



SIEMENS

Ingenuity for life

シーメンスデジタルインダストリーズソフトウェア

完全な回路の3D電熱モデリング

測定とキャリブレーションで精度をさらに向上

エグゼクティブ・サマリー

電子システムの3D熱シミュレーションでは通常、既定の電力値のもと、すべての電力が半導体で消費されると仮定します。しかし、大電流のパワーモジュールでは電源供給ネットワークでも多くの電力が消費され、また市販のコンポーネントでは、銅配線での散逸電力が全入力電力の30%程度になる場合があります。したがって、半導体を唯一の熱源と仮定するアプローチでは今日または今後の高性能アプリケーションを正確に検証できない可能性があり、半導体以外の発熱の影響を考慮したシミュレーションが非常に重要になります。

Robin Bornoff, Andras Vass-Varnai, Byron Blackmore,
Gang Wang, Voon Hon Wong

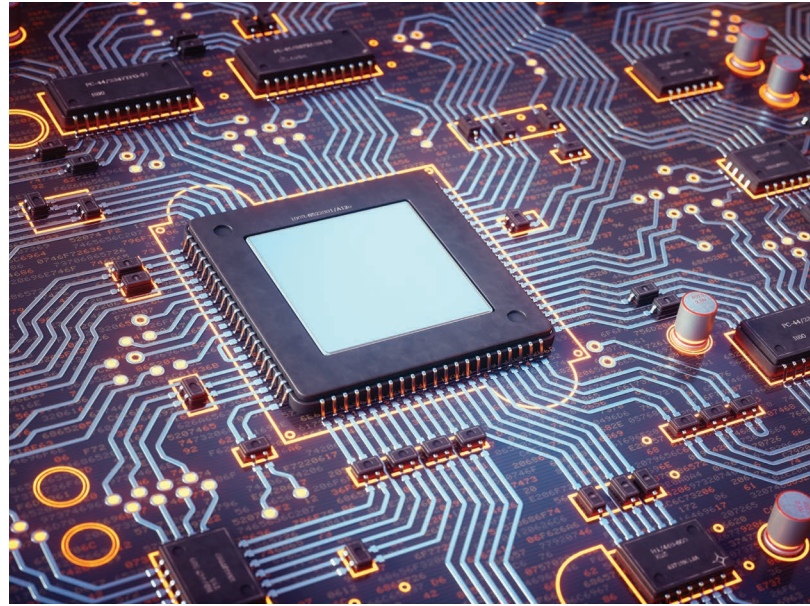
目次

概要	3
消費電力の分布が熱シミュレーションに影響を及ぼす	4
電熱シミュレーション法を評価する	5
IGBTを実際に測定する	6
モデルの調整とキャリブレーション	7
消費電力について学んだこと	9
アクティブレイヤの電力分配に及ぼす影響	10
想定したチップ内総消費電力の比較	11
線形電気モデル使用の限界	12
スイッチング時総消費電力のモデリングの限界を克服	13
まとめ	14

概要

消費電力の値が規定され、その電力が半導体のみで消費されるという仮定に基づくシミュレーションでは、温度上昇予測に大きな誤差が生じます。こうした誤差は、電熱シミュレーション法を用いることで解消できます。この方法は半導体の消費電力だけでなく電源供給ネットワークの抵抗による発熱を予測しながら電気回路全体をシミュレーションします。システムの電氣的挙動に加え、熱的挙動を解明することで、電力のレベルと分布を予測することができ、温度上昇の予測精度を向上できます。

ここでは、IGBT (絶縁ゲートバイポーラトランジスタ) 電力変換器を例に用いて電熱シミュレーション法を説明します。回路全体の電熱シミュレーションによって、電力変換器モジュール全体の消費電力と温度のばらつきを予測してみましょう。



