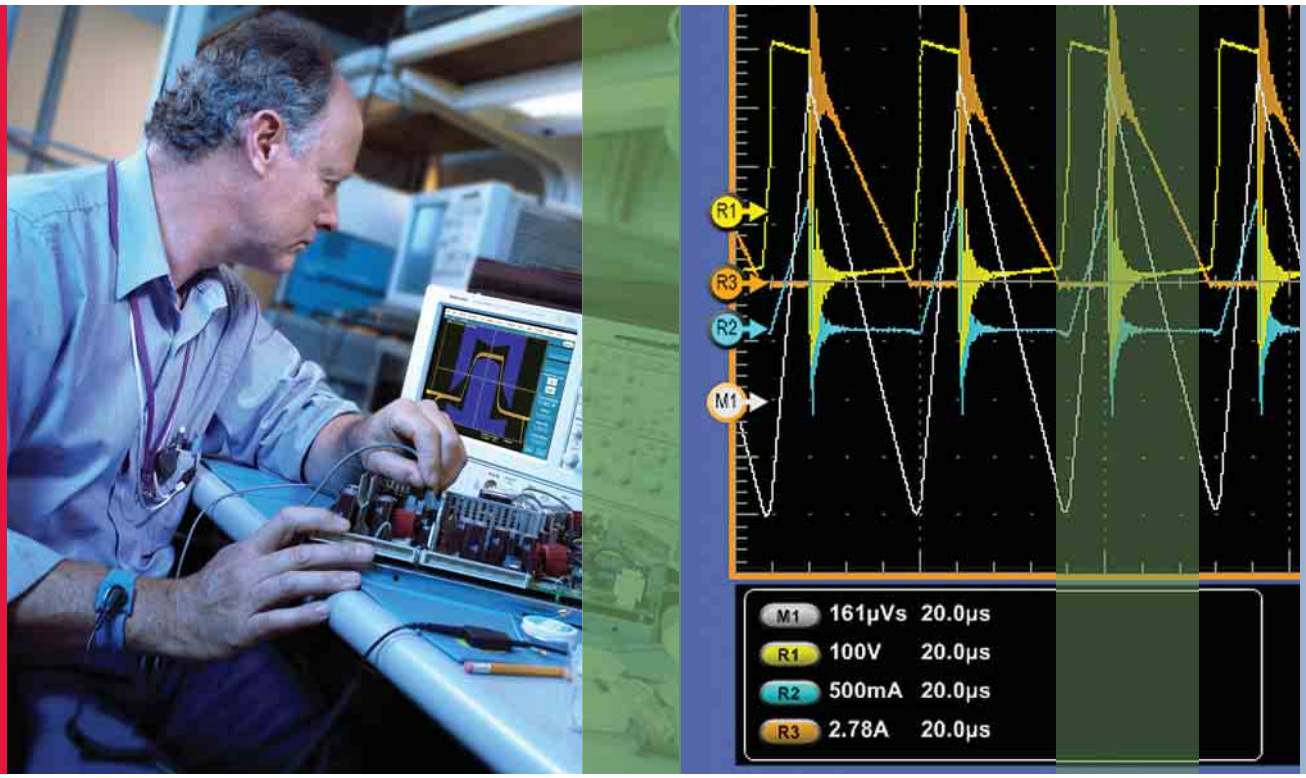
Tektronix



パワー測定と解析

入門書

目　次

はじめに 3

電源設計の測定に関する疑問 3

スイッチング電源の基礎 . . . . . .3 - 4

アクティブ・コンポーネント測定：
スイッチング・デバイス . . . . . .4 - 11

スイッチング・デバイスにおける電力損失の理論 4
ターン・オフ損失 4
ターン・オン損失 5
電力損失 5
SOA（安全動作領域） 6
ダイナミック・オン抵抗 6
アクティブ・コンポーネントの測定 6
最適な測定ソリューションの選択 7
オシロスコープの性能に関する考察 7
立上り時間 7
サンプル・レート 7
レコード長 7
パワー測定／解析ソフトウェア 7
電圧プローブと電流プローブ間のスキュー調整 9
プローブのオフセットとノイズの除去 11
オフセットの自動除去 11
オフセットの手動除去 11

受動コンポーネント測定：
磁気コンポーネント . . . . . .12 - 17

インダクタンスの基礎 12
オシロスコープを使用したインダクタンス測定 12
磁気電力損失の基礎 13
鉄損 13
銅損 13
オシロスコープを使用した磁気電力損失測定 14
磁気特性の基礎 14
B-H曲線 15
磁気特性の測定 16
オシロスコープを使用した磁気特性の測定 17

電力ライン測定 . . . . . .18 - 19

電力品質測定の基礎 18
オシロスコープを使用した電力品質測定 19

まとめ 20

製品比較一覧 21

はじめに

電源とは、電力をある形態から別の形態に変換する、コンポーネント、サブシステムまたはシステムを意味し、一般には交流（AC）出力から直流（DC）出力へ変換します。パーソナル・コンピュータから工業機械まで、電気デバイスが正しく動作するためには、電源の性能と信頼性が重要になります。

従来のアナログ・タイプの電源から、高効率スイッチング電源まで、数多くの種類やサイズがあります。すべての電源は、複雑でダイナミックな動作環境で使用されます。デバイスの負荷や電流は、常に変化しています。ごく一般的なスイッチング電源でさえ、平均動作レベルをはるかに超えるような、突然のピーク負荷に対しても対応することが求められています。電源そのもの、また電源を使用するシステムを設計する際は、定常状態から最悪条件での電源の動作を理解しておく必要があります。

従来、電源の動作特性は、デジタル・マルチメータを使用して、静的な電流と電圧を測定し、計算機やPCで計算することで評価してきました。現在では、多くのエンジニアが、パワー測定をオシロスコープで行うようになりました。

今日のオシロスコープには、パワー測定／解析ソフトウェアがインストールされ、セットアップも簡単であり、長時間にわたって測定することができます。重要なパラメータをユーザ定義し、計算を自動化して結果を数秒で表示できます。

この入門書では、オシロスコープとアプリケーション・ソフトウェアを使用したスイッチング電源の測定について説明します。

電源設計の測定に関する疑問

電源は、それを設計したときの数式モデルのとおりに動作することが理想です。しかし、現実にはコンポーネントは完全ではなく、負荷も変化し、ライン電源波形も歪むことがあるなど、電源をとりまく環境の変化によって、その性能は影響を受けます。さらに、性能やコストの要求が、電源設計をより複雑にしています。次の疑問について考えてみましょう。

- 電源は、何ワットを越える定格出力容量に対して耐える必要があるのでしょうか。また、どのくらいの時間耐えるように設計すべきなのでしょうか。
- どの程度の熱が放出されるのでしょうか。また、過熱した場合どうなるのでしょうか。冷却用のエアフローはどの程度必要なのでしょうか。
- 負荷電流が急激に増加するとどうなるのでしょうか。デバイスは、定格の出力電圧（負荷レギュレーション）を維持できるのでしょうか。出力が短絡した場合の電源はどうなるのでしょうか。
- 電源の入力電圧（ライン・レギュレーション）が変化するとどうなるのでしょうか。

設計エンジニアは、占有面積のより小さな電源を求められています。さらに、効率が良く、放熱が少なく、製造コストが安く、より厳しいEMI/EMC規格にも適合できるよう要求されています。この目標を達成するためには、厳密な測定システムが必要になります。

スイッチング電源の基礎

最新のシステムで最も普及しているDC電源はスイッチング電源であり、負荷変動に対して効率良く対応することができます。一般的なスイッチング電源の電力信号経路には、受動コンポーネント、アクティブ・コンポーネント、磁気コンポーネントが使用されます。スイッチング電源では、抵抗、リニアモード・トランジスタなどの電力損失があるコンポーネントの使用を極力抑え、（理想的には）電力損失のないコンポーネントを重視します。これらのコンポーネントには、スイッチング用のトランジスタ、コンデンサ、磁気コンポーネントなどがあります。

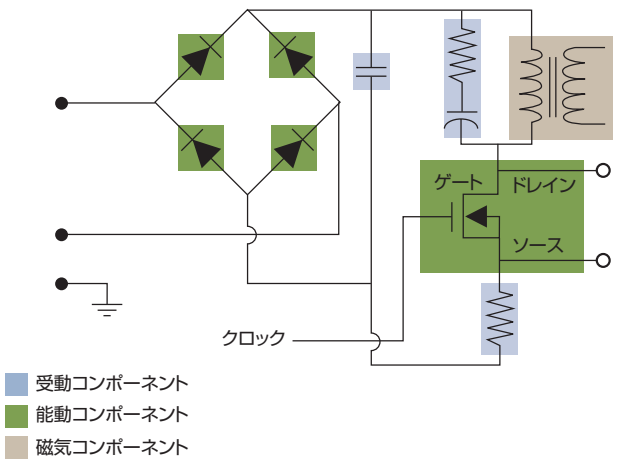


図1. スイッチング電源の概略図

スイッチング電源のデバイスには、パルス幅変調、パルスレート変調、フィードバック・ループ*1などの制御を行う部品も含まれます。制御セクション自身も、電源を持つものがあります。図1は、アクティブ・コンポーネント、受動コンポーネント、磁気コンポーネントを使用した、スイッチング電源の簡略図です。

