

パワー解析： その課題とソリューション

Selu Gupta

ハードウェア設計エンジニア
Tektronix, Inc.
Beaverton, Oregon USA

概要：

スイッチング電源は、設計エンジニアにとってきわめて大きな課題となってきています。電力密度の増大に伴い、効率と性能に対する要求が厳しくなるとともに、測定と解析に関する課題は多岐に渡ります。最新のパワー半導体はスイッチング速度が高いため、電圧と電流を正確に測定するのが困難で、しかもそれらを細かく解析するには複雑な計算が必要となります。

ここでは、基本的な測定であるターンオン／ターンオフ損失、SOA（安全動作領域）、ダイナミック・オン抵抗に関する問題点について説明します。高いスイッチング周波数では、磁気コンポーネントも電源回路の性能に大きく影響を与えます。インダクタンス測定や磁気特性、磁気電力損失の検証に関する課題にも焦点を当て、リップル／ノイズの入出力解析や、電流高調波、電源品質、コンプライアンスのニーズについても考察します。

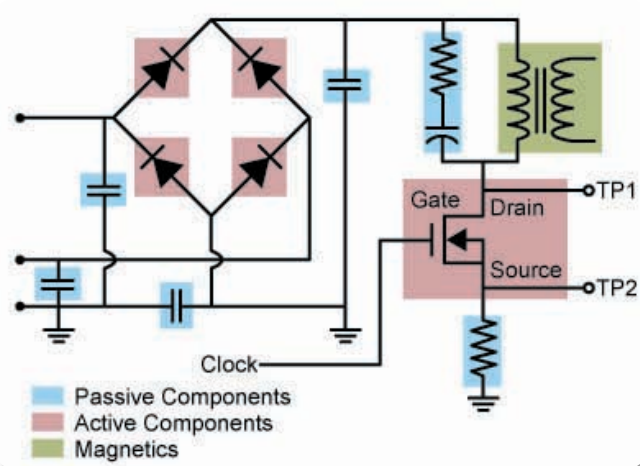
さらに、これらの測定課題に対するパワー測定／解析ソリューションを紹介します。当社のDPO7000シリーズ・オシロスコープと、DPOPWRパワー解析ソフトウェア、TCP0030型電流プローブ、P5205型高電圧プローブという組合せは、電力回路に携わるエンジニアにとって心強い味方となります。

I. はじめに

電力需要は、近年指数関数的に増大しています。そのため、日々使用される電気製品のみならず、複雑な電気／通信システムの電源には、より高い性能とエネルギー効率が求められています。

今日のほとんどの電源回路では、スイッチング電源（SMPS：Switch Mode Power Supply）が主流のアーキテクチャになりました。スイッチング電源は効率に優れている上、従来の整流器とリニアDC-DCコンバータによる電源に比べて、AC入力電圧レンジが広く、小型・軽量、低コストで大きな電力を供給できるなどの特長があります。また、スイッチング電源は負荷の変化にも効率良く対応できます。

スイッチング電源でキーとなるコンポーネントが、MOSFET（Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor）またはIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）です。スイッチング電源の磁気コンポーネントには、インダクタ（コイル）と変圧器があります。これらのキー・コンポーネントにおける損失を適切に評価・測定することで、スイッチング電源の性能を正しく理解することができます。



▶ 図1：スイッチング電源の簡易ブロック図。TP1とTP2がMOSFETの測定ポイントです。

ここでは、(1) スwitchング電源の主な用語の定義と、性能に関する重要な測定項目、(2) パワー解析を簡単かつ正確に行うための当社測定システムの概要、(3) 当社測定システムによる電源特性評価のための測定手法の順に説明し、最後に(4) 正確な測定のための一般的なヒントをいくつか紹介します。なお、このホワイト・ペーパーでは、スイッチング電源の性能解析と特性評価に焦点を当てていますが、説明の中で使用している用語や概念は、他のスイッチング回路にも共通するものです。

II. スwitchング電源の基礎

まず、スイッチング電源の性能と品質に関する用語の定義を押さえておきましょう。基本測定は、電気特性、磁気特性、入出力解析という3種類に分類できます。

電気特性

電気特性とは、一般に、電源のスイッチング・デバイス(MOSFETまたはIGBT)にかかる電圧、流れる電流の特性、測定を意味します。測定項目としては、ターンオン損失、ターンオフ損失、電力損失、ダイナミック・オン抵抗、SOA(安全動作領域)が挙げられます。

ターンオン/ターンオフ損失

MOSFETやIGBTなどのスイッチング・デバイスがオフからオンに移るときエネルギー損失を、「ターンオン損失」といいます。同様に、スイッチング・デバイスがオンからオフに移るときエネルギー損失を、「ターンオフ損失」といいます。

トランジスタ回路では、寄生容量、寄生インダクタンス、ダイオードに蓄積された電荷の消失により、スイッチング時にエネルギーが消失します。電源の評価、効率の評価においては、この損失を正しく解析することが不可欠です。

ターンオン、ターンオフ損失の測定で難しいのは、スイッチング信号のリングングを除去することです。このリングングはオン/オフの遷移と誤解されることがあります。このリングングの原因となるのが、回路の寄生容量と寄生インダクタンスです。

電力損失

電力損失は、2点間のエネルギー伝送の結果として生じる、入力電力と出力電力の差です。スイッチング損失と伝導損失が、電源における電力損失の大半を占めます。

ダイナミック・オン抵抗

スイッチング・デバイスのダイナミック・オン抵抗は、デバイスがオンのときの抵抗値です。この値は一定でなく、電圧や電流によって変化します。

SOA(安全動作領域)

トランジスタの安全動作領域とは、トランジスタがダメージを受けることなく動作できる条件、具体的には、所定の電圧でどれだけの電流を流すことができるかを意味します。この限界を越えるとトランジスタが故障する原因となります。SOAには、最大電圧、最大電流、電力、接合温度、2次ブレイクダウンなど、デバイスの他の制限事項も含まれます。スイッチング電源の設計エンジニアは、SOAの情報を基に、さまざまな動作条件で電源のスイッチング・デバイスをテストします。

SOAとダイナミック・オン抵抗の測定で難しいのは、さまざまな負荷条件、動作温度の変化、ライン入力電圧の変動下で、デバイスの電圧・電流データを正確に取込むことです。電圧値と電流値の取込みが正確であれば、その分、解析も正確に行うことができます。

磁気特性

スイッチング電源の磁気コンポーネントには、インダクタ（コイル）と変圧器があります。電源の性能を正確に評価するには、磁気コンポーネントに関連する損失のメカニズムを理解していなければなりません。測定項目としては、インダクタンス、磁気電力損失、B-H特性などの磁気特性が挙げられます。

インダクタンス

インダクタは電源の入出力におけるフィルタとしてよく使用されています。変圧器は、スイッチング電源における発振を持続させ、絶縁しながら電圧と電流を一次側から二次側へ結合させます。インダクタンスの値は、電流源、電圧源、動作周波数、励磁信号、波形などによって異なります。したがって、これらのデバイスの動作領域における振舞いを観測することが重要です。

磁気電力損失

スイッチング電源の効率、信頼性、温度性能を正確に評価するには、電源内で発生する磁気電力損失を理解し、認識する必要があります。磁気要素に関連する損失には、銅損とコア損失があります。