消費電力の分布が熱シミュレーションに影響を及ぼす

温度上昇の予測精度は、消費電力の大きさや分布の正確なデータの上に成り立ちます。一般的な前提では、電力は半導体チップのアクティブレイヤでしか消費されないとされています。しかし、大電流のパワーエレクトロニクスアプリケーションでは、かなりの量の電力が電源供給システムのその他の場所で消散しています。ドレイン・ソース間オン抵抗 ($R_{ds(on)}$: drain-source on resistance) が小さくなればなるほど、相対電気抵抗、つまり電源供給システムの電力損失がますます重要になります。こうした傾向にシミュレーションでどう対応できるでしょうか。

電熱シミュレーション法を評価する

IGBTは、主に電気スイッチとして使用される3端子のパワー半導体デバイスであり、高効率だけでなく高速スイッチングが可能です。IGBTを使った回路は、SPICEやSaberなど、さまざまな回路シミュレーション用コンピュータプログラムで開発およびモデル化が可能です。IGBT回路をシミュレーションするには、デバイス（および回路内の他のデバイス）用モデルが必要です。それによって電気端子に加わるさまざまな電圧や電流に対するデバイスの応答を予測またはシミュレーションします。さらに詳細なシミュレーションをするには、温度がIGBTの各部位に及ぼす影響を考慮する必要があります。

システムの電氣的挙動と熱的挙動の両方を解明することによって、温度による影響を考慮に入れて消費電力を見積もることができます。これは通常、2つある標準アプローチのいずれか1つを使って行います。1つは緩和法で、2つの独立した電気ソルバーと熱ソルバーを組み合わせ、2つの間に温度と消費電力を渡します。もう1つの直接法は、1つのソルバーで電氣的挙動と熱的挙動を解決します。最近では直接法を使用した電熱SPICE型ネットワークソルバーを使用する方法が一般的になってきました。

今回は、完全3D電熱シミュレーションで直接法がいかに効果的かを調べる実験を行いました。この実験の目的は、消費電力の分布とその結果生じる温度上昇を予測するためのシミュレーションモデルの精度を検証することです。

IGBTを実際に測定する

まずはラボでSimcenter T3STER™を使って、Infineon FS800R07A2E3 IGBT電力変換器モジュールのチップ内部を正確に測定します。

モジュールに含まれる3つのハーフブリッジ電力段のうち、第3段のローサイドIGBTを測定用に選択しました。電力管理をしやすくするため、IGBT内の電力は2つの同一チップに分散させます。コンポーネントは飽和モードで測定しました。つまり、15Vのゲートを通じてデバイスに電圧を印加し、500Aの加熱電流と500mAのセンサー電流間を切り替えて、適切な電力段を駆動しました。

このサンプルには、高電流の電力供給端子 (3、N3と呼ばれる)、そしてIGBTのエミッターとコネクタにそれぞれ接続された個別のセンサー端子 (C6、E6と呼ばれる) が含まれます。この個別のセンサー端子によって、電力供給線と測定線が分けられたケルビンプローブセットアップを構築することができ、チップ全体の電圧降下をより正確に測定できるようになりました。

金属配線の電圧降下は、過渡熱測定の結果に大きな影響を及ぼしうると考えました。このことを検証するために、メインの電源ピン (3-N3) で電力供給して測定してから、3-N3ピンから電力供給して指定のセンサーピン (C6-E6)の電力を測定するという方法で、サンプルの熱抵抗を測定しました。システムの温度感度は、主に測定される半導体に依存するため、どちらのケースでも測定した温度応答は同じでした。しかし内部の金属配線を考慮して測定した放熱電力は約900Wだったのに対し、半導体で直接測定すると放熱電力はわずか700Wでした。

また測定ピンの位置も、構造関数の計算結果や測定される熱抵抗に大きな影響を及ぼします。その影響を検証するために、このセットアップの正確な3D電熱モデルを作成して解析しました。

