

# 過渡熱測定と熱等価回路モデル

AN2008-03改訂版

## 本書について

### 適用範囲と目的

パワーエレクトロニクス設計の基本は、IGBT モジュールの電力損失とシステムの熱インピーダンスの相互作用にあります。

精密なモデルを用いることで、最大ジャンクション温度を超えることなく大電流に対応すると同時に、パワーサイクルに対する信頼性を確保した設計が可能です。

こうした要求を満たすため、インフィニオンは測定方法を最適化しました。

このアプリケーションノート AN2015-10 では、パワーエレクトロニクスシステムの熱特性を評価する方法と、アプリケーション指向の調査向けのモデル化方法について説明しています。

目次

目次

|                                       |           |
|---------------------------------------|-----------|
| 本書について.....                           | 1         |
| 目次 .....                              | 2         |
| <b>1 熱インピーダンス曲線の決定.....</b>           | <b>3</b>  |
| 1.1 測定原理 - $R_{th}/Z_{th}$ の基本 .....  | 3         |
| 1.2 $R_{th}/Z_{th}$ 測定の課題と最適化 .....   | 4         |
| <b>2 熱等価回路モデル.....</b>                | <b>6</b>  |
| 2.1 はじめに.....                         | 6         |
| 2.2 放熱グリスの考慮.....                     | 8         |
| 2.3 半導体モジュールとヒートシンクのシステムモデルへの統合 ..... | 8         |
| 2.3.1 連続分数モデルを用いた熱システムモデル.....        | 8         |
| 2.3.2 部分分数モデルを用いた熱システムモデル.....        | 9         |
| <b>3 参考文献 .....</b>                   | <b>10</b> |
| 改訂履歴 .....                            | 11        |
| 免責事項 .....                            | 12        |

熱インピーダンス曲線の決定

# 1 熱インピーダンス曲線の決定

## 1.1 測定原理 - $R_{th}/Z_{th}$ の基本

測定の基本原理は、IEC 60747-9 Ed. 2.0 (6.3.13.1) [1]に記載されています。Figure 1 に熱インピーダンスの測定方法を示します。一定の電力  $P_L$  となるように IGBT モジュールに電流で流し、過渡期を経て定常ジャンクション温度  $T_j$  に到達させます。電力を切った後、モジュールの冷却を記録します。

熱抵抗  $R_{th(x-y)}$  は、 $t=0$  における 2 つの温度  $T_{x0}$  と  $T_{y0}$  の差を  $P_L$  で割ったものです。時間に依存した熱インピーダンス  $Z_{th(x-y)}(t)$  を計算するには、記録された温度曲線を x 軸方向に反転し、座標系の原点に移動させる必要があります。そして、 $T_x(t)$  と  $T_y(t)$  の差を  $P_L$  で割ることで  $Z_{th(x-y)}(t)$  を算出します。

