パワーデバイス

抵抗負荷を駆動する IGBT のスイッチング損失の算出

IGBT が使用されるほとんどのアプリケーションでは、デバイスは誘導負荷をスイッチングします。データシートやシミュレーションモデルは、このような動作を想定して作成されています。しかし、電気自動車に使用される高電圧（HV）ヒーター市場を中心に、IGBT を抵抗負荷の駆動に使用することへの関心が高まっています。HV ヒーターは、加熱電力の調整に IGBT を使用しています。IGBT は、主に抵抗負荷のオン・オフを切り替えます。デバイスの故障を回避するためには、ターンオンとターンオフ時の損失を適切に算出する必要がありますが、一般的な損失算出法はこの場合には適用できません。このアプリケーションノートでは、このような動作条件を考慮してスイッチング損失と瞬時ジャンクション温度を推定する確実な方法を紹介します。

理想スイッチのスイッチング動作 - 誘導負荷と抵抗負荷

誘導負荷と抵抗負荷の違いを理解しやすくするため、ここでのスイッチング動作は「理想的な」スイッチとダイオードとして考えます。これを考慮して、誘導負荷スイッチングのターンオン動作時の電圧 V と電流 I の波形を Figure 1a に示します。この動作モードの主な特徴は、負荷電流 I_L に達してから電圧 V が減少し始めることです。逆に、ターンオフ時には、電流が減少するためには、電圧 V が DC リンク電圧 V_{dc} に到達しなければなりません。この場合の瞬時電力ピークは、$P_{max} = V_{dc}\, I_L$ になります。

抵抗負荷スイッチング波形は、Figure 1b に示すように大きく異なります。ここで、オームの法則より係数 V/I は一定で負荷抵抗 R と等しくなければなりません。デバイスの最大ストレスは、スイッチング動作の中間で発生し、$P_{max} = \frac{1}{4} V_{dc}\, I_L$ になります。合計スイッチング電力は次式で表すことができます。

$$E_{id} = \frac{1}{6} V_{dc}\, I_L\, t_{sw} \qquad (1)$$

抵抗負荷を駆動する IGBT のスイッチング波形

ご存じの通り、IGBT は理想的なスイッチとして動作するものではありません。誘導負荷スイッチングの場合、IGBT ターンオフ時の「テール電流」がその良い例です。IGBT で抵抗負荷を駆動する場合、その損失は理想的な場合よりも高くなります：

$$E_{on} = E_{off} = \frac{1}{6} V_{dc}\, I_L\, t_{sw} + E_{cm} \qquad (2)$$

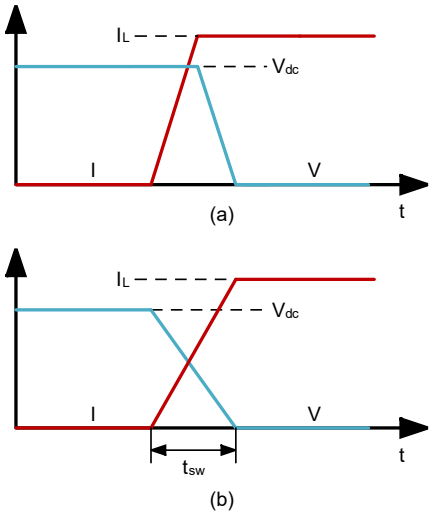


Figure 1. (a) 誘導負荷スイッチングと (b) 抵抗負荷スイッチングの理想的なターンオン波形

ここで、E_{cm} は IGBT の伝導度変調過程による損失を表します。IGBT では、コレクタからデバイスのドリフト領域へのキャリア注入により、デバイスがオンになったときの伝導度が向上します。これは、デバイスがオンになるたびに起こる動的な過程です。この過程の間、デバイスは時間依存の可変抵抗として動作します。詳細な説明については、[1]を参照してください。

ターンオン時の IGBT の波形の例を Figure 2に示します。理想スイッチと実際のデバイスの主な違いは、伝導度変調が起こる第 III フェーズで見出すことができます。このフェーズは IGBT 技術に依存し、その持続時間はゲート電流に反比例します。

選択したデバイスとその動作条件によっては、追加損失 E_{cm} がかなり大きくなる可能性があります。Figure 3 の場合、式(1)に従って計算された理想的な損失 E_{id} は 83mJ ですが、合計損失 E_{on} は 142mJ です。従って、E_{cm} は E_{id} よりも 20%少ない 59mJ にもなります。ただし、これは極端な例であり、1200V IGBT を 470V の電圧で駆動していることに注意してください。

© 2024 ROHM Co., Ltd.