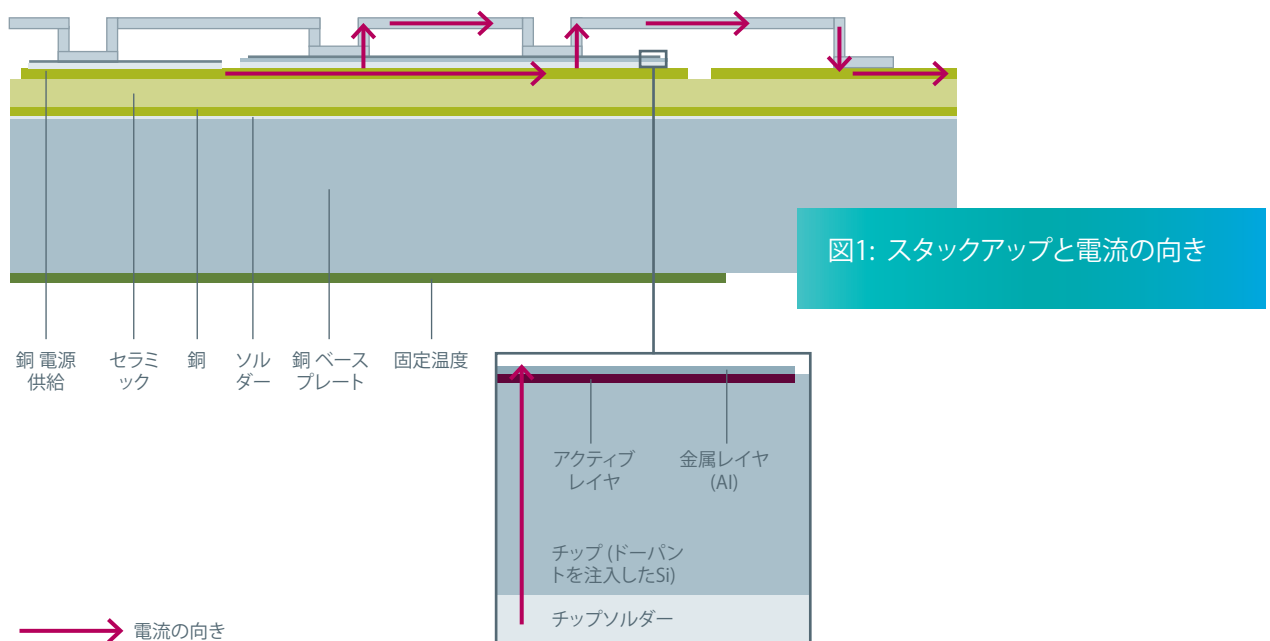
モデルの調整とキャリブレーション

定常状態の高精度3D電熱モデルには、細かく定義した電気抵抗と熱抵抗の特性が必要です。つまり、ジオメトリ、電気抵抗率、熱伝導率の値を定義して細かく示す必要があります。このため、測定したチップ温度、ユニットの電力段へのチップの過渡熱応答 (Z_{th} 曲線)、ポイント電圧降下を組み合わせることで3D電熱モデルを微調整しました。ピンN3に500Aの境界条件を、ピン3には0Vを適用し、ピンE6とC6を使ってIGBTチップ全体の電圧降下を監視しました。

図1に、アクティブなIGBTのスタックアップ断面を示します。このモデルは、チップの金属レイヤ、アクティブレイヤ、チップ、溶剤、DCB (ダイレクト銅ボンド) 基板など十分詳細に表現しています。アクティブでないすべてのIGBT、ダイオードのアクティブレイヤ、そしてセラミックレイヤは誘電体として指定し、アクティブな2つのIGBTの電源供給ネットワーク、金属レイヤ、ボンドワイヤ、チップ、アクティブレイヤへの電気回路を絶縁しました。

IGBTモジュールは、ベースプレートの底部に、ウォータージャケットで冷却されるピン・フィン統合型ヒートシンクを備えています。ピンとウォータージャケットは明確にはモデル化しませんでした。その代わりに、フィンがあるベースプレート領域のベースプレートと固定温度境界条件間で、ベースプレート底部の接触熱抵抗を定義しました。温度依存係数を含め、すべての金属体の電気抵抗材料の特性を十分に評価しました。