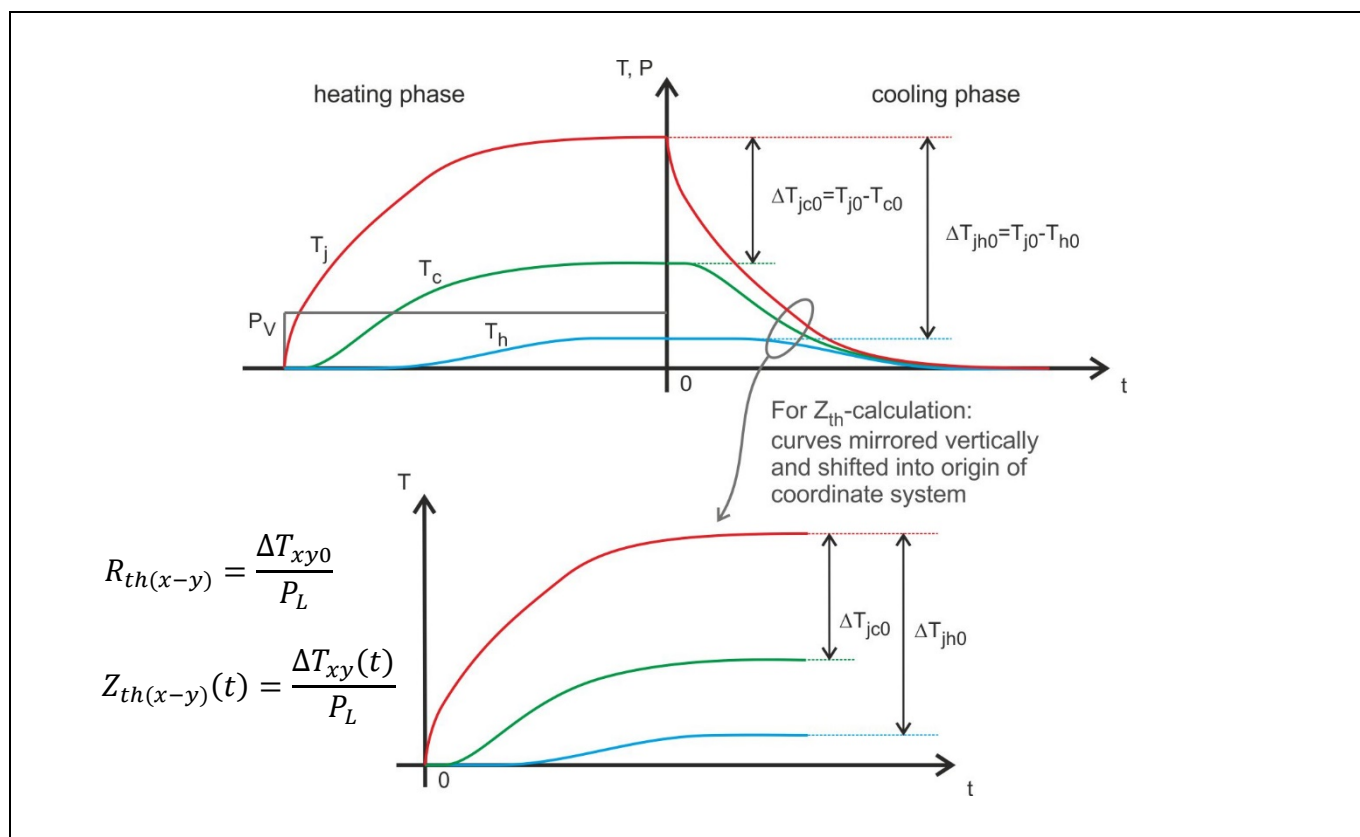


Figure 1 熱インピーダンス測定の基本原則

冷却段階でのジャンクション温度を決めるには、定義された測定電流 ( $I_{ref}$ : 約  $1/1000 I_{nom}$ ) をモジュールに流し、その結果得られる飽和電圧または順方向電圧を記録します。ジャンクション温度  $T_j(t)$  は、較正曲線  $T_j = f(V_{CE}/V_F @ I_{ref})$  を用いて測定された順方向電圧によって決まります。その逆曲線  $V_{CE}/V_F = f(T_j @ I_{ref})$  (Figure 2 参照) が、まず試験モジュールの外部からの一定の加熱によって記録されます。

熱インピーダンス曲線の決定

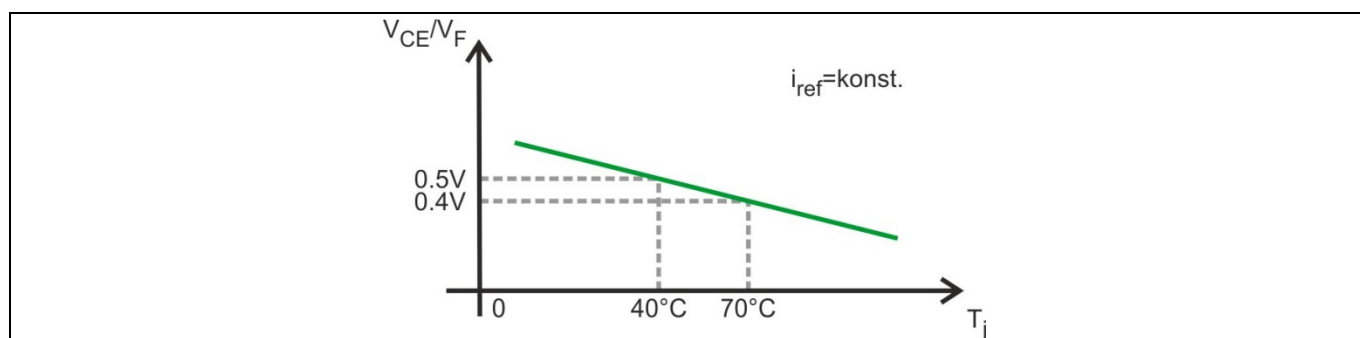


Figure 2 規定の測定電流で飽和電圧を測定し、ジャンクション温度を決定する較正曲線の例

ケース温度  $T_c$  とヒートシンク温度  $T_h$  は、熱電対によって決まります。熱電対は上部を除いて熱的に絶縁されています。この部分で、モジュールのベースプレートとヒートシンクにそれぞれ接しています (Figure 3、左)。いずれの場合も、熱電対の軸は各チップの中央に位置しています (Figure 3、右)。