スイッチング電源の技術は、MOS電界効果トランジスタ（MOSFET：Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors）や絶縁ゲート型バイポーラ・トランジスタ（IGBT：Insulated Gate Bipolar Transistors）などの、電源用半導体であるスイッチング・デバイスの性能に多くを依存しています。これらのデバイスは高速なスイッチング時間を持ち、不規則なスパイク状電圧にも耐えることができます。さらに重要なことは、オンとオフのいずれの状態でも、電力ロスが非常に小さいので発熱が少なく、高効率を実現しています。ほとんどの部分において、スイッチング・デバイスがスイッチング電源の全体的な性能を決定します。スイッチング・デバイスの主な測定項目には、スイッチング損失、平均電力損失、安全動作領域（SOA）などがあります。

＊1　この入門書では、出力に関係する回路素子のテストを含む、電源回路に関係する測定について説明します。制御部の測定については、従来の波形、ロジック測定となるため、本書では説明しません。

アクティブ・コンポーネント測定：スイッチング・デバイス

スイッチング・デバイスにおける電力損失の理論

トランジスタ・スイッチング回路では、スイッチング時の寄生インダクタンスおよび浮遊容量のエネルギ放電により、遷移中にエネルギを失います。「ターン・オフ損失」は、スイッチング・デバイスがオンからオフに遷移するときのエネルギ損失を意味します。「ターン・オン損失」は、スイッチング・デバイスがオフからオンに遷移するときのエネルギ損失を意味します。

ターン・オフ損失

図2は、ターン・オフ損失の計算を示しています。t_1後、スイッチ電流が減少し、ダイオード電流が増加します。時間（t_2-t_1）は、ドライバがMOSFETのゲート・ドレイン容量C_{gd}をチャージする速度によって異なります。遷移中のエネルギ損失は、次の数式で表されます。

$$E_{off} = \frac{1}{2} \cdot V_g \cdot i_L \cdot \left[t_2 - t_0 \right]$$

ここで、

- E_{off} は、遷移中の平均エネルギ損失
- V_g は、ゲートにおける電圧
- i_L はインダクタを流れる電流
- t_2 はトランジションが完了する時間
- t_0 はトランジションが開始する時間

この式は、C_{ds}（ドレイン・ソース間容量）とC_{gd}にかかる電圧が線形に増加することを前提としています。C_{ds}とC_{gd}は、浮遊容量です。

実際のデバイスでは、容量C_{gd}とC_{ds}はかなり非線形になり、ドレインーソース電圧によって変わる傾向があります。このため、前述の理論的な計算がある程度不正確になります。IGBTの場合は、「テール電流」現象のため、電流の立上り時間がより長くなります。この違いにより、電圧変動の特長を実際に取込むことが必要となります。専用のパワー測定ソフトウェアを備えたオシロスコープは、これらの測定を大幅に簡略化できます。

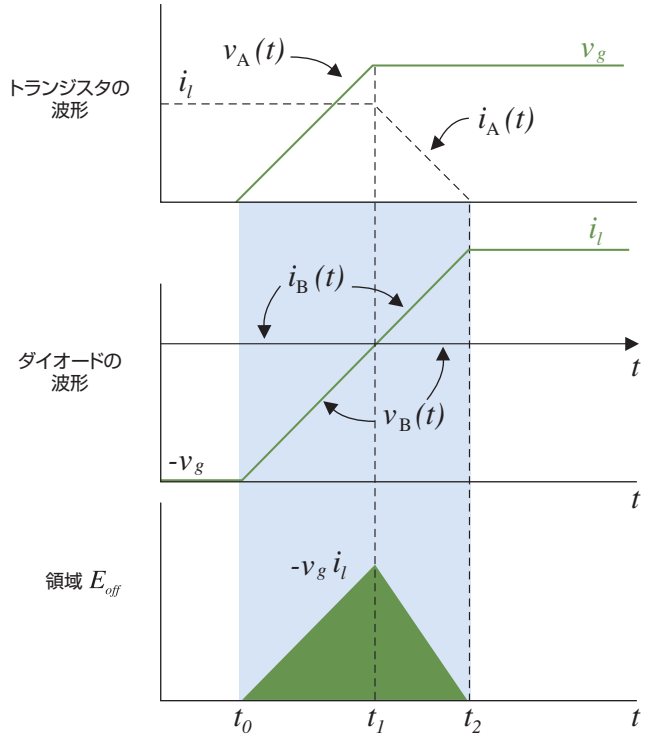


図2. ターン・オフ損失の計算

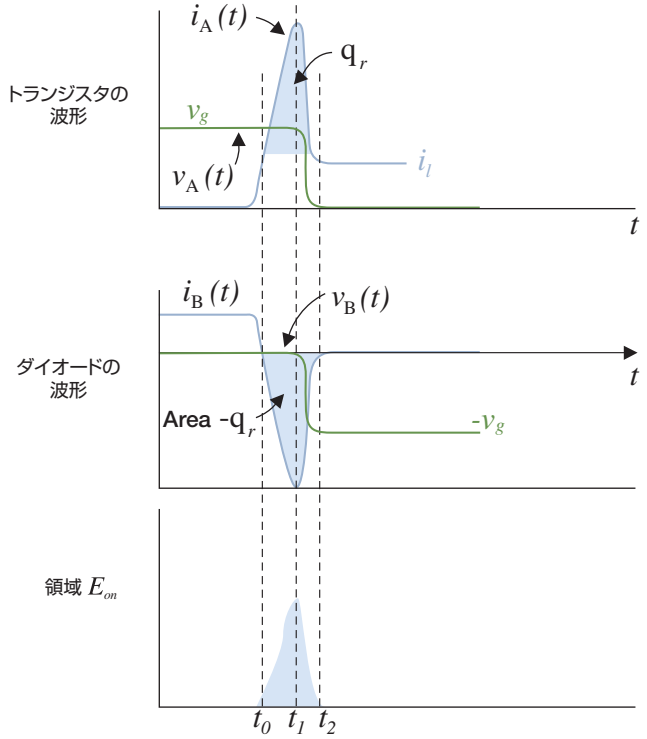


図3. クランプされた誘導負荷を持つMOSFETにおけるターン・オン損失*2

ターン・オン損失

図3は、クランプされた誘導負荷とダイオードのリカバリ電荷を持つMOSFETのターン・オン損失を示しています。クランプされた誘導負荷を持ったMOSFETがオンになる場合、蓄積された電荷が回復するまでダイオード電圧は生成されません。つまり、ダイオードは電圧をブロックできるまで負の方向に電流を伝導し続けます。これにより、スイッチングで大きな損失が生じます。逆リカバリ電流は、外部回路のダイオード・パスによって異なります。ダイオードの電荷は、順方向の電流とダイオードのオフ遷移中における降下電流のdi/dtによって異なります。遷移中のエネルギ損失は、次の数式で表されます。

$$E_{on} = \int_{t_0}^{t_1} v_a(t) \cdot i_a(t) \cdot dt$$

*2 コロラド大学、Robert A. Erickson氏の「Fundamental of Power Electronics」（パワー・エレクトロニクスの基礎）から抜粋。

ここで、

- E_{on} は、遷移中のエネルギ損失
- $v_a(t)$ は、瞬時ゲート電圧
- $i_a(t)$ は、スイッチを流れる瞬時電流
- t_1 はトランジションが完了する時間
- t_0 はトランジションが開始する時間

電力損失

総損失は、スイッチングの平均電力損失となります。これは、スイッチング損失と伝導損失を含みます。総損失は次の式で定義されます。

$$P_{Loss} = \frac{1}{T_S} \cdot \int_0^{Ts} V_{switch}(t) \cdot I_{switch}(t) \cdot dt$$

ここで、

- P_{Loss} は、平均電力損失
- $V_{switch}(t)$ は、スイッチの瞬時電圧
- $I_{switch}(t)$ は、スイッチを流れる瞬時電流
- T_S は、スイッチング期間

SOA（安全動作領域）

スイッチング・デバイスの安全動作領域（SOA）測定は、電圧と電流の関係をX-Yプロットし、デバイスの動作領域特性を評価します。これにより、電源のさまざまな動作条件においてスイッチング・デバイスが安全動作領域内で動作していることを確認できます。