アクティブレイヤの電気抵抗率と、ドーパントを注入したシリコンチップの電気抵抗率の2つのパラメータ値が不明でした。アクティブレイヤの電気抵抗率は、最も影響を受けやすく、キャリブレーションにとって非常に重要なパラメータです。ドーパントを注入したチップの電気抵抗率は、ドーパント濃度に左右されるものの、影響の受けやすさはアクティブレイヤの電気抵抗率ほどではありません。ここでは $2e-50 \text{hm m}$ と仮定しました。



熱伝導材料特性の解析時に、温度上昇予測の影響を最も受けたパラメータは、モデル化しなかったピン・フィンに相当するセラミック抵抗と接触抵抗の2つです。そこで、キャリブレーションの手順では、アクティブレイヤの電気抵抗率、セラミックの熱伝導率と厚さ、接触抵抗の値を固定温度境界条件で変化させました。T3STERで測定した2つの電圧降下値 (N3-0とE6-C6)、定常状態の平均チップ温度、 Z_{th} と累積構造関数が、Simcenter Flotherm™ ソフトウェアの3Dモデルで再現されるまでパラメータを変化させました。

最終キャリブレーションでは、セラミックレイヤの厚さを740ミクロン、熱伝導率を105W/mK (ワット毎メートル毎ケルビン)、アクティブなIGBTレイヤの実効電気抵抗率を0.115 Ohm-m、ピンとウォータージャケットの接触抵抗を3.5e-5m²K/W (平方メートル・ケルビン毎ワット) に設定しました。アクセス可能なすべてのジオメトリを測定することもできましたが、破壊的な、断面測定は行いませんでした。そのためアクティブレイヤの実効抵抗率、そして熱伝導率と(セラミックの)厚さは正確ではないかもしれませんが、最終的な実効電気抵抗と熱抵抗はキャリブレーションしてあります。

システムの消費電力増加に対する過渡熱応答 (Z_{th}) をシミュレーションするために、T3STERで同様の測定を行いました。t=0の駆動電流、定常状態、電熱ソリューションから始めて、過渡熱のみのシミュレーションを実施し、結果として得られたチップ平均温度対時間曲線を記録しました (図2)。実際は、過渡測定を開始するとT3STERは感応電流に切り替わりますが、このような電流はごくわずかなため、自己発熱ゼロという前提で進めます。

過渡熱応答の測定値に対するキャリブレーションは理論上は、過渡熱挙動のモデルをキャリブレーションすることですが、真の目的はIGBT外部の熱材料特性をさらに見極めることでした。これは、定常状態温度上昇の予測値の根拠を示し、スタック内の誤った熱抵抗値を総和したら偶然に正しい総熱抵抗 (R_{th}) になったのではないことを証明するためです。この方法によって、チップ温度だけでなくスタック全体の正確な温度予測を保証できるようになりました。

