

設計エンジニアのためのソースメータ (SMU) 事例集： ソースメータ (SMU) を使って作業時間を短縮、 効率アップ



図1. 設計エンジニアによる複雑な製品開発



図2. 研究、開発、製品設計で使用される最新のベンチ計測器

設計/電気エンジニアの仕事には、困難が付きます。製品は、それ以前のものに比べて高性能でないとはいけな
いのでしょうか、それともそんな必要はないのでしょうか。このような複雑で高性能な製品をスケジュール通りに、予算内で完成させるためには、優れた設計ツ

ルが必要になります。他にどのような方法をとれば、シンプルな製品を設計したのと同じ時間枠内で、より多くの機能を持った複雑な製品を設計することができるのでしょうか。

コンポーネント業者は時間を大幅に短縮できるツールを提供し、エンジニアがより複雑な製品を短時間に設計できるように貢献しています。デジタル・ドメインでは、マシン・コードはアセンブリとCなどのハイレベルな言語に移行しました。これにより、エンジニアはリアルタイム・オペレーティング・システム (RTOS) と強力なライブラリ・モジュールを利用するようになりました。アナログ・ドメインでは、真空管からトランジスタへ、オペアンプへ、特殊な用途やアプリケーションに特化した集積回路へと移行しました。

同様の変化は、作業ベンチでも起きました。従来は設計や製造段階で見落とししていたような微妙な問題をすばやく、安全に見つけられるような新しい計測器があれば、使わない手はありません。

これらの問題を解決する強力なツールがソースメータ (SMU) であり、オシロスコープやデジタル・マルチメータ (DMM) のそばに置いて使用します (図2参照)。ただしソースメータ (SMU) は、ソース・メジャー・ユニットと呼ばれる、製造環境のために設計された数多くの旧来の製品などとは違います。ソースメータは、作業ベンチでより簡単に使用できる計測器です。

ソースメータと、従来からあるDMMと電源の違いについて理解しておくことが重要になります。ソースメータの特長が理解できたところで、デイブとカレンという二人のキャラクターが登場してもらい、ソースメータを使用してテスト・ベンチでの作業時間が短縮できることについてご説明します。



図3. 最新のソースメータの例



図4. タッチスクリーンのグラフィカル・ユーザ・インタフェースを装備した、ケースレーの2460型ソースメータ

ソースメータ (SMU) とは？

ソースメータを少しはご理解いただいているか、ご購入を検討されたこともあるのではないのでしょうか。すでに電源とDMMをお持ちの方も、ソースメータ (SMU) でどれほど作業が効率的になるのかと思われるのではないのでしょうか。ソースメータを詳細に説明することで、その必要性がご理解いただけると思います。

では、ソースメータとは何でしょうか。電源でしょうか、DMMでしょうか。ソースメータは測定し、時間に対してプロットできるので (図4参照)、オシロスコープのように動作します。

一般的に、ソースメータ (SMU) は電圧源 (プログラムによる電流制限が可

能) または電流源 (プログラムによる電圧制限が可能) になります。印加機能と制限機能は16ビットの分解能でプログラムでき、どちらの値も高分解能DMMによって正確に測定できます。電源またはDMMと細かなポイントを比較することで、その差を見てみましょう。

1. ソースメータは高速の電源です。多くの電源はDCセンスで電流を制限するように設計されていますが、ソースメータにはより広い帯域幅があります。印加と制限機能のスピードは負荷に依存しますが、場合によっては最小50μsの電圧値または電流値を印加または制限することができます。多くの場合、ソースメータの電流制限は十分に高速であるため、部

品や回路全体を過電流から保護できます。これは、ロー・コストの電源にはない機能です。また、ソースメータはパルスで電圧、電流を印加できるため、デバイスの電力に制限をかけることができます。