No. 67AN059J Rev.002
2024.10

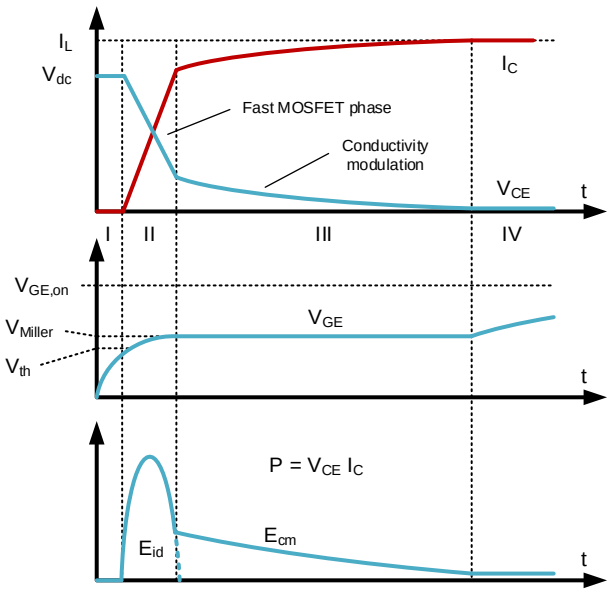


Figure 2. IGBT の抵抗負荷ターンオン波形（簡略図）

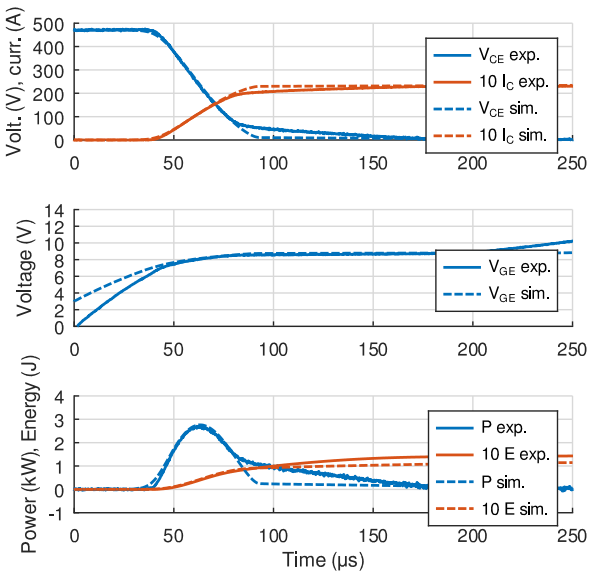


Figure 3. IGBT RGS80TSX2DHRC11 のターンオン波形
470V、23.5A、t_{sw}=45µs 時
R_G=23kΩでの実測と R_G=34kΩでのシミュレーションに基づく
損失 E_{on}=142mJ（実測）vs. E_{on}=115mJ（sim.）

SPICEモデル：抵抗負荷駆動の検証に十分か？

理想的な波形がスイッチング損失を算出するのに十分なほど IGBT の挙動を正確に反映していないことを理解した上で、ROHM が提供する SPICE ベースの IGBT モデルが抵抗負荷駆動に対してどの程度正確であるかを評価する必要があります。実測波形とシミュレーション波形を比較した際の最初の問題は、同じ R_G 設定値の場合、シミュレーションでは IGBT が実測よりも速くスイッチングすることです：38µs（シミュレーション）vs. 45µs（実測）。これを補正するために何もしなければ、損失は過小評価されることになります：82mJ（シミュレーション、図示せず）vs. 142mJ（実測）。

シミュレーションモデルの R_G 設定値を23kΩから34kΩに増やすと、両方のスイッチング時間（実測とシミュレーション）が一致します（Figure 3参照）。SPICE モデルでは伝導度変調のフェーズが正確に再現されないため、E_{on} 損失が19%低くなります。スイッチング時間の調整は理想的な波形で考えるよりも正確ですが、それでも適切な損失算出には十分ではありません。標準的な IGBT モデルの抵抗負荷駆動に対するこのような不正確さは既知の制約であり、[1]で議論されています。