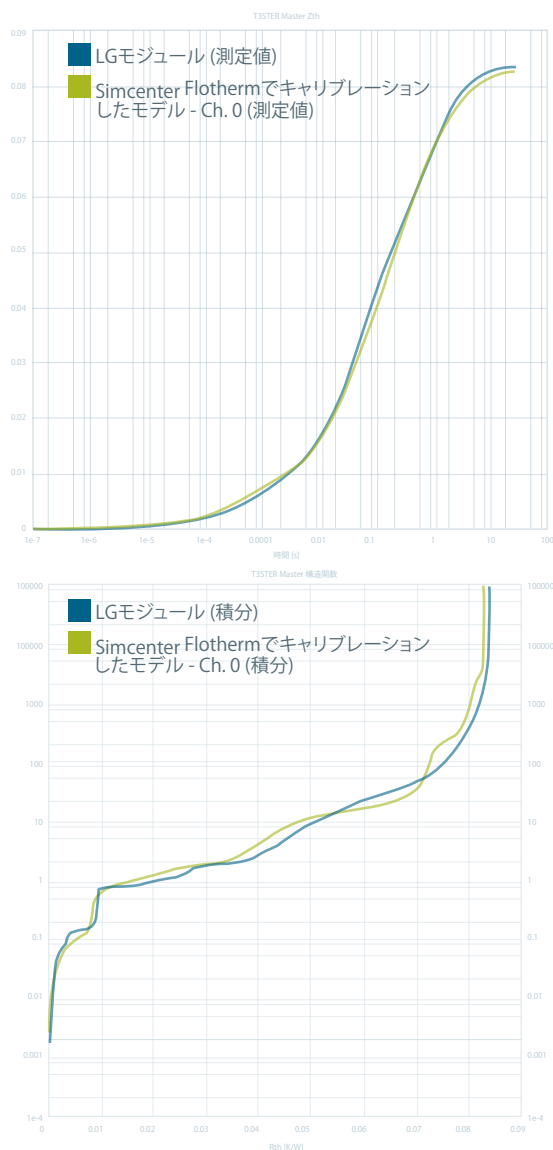


図2: Z_{th} と累積構造関数のキャリブレーション比較

消費電力について学んだこと

低電流条件下 (感応電流など) では、IGBTの電気抵抗率はそれ以外の回路に比べてはるかに大きくなりました。電力の大部分はチップで消費されました。高電流では、IGBTチップの相対抵抗はそれ以外の回路に比べて低下し、ほぼすべての消費電力がチップで消散されるという仮定は当てはまりません。図3に、500Aの駆動電流でシミュレーションした電力バジェットを示します。

912Wの総消費電力のうち、64%は2つのIGBTのアクティブレイヤで、4.7%がボンドワイヤ、1.4%が金属レイヤ、そして残りの29.6%がそれ以外の電源供給回路で消散されました。回路全体をカバーするN3-0、IGBTチップとボンドワイヤをカバーするE6-P6の4つのピンにおける電圧測定値の比率は、 $1.4/1.812V=77\%$ となり、電力バジェットがアクティブデバイスと電源供給回路に分かれたことを示しました。

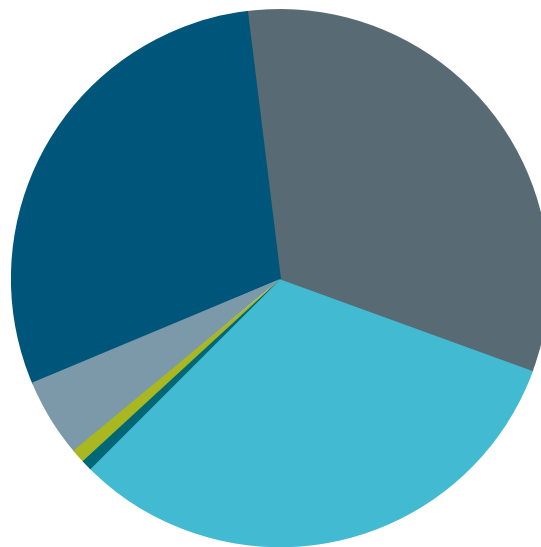


図3: IGBTモジュールの消費電力バジェットのシミュレーション

- アクティブレイヤのチップ2 291W
- アクティブレイヤのチップ1 296W
- その他の電源供給回路 270W
- ボンドワイヤ 43W
- 金属レイヤのチップ2 7W
- 金属レイヤのチップ1 6W

アクティブレイヤの電力分布に及ぼす影響

アクティブレイヤを流れる電流の分配、つまり電力分布に影響を及ぼしたのは、接続されたボンドワイヤに電流を波及させる金属レイヤの効果と、ボンドワイヤと電源供給回路のリターン部分との近さでした。図4に各ボンドワイヤによって運ばれる電流の不均一性を示しています。

0-Vのリターンピンにより近いボンドワイヤ (左上) には、リターンピンに最も離れているボンドワイヤ (右上) より約20%多くの電流が流れます。この理由として、0-Vリターンピンに近いボンドワイヤ間の電気抵抗が、0-Vリターンピンから遠いボンドワイヤ間の電気抵抗に比べて小さくなったことが原因だと考えました。

