

IGBTの並列接続

AND9100/D

はじめに

ハイ・パワー・システムでは、数十kWから時には数百kWの負荷に適切に対処するために、IGBTを並列接続する必要が生じます。並列接続する複数のデバイスとして、個別パッケージのデバイス、または単一モジュール内に封入されたベア・チップを使用できます。このような構成を採用するのは、高い電流定格を達成し、放熱を改善し、時には冗長性を確保することが目的です。パーツ間のプロセスの変動、およびレイアウトの変動は、並列接続されたデバイスの静的および動的な電流共有特性に影響します。信頼性の高いシステム設計を実現できるように、システム設計技術者がこれらの事項を理解することが重要です。

この資料では、プロセスと温度に起因する変動の種類、およびそれらがIGBTの電力共有にどのような影響を及ぼすかを検討します。また、いくつかの経験的なデータと、電力共有に関する暗黙的な前提にも注目します。複数のIGBTモジュール間の差異と、個別パッケージ化されたIGBTの並列接続についても検討します。

IGBTの並列接続を必要とするアプリケーションでは、損失を均衡した形で共有する能力が主要な目標になります。損失が均衡した形で共有されない場合、デバイス間で生じる発熱の差異が、他の問題やトランジスタ障害の可能性につながります。不均衡には2つの発生源があります。IGBT内部に由来する原因は、適切なデバイスを選択することで対処でき、IGBTの外部に由来する原因は、適切なシステム設計によって対処できます。この資料では、両方の発生源を扱います。

静的な変動

IGBTの静的な考慮事項に関して、2つのパラメータを理解することが重要です。 $V_{CE(SAT)}$ の変動、および第1象限での動作中に生じるトランスコンダクタンスの変動です(Figure 2とFigure 3を参照)。

$V_{CE(SAT)}$ は、IGBTの導通損失を制御する重要なパラメータです。導通損失は、損失全体に対する寄与率が高く、その結果、デバイスの放熱に大きく寄与するからです。 $V_{CE(SAT)}$ は、通常は25°C時と定格接合部温度、場合によっては第3の温度でも規定されます。一般的に、25°C時の代表値と最大値が示され、他の温度では代表値のみが示されます。

トランスコンダクタンスも、デバイスごとに異なります。このパラメータは、ゲート電圧の変化に対応するコレクタ電流の変化として定義されます。このパラメータは決して一定ではなく、通常は代表

的な曲線がデータシートに図示されます。Figure 1のグラフに示すとおり、温度によっても変動します。トランスコンダクタンスの変動は、 $V_{CE(SAT)}$ の変動に等しくなります。

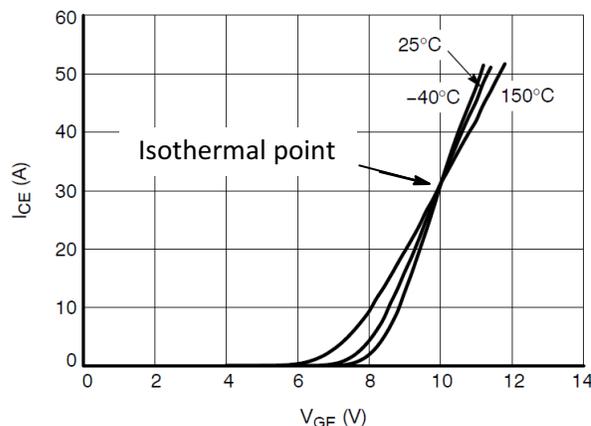


Figure 1. Typical IGBT Transfer Characteristics
 $V_{GE} = 20\text{ V}$

IGBTの $V_{CE(SAT)}$ は、トランジスタの導通損失に直接関係することから、静的変動を計算するときを使用する主要な静的パラメータになります。トランスコンダクタンスは一般に代表値のみ規定され、パーツ間の変動に関する情報は得られません。一方、 $V_{CE(SAT)}$ は通常は温度範囲にわたって規定され、パーツの変動データも得られます。ほとんどのメーカーは25°C時の代表値と最大値のみを示していますが、オンセミ(onsemi)は通常は並列接続アプリケーションで使用されるIGBTに関して最小値と最大値を規定しています。 $V_{CE(SAT)}$ の最小値は単独デバイスではそれほど重要ではありませんが、最小値が利用できる場合は特定の制限を想定してこの損失を詳細に分析できることから、複数のデバイスを並列接続する場合は非常に有用です。