提案するスイッチング損失の算出方法

理想的な波形もシミュレーション波形も、スイッチング損失を正確に算出するのに必要な IGBT の挙動を適切に反映していないため、ここでは測定値からデバイス損失を抽出し、等価 RC サーマルネットワークを使用してワーストケースの動作条件に基づいて温度スイングを再現するハイブリッド法を提案します。

Part 1：実測波形の取得

Figure 4のようにターンオンとターンオフ時の V_{CE} と I_C 波形を取得するために、抵抗負荷を駆動する IGBT のシングルパルス試験を実施します。IGBT は、デバイスが動作する温度を反映するように外部から加熱する必要があります。通常、100～150℃の値を選択します。R_G 設定値が大きい場合、ジャンクション温度の絶対最大定格に近い温度を設定すると、ターンオンまたはターンオフの際に大きな温度スイングにより破壊する可能性があります。

ここで他に考慮すべき重要な条件は DC リンク電圧 V_{dc} であり、アプリケーションにおける IGBT のワースト条件に従って選択する必要があります。HV ヒーターの場合、Figure 5の電力/電圧平面で最高の T_j をもたらす動作点は以下のとおりです：

1. ディレーティングなしで許容される最高電圧での最大電力動作 $(P_{max}, V_{max,FP})$。
2. 絶対最大定格電圧とその電圧で許容される最大電力 (P_{max2}, V_{max})。
3. 絶対最大定格電圧と最小 Duty サイクル（$P \rightarrow 0$, V_{max}）。

これは、少なくとも2つの異なる DC リンク電圧 V_{dc} を考慮しなければならないことを意味します。IGBT の特定の動作条件によっては、関連する他の電圧もチェックする必要があります。

© 2024 ROHM Co., Ltd.

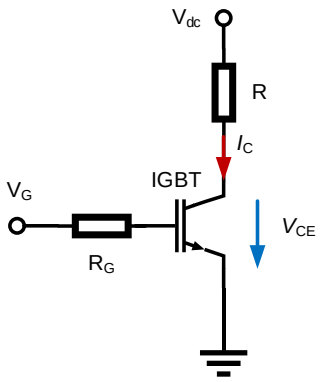


Figure 4. 抵抗負荷スイッチング特性評価用回路図

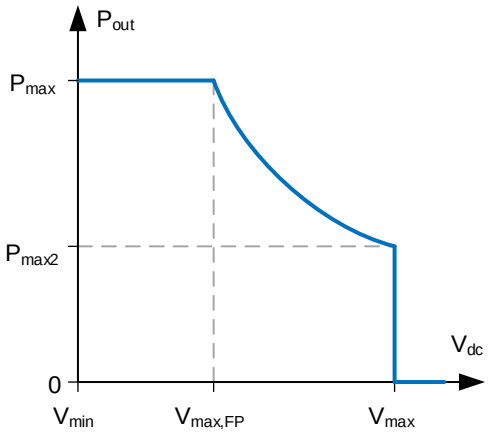


Figure 5. HV ヒーターで使用される出力電力 P_{out} vs. DC リンク電圧 V_{dc} 例示図

Part 2：スイッチング波形の取得後処理

代表的なデバイスのものではなく、ワーストケースの条件を反映するように、実測により得られた波形を調整することを推奨します。具体的には以下の手順を推奨します：

1. 取得した波形から、ターンオンとターンオフ両方のスイッチング過程を抽出する。
2. 電圧と電流を掛け合わせて瞬時電力波形を求める：

$$P(t) = V_{CE}(t)\, I_C(t) \qquad (3)$$

3. スイッチング損失が大きい分布外れデバイスの可能性を考慮して、$P_{on(t)}$と $P_{off(t)}$の期間に20%の安全マージンを加える。

Part 3：ワーストケースの動作条件における瞬時電力波形の合成

デバイスの最大ジャンクション温度を推定する通常の方法は、ターンオン損失、ターンオフ損失、および導通損失を計算し、それらを加算して冷却条件に基づいてジャンクション温度 T_jを計算することです。しかし、この方法は、HV ヒーターなどのアプリケーションで一般的に使用されるような、kΩレンジの非常に高いゲート抵抗値で IGBT をスイッチングする場合には適していません。合計損失を使用した場合、デバイスの温度スイングを無視した平均 T_j 値が得られます。この温度スイングは大きく、無視すべきではありません。