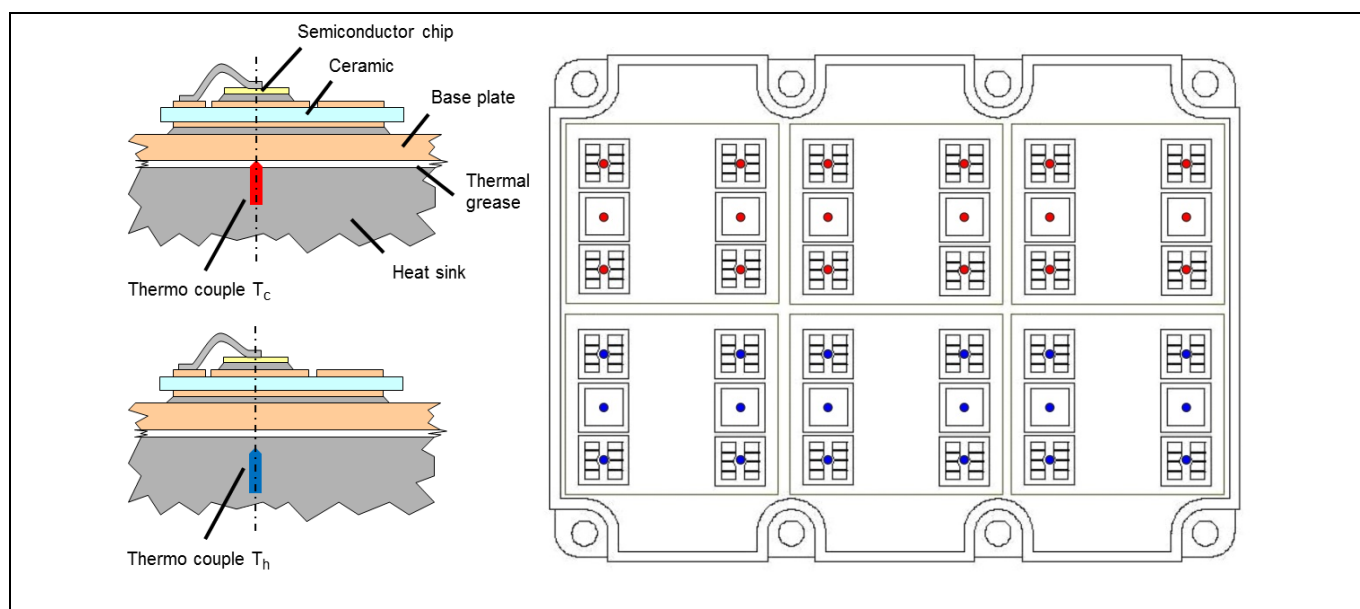


Figure 3 3.3 kV 140x190 mm<sup>2</sup> モジュールに基づくケース温度  $T_c$  とヒートシンク温度  $T_h$  の決定と熱電対の想定位置の例

## 1.2 $R_{th}/Z_{th}$ 測定の課題と最適化

$T_j$  と  $T_c$  を正確に測定するには、冷却開始と同時に測定することが要求されます。特にターンオフ直後は熱時定数が最も小さくなり  $T_{vj}$  が大きく変化するため、この時間帯の測定は非常に重要です。一方、この時間帯には発振も起こるため、測定は非常に難しくなります。また、寄生効果により、測定信号に過渡的な乱れが発生します。