温度係数についてまだ説明していませんが、ノンパンチスルーIGBTは正の温度係数を持つので、飽和電圧が低い状況でIGBTの発熱により温度の不均衡が生じた場合でも、 $V_{CE(SAT)}$ の差異が最小化されることに注意してください。

他の静的変動は、逆並列レクティブファイヤの順方向電圧降下です。ほとんどのハード・スイッチング・アプリケーションのダイオードは、第3象限の電流を導通させる必要があります。

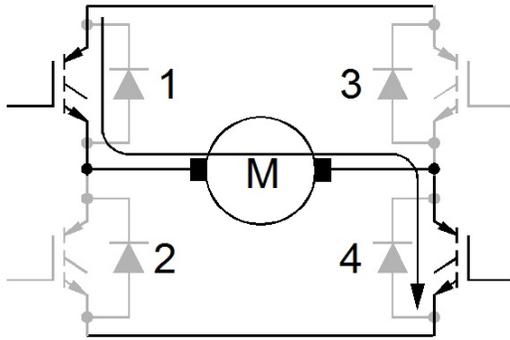


Figure 2. First Quadrant Conduction of IGBTs

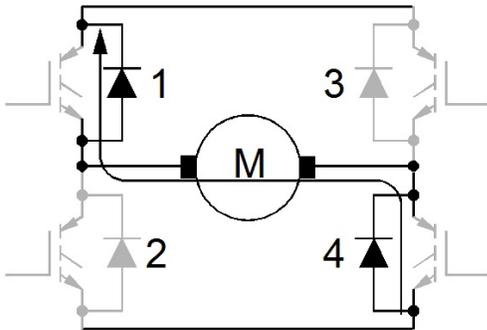


Figure 3. Third Quadrant Conduction of Diodes

逆並列ダイオードは通常、IGBTとの共通パッケージ型ですが、特定の状況では個別パッケージにすることもあります。共通パッケージ型デバイスの場合、ダイオードの順方向特性はIGBTのデータシートに記載されます。変動に関する情報量は、デバイスごとに異なります。多くの場合は、電気的特性のセクションに代表値と最大値が示され、代表的特性のセクションに、温度範囲にわたる一連の曲線が掲載されます。

動的な変動

損失の動的成分は、ターンオン損失、ターンオフ損失、およびダイオードの逆回復損失です。ターンオン損失とターンオフ損失は、ゲート・ドライブ回路である程度制御できます。ゲート電圧とドライブ・インピーダンスはどちらも、これらの損失を調整する目的で変化させることができるシステム・パラメータです。

コレクタの立上り時間は通常は10~50 nsの範囲内であり、立下り時間は一般に立上り時間の3~8倍遅くなります。立上り時間と立下り時間は、ゲート・ドライブ・レベルとインピーダンスの影響を受けるので、スイッチング速度の差異を最小化するために、並列接続されたすべてのデバイスで信号をマッチングさせることが重要なパラメータになります。

並列接続されたデバイスのスイッチング速度をできるだけマッチングさせるために、適切なレイアウト手法が不可欠です。この目標を達成するために、レイアウトをできるだけ対称にして、寄生インダク

タンスを可能な限りマッチングさせる必要があります。エミッタ・パスからグラウンドへの配線で、インピーダンスとインピーダンス不整合を最小化することが非常に重要です。電流センス・トランスを使用している場合は、トランスをコレクタ・パスに接続する必要があります。電流センス抵抗を使用する場合は、一般的にエミッタ・パスに接続する必要がありますが、これらの抵抗が非誘導性抵抗でレイアウトのバランスがとれている限り、問題が生じることはありません。

適切なレイアウトでは、各デバイスのサーマル・パスもできるだけマッチングさせる必要があります。例えば、あるデバイスをヒートシンクの端、別のデバイスをヒートシンクの中央に配置するのではなく、できるだけヒートシンクに関して対称的な位置に配置してください。

動的損失の変動は、複数のパラメータに由来します。デバイス間のスイッチング速度には、ダイゴとおよびウェハごとに本質的な差異が存在します。また、立上り時間と立下り時間の変動を生じさせる、トランスコンダクタンスの差異も存在します。これは、 V_{th} の差異とみなすこともできます。ゲート電圧は、トランスコンダクタンス曲線を示すグラフで一方の軸にあるからです。