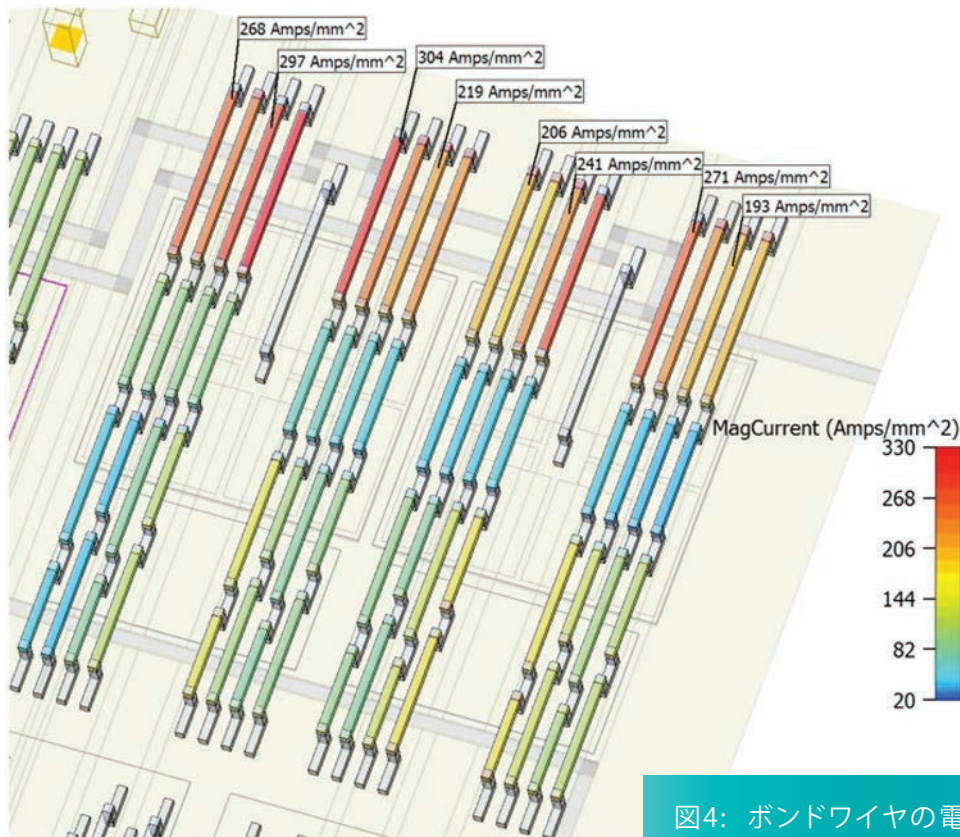


図4: ボンドワイヤの電流流速のばらつき

想定したチップ内総消費電力の比較

熱のみのシミュレーションでは、消費電力とその位置を予測しません。総消費電力は、回路全体の電圧降下を測定し、その値に既知の電流を乗算することで測定できます。しかし、すべての消費電力がアクティブレイヤに分散し、すべてのレイヤに均一に散逸されると仮定すると、温度予測にかなりの誤差が生じることとなります (図5)。この図に示すように、この仮定によって最大の温度上昇予測が34%高くなり、最大温度になる位置が変わり、アクティブレイヤ全体の温度差は30%大きくなります。