こうした課題を克服するために改良された測定システム (Figure 4 参照) が使用されます。

熱インピーダンス曲線の決定

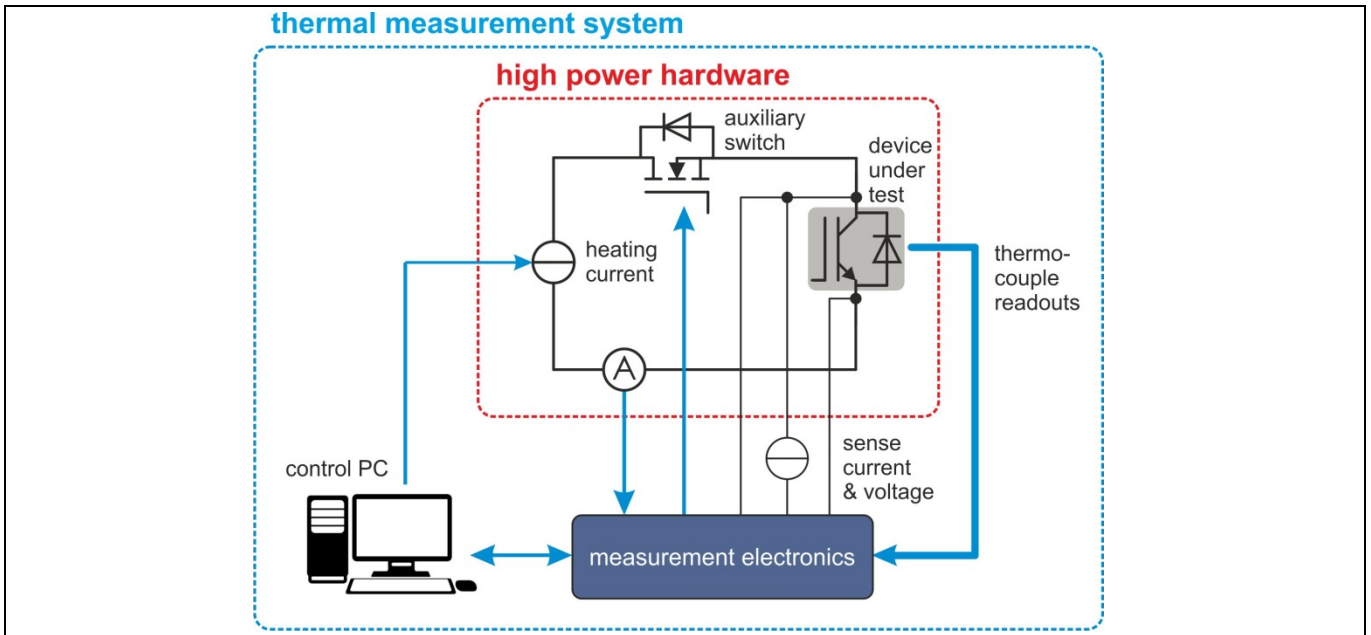


Figure 4 最適化されたアナログ/デジタル測定器

技術や製品の進歩に伴い、インフィニオンは  $R_{th}/Z_{th}$  の測定方法やシミュレーション方法を見直してきました。新しい測定装置を使用することで、IGBT モジュールの  $R_{th}/Z_{th}$  値のより正確な決定が可能になります。Figure 5 にその様子の簡略図を示します。  $t=0$  における  $T_j$  と  $T_c$  の差は、従来の測定システム A に比べて改良後の測定システム B の方が大きくなります。Figure 1 に見られるように、この温度差は熱抵抗  $R_{th}$  に比例し、熱インピーダンス  $Z_{th}$  にも影響します。

改良された測定システムは、冷却開始時でも正確なデータを決定できます。

モジュールの熱機械的挙動により、ケースとヒートシンク間の熱インピーダンス ( $Z_{thCH}$  および  $Z_{thJH}$ ) は温度依存性を持っています。モジュールは、一般的に半導体が最もよく使われる高温動作時に、ヒートシンクへの熱伝導が最もよくなるように最適化されています。したがって、データシートの条件は高温動作時のみを反映しています。低いケース温度で動作させる場合は、熱インピーダンスが著しく増加することがないか、ユーザー自身で測定しなければいけません。

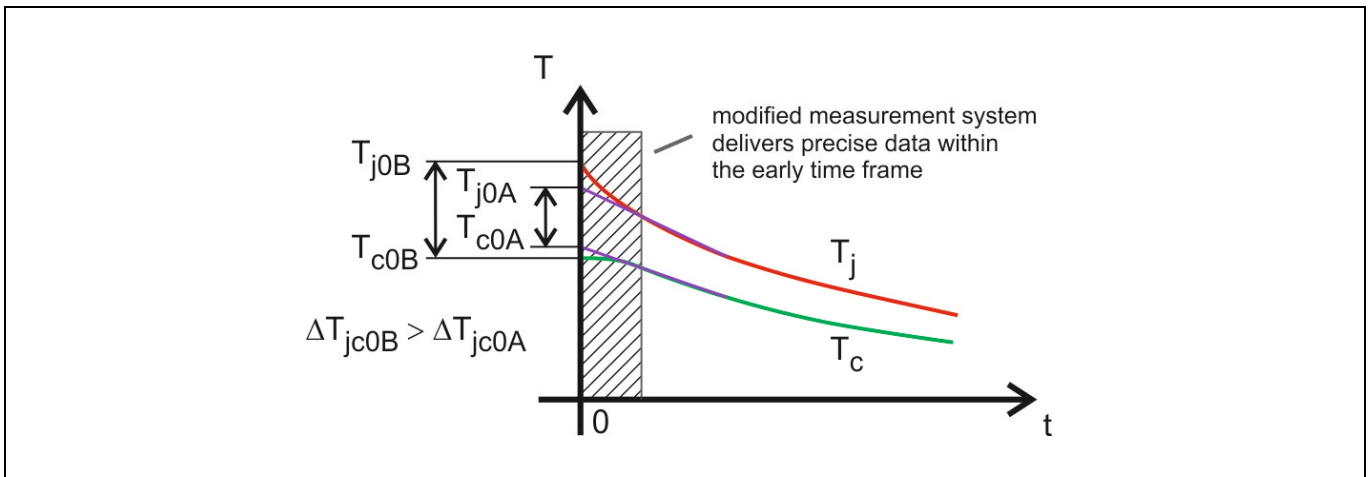


Figure 5 従来の測定システム (A) と変更後の測定システム (B) の比較

## 2 熱等価回路モデル

### 2.1 はじめに

半導体部品の熱特性は、様々な等価回路モデルを用いて記述できます。

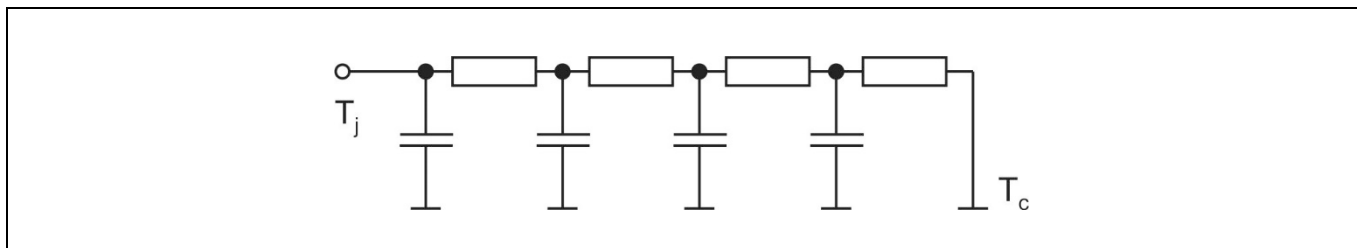


Figure 6 連分数回路 (別名: Cauer モデル, T モデル, またはラダーネットワーク)

