立上りエッジの順番からモータの回転方向を判断します。

回転方向を測定するには、極数を設定する必要があります。図37に示す、120°離れて配置するA、B、Cのホール素子を持った、2極のモータを例に考えます。最初のロータ・マグネットのN極が、0°でホール素子Aを横切り、立上りエッジを出力します。回転の設定方向が時計回り（A-B-C）とすると、N1はホール素子Aから120°離れたところでホール素子Bを横切ります。しかし、N2はホール素子Cから60°しか離れていないため、最初にホール素子Cを横切ります。このため、2極モータではパルス・エッジの順番はA-C-Bとなります。

IMDAソフトウェアでは、ホール素子Aの最初の立上りエッジと、120°後の次のエッジを比較することでも回転方向を検証します。例えば、最初の立上りエッジがホール素子Aからのもので、ホール素子Bの立上りエッジが120°離れて観測された場合、ロータの回転の順番は、この例では時計回りでA-B-Cとなります。仮に120°後にホール素子Cの立上りエッジが観測された場合は、回転方向はA-C-B、すなわち反時計回りとなります。

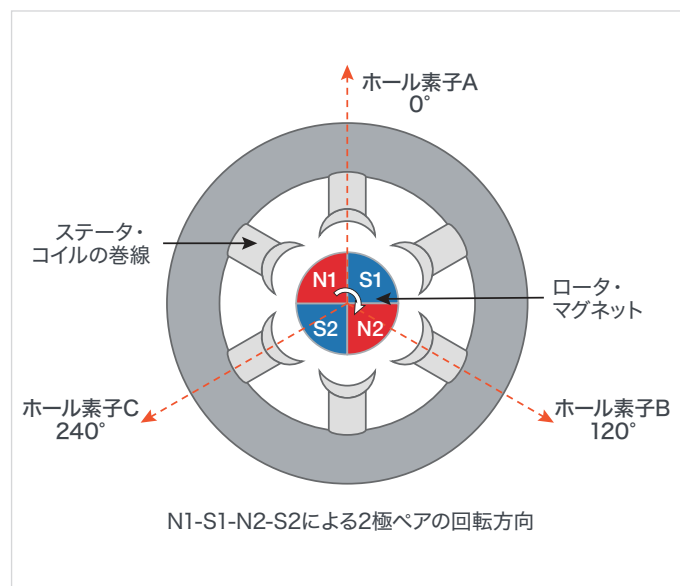


図37. 回転方向を知るためには、ロータの極数がわかっていなければならない

加速度

加速度は、単位時間における速度の変化率です。

$$\text{加速度} = \frac{\text{Speed}_{t_{n+1}} - \text{Speed}_{t_n}}{t_{n+1} - t_n}$$