2. ソースメータには、広いダイナミック・レンジがあります。多くの電源はいくつかのレンジしかなく、1つしかないものもあります。機種にもよりますが、広いダイナミック・レンジにより数百fA (フェムト・アンペア) から最大50Aまでの電流が測定できます。低電流のレンジは、コンポーネントの特性評価、わずかに損傷したコンポーネントの特定、低電力アプリケーションのデバッグなどに適しています。
3. DMMと同様、ソースメータには電圧、電流の高分解能、22ビットの測定機能があります。
4. ソースメータは、パルス状の電圧、電流をプログラムできます。電圧、電流の独自のシーケンスをプログラムすることもできます。優れたプログラミング言語を内蔵しているため、電圧、電流の両方が印加できる任意波形ジェネレータのように使用できます。
5. DMMと違い、ソースメータはその電圧能力まで、高入力インピーダンスを維持します。すべてのDMM (オシロスコープも) は抵抗デバイスで高電圧を測定します。
6. ソースメータは正または負の出力電圧で正または負の電流を印加できるため、出力アンプは4象限すべてをカバーでき、電子負荷としても使用できます。ほとんどの電源は、4象限すべてを扱うことはできません。

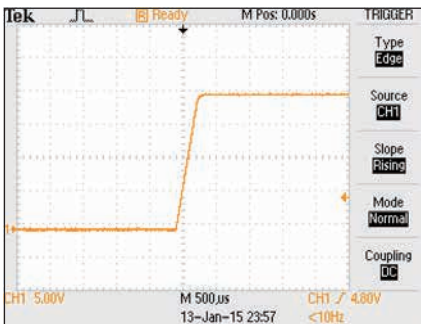


図5a

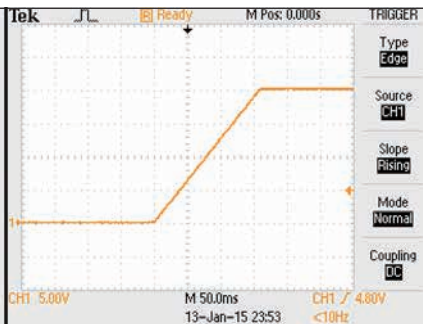


図5b

図5. ソースメータと電源による、ソース電圧20Vのステップ応答 (a: ソースメータ、b: 一般的なテスト・ベンチ用電源)

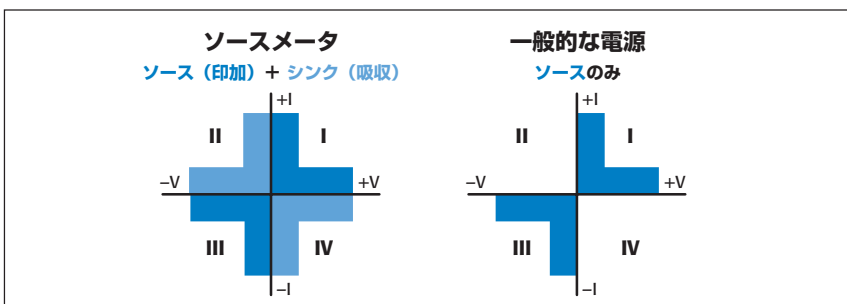


図6. 4象限のソースメータと、2象限の電源

では、ソースメータはテスト・ベンチで実際にどのように使うのでしょうか。ソースメータをまだ考慮中であるという人のために、ソースメータをどのように使用しているのか、興味深い例を見てみましょう。DMM、電源、任意波形ジェネレータ、オシロスコープの優れた機能を組合せ、統合することで、それぞれの計測器を単体で使用するよりもより便利であることをご理解いただけます。ここで登場する二人、デイブとカレンをご紹介します。

デイブ：電源の設計エンジニア

デイブは、電源を設計する会社の設計エンジニアです。今週、デイブは神経質になっています。彼の設計した電源基板100枚が倉庫に入庫されましたが、少し心配しています。スケジュールは厳しく、基板の発注段階まで仕様は変更されました。さらに悪いことに、この電源はシンプルな設計にはなっていません。数多くの機能を持ったソフトウェア制御の電源であり、さまざまなアプリケーションで使えるよう、数多くの動作モードを持っています。電源の特長としては、プログラム可能な印加電圧、ステップ応答、効率などがあります。力率改善(PFC)オフライン(メイン)電源、数多くの二次出力を持った、いくつかのプッシュプル・フォワード・コンバータで設計されています。その他にも数多くのソフトウェア制御機能がありますが、どれもまだ完成していません。完全でないソフトウェアでどれだけ電源にダメージが及ぶかを考えると、デイブは冷汗をかく思いがします。