- ・ 銅損は、銅巻線の抵抗によるものです。
- ・ コア損失は、渦電流損失とヒステリシス損失からなり、鉄芯製造メーカーのデータ・シートから計算します。これらの損失は動作周波数とAC磁束スイングによって決まり、DC磁束には影響されません。

磁気特性とB-H特性

スイッチング電源のインダクタと変圧器の設計においては、B-H曲線が重要な鍵となります。B-H曲線は、コア材質の磁束密度（B）と磁界強度（H）の関係を表します。この特性の傾きがコア材質の透磁率（ m ）であり、インダクタンスに影響します。コア材が高磁束密度で飽和すると、インダクタンスと透磁率は著しく低下します。B-H曲線を測定することで、スイッチング電源の磁性要素のコア損失と飽和（または不足）を検証することができます。また、コア材の単位容積におけるサイクルあたりのエネルギー損失を測定することもできます。

その他の磁気特性には、磁界強度（H）、飽和磁束密度（ B_s ）、残留磁束密度（ B_r ）、保磁力（ H_c ）、初期透磁率（ μ_i ）があります。

入出力 (I/O) 解析

電源性能の品質と効率全般を理解する上では、電源の入力と出力における電圧と電流を解析、比較することが不可欠です。そして、正確なI/O解析の鍵となっているのが、リップル、ノイズ、高調波、電力品質などのパラメータです。

リップル

リップルは、電源のDC出力に重畳するAC電圧であり、通常の出力量に対する比、またはピーク・ツー・ピーク電圧で表されます。リニア電源では、通常、リップル周波数は商用周波数の2倍（約120Hz）ですが、スイッチング電源では数百kHzのスイッチング・リップルが観測されます。

ノイズ

スイッチング電源の出力ノイズの原因となるのは、 dv/dt 、 di/dt の高いスルー・レート、寄生インダクタンスと寄生容量、レイアウト、高いスイッチング周波数などです。一般に、スイッチング電源のノイズは、スイッチング周波数と相関関係にあるか、広帯域に渡ります。

電源回路の高調波と歪

高調波は、基本周波数の整数倍の周波数を持った正弦波成分です。歪は、入力信号と出力信号波形の偏差です。歪は、オペアンプなどの能動デバイスの非直線性、同軸ケーブルなどの受動コンポーネント、あるいは遅延パスの反射などによって発生します。この歪の定量化に使用されるのが、THD（Total Harmonic Distortion、全高調波歪）という用語です。THDでは、歪を基本波のパーセントで表します。簡単に説明すると、純粋な正弦波には高調波も歪もなく、正弦波でない波形には歪と高調波が存在します。

高調波は電源回路では大きな問題です。スイッチング電源は奇数次の高調波を発生する傾向があり、それが電力網に戻ってしまうことがあります。電力網に戻る高調波歪のトータル・パーセンテージは、電力網に接続されるスイッチング電源の数が増えるほど大きくなります。歪は、電力網のケーブルや変圧器の加熱の原因となるため、高調波を解析し、低減することはきわめて重要です。

電源品質

電源の出力には、スイッチング高調波やその他のノイズ成分が一切含まれていないのが理想ですが、現実には不可能なことです。電源の出力品質の定量化に有効なのが、真の電力、皮相（無効）電力、力率、クレスト・ファクタ、電流高調波、THDなどの電源品質測定です。これらの電源品質測定なくして、非直線性の負荷がもたらす歪の影響を調べることはできません。

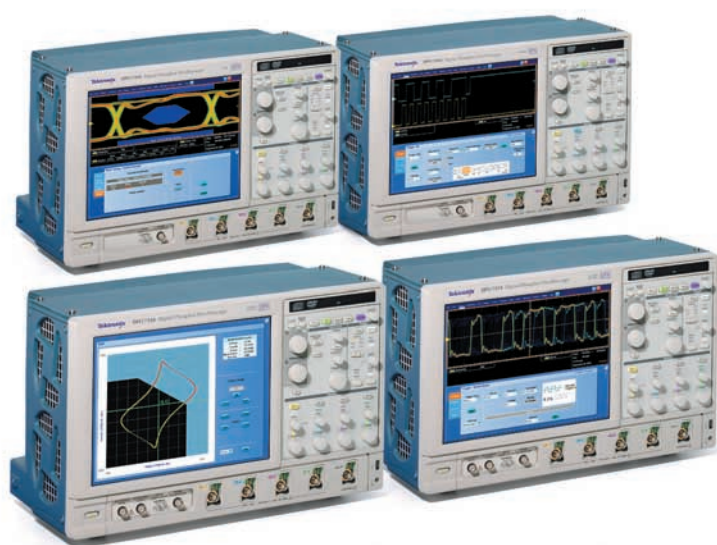
III. 効率的なパワー測定システム

測定効率を高めるためには、DUT（被測定デバイス）からオシロスコープへ、データや情報をシームレスに送る必要があります。ここに、オシロスコープとプローブ間のインタフェースが重要となる理由があります。当社はTekVPIインタフェースを開発し、プローブ・インタフェースと性能を次世代レベルに引き上げました。新設計のインタフェースは使いやすく、汎用性があり、オシロスコープとプローブ間の双方向通信が強化されています。

プローブとオシロスコープ間の双方向通信は、リモート測定において大きな威力を発揮します。TekVPIプローブの諸設定は、USB、GPIO、Ethernet経由によるホスト・コンピュータからの通信により、ユーザの自動テスト環境下でリモート制御できます。プローブの減衰比設定、DCオフセットのキャンセル、帯域制限フィルタの設定、電流プローブの残留磁気のでガウスなどをリモートで実行し、また、多くの測定情報を得ることができます。

TekVPI対応オシロスコープにはグラフィカルなプローブ・メニューが用意されており、プローブ補正ボックス上のメニュー・ボタンを押すだけで簡単に表示できます。このプローブ・メニューには、プローブの型名、製造番号、動作のステータスや警告メッセージ、トラブルシューティングの診断メニューなどが表示されます。

TekVPI®インタフェースの機能の中でも注目に値するのが、プローブの電源供給方法です。電流プローブ用の外部電源は不要で、TCP0030型電流プローブをオシロスコープに直接接続し使用することができます。電圧と電流を複数同時に測定できるため、スイッチング電源の設計環境では特に有効です。



▶ 図2：新プローブ・インタフェースTekVPI®を装備したDPO7000シリーズ・オシロスコープ・ファミリ。

DPO7000シリーズ

DPO7000シリーズは新プローブ・インタフェースTekVPI®を採用した初めてのオシロスコープ・ファミリで、リアルタイム・デジタル・フォスファ・オシロスコープとしてはトップ・クラスの性能と汎用性を備えています。3.5GHz、2.5GHz、1GHz、500MHz帯域の4機種が用意されており、アプリケーションに合った1台を選ぶことができます。4チャンネル同時に最高10GS/sのリアルタイム・サンプルを実現し、トランジェントや高速エッジなど、信号の詳細を簡単に取込むことができます。またDPO7000シリーズは、オプションで最大400Mサンプルのレコード長を装備し、高い分解能で長時間の波形取込みに対応することもできます。また、独自のコントロール・ウィンドウでオシロスコープのユーザ・インタフェースをカスタマイズできるMyScope®というユニークな機能を備え、測定項目ごとに必要な機能や操作だけを選択し登録しておくことが可能です。DPO7000シリーズには、カスタマイズ可能なフィルタ、FFT (Fast Fourier Transform、高速フーリエ変換) などの強力な波形解析ツールが標準で装備されています。また、データ解析に役立つDPOPWRなどのソフトウェア・パッケージもオプションで用意されています。