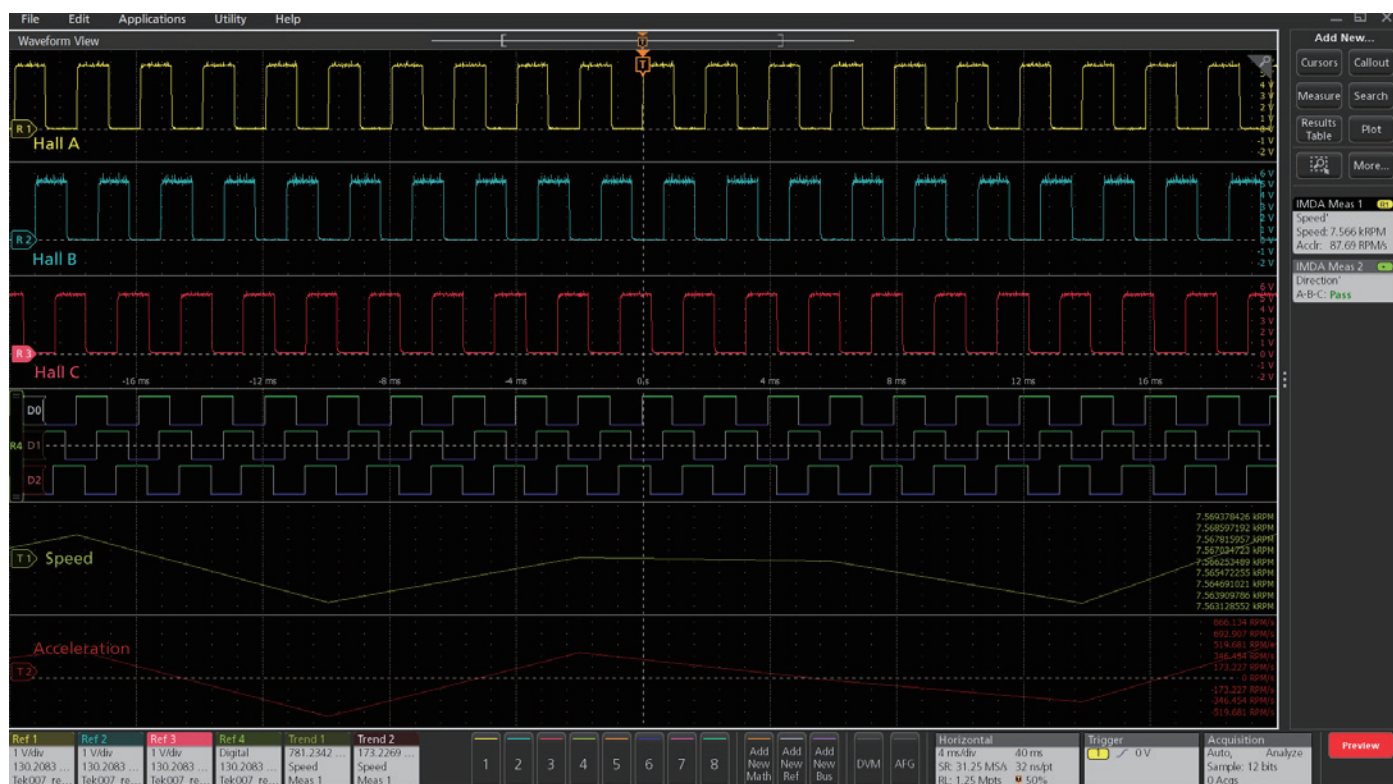


図38. ホール素子の波形と測定の例。下2つの波形は、回転速度と加速度のトレンド・プロットを表す

直交エンコーダ・インタフェース (QEI)

直交エンコーダ・インタフェース (QEI, Quadrature Encoder Interface) は、ロータ・シャフトに取り付けられたスロット付きのディスク、光源 (LED)、受光器 (フォトトランジスタ) で構成されています。

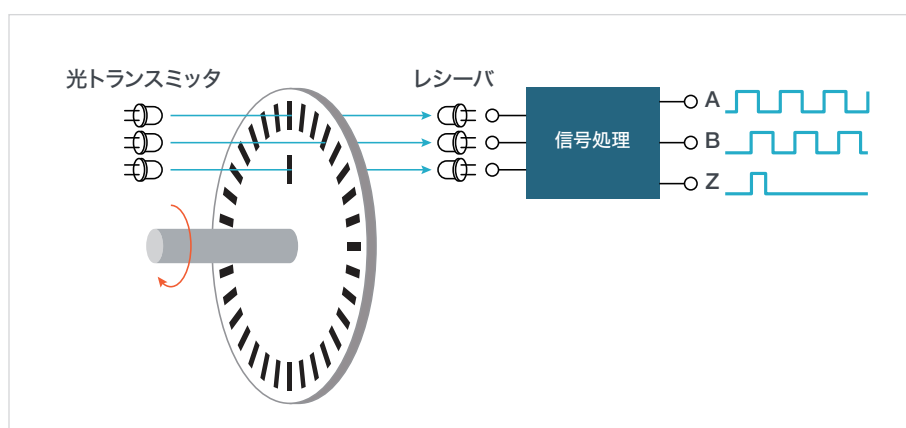


図39. 直交エンコーダの基本動作

ディスクのスリット数によってPPR (Pulses Per Revolution) が決まります。ディスク上のスリットを通過したLEDの光はフォトトランジスタに伝わり、90°位相のずれたパルス信号に変換されます。