連分数回路 (Figure 6) は、中間熱抵抗を持つ熱容量に基づく半導体の実際の物理的な設定を反映したものです。このモデルは、個々の層の材料特性が明確な場合に用いることができますが、その場合、個々の層での熱拡散の正しいマッピングが問題となります。個々の RC 要素は、モジュールの個々の層 (チップ, チップはんだ, 基板, 基板はんだ, ベースプレート) に割り当てることができます。そのため、ネットワークノードから層順の内部温度にアクセスできます。

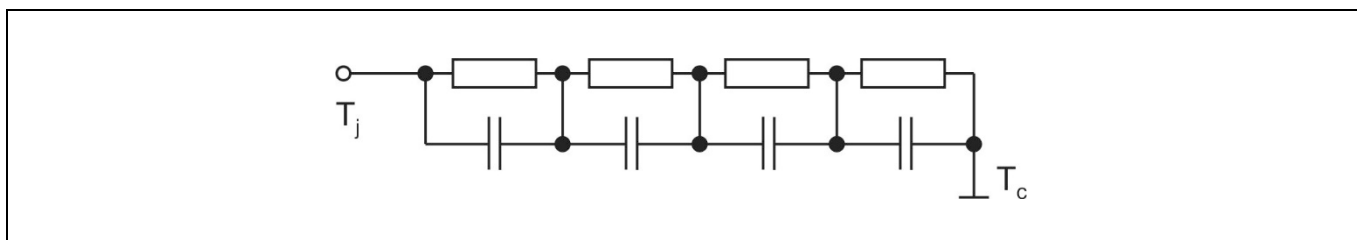


Figure 7 部分分数回路 (別名: フォスターモデル またはパイモデル)

連分数回路とは対照的に、部分分数回路の個々の RC 素子は各層を表すわけではなく、ネットワークのノードには物理的な意味はありません。この図は、モジュールの冷却曲線の測定値から係数を簡単に抽出することができ、データシートにも使用されています。さらに、解析的な計算にも利用できます。

部分分数モデルの熱インピーダンスは、次のように表すことができます。

$$Z_{th}(t) = \sum_{i=1}^n r_i \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \quad (1)$$

ここで、

$$\tau_i = r_i c_i \quad (2)$$

Figure 8 の例では、IGBT のモジュール データシートにおける  $Z_{th(j-c)}$  が部分分数モデルに基づいて指定されています。対応する係数は、抵抗 ( $r$ ) と時定数 ( $\tau$ ) の関数として表形式で提供されます。