DPOPWR

当社のパワー測定／解析ソフトウェア・ソリューションDPOPWRでは、電源のスイッチング・デバイスや磁気コンポーネントにおける電力損失をすばやく測定／解析することができます。対応可能なアプリケーションには、半導体デバイスの特性評価、同期整流器の理想的なドライブ評価、リップル／ノイズの測定と解析、アクティブ力率補正回路のデバッグ、IEC規格EN61000-3-2、EN61000-302 AM14、MIL規格1399 (400Hz) のプリコンプライアンス・テストなどが挙げられます。

DPOPWRの特徴は、スイッチング電源の主要コンポーネントの測定と解析を他のソリューションより短時間で済ませられるという点です。信頼性に関する問題は、B-H解析とHiPower Finderが解決の糸口となります。重要な信頼性に関するテストにおいては、リニア・スケールとログ・スケールによるユーザ独自のSOAマスク・テストが実行でき、測定結果を独自のフォーマットで詳細にまとめることもできます。



▶ 図3：P5205型差動プローブ

高電圧差動プローブ

ほとんどのオシロスコープでは、設計上の理由からフローティング信号を直接測定することはできません。たとえば、電源のスイッチング・トランジスタの V_{DSon} を測定しようとしても、MOSFETのドレインとソースのいずれもが接地されていない場合は、測定が不可能です。この不可能を可能にするのが差動プローブです。当社の差動プローブは、MOSFETのフローティング V_{DSon} 信号を測定し、グランドを基準としたシングルエンド信号としてオシロスコープに入力します。

パワー・アプリケーション向けの従来の差動プローブであるP6246型/P6247型/P6248型では、最大8.5Vの差動電圧を測定することができます。一方、P5205型とP5210型では、それぞれ1300V (DC+ピークAC)、5600V (DC+ピークAC) の差動電圧を測定することができます。

P6246型/P6247型/P6248型差動プローブでは、850mV、8.5Vの2つのレンジで最高1.7GHz (-3dB) の帯域、200MHzの帯域フィルタ、DC除去 (測定信号のDCオフセットを除去) 機能があり、スイッチング電源設計のテストとトラブルシューティングに最適です。これらのプローブは小型で、豊富なアクセサリを標準で装備しているため、DUTとの接続において高い汎用性を実現しています。



▶ 図4：TekVPI®プローブ・インタフェースを装備したTDP1000型・TDP0500型高電圧差動プローブ

新製品の高電圧差動プローブ TDP0500型、TDP1000型は新しいプローブ・インタフェースであるTekVPI®に直接接続できます。42Vの差動電圧測定が可能でありながら最高1GHzの周波数帯域をもっています。2つの電圧レンジ(4.25Vと42V)、3つの帯域制限フィルタ (1MHz、10kHzおよび100Hz)、さらに信号に含まれるDC成分を除去できるDC Reject機能があり、スイッチング電源のテスト、トラブルシューティングに最適のプローブです。これらの機能に加え、42Vまでのオフセット機能、高電圧での優れた同相成分除去比(CMRR)、さらに優れた波形再現性、S/N比を実現しています。さらにプローブ自体が小型であるため、容易にプロービングがおこなえます。ダンピング抵抗付きのソルダ・ダウン用のアクセサリや数々のプロービング用アクセサリも用意されています。

P5205型プローブの周波数帯域は100MHzで、最大1300Vの差動電圧を測定することができます。高い入力インピーダンス、減衰比の切替機能、5MHzの帯域制限フィルタなどを備えており、スイッチング電源のデバック、テストに適しています。



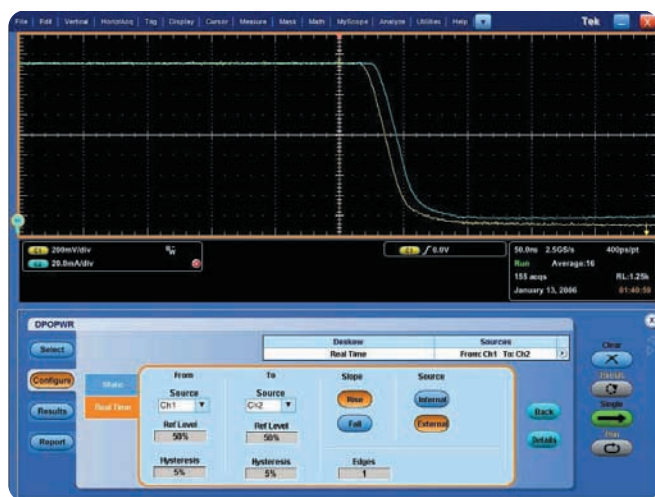
▶ 図5 : TekVPI®プローブ・インタフェースを装備したTCP0030型電流プローブ。

TCP0030型電流プローブ

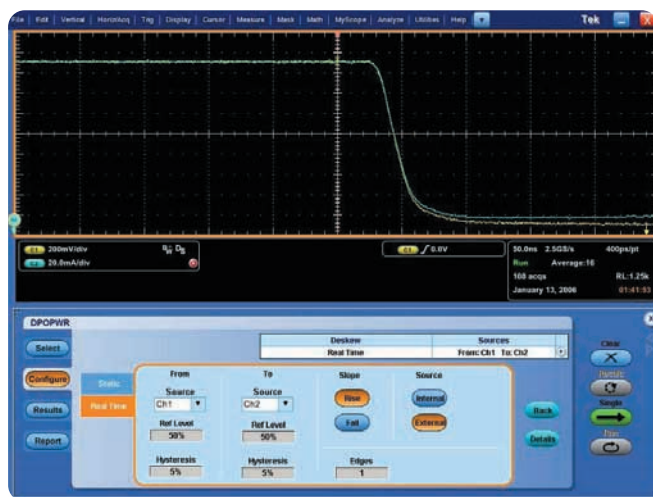
TekVPI®インタフェースの利点は、消費電力の大きな電流プローブをオシロスコープに直接接続できることです。電源はオシロスコープから供給されるため、外部電源を用意する必要はなく、作業スペースを圧迫することはありません。

TCP0030型は、TekVPI®プローブ・インタフェース対応の新型電流プローブです。DP07000シリーズ、DP04000シリーズ・オシロスコープに直接接続でき、自動単位スケール機能により、オシロスコープに電流値をリードアウト表示することができます。当社のほとんどの電流プローブと同様、スプリットコア構造と小型のプローブ・ヘッドにより、回路への接続が簡単で、他の電流プローブに比べて使いやすくなっています。さらに、プローブ・ヘッドがシールドされており、安定器の設計、開発など、ノイズの多い環境でも信頼性の高い測定が可能です。

このAC/DC電流プローブの周波数帯域は120MHzです。50Aのピーク・パルス電流から1mAまでの電流を高精度に測定することができます。高感度、低ノイズ、低DCドリフトなどを備えており、スイッチング電源やその他の電源回路における電力損失を正確に測定するのに最適な電流プローブです。