スイッチング・デバイス製造メーカのデータ・シートからは、スイッチング・デバイスにおける一定の制限を読み取ることができます。安全動作領域を測定することで、実際の使用環境下でスイッチング・デバイスが耐えられることを保証することができます。SOAテスト・パラメータには、さまざまな負荷、動作温度の変動、ライン入力電圧の高低などが含まれます。図4に、SOAプロットの例を示します。

通常、SOAテストは次の式を使用して電力を計算します。

$$P_n = V_n I_n$$

ここで、

- P_n は、瞬時電力値
- V_n は、電圧
- I_n は、電流
- n は、特定のポイントでのサンプル数

次の式で、平均電力を計算します。

$$P_{Avg} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{n=N} V_n I_n$$

ここで、

- N は、スイッチング周期におけるサンプルの数

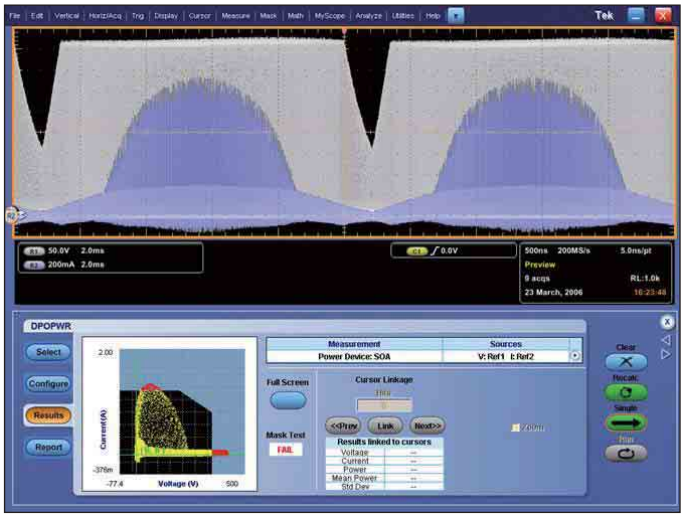


図4. DPOPWRでプロットしたスイッチング電源のSOAの例。スイッチング・デバイス製造メーカ発行のデータと比較できる

ダイナミック・オン抵抗

ダイナミック・オン抵抗はスイッチング・デバイスのオン状態の抵抗であり、スイッチング・デバイスの製造元が発表するデータ・シートをもとに、RDS_{on}値を決定することがあります。しかし、実際の抵抗（およびスイッチング伝導損失）は一定ではなく、スイッチング電圧またはスイッチング電流の変化に応じて大幅に変化することがあります。

di/dtとdv/dt

di/dtはスイッチング中での電流の変化率を表し、dv/dtはスイッチング中での電圧の変化率を表します。

アクティブ・コンポーネントの測定

オシロスコープを使用して高い周波数を測定している方にとっては、パワー測定などの比較的低い周波数の測定は簡単に思えるものです。しかし、パワー測定には、高速回路の設計エンジニアが経験したことのないような問題が数多くあります。スイッチング・デバイスの電圧は非常に大きく、また「フローティング」、つまりグランド基準になっていないのです。パルス幅、信号の周期、周波数、デューティ・サイクルも変化します。このため、忠実に波形を取込んで障害を解析する必要があります。

最適な測定ソリューションの選択

スイッチング電源を測定する場合、最適なツールを選択することが重要になります。テストでスイッチング電源をオン／オフするためには、パルスを発生する信号源が必要になる場合もあります。通常の動作条件におけるゲートのドライブ信号を正確に出力するためには、デューティ・サイクル、エッジ・トランジション時間、周波数を設定できることが必要になります。また、IGBTデバイスをドライブするには、信号源は12～15Vの電圧も出力できることが必要になります。

当然のことながら、オシロスコープの周波数帯域やサンプル・レートも、スイッチング電源のスイッチング周波数に対応できることが必要になります。また、低い周波数を長時間にわたって高い分解能で取込むためにはロング・メモリも必要になります。さらに、パワー測定のためには、電圧用に1チャンネル、電流用に1チャンネルの、最低でも2チャンネルの入力が必要になります。

これらと同様に重要となるのが、デバイスとオシロスコープを接続するためのプローブです。シングルエンド・プローブ、差動プローブ、電流プローブなど、さまざまなプローブが同時に必要になります。信頼性の高いパワー測定を迅速に実行するためには、アプリケーション・ソフトウェアも必要になります。

オシロスコープの性能に関する考察

オシロスコープを選択する際に重要となる項目としては、立上り時間、サンプル・レート、レコード長、さらに測定解析ソフトウェアなどがあります。

立上り時間

スイッチング信号は比較的低速ですが、信号の立上り時間は非常に高速な場合があります。信号の高速なトランジション（遷移）を詳細に取込むためには、オシロスコープの立上り時間は信号の立上り時間の5倍以上高速であることが必要になります。

$$\text{立上り時間}_{\text{オシロスコープ}} = \frac{\text{立上り時間}_{\text{スイッチング信号}}}{5}$$

例えば、スイッチング信号の立上り時間が5nsの場合、オシロスコープの立上り時間は最低でも1nsは必要になります。この立上り時間性能は、一般的に周波数帯域350MHz以上のオシロスコープで実現されます。

サンプル・レート

サンプル・レートはS/s（サンプル数／秒）で表され、デジタル・オシロスコープがどの程度の周波数で信号をサンプリングするかを表します。サンプル・レートが高速なほど分解能が高く、波形の詳細を取込むことが可能になり、重要な信号情報、イベントを見落とす可能性が低くなります。スイッチング電源のスイッチング時に一般的に見られるリンギングを評価するためには、スイッチング信号のエッジ部において数サンプルを取込めるだけの十分に高速なサンプル・レートが必要になります。

レコード長

一定時間のイベントを取込むためのオシロスコープの能力は、サンプル・レートとメモリ長（レコード長）によって決まります。メモリは、サンプル・レートが高速になるほどすばやく埋まります。サンプル・レートを高速に設定して信号を高分解能で取込むと、メモリはすぐに一杯になります。

スイッチング電源のパワー測定の多くでは、ライン周波数の1/4周期（90°）または半周期（180°）を取込むことが必要になります。場合によっては全周期が必要になることもあります。60Hzのライン周波数の半周期は、時間にすると8ms以上になります。1GS/sのサンプル・レートで8msを取込むためには、8M（800万）ポイントのレコード長が必要になります。

パワー測定／解析ソフトウェア

アプリケーション・ソフトウェアはオシロスコープ上で動作し、通常の測定を自動化したり、詳細なテスト・レポートを作成したり、スイッチング時の高電圧、低電圧の同時測定、パワー測定などの複雑な測定を簡単に実行することができます。

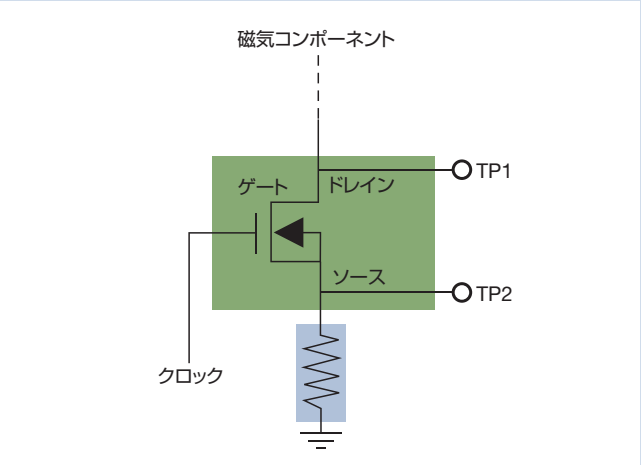


図5. MOSFETスイッチング・デバイスと測定ポイント

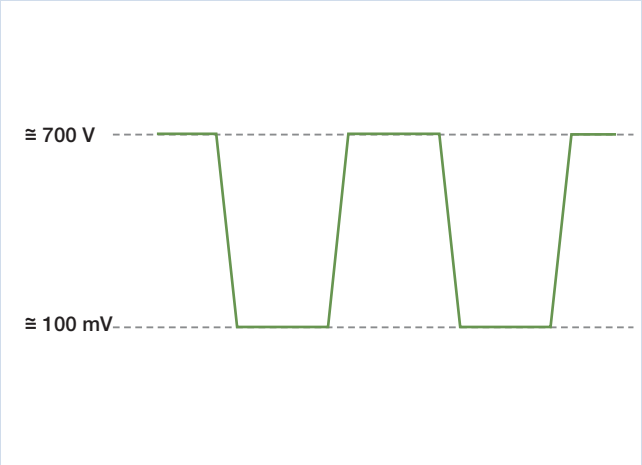


図6. スイッチング・デバイスにかかる代表的な電圧レベル

100Vと100mVを1回の取込みで測定する方法

スイッチング・デバイスにおけるスイッチング損失と平均電力損失を測定するためには、まずオシロスコープでオフとオン時のスイッチング・デバイスにかかる電圧を測定する必要があります。