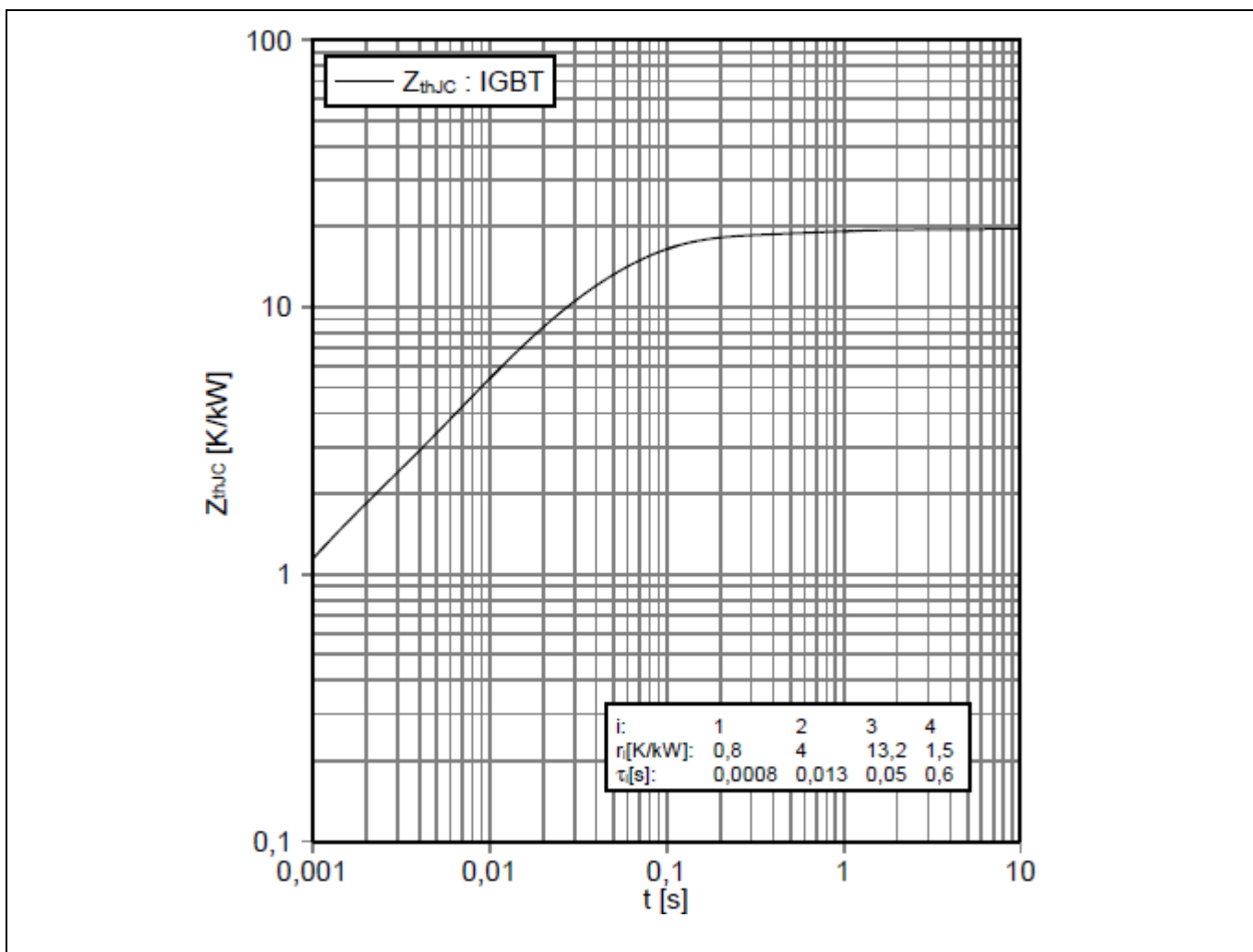


Figure 8 部分分数モデルを用いたデータシートでの熱インピーダンスの指定方法の例

特定のスイッチング損失および順方向損失  $P_L(t)$  を使い、ケース温度  $T_c(t)$  が既知であるとする、ジャンクション温度  $T_j(t)$  は次のように求めることができます。

$$T_j(t) = P_L(t) * Z_{th(j-c)}(t) + T_c(t) \tag{3}$$

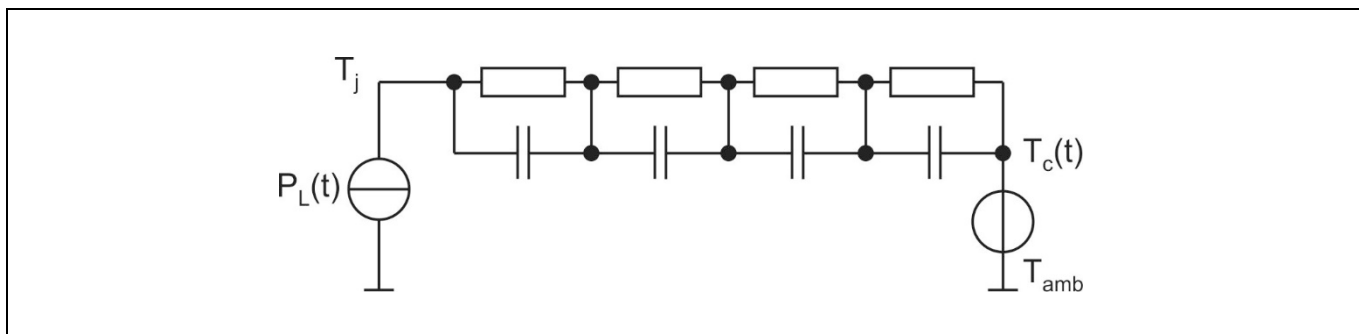


Figure 9 ケース温度  $T_c(t)$  が既知であると仮定して、与えられた損失  $P_L(t)$  に対して  $T_j(t)$  を決定するための部分分数モデル



### 熱等価回路モデル

ケースとヒートシンクの温度が一定であるという単純な仮定は、実際には、負荷時間がヒートシンクの時定数に比べて無視できるほど短くはないため、必ずしも成立するとは限りません。一定でない動作条件を考慮するためには、 $T_c(t)$ を測定するか、IGBT モデルとヒートシンクモデルを連携させる必要があります。

## 2.2 放熱グリスの考慮

どちらのモデルでも、ワーストケースの評価では、放熱グリスの  $Z_{th}$  は通常知られていないので、代わりに  $R_{th}$  が用いられます。部分分数モデルでキャパシタンスを無視すると、印加された電力が抵抗全体の温度低下を即座に引き起こします。温度と放熱グリス温度の両方が即座に一定値まで上昇しますが、これはシステムの物理的な挙動を示しているわけではありません。この問題を回避する方法は2つあります。