この目的のためにより良い方法は、前節で得られた電力波形 P_{on} と P_{off} を導通損失と組み合わせて、瞬時 T_j 波形を推定することです。

$$P_{cond} = V_{CE,sat}\left(I_{max}, T_{J,cond}\right) \cdot I_{max} \qquad (4)$$

ここで、$V_{CE,sat}$ は、想定される最大負荷電流 I_{max} と導通期間中に想定される最大ジャンクション温度 $T_{J,cond}$ におけるデバイスの C-E 間飽和電圧です。このステップを簡略化するために、データシートに記載されている T_j=175°C における $V_{CE,sat}$ 値をワーストケースの推定値として使用することもできます。

瞬時電力波形の合成の最終ステップは、P_{on}、P_{cond}、および P_{off} を結合して、本節の Part 1に示したようなデバイスのワーストケースの動作条件を反映することです。

最終的な $P(t)$波形は、Figure 6のようになります。この波形では、サイクルが再開されるまでのデバイスがオフになっている時間も考慮しています。

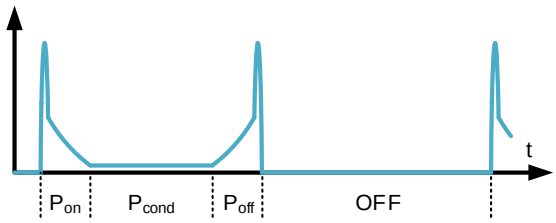


Figure 6. 測定したターンオンとターンオフの過程と導通損失の算出値から合成された瞬時電力波形

Part 4：RC サーマルネットワークへの電力波形の入力

瞬時電力波形 $P(t)$を作成した後、これをデバイスと冷却条件を表現したサーマルネットワークに周期的に印加します。この目的で使用したシミュレーション回路と、その結果の P および T_j 波形の例を Figure 7 に示します。これは IGBT RGS50TSX2DHRC11の測定値に基づいて作成されており、条件の詳細はキャプションに示しています。

Part 5：シミュレーション結果の評価

瞬時温度 T_j をプロットすれば、デバイスが仕様の範囲内で動作しているかどうかを簡単に評価できます。ROHM 製 IGBT の絶対最大定格 T_j は175℃です。スイッチング過程を含め、この温度上限は常に遵守する必要があります。経験則として、ピーク値を160°C 以下に保つことで、安全マージンとデバイスの使用率の良いバランスが得られます。

© 2024 ROHM Co., Ltd.

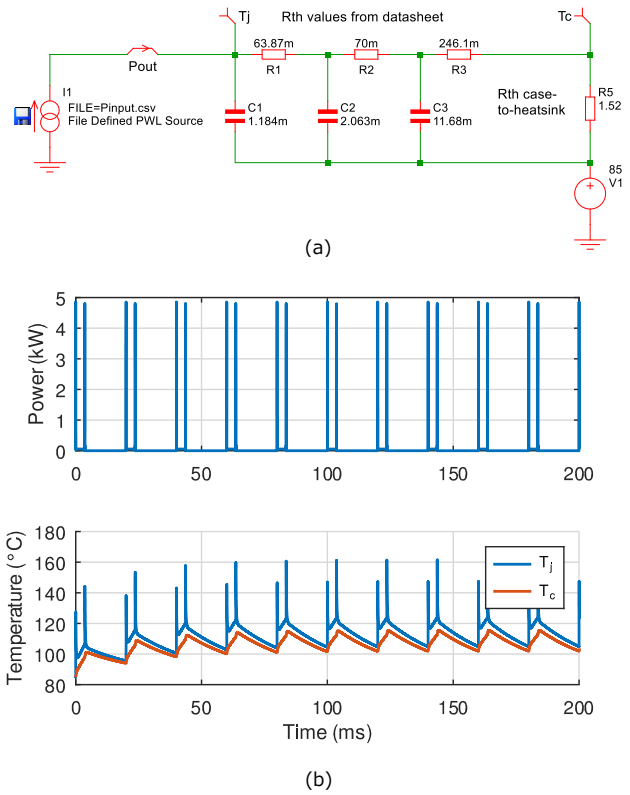


Figure 7. 提案手法の結果例: (a) SIMetrix-SIMPLIS のシミュレーション回路、(b) 電力 P と温度 T_C と T_J 波形 (IGBT RGS50TSX2, R_G=5.6kΩ, V_{dc}=865V, R=50Ω, f_{sw}=50Hz, duty cycle D=0.18, $R_{th,c\text{-}h}$=1.52K/W, T_h=85°C)