AC/DCコンバータでは、スイッチング・デバイスにかかる電圧は、非常に広いダイナミック・レンジを持ちます。オン状態でのスイッチング・デバイスにかかる電圧は、スイッチング・デバイスの種類によって異なります。図5に示すMOSFETでは、オン時の電圧は、スイッチング・デバイスのオン抵抗と電流の積となります。バイポーラ・ジャンクション・トランジスタ（BJT）とIGBTデバイスでは、電圧は主に飽和電圧降下（VCE_{sat}）になります。オフ時の電圧は、動作入力電圧とスイッチング・モード・コンバータの状態によって異なります。コンピュータ機器用に設計された代表的なDC電源は、80～264V $_{rms}$の範囲で動作します。オフ時のスイッチング・デバイスにかかる、TP1－TP2間の最大入力電圧は750Vにも達します。オン状態では、同じ端子間の電圧は、数mVから約1Vという範囲になります。図6は、スイッチング・デバイスにおける代表的な信号特性を示しています。

スイッチング・デバイスの正確なパワー測定のためには、最初に、これらのオン、オフ時の電圧を測定する必要があります。しかし、一般的な8ビット分解能のデジタル・オシロスコープには、オン時のmV程度の信号と、オフ時に発生する高電圧を1回の波形取込みで正確測定するための十分なダイナミック・レンジがありません。

図7. DPOPWRソフトウェアでは、デバイスのデータ・シートからRDS_{ON}とVCE_{sat}を入力できる

この信号を取込むためには、オシロスコープの垂直軸レンジを1目盛あたり100Vに設定します。この設定では、オシロスコープは最高1000Vの電圧が測定できるため、オシロスコープをオーバドライブすることなく、700Vの信号を取込むことができます。この設定で問題となるのは、測定可能な最小信号振幅分解能が1000/256、つまり約4Vであるということです。これは、オン状態での電圧と電流の積から伝導損失を求めると、大きな誤差を生むおそれがあることを意味します。

最新のオシロスコープで実行するパワー・アプリケーション・ソフトウェアを使用することで、この問題を解決します。デバイスのデータ・シートからRDS_{ON}またはVCE_{sat}の値を読み取り、図7に示すように、測定メニューに入力します。または、測定電圧がオシロスコープの感度内にある場合は、アプリケーション・ソフトウェアを使用して、手動で値を入力することなしに、実際のデータを取込み、計算することが可能になります。

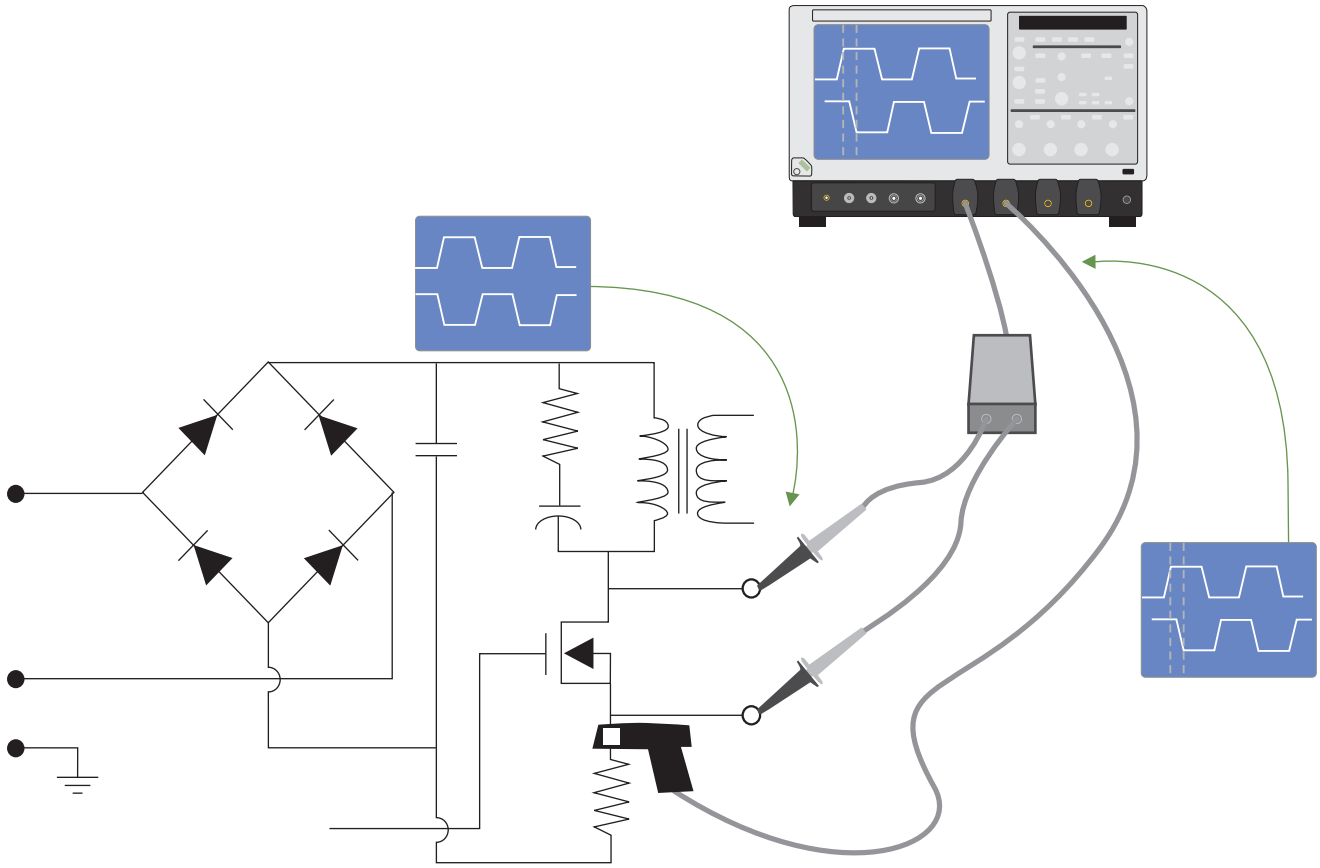


図8. パワー測定における伝播遅延の影響

電圧プローブと電流プローブ間のスキュー調整

デジタル・オシロスコープで電力を測定する場合、図2に示すように、MOSFETスイッチング・デバイスのドレイン、ソース間の電圧と電流を測定する必要があります。IGBTの場合は、コレクタ、エミッタ間の電圧を測定する必要があります。また、この測定には、高電圧差動プローブと電流プローブも必要になります。ここで使用する電流プローブは、非接触型のホール素子を使用したタイプです。どちらのプローブにも伝播遅延特性があり、これらの遅延により「スキュー」として知られる差が発生し、振幅や時間が関係する測定において精度を低下させる原因となります。

最大ピーク・パワーと電力損失測定における、プローブの伝播遅延の影響を理解することは非常に重要になります。電力は、電圧と電流の掛け算です。掛け合わされる2つの値の時間的スキューが正しくとれていないと、正確な測定が行えません。2つのプローブのスキューが正しくとれていないと、スイッチング損失などの測定精度が低下することになります。