(a)



(b)

▶ 図6：測定した電圧と電流信号による伝播遅延の差 (a)。DPOWPRパワー解析ソフトウェアの自動デスクュー機能により、伝播遅延による差をキャンセルしています (b)。

IV. パワー測定

パワー測定を正確かつ簡単に行うには、長いレコード長を備えたオシロスコープ (DP07000シリーズなど)、オシロスコープに組み込まれたパワー解析ソフトウェア (DPOWPRなど)、DUTに対応したダイナミック・レンジを持つ差動プローブ (P6247型、P5205型など)、および、適切なダイナミック・レンジと感度を持つ電流プローブ (TCP0030型など) が必要です。

電気特性

ここでは、スイッチング電源の電力損失とSOAの正確な測定について考察します。

ターンオン／ターンオフ損失と電力損失

ほとんどの電源回路では、スイッチング・デバイスにかかる信号のダイナミック・レンジが非常に広く、デバイスがオンときは数十mVであるのに対して、オフのときは数百Vにも及びます。スイッチング・デバイスにかかるこのトランジション電圧は、 R_{DSon} の値など他の変数と共に、電力損失の計算に使用されます。8ビット分解能のオシロスコープで測定する場合、ダイナミック・レンジが不足し、極端な差のある2つの電圧を同時に測定できないという問題があります。プローブとオシロスコープのオーバドライブ・リカバリ性能によっても、測定精度は低下します。DPOWPRなどのオシロスコープ常駐型のソフトウェア解析パッケージでは、スイッチング・デバイスのデータ・シートに記載されている R_{DSon} 値を直接入力し、その値に基づいて電力計算を行うことができます。これにより、電力損失の解析が簡単になるだけでなく、より正確な結果を得ることができます。

電源回路のターンオン、ターンオフ、電力損失を正確に解析するには、まず電圧プローブと電流プローブの間の伝播遅延によって生ずる誤差をなくすこと、つまり「デスクュー」が必要です。従来は、電圧信号と電流信号の間のスキューを計算し、オシロスコープのデスクュー・レンジを利用してスキューを手作業で調整することが推奨されていました。しかし、当社オシロスコープとデスクュー・フィクスチャを使用すれば、このような手間は不要です。しかも、DPOWPRソフトウェアを使用すれば、2本のプローブ間の伝播遅延を計算して、自動的にオシロスコープヘスキューを設定することができます。

プローブのデスクューが済んだら、次にデバイスにかかる電圧とデバイスに流れる電流を測定し、これらの波形を取込みます。測定する電圧ノード (スイッチング・デバイスのドレインとソース) がグランド基準でない場合、 V_{DS} の電圧は差動プローブを使うことで簡単に測定できます。電流プローブを使用すると、回路を切断することなくスイッチング・デバイスに流れる電流を測定することができます。



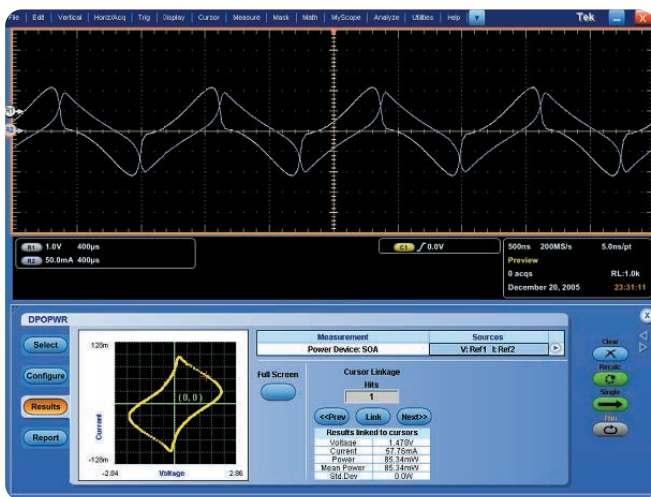
▶ 図7：スイッチング・デバイスのターンオン期間における最小、最大、平均の電力損失をDPOWPRで測定



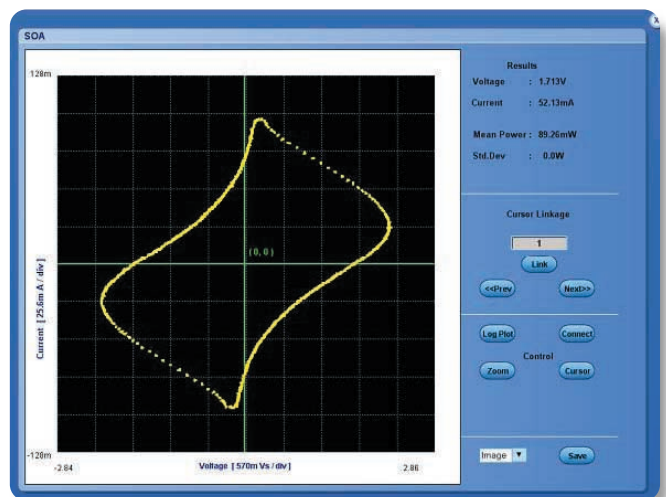
▶ 図8：負荷が変化するスイッチング・デバイスの電力波形解析例 (HiPower Finderとオシロスコープのズーム機能を使用)。

最後に、DPOWPRソフトウェアの“スイッチング損失”機能を使用します。DPOWPRは、取込んだデータを基に、スイッチング・デバイスにおける電力損失の最小値、最大値、平均値を測定します。このデータは処理されてターンオン損失、ターンオフ損失、電力損失として表示されます。DPOWPRは、繰り返し性のない電力波形も簡単に解析することができます。

負荷が常に変動するような電源で、電力損失を確実に解析するには、DPOWPRの“HiPower Finder”機能が非常に有効です。DPOWPRは、オシロスコープに保存された膨大なメモリ・データを解析、計算し、スイッチングの回数と、取込んだデータにおける最大/最小のスイッチング損失を表示します。



(a)



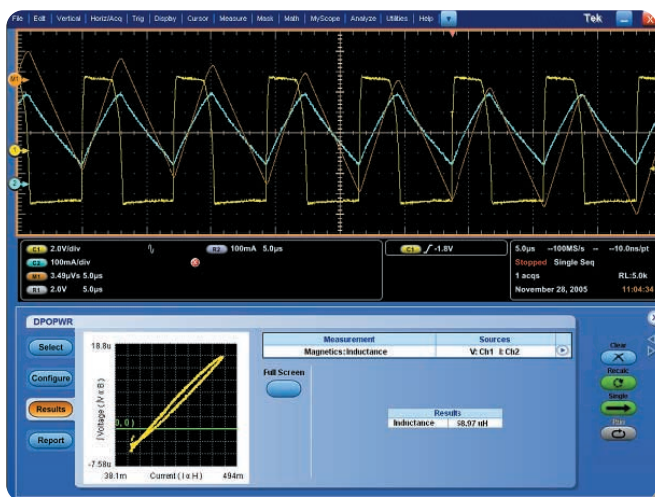
(b)

▶ 図9：DPOWPRにより、スイッチング電源で 사용되는スイッチング・デバイスのSOA測定が簡単におこなえます。(a)は測定された電流と電圧波形から計算されたSOA、(b)はSOAの全画面表示です。