基板を組立てに回す前に、その一枚をテスト・ベンチに持ってきました。最新のソースメータを使用して、出力電源のプリント基板配線(PCBT)とライン(メイン)電圧回路に、定格電源出力電圧を印加しました。電源が入っている場合、定格の電圧で動作するはずですが、まず、 $10\mu\text{A}$ の電流制限をかけてみましょう。低電圧の電源では、ライン電圧(と安全スペース)は良いようです。しかし、 700V の高電圧出力では $10\mu\text{A}$ の電流制限にかかりました。何か間違っています。ソースメータは 350V での制限電圧をレポートしており、短絡ではなく電圧のブレークダウン問題であることは明らかで、ブレークダウンは 350V で発生

しています。

しばらく調査した結果、高電圧ネット(PC基板の高電圧配線)とPC基板の短いグランド・トラックの間の溝を掘ることで、この問題は簡単に解決できました。CADツールでは、このネットの電圧スペース・ルールは強制されていなかったことがわかりました。エンジニアは配線時にスペースを確保していましたが、一ヶ所忘れていたようです。自分へのメモとして、安全に関するスペーシングだけでなく、すべての電圧スペーシングをCADツールに組み込むこと、としました。早期にこの間違いを発見できたため、大ごとになる前に基板を装備することができました。すべての部品が基板に取り付けられた後でブレークダウン問題を解決するのは困難であったと思われます。

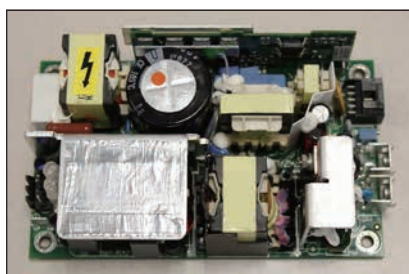


図7. 複雑な電源の例(デイブのものではありません)

一週間後、完全に部品が装備された状態の基板が12枚、デイブのデスクに届きました。電源供給とDC-DCコンバータ間のジャンパを外し、独立して電源を供給できるようにしました。ソースメータにより、オフライン電源は正常に立上りました。ソースメータの電流制限は、同様の古い設計の自己消費電流(回路が信号を増幅しない、または負荷をドライブしない状態で回路を流れる電流)を参

考に設定しました。DC-DCコンバータはうまく動作しませんでした。もう一度ソースメータが電流制限に達したため、慎重に間違い探しを続けました。デイブは、負荷のかかっていない状態で電源が機能するように電流制限を正しく設定する必要があることを知っていました。制限のない電源で壊れているDC-DCコンバータを使用していたら、大きな損傷になっていたかもしれません。電源だけでは高速な電流を制限することはできず、電子回路を保護することはできません。デイブは設計、製造に関する問題のすべてを、オシロスコープ、DMM、二台目のソースメータを使って検出し、解決しました。二台目のソースメータ(一台目は電源供給で使用)は、2端子、3端子のデバイスの測定、さらには動作電源内部の測定に役立ちます。ソースメータはLO端子を常にフローティングできませんが、これはソースメータにしかできません。ただし、すべてのソースメータがLO端子をフローティングできる訳ではありません。ソースメータの中には、デフォルトでLO端子とグランドが直接接続されているものも数多くあります。

単体のデバイスでもその他のテストを実行することができます。

- ツェナー・ダイオード: 実際のツェナー電圧より少し大きな制限電圧で、ダイオードに小さな電流を印加します。これは、電源をオン/オフすることで回路内でも実行できます。
- トランジスタの H_{fe} (電流ゲイン): 一台目のソースメータでベース・エミッタ接合に電流を印加し、二台目のソースメータでトランジスタのエミッタ・コレクタ端子に電圧をかけてコレクタ電流を測定します(図8を参照)。