- ヒートシンクの  $Z_{th}$  を測定によって決定する場合、ヒートシンク温度  $T_h$  の代わりにケース温度  $T_c$  を使用する必要があります。この場合、放熱グリスによる影響もヒートシンクの測定に含まれるため、個別に考慮する必要はなくなります。
- IGBT の設定が可能で、電力損失  $P_L(t)$  が既知である場合、ケース温度  $T_c(t)$  を直接測定し、Figure 9 に従って計算に含めることができます。

## 2.3 半導体モジュールとヒートシンクのシステムモデルへの統合

測定の手間を省くため、既存の IGBT/ダイオードモデルと理想的なヒートシンクデータから熱システムモデルを作成することが多々あります。連分数モデルと部分分数モデルは、IGBT の「ジャンクション-ケース間」とヒートシンクの「ヒートシンク-周囲間」のそれぞれの伝達関数を表すことができます。IGBT とヒートシンクのモデルを組み合わせる場合、特に IGBT とヒートシンクが別々にモデル化されている場合は、2つのモデルのうちどちらを使用すべきか、という問いが生じます。

### 2.3.1 連続分数モデルを用いた熱システムモデル

連分数モデルとこのタイプの個々のモデルの連結は、順次加熱される個々の層の物理的な概念を視覚化します。熱流 (Figure 10 のモデルにおける電流) は、一定の遅れをもってヒートシンクに到達し、加熱されます。連分数モデルは、シミュレーションまたは測定された部分分数モデルからの変換によって実現できます。

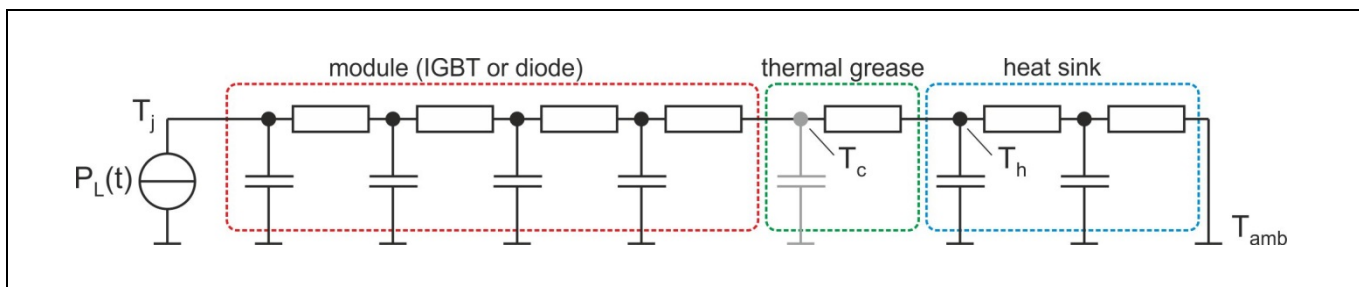


Figure 10 連分数モデルのシステムモデルへの統合

システム全体の各層の材料解析と FEM シミュレーションでモデルを構築することが一般的です。しかし、これは特定のヒートシンクデータを使用した場合にのみ可能で、ヒートシンクは半導体モジュール内の熱拡散に逆効果となり、モジュールの時間応答と  $Z_{th(j-c)}$  に影響を与えるからです。アプリケーションのヒートシンクがシミュレーションされたヒートシンクから逸脱している場合、モデルではこれを考慮しません。

通常データシートでは、測定および解析の結果である部分分数モデルが使用され、 $Z_{th(j-c)}$  は閉じた解として提供されます。部分分数モデルから連分数モデルへの数学的変換は可能です。この変換は一義的な



# 過渡熱測定と熱等価回路モデル

## AN2008-03 改訂版

### 熱等価回路モデル

ものではありません。様々な熱抵抗 ( $R_{th}$ ) および熱容量 ( $C_{th}$ ) 値の組み合わせが可能です。また、個々の  $R_{th}$  と  $C_{th}$  の要素、および新しい連分数モデルのノードポイントは、変換後に物理的な意味を持ちません。したがって、互いに調整されていない連続分数モデルのマージは、多くの異なるエラーを引き起こす可能性があります。

### 2.3.2 部分分数モデルを用いた熱システムモデル

データシートにあるような半導体モジュール、部分分数モデルは、特定のヒートシンクと組み合わせた測定が基本とします。空冷式ヒートシンクはモジュール内の熱流の広がり広いため、測定ではより良い、つまり低  $R_{th(j-c)}$  になりますが、水冷式ヒートシンクでは熱の広がりが制限されるため、測定においては比較的高い  $R_{th(j-c)}$  値となります。特性評価に水冷バーを使用することで、インフィニオンのデータシートに記載されている部分分数モデルは、比較的に不利な動作モードを表し、これは安全側、つまりモジュールに有利な評価を意味します。

ネットワークが直列に接続されているため (Figure 11)、電流で表される等価回路では、ジャンクションに印加されるパワーは遅滞なくヒートシンクに到達します。そのため、早い段階から、ジャンクション温度の上昇はヒートシンクモデルの種類に依存することになります。