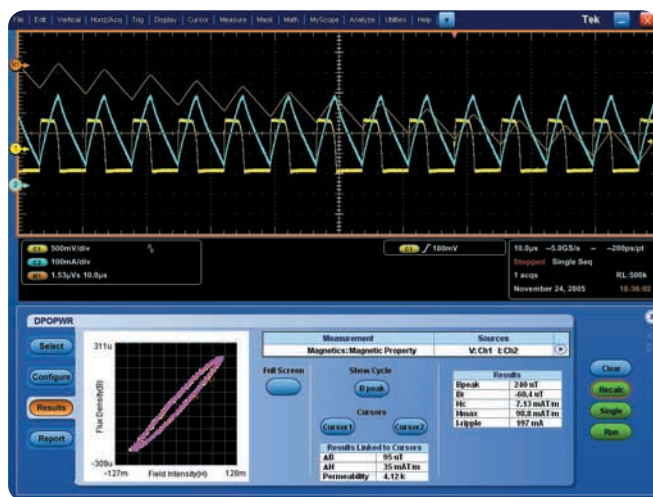
SOA (安全動作領域)

スイッチング・デバイスのSOAもまた、DPOWPR、ダイナミック・レンジの広いプローブ、高分解能のオシロスコープを組み合わせることで、簡単かつ正確に評価することができます。プロ

ーブは、 V_{DS} と I_{DS} (ドレイン・ソース間の電圧と電流) または、IGBTでは V_{CE} と I_{CE} (コレクタ・エミッタ電圧と電流) を測定するように設定します。DPOWPRを使用して、測定値からSOA曲線をプロットします。



▶ 図10：DPOPWRによるインダクタンス測定



▶ 図11：DPOPWRによるインダクタのB-H特性測定

磁気特性

電源の安定度を測定するには、スイッチング電源で動作している磁気コンポーネントの動作領域を評価する必要があります。

インダクタンス

DPOPWRを使用すると、スイッチング電源の磁気コンポーネントのインダクタンスを簡単に測定することができます。これに必要な操作は、動作している電源の磁気コンポーネントにプロービングし、デバイス間の電圧と電流を測定するだけです。後は、DPOPWRがその測定情報からインダクタンスを計算します。

磁気電力損失

磁気デバイスには、変圧器、単巻のインダクタ、あるいは複数巻のインダクタなどがあり、スイッチング電源における磁気電力損失の計算方法は磁気デバイスの種類によって異なります。単巻インダクタによる磁気電力損失を測定するには、インダクタ両端の電圧とインダクタに流れる電流を測定する必要があります。DPOPWRはこの測定結果を基に、電力損失値を自動的に計算します。変圧器の場合は、電圧プローブと電流プローブを使って一次巻線と二次巻線を測定することで電力を測定します。損失は次の式で計算されます。

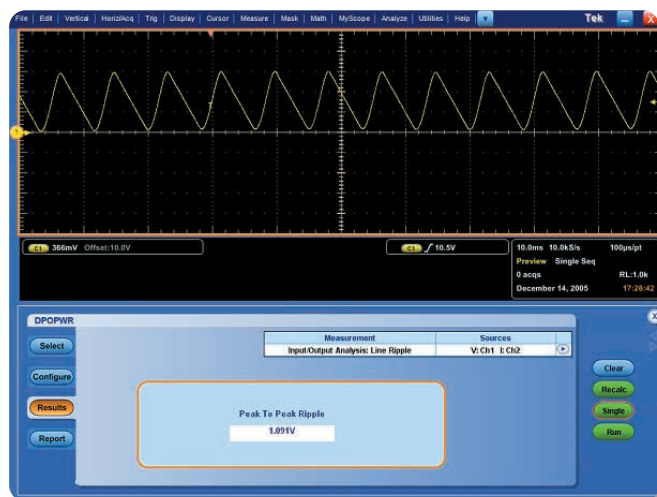
$$\text{全電力損失} = \text{電力損失}_{PR} - (\text{電力損失}_{S1} + \text{電力損失}_{S2} + \dots + c) \quad (1)$$

ここで、PRは一次巻線、S1、S2、…は二次巻線です。

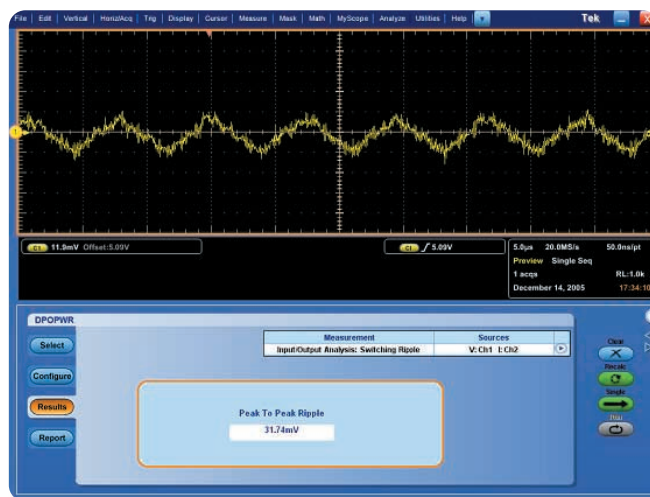
デバイス内のインダクタでアクティブ力率制御を行っている場合は、繰り返しのない波形またはバースト状の波形で磁気電力損失を評価しなければなりません。このような場合でも、DPOPWRは区間指定された時間ウィンドウでゲート測定することができます。

磁気特性とB-H特性

スイッチング電源のインダクタまたは変圧器の磁気特性も、DPOPWRとオシロスコブの組合せで簡単に測定、解析することができます。必要な操作は、デバイスにかかる電圧とデバイスを流れる電流を測定するだけで、後はDPOPWRが解析します。変圧器の場合は、一次巻線、二次巻線を流れる電流を測定すれば、DPOPWRが純粋な磁化電流を計算します。次に、インダクタの巻数 (N)、磁路長 (l)、コアの断面積 (A_e) を入力します。DPOPWRは、これらの情報と電圧、電流の測定値に基づいて、磁気デバイスのB-H曲線を作成します。このB-H曲線から、B_{peak}、H_{max}、透磁率が求められます。保磁力 (H_c)、残留磁束密度 (B_r) などの磁気特性も測定、表示されます。



(a)



(b)

▶ 図12: DPOWPRで測定したライン・リップル (a) とスイッチング・リップル (b)。

入出力解析

入出力解析により、電源性能の品質がわかります。

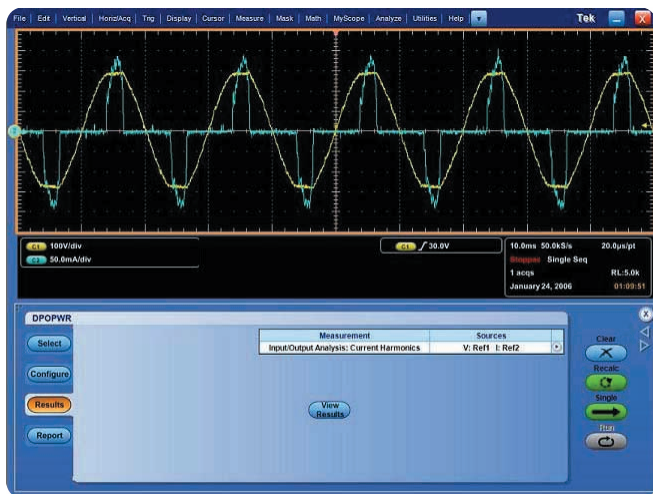
リップルとノイズ

リップルとノイズは、スイッチング電源の出力品質を解析する上で重要な測定項目です。これらは、DPO7000シリーズのサンプル、エンベロープ、アベレージ、ハイレゾ、ピーク・ディテクトなど、さまざまなアキュイジション・モードを使用することで、簡単に測定できます。