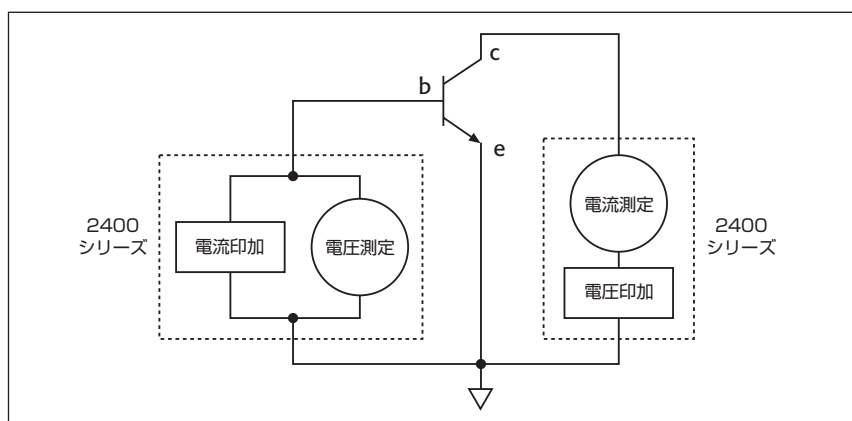


図8. 2台のソースメータを使用したトランジスタの H_{fe} (電流ゲイン)

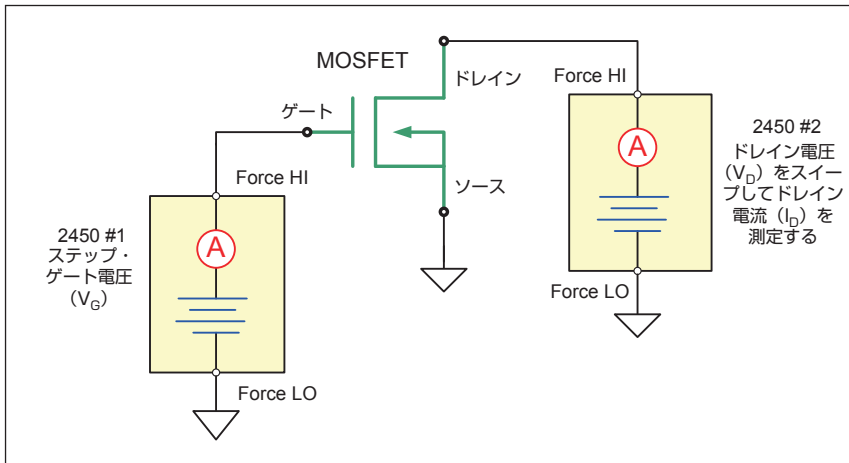


図9. 2台のソースメータを使用したMOSFETの g_m (トランス・コンダクタンス)

・ MOSFETの g_m (トランス・コンダクタンス) : 2台のソースメータを使用し、一台目はゲート・ソース端子間に電圧を印加し、二台目はトランジスタのドレイン・ソース端子間に電圧を印加してドレイン電流を測定します。この測定も、パルス・モードまたはDCで行います。

発生していた問題がすべて解決したため、ディブは電源単体で動作させてみようと思いました。オフライン電源とDC-DCコンバータを分離していたジャンパを戻し、立ち上げました。オシロスコープで各出力の電圧リップルを測定していると、電源が止まり、基板から大きな破裂音が聞こえました。何か障害が発生しましたが、すぐにではなく、何時間経ってからでした。部品はすべて正常であることはわかっています。長時間持ちこたえなかったのかもかもしれません。

ディブは、ソースメータを1.5Vリミットの電流印加、電圧測定に設定しました。目的は、電源のすべてのパワー・デバイスのテストです。電源基板の電源をオフにし、設計における各MOSFETのソースからドレイン、およびドレインからソースに電流を印加し、印加する電流の値をデバイスの定格に合うように変更しました。電圧制限の1.5Vの値は、各MOSFETのチャンネル抵抗をチェック中に、ネットの他のコンポーネントがオンにならないように設定しました。過電流は、ゲートをオンにする電圧になっていない場合でも、チャンネルが両方向で導通状態になることがあります。ゲートのリーク・チェックが次の作業なので