図8は、プローブの先端（左の波形）と、伝播遅延を伴ったオシロスコープの入力部における信号（右の波形）を比較しています。

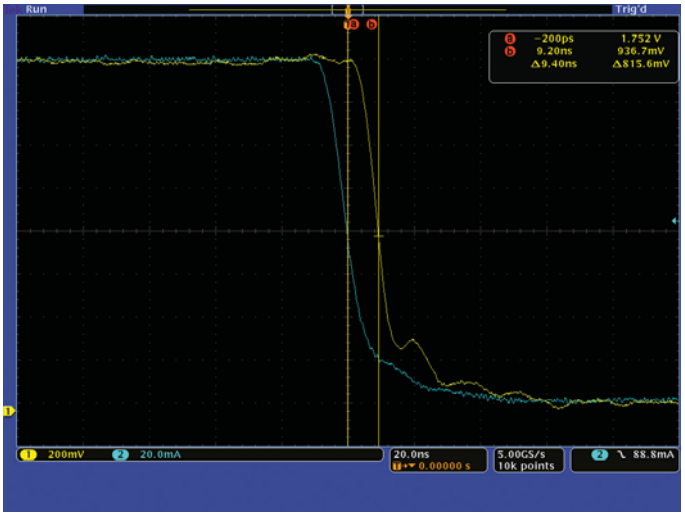


図9. 電圧信号と電流信号間の9.4nsのスキュー

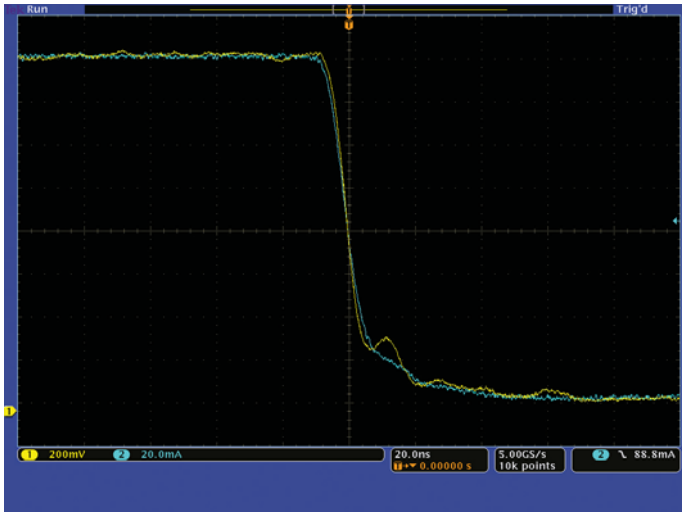


図11. デスキュー処理後の電圧信号と電流信号の様子

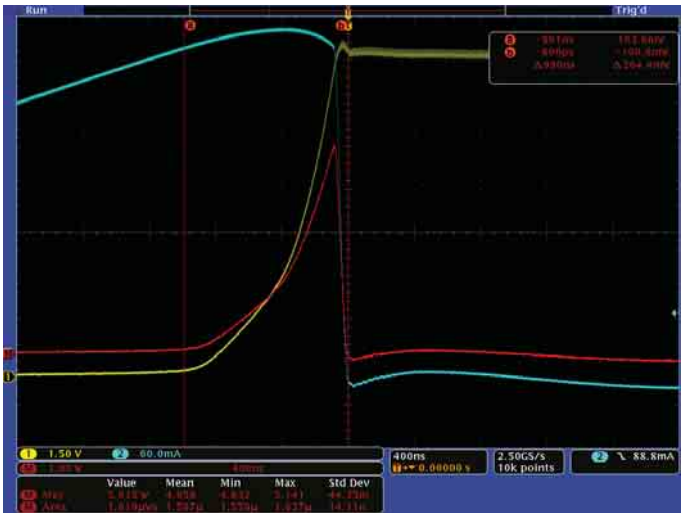


図10. スキューがある場合、電力波形のピーク振幅は4.958Wとなる

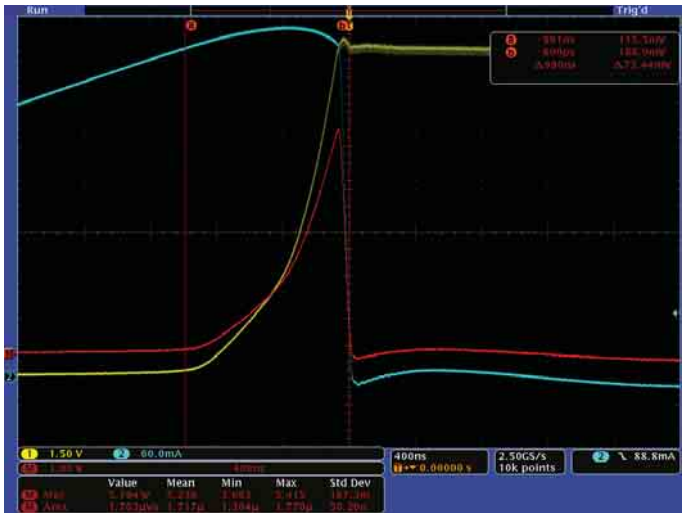


図12. デスキュー後、ピーク振幅は5.239Wに（5.6%）増加

プローブのスキューによる影響を、図9～12に示します。図9は電圧プローブと電流プローブ間にスキューがあることを示しており、スキューがある状態での測定結果（4.958W）を図10に示しています。

図11では、プローブがデスキューされている（スキューがとれている）ことを示しています。2本の波形は重なっており、遅延が解消されていることがわかります。図12は、デスキューを正しく行った場合の測定結果です。この例でわかるように、スキューにより約6%の測定誤差が発生しています。正確なデスキューにより、ピーク・ピーク間の電力損失測定による誤差を低減することができます。

パワー測定ソフトウェアの中には、選択したプローブの組合せにおいて自動的にデスキューを実行するものもあります。このソフトウェアでは、オシロスコープを設定し、電流波形と電圧波形間の遅延を調整して、両チャンネル間の伝播遅延を取り除きます。

また、電圧プローブ、電流プローブは固有の伝播遅延を持つことから、便利なデスキュー機能も装備しています。当社のプローブを使用した場合、プローブ型名をテーブルから選択するだけで、組込まれた伝播遅延テーブルに基づいて遅延を自動的に調整します。これにより、簡単に、しかもすばやくデスキューに要する時間を最小限に抑えることが可能になります。

プローブのオフセットとノイズの除去

差動プローブは、微小な電圧オフセットを持つ傾向があります。このオフセットは精度に影響を及ぼすため、測定前に取り除く必要があります。差動プローブの中には、DCオフセット機能を内蔵しているものもあります。

オフセットの自動除去

当社TekVPIプローブ・インタフェースを備えたプローブとオシロスコープを使用すると、信号経路にあるDCオフセットを除去することができます。TekVPIプローブのMENUボタンを押すと、オシロスコープにはプローブ・コントロール・ボックスが表示され、その中にAutoZero機能が表示されます。

図13. TDRPWR3ソフトウェアの信号設定メニュー。スイッチング・デバイスの「オフ」状態で電流をゼロに設定

AutoZeroのオプションを選択すると、測定システムにあるDCオフセット誤差を自動的にキャンセルします。TekVPI電流プローブには、さらにプローブ本体にDegauss/AutoZeroボタンがあります。AutoZeroボタンを押すと、測定システムのDCオフセット誤差を除去することができます。

オフセットの手動除去

ほとんどの差動電圧プローブにはDCオフセットの調整機能が内蔵されており、簡単な手順でオフセットを除去することができます。同様に、測定前に電流プローブを調整する必要があります。

差動プローブと電流プローブはアクティブなデバイスであるため、静止状態でも多少の低ノイズ・レベルが存在することにご注意ください。このノイズは、電圧波形、電流波形の両方の測定に影響します。パワー解析ソフトウェアの中には、プローブ・ノイズの影響を最小に抑える調整機能（図13）を備えているものもあります。

受動コンポーネント測定：磁気コンポーネント

受動コンポーネントは、信号を増幅したり、切り替えたりしないコンポーネントです。電源は、抵抗器やコンデンサなどの受動コンポーネントを使用しますが、測定の見地から、特にインダクタや変圧器などの磁気コンポーネント（磁性物質）を中心に考えます。インダクタも変圧器も、鉄芯に銅線を巻きつけたものです。

インダクタのインピーダンスは、周波数が増えると増加し、低い周波数より高い周波数が通りにくくなります。このため、インダクタは電源の入力と出力において、フィルタとして使用されます。

変圧器は、一次巻線から二次巻線にかけて電圧と電流を結合させることにより、信号のレベルを増減します（電圧または電流のいずれか一方）。例えば、一次側に120Vを入力すると、二次側では12Vが出力されます。このとき二次側では、同じ比率で電流を増加させます。信号の総電力は増加しないため、これは「増幅」とは考えられないことにご注意ください。変圧器の一次側と二次側は電気的に接続されていないため、回路要素間の絶縁として使用することもできます。電源の性能は、次の測定で評価できます。

- インダクタンス
- 電力（磁気）損失
- 磁気特性

インダクタンスの基礎

電源は、エネルギーの蓄積デバイス、フィルタ、変圧器としてインダクタを使用します。スイッチング電源において、インダクタは変圧器として発振を維持するのに役立ちます。設計エンジニアは、動作条件下で、このデバイスの動作を確認する必要があります。インダクタンスの値は、電流源、電圧源、励磁信号、波形の形状、動作周波数などによって変化します。インダクタンスは、次のように定義されます。

$$L = \frac{\int -Vdt}{I}$$

ここで、

- L ＝インダクタンス（H、ヘンリ）
- V ＝インダクタに印加される電圧
- I ＝インダクタを流れる電流
- dt ＝信号の変化率、スルー・レート

インダクタンスの計測器には、いくつかの種類があります。従来の方法では、インダクタに既知の励磁信号をかけることでインダクタンスを測定します。例えば、LCRメータでは、内蔵の信号ジェネレータを使用してインダクタを励磁させ、ブリッジ・バランシング技法を用いて、デバイスのインピーダンスを測定します。LCRメータは、信号ソースとして正弦波を使用します。

ただし、実際の電源では、高電圧、大電流の方形波となります。このため、多くの電源設計エンジニアは、電源が動的に変化する環境でインダクタの動作を観察することで、より正確に動作を把握することができます。