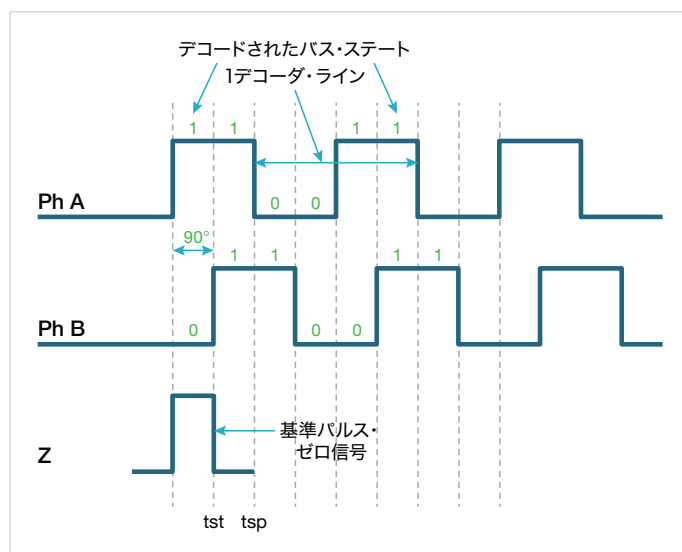


図40. QEIのパルス・パターンの例。信号は90°位相がずれ、Ph Aの1サイクルで10、11、01、00の4つのステート・パターンをとる

$$\text{回轉速度} = \frac{G \times 60}{\sum_{n=1}^{4 \cdot PPR} \Delta t(n)}$$

ここで、回転速度は単位RPMで測定され、PPRは機械的な1回転でのパルス数を表します。 $\Delta t(n)$ は、ステート・トランジション間の時間差、つまり、Ph Aでエッジが発生した後、Ph Bでエッジが発生するまでの時間差分です。Ph Aの1パルス・サイクルで4つのステート・トランジションがあるので、1回転では $4 \times \text{PPR}$ のステート・トランジションになります。ギア比 (G) は、ギアアップ ($G > 1$) またはギアダウン ($0 < G < 1$) されたセンサを考慮し、回転速度をスケールングするために使用されるパラメータです。

エンコードのインクリメンタル角度（角度分解能）は、次のように求められます。

$$\text{インクリメンタル角度} = \frac{360}{4 \times PPR}$$

IMDAソフトウェアは、カウントしたトランジションの数と角度分解能(インクリメンタル角度)を乗算することで回転角度を計算します。

動的測定

モータ駆動回路の解析における一般的な要件として、時間経過によるモータの応答を観測し、加速および負荷変動条件下でのDUTの振る舞いを観測できることがあります。このような動的測定は、さまざまな条件における電圧、電流、電力、周波数などのパラメータ間の相互関係を理解するのに役立ちます。IMDAソフトウェアには、電源品質測定において2種類のトレンド・プロットがあり、このような解析を実行できます。

- タイム・トレンド・プロット
- アクイジション・トレンド・プロット

それぞれのプロットには特長があり、電源品質測定の下にある、対応するサブ測定のプロットで使用できます。プロットはCSVフォーマットで保存できるため、後処理や外部PCでの解析が可能です。

タイム・トレンド・プロット

タイム・トレンド・プロットでは、ロング・レコード長で取り込んだ1回のアクイジションにおける波形サイクルごとの測定値を記録し、トレンド・グラフとして表示します。これは、測定における詳細な、短時間における測定値の変動、相関関係を調べるのに適しています。