すが、その必要はありません。この方法でソース電流を印加したところ、プッシュプルMOSFETの一つがわずか数mVと測定されました。良品であれば電圧は一方方向で電圧リミットに達するはずであり、反対方向では0.6Vの寄生ダイオード電圧が現れるはずですが、何が間違っているのでしょうか。

振り返れば、ディブはオフライン電源ではなく、引き続きソースメータで電源を供給すべきでした。燃えた基板を外し、新しい基板を用意して、ディブがプログラムしたACライン電圧テスト・スクリプトでライン電圧を供給するようにソースメータを設定し、スクリプトをソースメータにアップロードしました。スクリプトは、無負荷電源の静止電流のための正しいリミット電流による50Hz正弦波を出力するように記述されています。新しい基板は、仕様にあるすべての供給電圧で正しく立ち上がりました。この基板が最初の基板と同じようになった場合、わずか数時間でこの問題を検出することができます。しかも、安全電流リミットをオンにした状態で検出できます。ディブはオシロスコープを使用し、各整流子の電圧を観測し、電源のすべてのスイッチング・サイクルを取込みました。

図10に示すように、整流用ダイオードの電圧の変更は、以下に示すようなソースメータによって得られるログ・アンプのI/Vカーブによって規定される負荷電流を反映したものです。この波形(上は無負荷、下は全負荷)が単純なシフトまたはシフトが正しくない場合は、整流器の後の二次回路に問題があると考えられます。

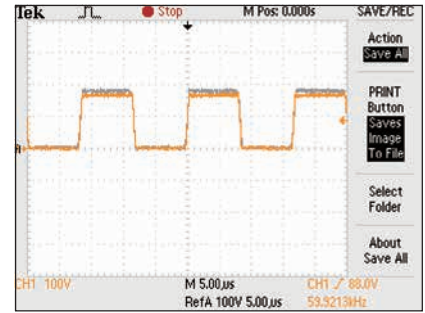


図10. 定格の負荷、無負荷で印加した場合の全波ブリッジ整流子における正しい電圧降下の様子

どの出力も、その整流器の電圧は正常です。整流器の電流が何らかの理由で大き過ぎる場合、電流対時間において整流器電圧(基本的にログ・アンプ)は増加します。ディブは、二台目のソースメータを使用して、プログラム、電圧スイープ、電流測定によって各ダイオードのIV特性を測定することで電圧値が決まるということを知っていました。オシロスコープのプロンプを探しているときに、ディブは新しい基板に電源供給しているソースメータが電流制限モードであることに気がきました。何が間違っているにせよ、わずか30分でこの基板は機能しなくなりました。しかし、今度は何も障害は発生せず、基板は燃えませんでした。ディブは、ソースメータの出力をオフにし、ソースメータを0VにプログラムしてACラインの電圧スクリプトを再起動するしかありませんでした。再起動後、ディブはオシロスコープでそれぞれのプッシュプル電源の一次電流を測定しました(図11を参照)。

ここに抵抗を入れることを誰も思いつかなかったため、ディブは2.5cmのプリント基板トレースの小さな電圧降下を測定することで、一次電流を測定しなければなりません。このテストは通常フローティング・オシロスコープで行うのですが、高分解能デジタイジングDMMでも測定できます(図12を参照)。

この測定は有意義なものでした。わずか5分後、ディブは電流の振幅が大きくなったことに気がきました。二次側は正常でしたので(最初のテスト)、残り2つのうちの1つに問題があると思われる。変圧器が正しく設計または製造されていないか、マイクロ・コントローラが設定するプッシュプルMOSFETの各半波のプッシュプル・オン時間が等しくない(不平衡磁束の状態)ことが考えられ