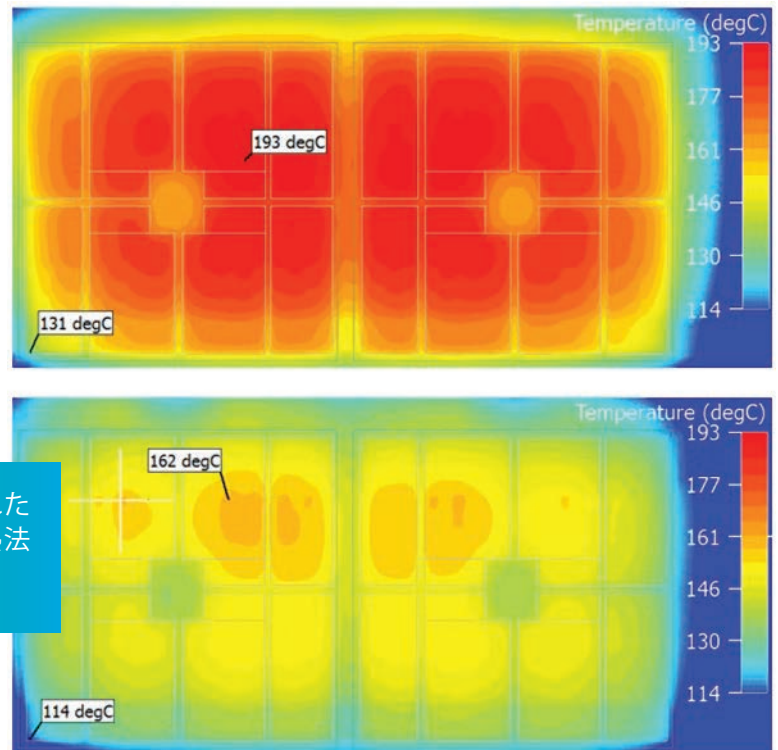


図5: 電力が均一に分配された場合の温度予測 (上) と電熱法による温度予測 (下)

線形電気モデル使用の限界

IGBTは非線形IVの関係を示すのに対して、Simcenter Flothermでは単一の電気抵抗材料特性が前提となるため、シミュレーションのみでは、IGBTなどのデバイス内の単一駆動電流に合わせてキャリブレーションすることに限界があります。このような抵抗率は（線形の）温度依存を示す場合もありますが、一般的に応用するには、原点を通る線形IVの特性を示す材料に限定されます。総消費電力は容易に測定できます（既知の駆動電流と回路全体の電圧降下の測定値から導出）。キャリブレーション法は、IV曲線が駆動電流線と交わるようにアクティブレイヤの抵抗率の寄与を調整することで、（電気の）動作点を決定します（図6）。

同一の駆動電流で、そして異なるジャンクション温度で、（周囲のウォータージャケット温度を制御しながら）アクティブレイヤの実効電気抵抗率をキャリブレーションすると、その電気抵抗率の温度依存係数を特定できるようになります。これによってチップ温度と電気抵抗率の局所的なばらつきを考慮しながら、アクティブレイヤの消費電力の予測精度をさらに向上できる可能性もあります。I対V対Tを特性化して定義した汎用的な電気材料特性を使用すると、温度依存も含め、あらゆる動作電流をシミュレーションすることができます。