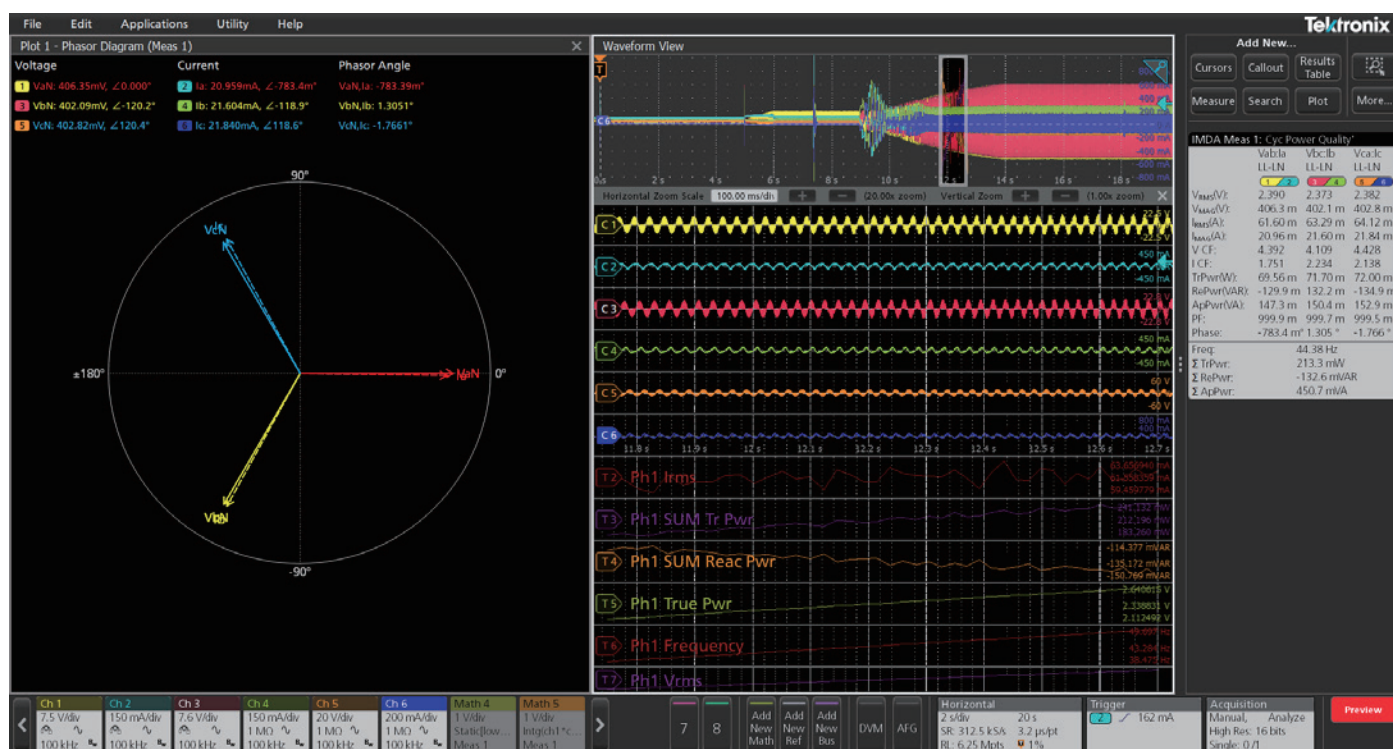


図41. IMDAソフトウェアによるトレンド・プロットの例。1回のアキュイジションにおける測定値の変動を示している

アキュイジション・トレンド・プロット

アキュイジション・トレンド・プロットは、波形取り込みを繰り返し、各アキュイジションごとの平均測定値を記録し、トレンド・グラフとして表示します。これは、長時間における解析に適しています。テスト設定でアキュイジションを設定することでテスト期間を設定できます。プロットはCSVフォーマットで保存できるため、後処理が可能です。プロット・データをCSVファイルで保存した場合、時間の値を利用することができます。

動的負荷制御は、三相誘導モータやその他の電気モータでも重要です。アキュイジション・トレンド・プロットは、加速時、一定速度時、減速時における測定値の変化も観測できます。