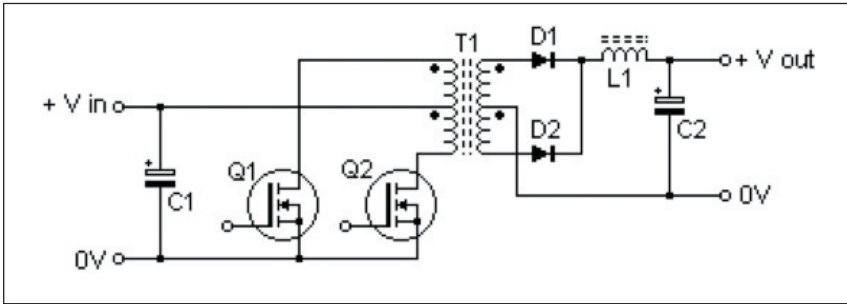


図11. プッシュプル電源回路図の例

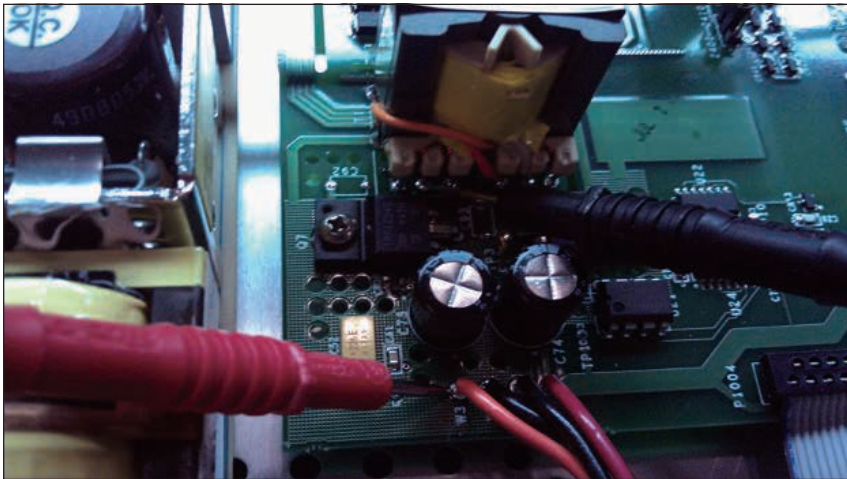


図12. プッシュプルのセンター・タップにおける電流測定の様子

ます。デイブは、この日の残りの時間と次の一日をかけて問題を発見しました。

問題は、コントローラのコードにありました。割込み実行はプッシュプルシーケンスの半分のみで、同じスイッチでは常時であるところが、オン時間が変わっており、変圧器の不均衡磁束問題の原因となっていました。デイブの変圧器の設計では磁化インダクタンスが非常に小さいため、特にこの問題に敏感になっていました。最初の2種類のテストだけでわかりましたが、一時間くらいの障害から一日くらいの障害まで延長させ、一週間かけて問題を解決することができました。

このプロジェクトでは、デイブはソースメータを使用することで時間が短縮でき、再作業の手間を省くことができました。ソースメータで電源を供給できなかったならば、デイブは基板を修理しなければなりません。誰もやりたがりませんが、それでもデイブは最初の基板を修理しなければなりません。デイブは何日もかけて、ソースメータから何回も電源を入れたり外したりして問題を探さなければなりません。

数多くの電源アプリケーションにおいて、ソースメータは製品設計の検証だけでなく、電源設計においても最適です。ソースメータは正確に電流を印加するの

と同様、電流を正確にシンクすることもでき、ほとんどの電源では実行できない便利な機能を備えています。デイブの会社のエンジニアリング検証チームでは、電子負荷としてのソースメータを気に入っています。多くの電子負荷よりも高速であることに加え、このような機能を備えたソースメータは非常に便利な計測器です。

ソースメータは、MPPT (Maximum Power Point Tracking) スwitchング電源の設計におけるソーラ・パネル・シミュレータとしても使用できます。このアプリケーションでは、太陽電池セルは印加される電圧と照度によって変化する電流源のように見ることができます。照度が一定の場合、ソースメータをプログラムして、測定される電圧の変化によってソース電流を変化させることができます。全体のリミット電圧は、セルのオープン回路電圧に設定します。