オシロスコープを使用したインダクタンス測定

実際の電源におけるインダクタ測定では、オシロスコープを使用します。インダクタ測定そのものは、前述のスイッチング・デバイス測定のように、磁気コンポーネントでの電圧と電流を調べるという簡単なものです。

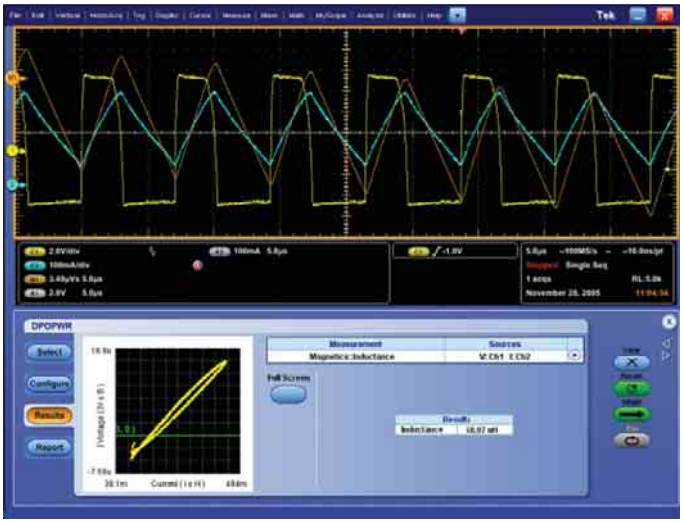


図14. DPOPWRアプリケーション・ソフトウェアによるインダクタンス測定の例

図14は、インダクタンス測定の結果を示しています。ここでは、インダクタンスは58.97μHと計算されました。

磁気電力損失の基礎

磁気電力損失は、電源の効率、信頼性、温度性能に影響を及ぼします。磁気の要素には、鉄損と銅損という2つの電力損失が関連します。

鉄損

鉄損は、ヒステリシス損失と渦電流損失からなります。ヒステリシス損失は、動作周波数とAC磁束スイングの関数です。これは、直流磁束とは関係ありません。単位体積あたりのヒステリシス損失は、次の式で表されます。

$$P_{Hyst} = \int H \cdot dB$$

ここで、

- P_{Hyst} ＝単位体積あたりのヒステリシス損失
- H ＝磁束強度
- B ＝磁束密度

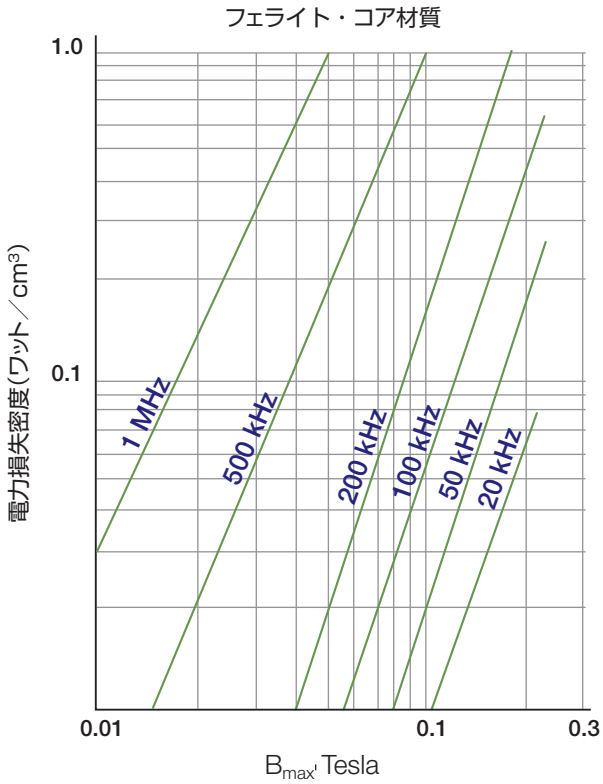


図15. さまざまなスイッチング周波数における鉄損対磁束密度

図15に示すような鉄芯製造メーカのデータ・シートにより、鉄損を計算することができます。ここでは、製造メーカは、IおよびIII象限動作における正弦波励磁の損失と指定しています。また、製造メーカは、経験則から、異なるAC磁束密度と周波数で鉄損を計算しています。

銅損

銅損は、銅巻線の抵抗によるものです。銅損は、次の式で表されます。

$$P_{cu} = I_{rms}^2 \cdot R_{wdg}$$

ここで、

- P_{cu} ＝銅損
- I_{rms} ＝磁気コンポーネントを流れる実効電流
- R_{wdg} ＝コイルの抵抗。この抵抗は、DC抵抗、表皮効果、近接効果によって変化します。

オシロスコープを使用した磁気電力損失測定

総電力損失と鉄損は、鉄芯メーカのデータ・シートとオシロスコープのパワー測定ソフトウェアの結果から、すばやく導き出すことができます。両方の値を使用して、銅損を計算します。電力損失コンポーネントの違いがわかると、磁気コンポーネントにおける電力損失の原因を特定することが可能になります。

磁気コンポーネントの電力損失を計算する方法は、測定するコンポーネントの種類によって異なります。テストするデバイスは、単巻線のインダクタ、複巻線のインダクタ、または変圧器となります。図16に、単巻線インダクタの測定結果を示します。

チャンネル1（黄色の波形）はインダクタでの電圧で、チャンネル2（青の波形）は非接触型電流プローブを使用して測定したインダクタの電流です。パワー解析ソフトウェアは、電力損失の値を自動的に計算して表示します。ここでは、173.95mWと表示されています。複数巻のインダクタでは、多少異なった方法が必要になります。トータルの電力損失は、個々の巻線の損失の合計になります。

総電力損失＝電力損失$_{L1}$＋電力損失$_{L2}$＋電力損失$_{L3}$＋....

変圧器での電力損失の計算は、さらに異なります。

総電力損失＝電力損失$_{PR}$ －（電力損失$_{S1}$＋電力損失$_{S2}$＋....）

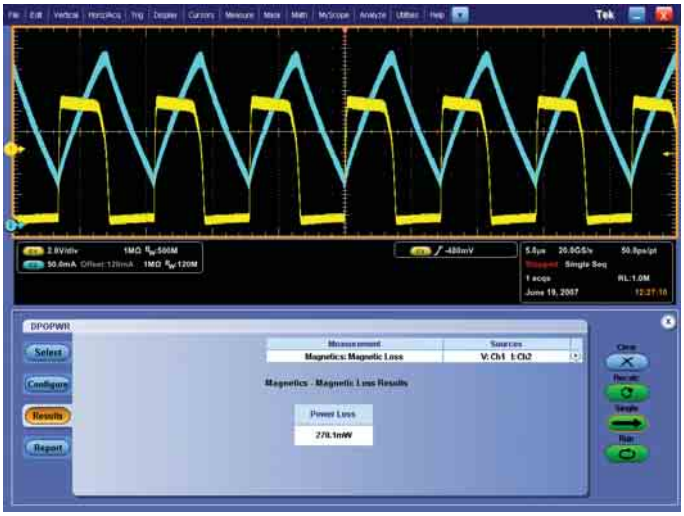


図16. DPOPWRで測定した単巻線インダクタの電力損失

一次巻線で測定された電力損失は、二次巻線の反射電力を含みます。このため、一次巻線と二次巻線での電力を測定し、変圧器の式を使用して電力損失を計算する必要があります。

磁気特性の基礎

スイッチング電源は、さまざまな条件下で、高い信頼性で動作する必要があります。最適な性能を得るため、製造メーカが提供しているB-H（ヒステリシス）曲線から、変圧器やインダクタンスなどの磁気コンポーネントを指定します。この曲線は、磁性物質であるコア材質の性能エンベロープを定義しています。動作電圧、電流、回路構成、変換器の種類を含む要素は、ヒステリシス曲線の線形領域内に入っている必要があります。多くの変数があるため、これは簡単なことではありません。

スイッチング電源を動作させながら磁気コンポーネントの動作領域の特性を評価することは、電源の安定性を見極めるのに必須です。測定手順には、ヒステリシス・ループと以下の項目が含まれます。