まとめ

このアプリケーションノートでは、抵抗負荷を駆動する IGBT のスイッチング損失を正しく算出することは容易ではないことを示しました。損失や温度の過小評価につながるいくつかの障害があります。これを克服するために、測定に基づく方法を提案しました。本手法を、設計者が適切な IGBT を選択し、それに応じて冷却回路を設計するのに役立てていただければ幸いです。

パワーデバイスの熱設計に関する ROHM のドキュメントは他にも数多くあり、確認して理解しておく価値があります。最も関連性の高いドキュメントの概要は [2] に記載されています。

参考文献

[1] A. T. Bryant, L. Lu, E. Santi, J. L. Hudgins and P. R. Palmer, "Modeling of IGBT Resistive and Inductive Turn-On Behavior," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 44, no. 3, pp. 904-914, May-june 2008, doi: 10.1109/TIA.2008.921384

[2] 「パワーデバイスの熱設計を成功に導く4つのステップ」、ローム株式会社、日本、White paper 64WP009J、2022年 [オンライン]

© 2024 ROHM Co., Ltd.

ご 注 意

1) 本資料に記載されている内容は、ロームグループ(以下「ローム」という)製品のご紹介を目的としています。ローム製品のご使用にあたりましては、別途最新のデータシートもしくは仕様書を必ずご確認ください。

2) ローム製品は、一般的な電子機器(AV機器、OA機器、通信機器、家電製品、アミューズメント機器等)もしくはデータシートに明示した用途への使用を意図して設計・製造されています。したがいまして、極めて高度な信頼性が要求され、その故障や誤動作が人の生命、身体への危険もしくは損害、またはその他の重大な損害の発生に関わるような機器または装置(医療機器、輸送機器、交通機器、航空宇宙機器、原子力制御装置、燃料制御、カーアクセサリーを含む車載機器、各種安全装置等)(以下「特定用途」という)にローム製品のご使用を検討される際は事前にローム営業窓口までご相談くださいますようお願いいたします。ロームの文書による事前の承諾を得ることなく、特 定用途にローム製品を使用したことによりお客様または第三者に生じた損害等に関し、ロームは一切その責任を負いません。

3) 半導体を含む電子部品は、一定の確率で誤動作や故障が生じる場合があります。万が一、誤動作や故障が生じた場合であっても、人の生命、身体、財産への危険または損害が生じないように、お客様の責任においてフェールセーフ設計など安全対策をお願いいたします。

4) 本資料に記載された応用回路例やその定数などの情報は、ローム製品の標準的な動作や使い方を説明するためのもので、実際に使用する機器での動作を明示的にも黙示的にも保証するものではありません。したがいまして、お客様の機器の設計において、回路やその定数及びこれらに関連する情報を使用する場合には、外部諸条件を考慮し、お客様の判断と責任において行ってください。これらの使用に起因しお客様または第三者に生じた損害に関 し、ロームは一切その責任を負いません。

5) ローム製品及び本資料に記載の技術を輸出または国外へ提供する際には、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」など適用される輸出関連法令を遵守し、それらの定めにしたがって必要な手続きを行ってください。

6) 本資料に記載された応用回路例などの技術情報及び諸データは、あくまでも一例を示すものであり、これらに関する第三者の知的財産権及びその他の権利について権利侵害がないことを保証するものではありません。また、ロームは、本資料に記載された情報について、ロームもしくは第三者が所有または管理している知的財産権その他の権利の実施、使用または利用を、明示的にも黙示的にも、お客様に許諾するものではありません。

7) 本資料の全部または一部をロームの文書による事前の承諾を得ることなく転載または複製することを固くお断りいたします。

8) 本資料に記載の内容は、本資料発行時点のものであり、予告なく変更することがあります。ローム製品のご購入及びご使用に際しては、事前にローム営業窓口で最新の情報をご確認ください。

9) ロームは本資料に記載されている情報に誤りがないことを保証するものではありません。万が一、本資料に記載された情報の誤りによりお客様または第三者に損害が生じた場合においても、ロームは一切その責任を負いません。

ローム製品のご検討ありがとうございます。
より詳しい資料やカタログなどご用意しておりますので、お問い合わせください。

ROHM Customer Support System

https://www.rohm.co.jp/contactus

© 2023 ROHM Co., Ltd. All rights reserved.