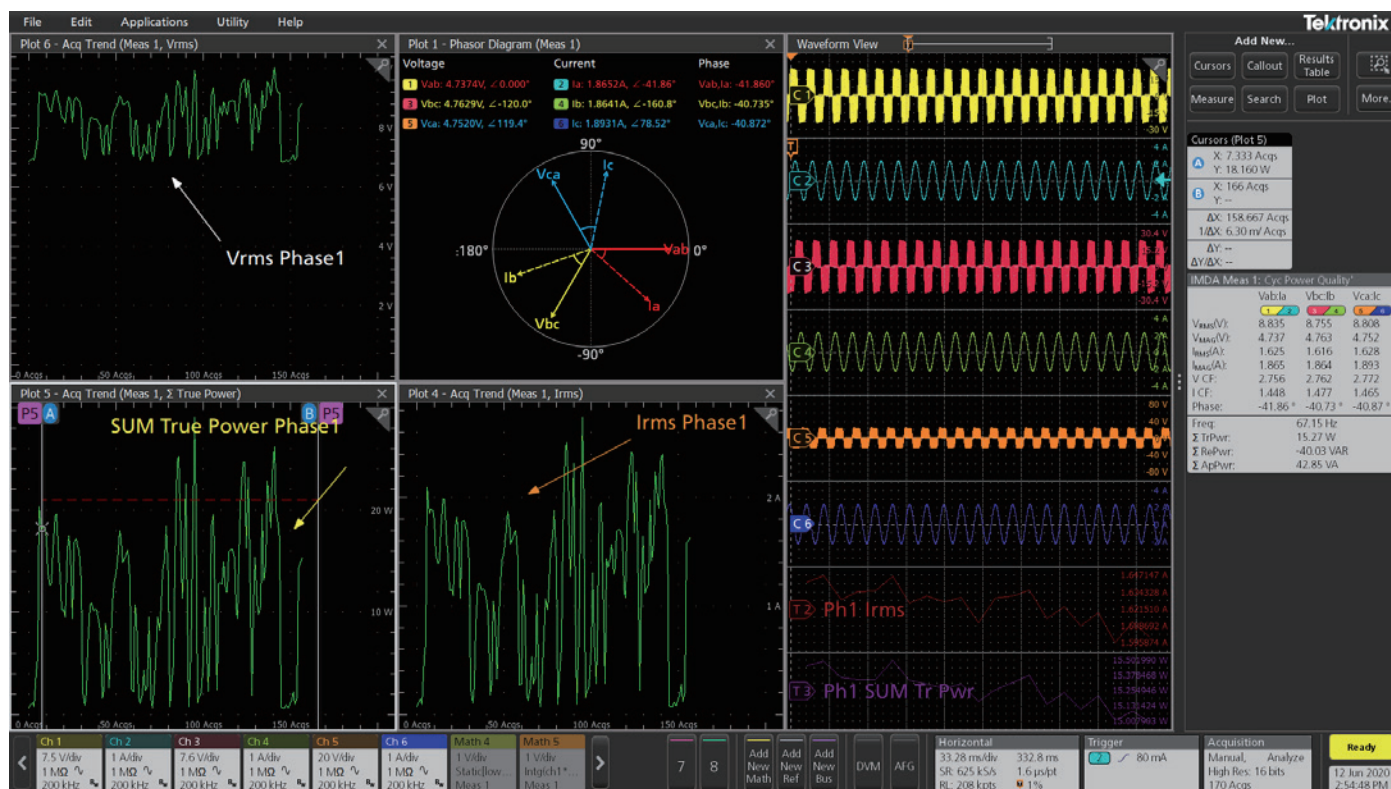


図42. アクイジション・トレンド・プロットによる、複数のアクイジションにおける測定値変化の記録例。
グリーンの波形で表示されており、直近のアクイジションにおける波形と測定値も表示されている

まとめ

三相モータのドライブ測定には、その接続、波形の複雑さ、計算量の多さなどの課題があります。テクトロニクス5/6シリーズMSO上で使用できるIMDAソフトウェアは、このような測定を簡単かつスピーディに実行でき、高速のサンプリング・システムとリアルタイム・オシロスコープによる優れた表示機能のメリットも兼ね備えたパワーアナライザとしての機能も実現できます。

オシロスコープを使用することで、三相モータ・ドライブ回路の設計エンジニアは静的および動的な動作条件下で解析を行い、電気的および機械的なパラメータを観測して、ドライブ性能を深く理解することができます。5/6シリーズMSOの優れたサンプリング性能、処理性能によりDQ0測定などが可能になり、制御システムの内部まで詳細に観測できます。このような機能は、現状の一般的パワーアナライザでは得られません。



www.tek.com/ja

テクトロニクス／ケースレイインストルメンツ

各種お問い合わせ先：<https://www.tek.com/ja/contact-tek>

技術的な質問、製品の購入、価格・納期、営業への連絡、修理・校正依頼
〒108-6106 東京都港区港南2-15-2 品川インターシティB棟6階

記載内容は予告なく変更することがありますので、あらかじめご了承ください。

Copyright © 2022, Tektronix. All rights reserved. TEKTRONIX および TEK は Tektronix, Inc. の登録商標です。
記載された製品名はすべて各社の商標あるいは登録商標です。

2022年3月 48Z-73863-0