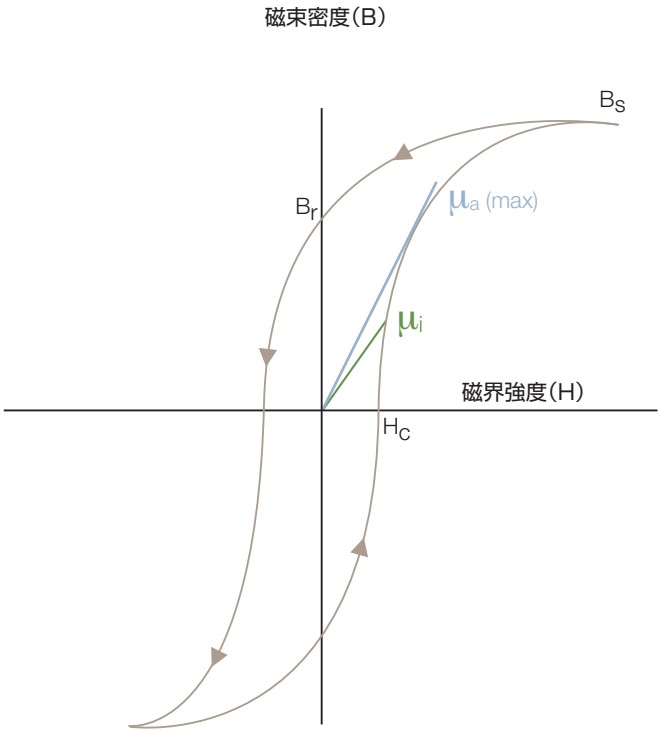


図17. 磁気コンポーネントの代表的なB-H（ヒステリシス）曲線

B-H曲線

B-H曲線は、磁気特性を表します。図17に、正弦励磁の代表的なB-H曲線を示します。

B−H曲線を測定するには、まず以下の情報が必要です。

- 磁気コンポーネントにかかる電圧（V）
- 磁化電流（I）
- 巻数（N）
- 磁性物質の長さ（l）
- 断面積（A）
- 表面積（S）

これらの変数は、図17に関連する次の定義で使用されます。

磁界強度（H）は、テストする材質で磁束を生じさせるための磁界です。単位はA/mで表されます。

$$H_k(t) = I_k(t) \cdot \frac{N}{l}$$

飽和磁束密度（B_s）は、外部の磁界Hの大きさに関係しない、材質内で誘発される最大磁束密度です。

$$\varphi_k = \int V_k(t)\,dt$$

また、

$$B_k(t) = \varphi_k / (N \cdot S)$$

残留磁束密度（B_r）は、外部の磁界（H）がゼロに戻った後、ヒステリシス・ループが生成されている間に、材質に残る誘発された磁束密度です。

保磁力（H_c）は、H軸とヒステリシス・ループが交差する点におけるHの値です。これは、ヒステリシス・ループの測定周期において、誘発される磁束密度（B）がゼロになるために必要な外部磁界をあらわします。Hcは、正の軸と負の軸で対称になります。

初期透磁率（μ_i）は、Hがゼロに近づくときの、誘発される磁束密度（B）とかかる磁束（H）との比率です。これは、ヒステリシス・ループの任意の点におけるBとHの比率になります。さらに、最大透磁率は、ヒステリシス・ループの正周期の第1象限におけるBとHの最大比率です。傾きは、原点から引かれます。

磁気特性の測定

インダクタは、電源の入力と出力でフィルタとして使用され、単巻または複数巻になります。

磁気特性の測定では、次の情報が必要になります。

- 磁気コンポーネントにかかる電圧（V）
- 磁化電流（I）
- 巻数（N）
- 磁性物質の長さ（l）
- 断面積（A）

インダクタの電圧と電流は、次の式で計算します。

$$V_L(t) = R \cdot i_l(t) + L \cdot \frac{di_l(t)}{dt}$$

代表的なDC-DC変換器では、コイルの磁束は次のように表されます。

$$L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} = N \cdot \frac{d\varphi_L(t)}{dt}$$

また、

$$\varphi_L\left[(n+1)T_S\right] = \varphi_L\left[nT_S\right]$$

図18は、結合インダクタまたは変圧器として使用できる代表的な複数巻の磁気コンポーネントを示します。この回路の動作を示す電気式は、次のとおりです。

$$\frac{v_1(t)}{n_1} = \frac{v_2(t)}{n_2} = \frac{v_3(t)}{n_3}$$

および

$$i_1'(t) \cdot n_1 = -\, i_2(t) \cdot n_2 - i_3(t) \cdot n_3$$

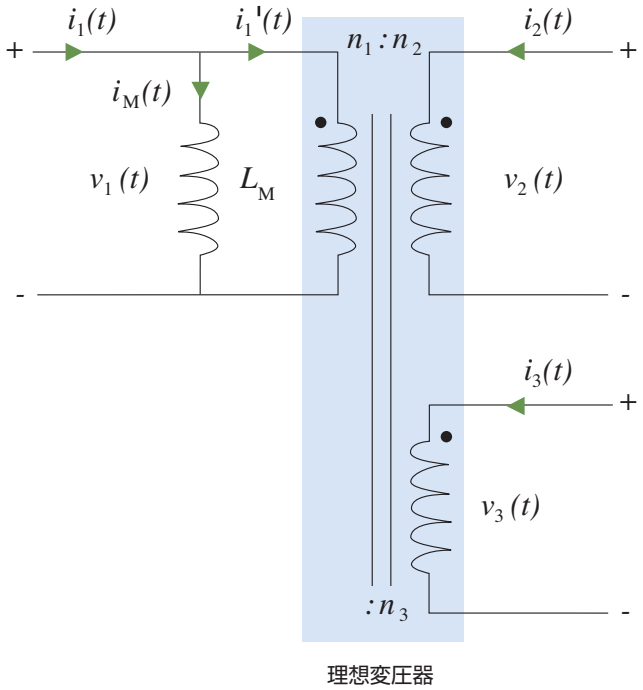


図18. 複巻線の磁束要素

および

$$i_1(t) = i_M(t) + i_1'(t)$$

総磁化電流を計算するには、$i_1(t)$、$i_2(t)$、$i_3(t)$を測定する必要があります。総磁化電流が求められると、B-H解析手順は、単巻インダクタで使用したものと似たものになります。磁束は、総磁化電流によって変化します。すべてのコイルで測定された電流のベクトル総計が、磁化電流となります。

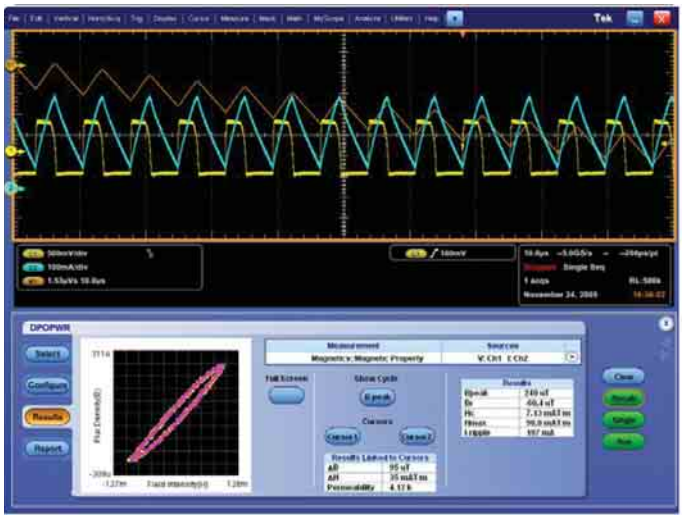


図19. 単巻線インダクタのB-H曲線

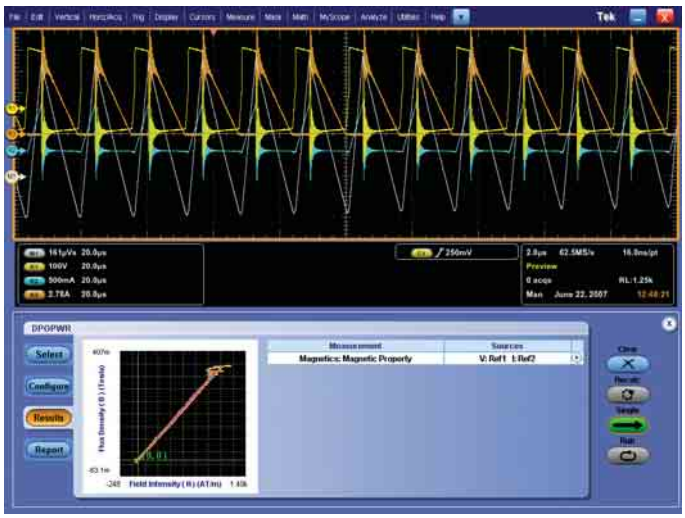


図20. 変圧器のB-H曲線

オシロスコープを使用した磁気特性の測定

専用のパワー解析ソフトウェアを使用することで、オシロスコープによる磁気特性測定が大幅に簡略化できます。多くの場合、電圧と磁化電流のみを測定するだけでよく、ソフトウェアが磁気特性を計算します。図19は、単巻インダクタにおける磁気特性測定を示します。変圧器の一次および二次電流ソースも同様に測定できます。

図20では、チャンネル1（黄色の波形）は変圧器にかかる電圧、チャンネル2（青の波形）は一次側を流れる電流、チャンネル3（赤紫の波形）は二次側を流れる電流です。ソフトウェアは、チャンネル2とチャンネル3のデータから磁化電流を計算します。