次の例で、カレンはソースメータを使用して非常に小さな電流の太陽電池セルを観測します。

カレン：極秘プロジェクトに携わる設計エンジニア

カレンの仕事は、デイブほど難しくはないかもしれませんが、デイブは何百Wを取り扱う必要がありましたが、カレンの場合は数nW以下の電力です。カレンは政府からの極秘契約に携わっており（これはフィクションです）、兵士が身につける腕時計を開発しています。バッテリーは搭載していますが充電の必要はなく、究極の環境発電です。腕時計を付けていない者が近づくと、兵士にそれを知らせます。バイタル・サイン（生命兆候）を中央司令部に中継します。初年兵には、立入りが許可されているところ、許可されていないところを知らせます。そして当然ですが、時刻と日付は、他の者が付けている腕時計と秒まで完全に同期しています。パッシブLCDで、ときにはフラッシュ・ライトで、ときには誰にも聞こえない、見えない、または検出できない弱い電気ショックで兵士と重要な情報を通信します。このハイテク機器は、体温、明かり、動きによって電力を得ます。12種類の動作モードを持ち、それぞれのモードで異なった静止状態電流を消費します。

カレンも緊張しています。極秘腕時計

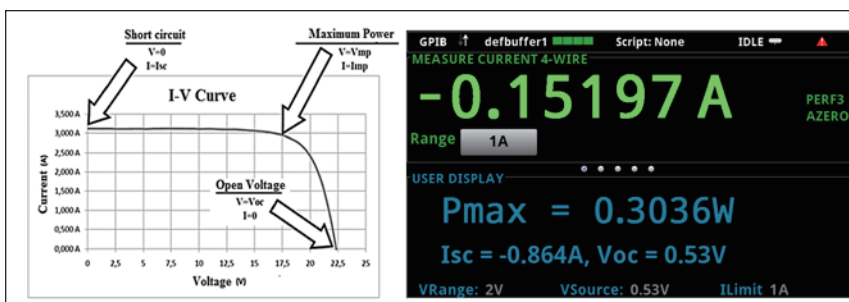


図13. I-Vカーブと、ソースメータに表示された情報の例



図14. 極秘腕時計の例

のプリント基板が100枚、彼女のもとに届きました。残りのもの（時計のハウジング、リスト・ストラップ）は出荷待ちの状態です。デバイスの場合と異なり、カレンは数百Wによるダメージについては心配していません。カレンは、彼女とソフトウェア・チームが、時計の統合されたエネルギー技術により、最小値を保証しているトータル消費電流1nA以下という非常に重要なスレッシュドをキープできるかを心配しています。どのような時間であっても時計の電流が1nAを超える場合、過度の負荷に対応するために一定時間負荷を下げる必要があります。時計の消費電流は、どの機能が有効になっているかだけでなく、マイクロプロセッサの周辺装置のどの機能が有効になっているか、さらにどのようなコードが記述されているかによっても異なります。

製品の開発サイクルの初期段階で、カレンはケースレーの2450型ソースメータ（図15）と低リーク・ガード・テスト・フィクスチャを使用して各周辺装置をテストしました。2450型には、彼女が必要としている低電流測定レンジがあり、テスト・フィクスチャと接続するための低ノイズ電流トライアキシャル・コネクタを内蔵しています。



図15. ケースレーの2450型ソースメータ

彼女は2450型を使用し、消費電流だけでなく、候補の回路を有効、無効にした場合の電流変化の割合も記録しました。どれも重要です。電流消費が頻繁に変化する場合であっても、低い周波数で動作します。2450型は、太陽電池セルのI-V特性のシミュレーションにも使用し、時計の超高効率パワー・コンバータをテストしました。これらすべてのテストは、高電圧、低電流で動作する、高速な電圧源が必要になります。2450型は、これに対処できる唯一の計測器です。

カレンは、時計を注意深くテスト・フィクスチャに入れました。時計のハウジングとリスト・ストラップを外し、テスト・フィクスチャとトライアキシャル・ケーブルを使用してデバイスの消費電流を正確に測定できるようにします。テスト・フィクスチャをよくご存知ない方のために説明すると、デバイス全体を静電シールドで覆うことにより、測定する電流が時計自身からのものであり、外部結合される干渉電流を除くことができます（図16を参照）。