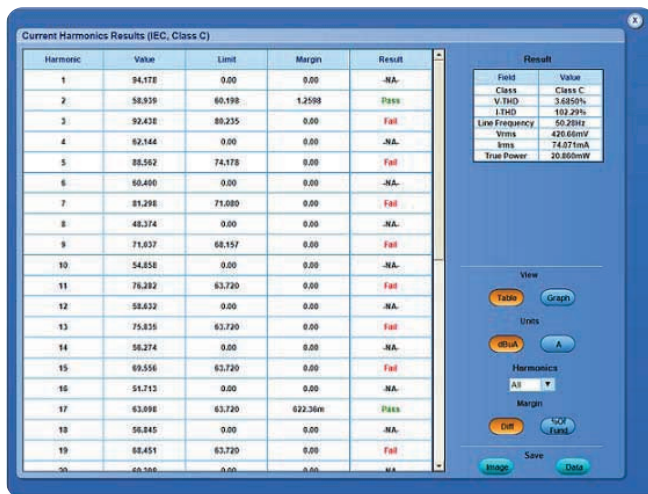
リップルの評価では、スイッチング・リップルからライン・リップルを正確に分離するのが非常に困難です。リニア電源の出力リップルは、通常、商用電源周波数の2倍の約120Hzあたりですが、スイッチング・リップルはkHzレンジで、ノイズを多く含んでいます。電圧プローブと電流プローブを校正し、デスクューしたら、オシロスコープのサンプル・レートをシステムのスイッチング周波数以下、商用周波数以上に設定します。次に、アキュイジション・モードを「ハイレゾ」に変更します。これにより、スイッチング・リップルを効果的に減衰させながら、低い周波数のACライン・リップルのみをオシロスコープに表示させるこ

とができます。ハイレゾ・モードは波形を高速にアベレージングするので、非常に有効な方法です。波形は所定の時間間隔で平均化され、取込んだ波形の分解能が向上します。アベレージングには、波形にローパス・フィルタをかけるのと同様の効果があります。フィルタのカットオフ周波数は、水平軸のサンプル・レートによって異なります。ピーク・ディテクト・モードはハイレゾ・モードと異なり、波形から大きく離れたデータ・ポイントが記録されます。ノイズやスイッチング・リップルは、このモードで取込み、解析することができます。

オシロスコープと電圧プローブの両方で、ハードウェアによる帯域制限フィルタが選択できるため、解析がより簡単になりました。DPO7000シリーズには、250MHzと20MHzのハードウェアによる帯域制限機能があり、またユーザが独自のフィルタを定義することもできます。オシロスコープ、プローブのどちらから帯域制限フィルタを選択しても、測定システム全体の帯域が制限できるということにご注目ください。DPOWPRの信号コンディショニング機能は、ノイズ測定におけるプローブ固有ノイズの影響を最小限にするのに役立ちます。



(a)



(b)

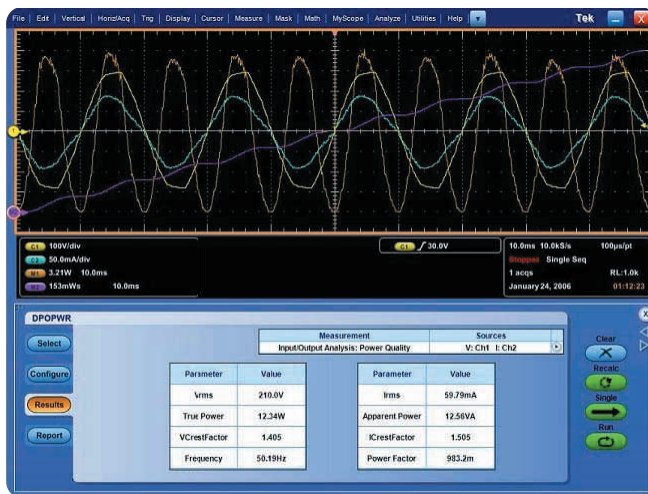
▶ 図13: 測定された電圧と電流の波形(a)。DPOWPRは、IEC規格に準拠した電流高調波をテストすることができます(b)。

電源回路の高調波

FFT (Fast Fourier Transform、高速フーリエ変換) は、DPO7000シリーズに標準で装備されている波形解析ツールです。FFTは、商用電源の高調波解析に優れたツールであり、スペクトラム・アナライザのように信号の周波数成分を表示することができます。FFTメニューは、MATHボタンで表示されるメニューの中にあり、アクティブな波形または保存されている波形でも実行できます。

スイッチング電源の場合、測定する信号の多くは繰り返し波形です。波形は、電流プローブまたは電圧プローブを使用してオシロスコープに入力して、トリガし、表示します。信号の振幅すべてが画面の垂直方向に収まるように、垂直軸スケールを調整します。十分な周波数分解能を得るためには、最低でも5サイクルの信号が表示されている必要があります。次に、ウィンドウの形式を選択します。繰り返し性の信号では、ハミング・ウィンドウが適しています。垂直軸のスケールは、対数スケールでなく、リニア・スケールが適しています。画面に表示されている波形は、ズーム機能を使ってさらに詳細に解析することができます。DPOWPRはまた、EN61000-3-2規格AM14 (50Hzと60Hz) およびMIL規格1399 (400Hzの周波数システム) との適合性を評価する電流高調波のテストにも使用できます。

電圧と電流の高調波を正確に測定できる方法がもう一つあります。それは、DPOWPRの“Harmonics”モードを使用することです。適切なプローブで電圧と電流を測定すると、DPOWPRでは基本波および、2〜50次までの高調波を取込むことができます。



▶ 図14: DPOWPRで簡単に実行できる電力品質解析

電源品質解析

DPOWPRは、スイッチング電源の出力全体の電源品質解析にも使用することができます。DPOWPRにより、オシロスコープは電源品質解析用に設定され、初期測定パラメータが設定されます。パラメータは手動で設定することもできます。電源の出力に電流プローブと電圧プローブを接続すると、DPOWPRは測定した電圧と電流に基づいて、真の電力、皮相電力、力率、クレスト・ファクタ、THDを正確に計算します。

V. 測定のためのヒント

このセクションでは、電源システムを正確に測定する上で役立つヒントを紹介します。

測定システムに必要な周波数帯域について

測定システムに必要な仕様を理解することは、正確な測定のための第一歩です。プローブ先端の周波数帯域と立ち上がり時間は、DUTの信号周波数または立ち上がり時間の性能を上回っていることが重要です。