テストをセットアップする場合、巻数、磁性物質の長さと鉄芯断面の面積をまず入力します。この情報から、ソフトウェアは磁気コンポーネントの正確なB-H曲線を作成し、その性能を評価します。

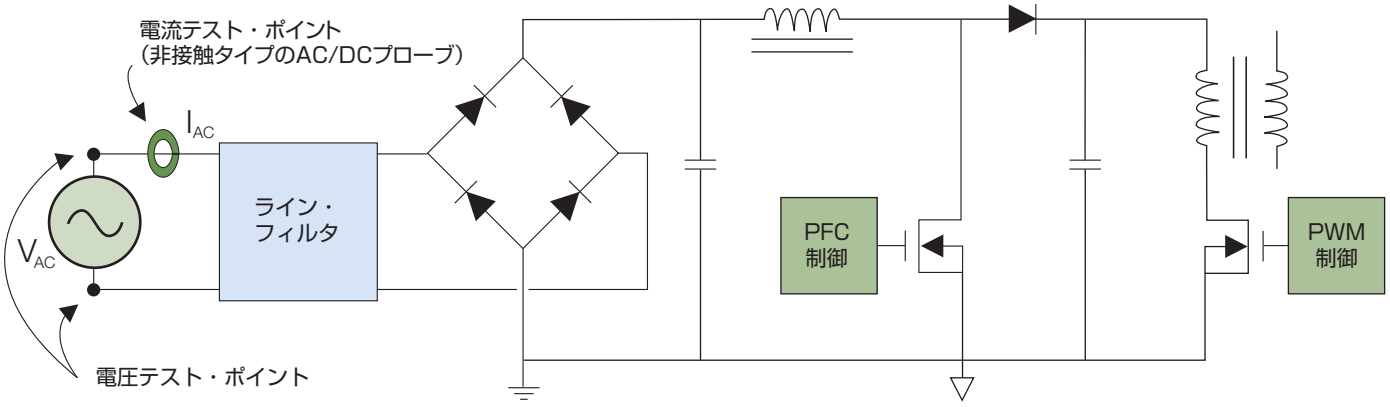


図21. スイッチング電源の簡略図（一次側のみ）とその電力品質測定テスト・ポイント。電力品質測定には、V_{AC}とI_{AC}入力の同時読み取りが必要になる

電力ライン測定

電力ライン測定では、電源と商用電源の状態の両方の特性を評価します。電源は、パーソナル・コンピュータの内部にあるものから、工場のモータに供給されるもの、電話局やサーバ設置場所に対応する大規模な電源まで、どのようなサイズにもなりうることを理解することが大切です。それぞれ、電源を供給する電力源（通常、商用電源）に影響を及ぼします。

電源の影響を見極めるためには、電圧と電流のパラメータを入力電源ライン上で直接測定する必要があります。

電力品質測定の基礎

電力品質は、電気の供給元にだけ依存して変化するのではありません。電源の設計と製造元、さらにエンドユーザの負荷によっても変化します。電源における電力品質の特性は、電源の「健全性」を示します。

実際の電力ラインは理想的な正弦波ではなく、ライン上にいくらかの歪みやノイズが存在します。スイッチング電源は、電力ラインに対して非線形な負荷となります。このため、電圧と電流の波形は同じにはなりません。電流は、入力サイクルの一部のみに流れるため、入力電流波形では高調波が発生します。これらの歪みの影響を見極めることは、電力エンジニアリングの重要な仕事です。

消費電力と電力ラインの歪みを決定するには、図21の電圧と電流テスト・ポイントで示されるように、入力段階で電力品質の測定を行います。

電力品質測定には、次の情報が含まれます。

- 真の電力
- 皮相電力または無効電力
- 力率
- クレスト・ファクタ
- EN61000-3-2標準規格にしたがった電流の高調波測定
- 総合高調波歪み（THD）

オシロスコープを使用した電力品質測定

パワー解析ソフトウェアを搭載したデジタル・オシロスコープは、従来、電力品質測定に使用されていた電力メータや高調波アナライザに代わる強力なツールです。

オシロスコープによる測定には、多くの利点があります。計測機器には、商用電源周波数の最高50次の高調波成分を取込む性能が必要です。電源周波数は、通常50Hzまたは60Hzです。軍用や航空機用の一部では、ライン周波数が400Hzの場合があります。信号のあばれにより、より高い周波数を含む場合もあります。最新の高速オシロスコープでは、高速に変化するイベントを詳細に（高分解能で）取込むことができます。一方、従来の電力メータは、比較的遅い応答時間のため、信号の詳細を表すことはできません。オシロスコープのレコード長は、非常に高いサンプリング分解能でも、複数の整数周期を取込むのに十分です。

ソフトウェア・ツールにより、測定手順を迅速化し、セットアップ時間を短縮できます。オシロスコープに組込まれたパワー解析ソフトウェアでほとんどの電力品質測定を自動化することができ、これまで長時間かかっていた手順を数秒で実行できます。手動による計算の数を減らすことで、オシロスコープは非常に多機能で効率的な電力メータとして動作します。図22に、パワー解析ソフトウェアによる測定例を示します。

オシロスコープ・プローブも、安全で信頼性のあるパワー測定には欠かせません。電力アプリケーション用に設計された高電圧差動プローブは、フローティング電圧信号の観測に最適です。

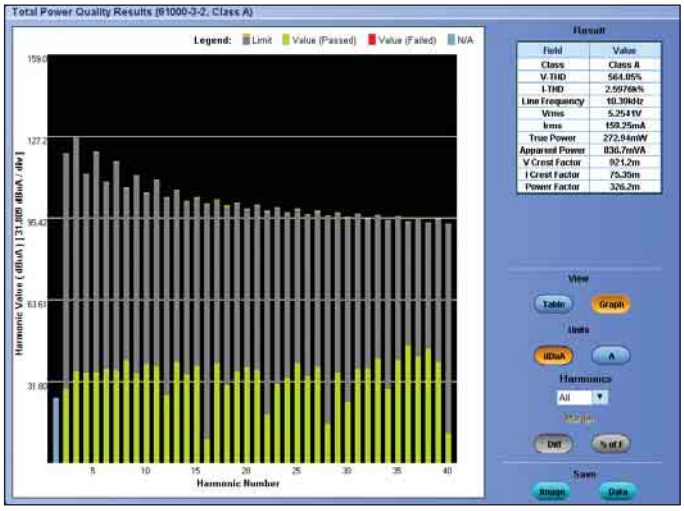


図22. DPOPWRパワー解析ソフトウェアを使用した電力品質の測定例。測定項目には、真の電力、皮相電力、クレスト・ファクタ、THD、力率、さらに高調波電流のバー・グラフ表示が含まれる

電流プローブには、特別な配慮が必要です。電流プローブは、その構造、原理により、以下のように分類されます。

- AC電流プローブは、電流変換（CT）技術を基にしています。CTプローブは非接触型ですが、信号のDC成分を感知できないため、正確に測定できません。
- シャント抵抗。この方法は、回路を遮断する必要があり、また抵抗により電圧が降下し、パワー測定の精度が低下することがあります。
- AC/DC電流プローブは、一般にホール素子を使用しています。このデバイスは非接触型で、AC/DC電流を感知し、同時にACとDC成分の両方を読み取ることができます。

AC/DC電流プローブは、スイッチング電源の電力品質測定に理想的なツールとして選択されるようになっています。

まとめ

電源は、商用電源を使用する、ほとんどすべての電気製品にとっては欠かせないものであり、デジタル・コンピューティング、ネットワーク、通信システムにおいてはスイッチング電源が大勢を占めています。1つのスイッチング電源の性能（あるいは障害）が、大型で、高額なシステムに大きく影響することがあります。

最新のスイッチング電源設計の信頼性、安全性、適合性を確かめるには、測定するしかありません。スイッチング電源の測定には、次の3種類のカテゴリに分類されます。アクティブ・デバイスの測定、受動デバイスの測定（ほとんど磁性物質）、そして電力品質のテストです。測定によっては、フローティング電圧や大電流を扱う場合、または数学的に高度な解析を必要とするものがあり、電源の測定は複雑になることがあります。

今日のデジタル・オシロスコープは、特性評価とトラブルシューティングのツールとして多用されるようになりました。適切なプローブと自動測定ソフトウェアを組み合わせたオシロスコープを使用することで、正確な解析結果がただちに表示され、難しいスイッチング電源の測定を大幅に簡素化できます。

〒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
テクトロニクス お客様コールセンター TEL:0120-441-046（ヨッ!良い オシロ）
電話受付時間／9:00～12:00・13:00～19:00（土・日・祝・弊社休業日を除く）

www.tektronix.com/ja

■ 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。
© Tektronix