フィクスチャを使用すると、エンジニアや監査担当者は、時計の押しボタンではなく、コンピュータを使って時計にアクセスできます。このインターフェースは監査のスピードを上げるために開発され

ており、今では一般的なものになっています。

今週始め、カレンは時計の負荷電流を連続的にモニタするコード（2450型内で実行）を書きました。時計は、2450型によって電源を供給されます。このコードは、1nAを超えるすべての事象と平均電流をトラックします。このテスト・セットアップ（時計、2450型、テスト・フィクスチャ、リモート・インターフェース）は、設計ごとに、また監査エンジニアで共有されます。誤動作でも不良になりますし、過度の電流が流れた場合でも不良になります。不良が発生するたびに、カレンと彼女のチームは、前に戻って不良となった特定のハードウェアの状態を調べ、解決方法を見つけることとなります。2450型は、このイベントが発生した場合にエンジニアに通告するようセットアップされたPCIに、応答を送るようにプログラムされています。監査結果は、予測できないものでした。チームは、機能しなかった項目と同じくらい数多くの過度の電流消費事例を修理しなければなりません。2450型を使用したことで、このアプリケーションに必要な低電流性能が実現できなかった電源と電子負荷を使用した場合と比較して、短時間にデバッグすることができました。

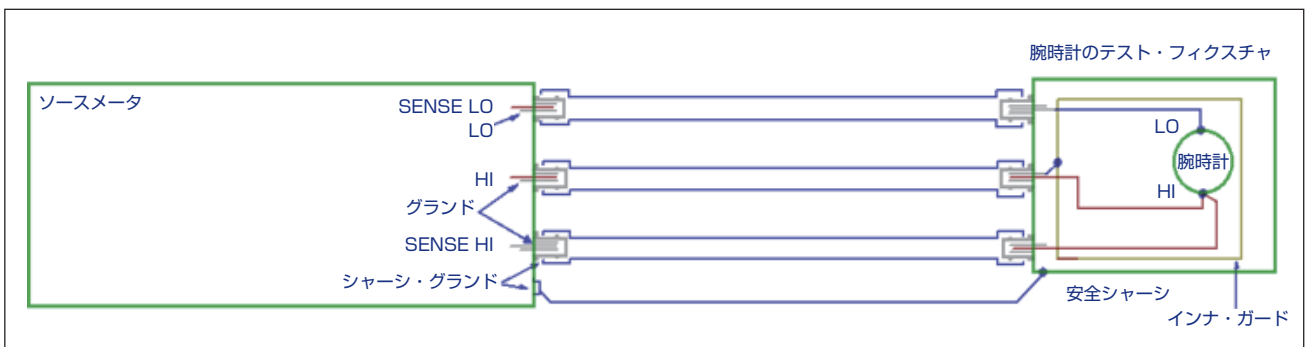


図16. テスト・セットアップの例

まとめ

ここで挙げた例はフィクションですが、このようなテスト、測定要件は非常に現実的なものです。ダイブとカレンがケースレーの2450型などのソースメータを使用して短時間に問題解決し、修理や作業のし直しを減らせたように、あなたの作業スペースでも同じような対応が可能になります。どのようなプロジェクトも他のプロジェクトとは異なっており、プロジェクトごとにさまざまな問題

を抱えます。現在お持ちの知識と検出スキル、そして利用可能なテスト機器でしか作業を終わらせることはできません。ツールの実用性は、そのツールで何ができるか、現在の複雑な計測器の豊富な機能をどのように使いこなすかというユーザの理解度に直接かかわってきます。ダイブとカレンのような競合上の優位点を考慮の上、ソースメータも考慮に加えてください。 ■

KEITHLEY

A Tektronix Company

www.keithley.jp

テクトロニクス/ケースレーインストルメンツお客様コールセンター

TEL : 0120-441-046 電話受付時間/9:00~12:00・13:00~18:00(土・日・祝・弊社休業日を除く)

〒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 © Keithley Instruments. All rights reserved. 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。

1KZ-60034-0 2015年6月