オシロスコープの周波数帯域 (BW) は、ほとんどのアプリケーションにおいて、測定する信号の3~5倍の周波数帯域が必要です。また、プローブの帯域は、使用するオシロスコープの帯域と等しいか、それ以上でなければなりません。下回っていると、オシロスコープの測定能力が制限されることになります。オシロスコープに対して適切なプローブを選択することにより、オシロスコープの帯域は事実上、プローブ先端と同等の帯域まで上がるようになります。

経験則で得られた次の式により、オシロスコープの帯域から立ち上がり時間を求めることができます。

$$T_r = 0.35 / BW \quad (2)$$

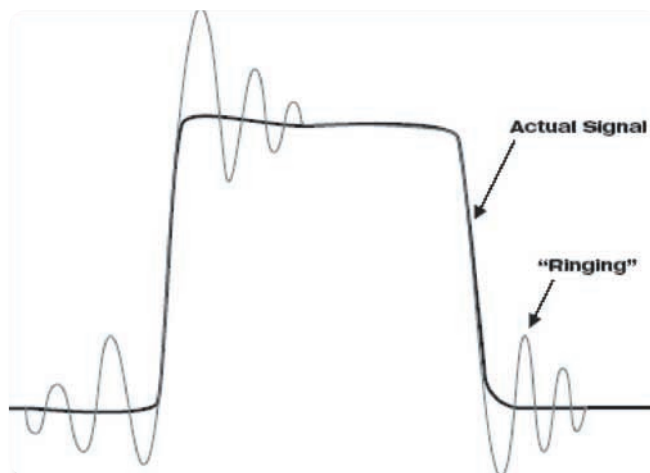
周波数帯域と同様に、オシロスコープの立ち上がり時間は、最も高速な測定信号の3~5倍高速でなければなりません。アクティブ・プローブ+オシロスコープ・システムのおおよその立ち上がり時間は、次の式を利用して求められます。

$$T_{r\text{SYSTEM}}^2 = T_{r\text{PROBE}}^2 + T_{r\text{SCOPE}}^2 \quad (3)$$

正弦波でない信号の測定では、高調波を考慮する必要があります。高調波の周波数成分は信号の基本波を大きく上回るため、測定システムの帯域要件は、測定する最も高次の高調波を基準に考える必要があります。たとえば10MHzの矩形波の5次高調波は50MHzであり、高調波を正確に測定するには、測定システムの周波数帯域は約250MHzが必要です。

差動／フローティング測定について

スイッチング電源のテストやトラブルシューティングでは、グランド電位にない2点間の信号を測定しなければならないこともよくあります。このような測定は、フローティング測定または差動測定と呼ばれます。フローティング測定は、スイッチング電源、モータ回路、安定器など、コモン・ノードが数百Vの電位で、どのポイントもグランド基準でないような回路の測定に使用されます。多くの場合、このような高コモン電位の信号は、それに重畳する低レベルの信号を観測、検証するために除去しなければなりません。



▶ 図15：オシロスコープをフローティングした（浮かせた）測定では、寄生インダクタンス/容量によるリングングによって波形が変形します。

フローティング測定で一般に使用されている方法に、オシロスコープをフローティングする（浮かせる）方法があります。これは、絶縁変圧器を使うか、安全グランド・システムを無効にするかして、「コモン信号」を大地グランドから切り離すというものです。これにより、オシロスコープのシャーシは、DUTに接続したプローブのグランド・リード接続ポイントと同じ電位になります。しかし、多くの理由から、この方法はお勧めできません。まず、こうすることでオシロスコープに高い電位が加わり、作業者に感電の危険が及びます。次に、オシロスコープの電源トランスの絶縁にストレスが加わるため、通常の状態に戻した後も、感電や発火などの危険性が残ります。最後に、このような方法による測定では、リングングやノイズによって正確な測定ができないことがよくあります。これは、商用電源に接続されている計測器がグランドから浮いている場合、大きな寄生容量を持つためであり、オシロスコープ・シャーシのトータル容量が、プローブのグランド・リードがDUTに接続されるノードに直接接続されることになるためです。

安全に、より正確に、そして再現性のあるフローティング測定のためには、差動プローブまたは絶縁プローブの使用をお勧めします。これらのプローブはオシロスコープのシャーシ・グランドから絶縁されており、いずれの入力も測定のためにグランドを必要としません。

フローティング測定のためのもう一つのツールが、絶縁チャンネルを装備したオシロスコープです。たとえば、当社のTPS2000シリーズ・オシロスコープは、IsolatedChannel™技術により、真の、完全なチャンネル間絶縁を実現しています。バッテリーでもACアダプタでも使用でき、オシロスコープの入力は常にフローティングされています。

差動／フローティング測定

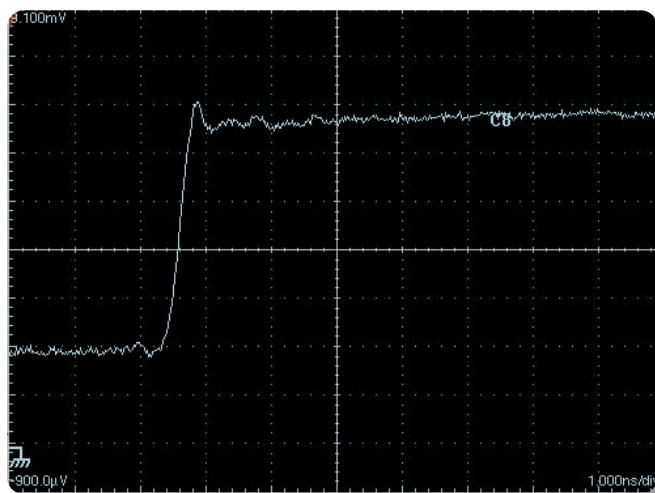
スイッチング電源で最も一般的な測定項目は、MOSFETの V_{DSon} 電圧です。どのスイッチング電源のテストや検証でも測定される項目でありながら、実際にこの電圧を測定するのはそれほど簡単ではありません。これは、どちらのノードもグランドにならないためであり、フローティング測定または差動測定を行う必要があります。

従来、差動測定には2つの方法があり、いずれかの方法が使われてきました。その1つが、2本のシングルエンド（通常は受動）プローブを使用して測定を行うという方法で、より一般的に使用されていました。この方法では、2つのグランド基準の測定値をオシロスコープの演算機能により引き算することで、差動信号を得ます。もう一つの方法は、差動プローブを測定に使用するというものです。2つのノードをプローブの入力に接続し、その差動電圧をオシロスコープのディスプレイに表示させます。

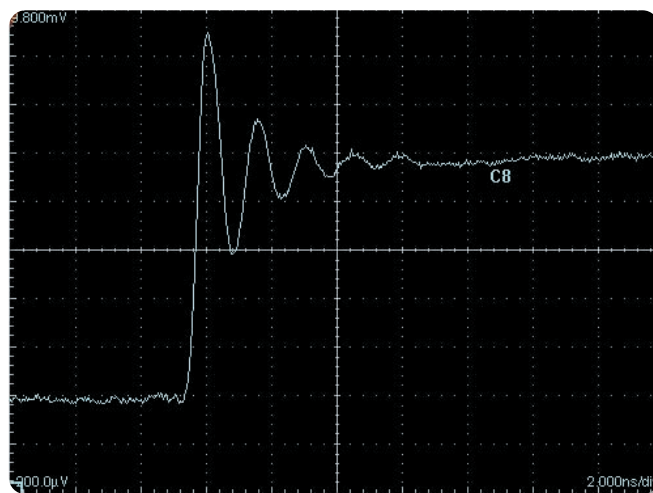
2本のシングルエンド・プローブを使用する差動測定には、問題点がいくつかあります。まず、最初に挙げられるのが、スキューの問題、言い換えると振幅とタイミングのエラーの問題です。2本のプローブを使用するという事は、プローブとオシロスコープの間に、長く、独立した信号経路が2つできるということであり、2本のプローブの（伝播）遅延差によって生ずる時間のずれが問題になります。高速信号では、測定される差動信号のタイミング誤差だけでなく、振幅誤差の原因にもなりかねません。このような誤差を最小にするには、特性の合ったプローブを使用するか、測定前にデスクューを実行する必要があります。