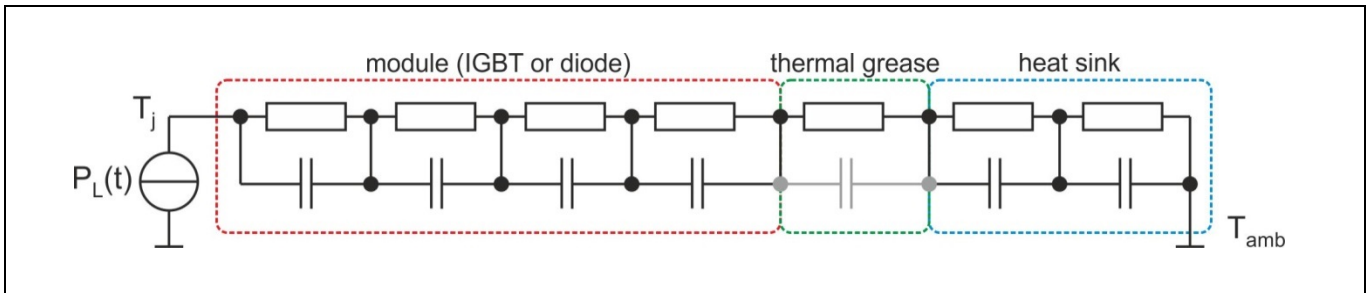


Figure 11 連分数モデルのシステムモデルへの統合

しかし、空冷式の場合、ヒートシンクの時定数は約 10 秒から数 100 秒と、IGBT 本体の約 1 秒を大きく上回っており、計算されたヒートシンクの温度上昇は、IGBT の温度をごくわずかしき変えません。一方、水冷システムは、熱容量が比較的小さく、時定数も小さいため、非常に重要です。「非常に速い」水冷式ヒートシンク、すなわち半導体モジュールのベースプレートを直接水冷するシステムの場合、半導体モジュールとヒートシンクの完全なシステムの  $Z_{th}$  測定を行う必要があります。

モジュール内の熱拡散に逆効果となるため、連分数モデルでも部分分数モデルでも、半導体モジュールとヒートシンクを誤りなしにリンクさせられないのです。この問題を克服する方法は、半導体モジュールとヒートシンクの  $Z_{th}$  を相互依存的にモデル化または測定することです。熱インピーダンス  $Z_{th(j-a)}$  を測定することによって、つまり、ジャンクションから半導体モジュール、放熱グリス、ヒートシンク、周囲温度までの熱経路を同時に測定することによってのみ、誤りのない熱システムモデルが得られます。これにより、システム全体の部分分数モデルを得ることができ、このモデルでジャンクション温度を誤りなく計算できます。

参考文献

### 3 参考文献

- [1] IEC 60747-9 Ed. 2.0 (6.3.13.1) ‘Semiconductor devices - Discrete devices - Part 9: Insulated-gate bipolar transistors (IGBTs) [3]

### 改訂履歴

### 改訂履歴

| 版数    | 発行日        | 変更内容                                                                                                            |
|-------|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| V 1.2 | 2023-04-27 | これは英語版 AN2015-10 Transient thermal measurements and thermal equivalent circuit models V 1.2 を翻訳した日本語版 V 1.2 です。 |

## Trademarks

All referenced product or service names and trademarks are the property of their respective owners.

**Edition 2023-04-27**

**Published by**

**Infineon Technologies AG**

**81726 Munich, Germany**

**© 2023 Infineon Technologies AG.**

**All Rights Reserved.**

**Do you have a question about this document?**

**Email: [erratum@infineon.com](mailto:erratum@infineon.com)**

**Document reference**

**AN2015-10**

## 重要事項

本手引書に記載された本製品の使用に関する手引きとして提供されるものであり、いかなる場合も、本製品における特定の機能性能や品質について保証するものではありません。本製品の使用前に、当該手引書の受領者は実際の使用環境の下であらゆる本製品の機能及びその他本手引書に記載された一切の技術的情報について確認する義務が有ります。インフィニオンテクノロジーズはここに当該手引書内で記される情報につき、第三者の知的所有権の不侵害の保証を含むがこれに限らず、あらゆる種類の一切の保証および責任を否定いたします。

本文書に含まれるデータは、技術的訓練を受けた従業員のみを対象としています。本製品の対象用途への適合性、およびこれら用途に関連して本文書に記載された製品情報の完全性についての評価は、お客様の技術部門の責任にて実施してください。

## 警告事項

技術的要件に伴い、製品には危険物質が含まれる可能性があります。当該種別の詳細については、インフィニオンの最寄りの営業所までお問い合わせください。

インフィニオンの正式代表者が署名した書面を通じ、インフィニオンによる明示の承認が存在する場合を除き、インフィニオンの製品は、当該製品の障害またはその使用に関する一切の結果が、合理的に人的傷害を招く恐れのある一切の用途に使用することはできないこと予めご了承ください。