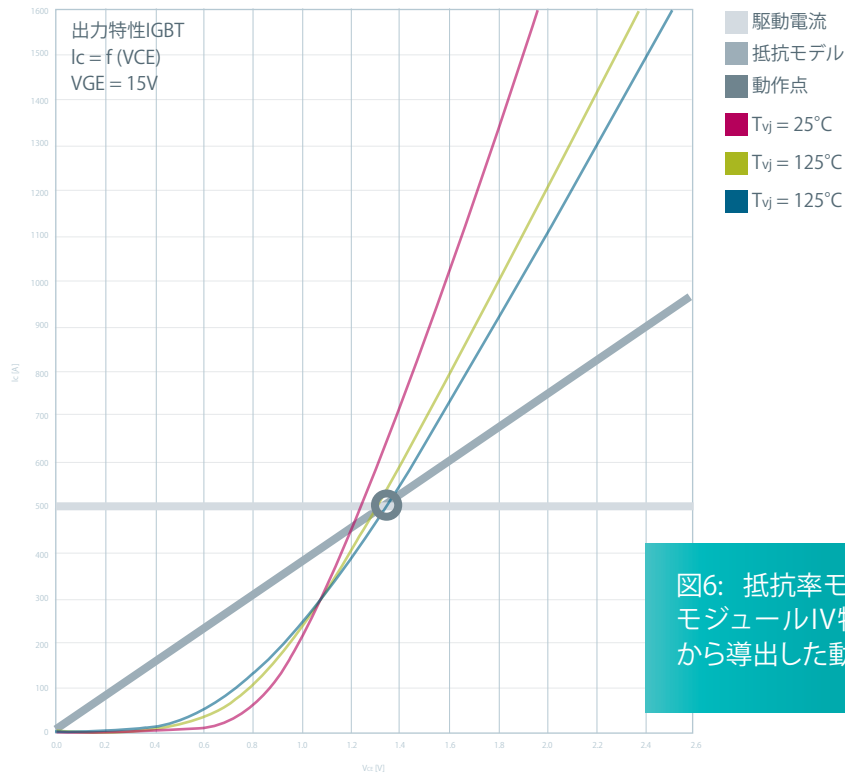


図6: 抵抗率モデルとIGBTモジュールIV特性の交点から導出した動作点

スイッチング時総消費電力のモデリングの限界を克服

IGBTモジュールが動作中の総消費電力は、DC損失とスイッチング時に生じる損失によるものです。3D過渡モデリングの観点では、電氣的スイッチングの時間軸と、そのほかの部分の熱的な時間軸を同時に解決するのは困難です。

代替策として考えられるのが、ELDOのような回路シミュレーターを使って、完全な過渡電氣シミュラスを入力する方法です。予測される瞬間的なパワープロファイルからDC寄与分を取り除くと、スイッチング損失のプロファイルが残ります。それをさらに時間平均して、累積スイッチング損失電力を導出します。この値を定常状態の電源として実装し、アクティブレイヤのオブジェクトとともに3D電熱モデルに含めることで、電熱学的に予測したDC損失とともに時間平均したスイッチング損失を考慮できるようになります。

まとめ

すべての消費電力は半導体で消散されることを前提としたこれまでの熱シミュレーション法は、パワーエレクトロニクスアプリケーションの温度上昇予測で34%もの誤差を招く可能性があります。Simcenter FlothermのシミュレーションモデルをT3STERでキャリブレーションしたものを使って電気回路全体を解析することで、消費電力の分布予測が可能になります。その結果、温度上昇を高精度に予測し、さまざまな動作条件下で設計案を試し、熱的要件を満たせるかどうかを判断できます。測定とシミュレーションを組み合わせるこの方法は、デジタル・ツインの精度向上を実現します。

シーメンスデジタルインダストリーズソフトウェア

本社

Granite Park One
5800 Granite Parkway
Suite 600
Plano, TX 75024
USA
+1 972 987 3000

アメリカ

Granite Park One
5800 Granite Parkway
Suite 600
Plano, TX 75024
USA
+1 314 264 8499

ヨーロッパ

Stephenson House
Sir William Siemens Square
Frimley, Camberley
Surrey, GU16 8QD
+44 (0) 1276 413200

アジア/太平洋

Unit 901-902, 9/F
Tower B, Manulife Financial Centre
223-231 Wai Yip Street, Kwun Tong
Kowloon, Hong Kong
+852 2230 3333

シーメンスデジタルインダストリーズソフトウェアについて

エンジニアリング、製造、そしてエレクトロニクス設計を未来につなげるデジタル・エンタープライズ。それを実現するのが、シーメンスデジタルインダストリーズソフトウェアが進めている変革です。弊社ソリューションによって、あらゆる規模の企業の皆さまがデジタル・ツインを作成、活用し、新たな知見と機会を開拓し、より高いレベルの自動化を実現できるため、イノベーションが推進されます。シーメンスデジタルインダストリーズソフトウェアの製品とサービスについての詳細は、[siemens.com/software](https://www.siemens.com/software) をご覧ください。または、[LinkedIn](#)、[Twitter](#)、[Facebook](#)、[Instagram](#) をフォローして情報をご確認ください。シーメンスデジタルインダストリーズソフトウェア – Where today meets tomorrow.

[siemens.com/software](https://www.siemens.com/software)

© 2019 Siemens. 関連するシーメンスの商標は[こちら](#)に記載されています。その他の商標はそれぞれの所有者に帰属します。
75476-81572-C6-JA 2/20 LOC