この方法には、もう一つ、コモンモードを適切に除去できないという問題があります。2本のシングルエンド・プローブで差動測定する場合、オシロスコープのチャンネルの差によってCMRR（コモンモード除去比）は大きく影響を受け、周波数が高くなるにつれて悪化し、結果として、ノイズの多い差動測定になってしまいます。ただし、測定する信号の周波数が十分に低く、振幅が十分に大きい場合に限っては、ノイズがあまり問題にならないため、この方法でもある程度誤差を抑えた測定が可能です。

差動プローブを使用する方法では、単に測定のためのセットアップが簡単というだけでなく、差動信号を正確に測定することができます。真の差動測定が可能になるため、グランド接続に関わる問題からも解放されます。差動プローブのプローブ・ヘッドにある差動増幅器によって差動電圧は決まり、測定された信号はオシロスコープの1つのチャンネルで表示されます。差動プローブは、広範囲な周波数レンジで高いCMRRを実現するように設計されており、先に説明した方法で問題となるノイズを抑えることができます。また、差動プローブのプローブ・ヘッドは小型で、DUTに接続するためのアクセサリも豊富に用意されているため、差動測定における接続が簡単になります。



(a)



(b)

▶ 図16：アクセサリにより、プローブの性能は影響を受けます。差動プローブでストレート・ピンを使用した場合 (a) と、Yリード・スクエア・ピン・アダプタを使用した場合 (b) では、測定結果に大きな違いがあります。

信号忠実度に影響するDUTとの接続方法

ピッチの狭いASICに確実にプロービングするには、ASICのピンに導線を半田付けするのが一般的です。この方法は測定のセットアップが簡単ですが、信号の速度によっては測定システムの性能を低下させることがあります。

そのため、半田付けに頼らなくてもDUTに接続できるよう、プローブにはさまざまなアクセサリが付属しています。しかし、アクセサリがプローブの性能にまったく影響しないというわけでもありません。たとえ短いグランド・リードであっても、アクティブ・プローブのグランド・ソケットに接続するとプローブの性能は変化します。グランド・リードは、グランド・リードのリターン・パスに約8nH/cmのインダクタンスを形成します。この寄生インダクタンスとプローブの入力容量により共振回路ができ、無視できないリングングが発生します。特に、高速で、インピーダンスの低いソースで動作する場合に顕著になります。他に、ソルダダウン・アクセサリ、ポゴ・ピン、ストレート・ピン、可変スペーシング・アダプタなどのアクセサリもありますが、いずれもプローブの立上り時間、周波数帯域、アベレーションに影響を及ぼします。アクセサリによる寄生インダクタンス/容量が小さいものであっても、高速信号に接続した場合、測定される信号の共振やオーバーシュートに大きな影響を及ぼすことがあります。

どのアクセサリを使用するとどのような影響が出るかをしっかり把握しておき、アクセサリの使用によって信号忠実性が損なわれることのないよう注意する必要があります。アプリケーションや被測定信号の特性によっても異なりますが、特に注意が必要なのが、立上り時間の測定です。また、プローブのグランド・リードと信号リードは、できる限り短くすることをお勧めします。これは、基板のASICに半田付けする導線もできる限り短くするというを意味します。

VI. まとめ

スイッチング電源は、通信システム、コンピュータ、最新の複雑な電気システムで必要とされる主流の電源になりました。その結果、スイッチング電源の性能品質や効率がより重要性を増しています。

このような電源で適切な性能、信頼性、安定性、安全性を確保するためには、通常の条件だけでなく、限界に近い動作条件における性能と動作のすべての局面を測定、テスト、解析する必要があります。しかし、電力メータや高調波アナライザなどの専用ツールでなければスイッチング電源の性能と損失を解析できないわけではありません。信号取込みに優れた性能を持っているオシロスコープ、強力な解析ソフトウェア、優れた信号忠実度を持った電圧プローブ、電流プローブを組み合わせることで、電源の性能と損失を効果的に解析できる測定システムを構築することができます。この測定システムでは、複雑な電力システム解析の作業が簡素化されるだけでなく、ダイナミックに変化する環境でもすばやく、再現性のある、正確な結果が得られます。

参考文献

テクトロニクス、入門書

「パワー測定および解析入門」

www.tektronix.co.jp/power

テクトロニクス、アプリケーション・ノート

「TDS3000Bシリーズによる電源品質測定」

www.tektronix.co.jp/power

テクトロニクス、アプリケーション・ノート

「TekVPI®プローブ・インタフェースによる新しいプローブ・アーキテクチャ」

www.tektronix.co.jp

テクトロニクス、アプリケーション・ノート

「デジタル・フォスファ・オシロスコープによる最新の電力損失解析について」

www.tektronix.co.jp/oscilloscopes

Erickson, R; Sathe, A.; Maksimovic, D., Using Real-time oscilloscopes to make power electronics measurements University of Colorado at Boulder.

www.tektronix.com/oscilloscopes

テクトロニクス、アプリケーション・ノート

「フローティング測定を容易に、正確に」

www.tektronix.co.jp/oscilloscopes

テクトロニクス、入門書

「プローブ測定技術と活用」

www.tektronix.co.jp/accessories

Power Designers Interactive Power Electronics Online Course

www.powerdesigners.com/InfoWeb/resources/pe_html/pe07_nc8.htm

Purdie, I. C. Electronic Tutorials

www.electronics-tutorials.com/basics/switched-mode-power-supplies.htm

ATIS ATIS Telecom Glossary 2000

www.atis.org/tg2k/

Answers.com Safe Operating Area

www.answers.com/topic/safe-operating-area

Pacific Gas and Electric Company Power System Harmonics

www.pge.com/docs/pdfs/biz/power_quality/power_quality_notes/harmonics.pdf

Oak Ridge National Laboratory Measurement Practices for Reliability and Power Quality

www.ornl.gov/sci/btc/apps/Restructuring/ORNLTM200491FINAL.pdf

Klampfer, W. L. Noise Suppression of Switch Mode Power Supplies

www.evaluationengineering.com/archive/articles/0805/0805noise_suppression.asp

詳細について

当社は、最先端テクノロジーに携わるエンジニアのために、資料を用意しています。当社ホームページ(www.tektronix.co.jp)またはwww.tektronix.comをご参照ください。

TEKTRONIXおよびTEKは、Tektronix, Inc.の登録商標です。記載された商品名はすべて各社の商標あるいは登録商標です。

05/07 MH/WOW 51Z-20043-2

Tektronix
Enabling Innovation