前述したエミッタ・インダクタンスの変動に加えて、ゲートのインダクタンスと抵抗に関するあらゆる変動は、ゲート信号の不均衡を招きます。

熱係数

IGBTを並列接続する場合、熱係数は重要なパラメータです。電流共有が可能になるように、正の温度係数を持つ必要があります。これは、Figure 1の等温ポイントより上の領域です。正の温度係数が大きい場合は、電流共有の均衡性が高まりますが、温度上昇に伴って $V_{CE(SAT)}$ が増大するので、高電流時には損失が増加します。

負の温度係数は安全ではありません。並列接続されたデバイスのいずれかが他のデバイスより高温になった場合は、そのデバイスの導通性が高くなり、より多くの電流が流入するため、ますます温度が上昇します。よくても大きな熱的不均衡が発生し、最悪の場合はデバイスが故障することがあります。

特定のデバイスを選択すると、具体的なトランスコンダクタンス曲線が決まりますが、ゲート・ドライブ電圧を調整して温度係数を変動させることが可能であり、その結果、動作ポイントを移動して等温ポイントに近付けたり、遠ざけることができます。もちろん、ゲート・ドライブ電圧を変動させると、 $V_{CE(sat)}$ とスイッチング速度にも影響します。

温度係数が高い場合は、導通期間中の電流共有は改善されますが、電力レベルが高いと電力損失が大きくなるというトレードオフが存在します。安全な並列接続動作を実現するには、正の温度係数が必須です。

データシートに掲載されているトランスコンダクタンス(または伝達特性)曲線は、特定のゲート・ドライブ信号に対応するコレクタ電流の変化に関する

情報を示します。Figure 4に、NGTB15N60S1ETG IGBTのトランスコンダクタンス曲線を示します。

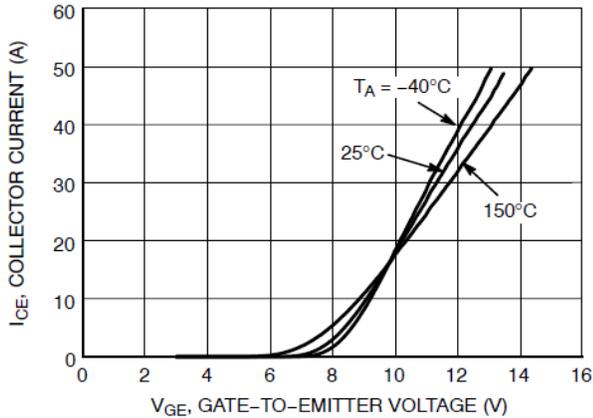


Figure 4. Temperature Coefficient from Transconductance Curves

ゲート電圧が9 V、9.8 V、11 V、および12 Vのときの電流をグラフから読み取ると、Figure 5のグラフを生成できます。9.8 Vを選択したのは、この電圧が温度係数が0の場合の等温ポイントだからです。

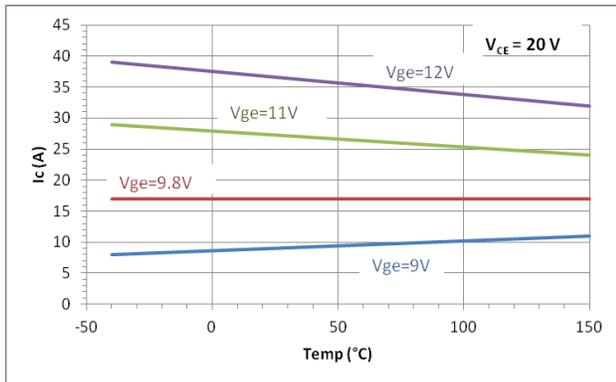


Figure 5. Collector Current Temperature Coefficient for the NGTB15N60S1ETG

このポイントで、インピーダンスまたは $V_{CE(SAT)}$ の各パラメータに関して、正の温度係数が望ましいことを理解する必要があります。上記の曲線は電流の変化に対応するものであり、このパラメータに関しては負の係数が必須です。この場合の負の係数は、適用されたコレクタ-エミッタ間電圧に関して、温度が上昇すると電流が減少することを意味しますが、適切な電流共有を達成するにはこの特性が必須です。

Figure 5から、ゲート・ドライブ電圧が9.8 Vを上回っている場合はゲート・ドライブ電圧が大きくなるほど電流の温度係数の傾きが大きくなり、より良い電流共有が達成されることを理解できます。

温度係数に注目するもう1つの方法は、ゲート電圧を固定して、コレクタ-エミッタ間電圧と温度をプ

ロットすることです。IGBTのデータシートには通常、高温、室温、低温の極値で、さまざまなゲート・ドライブ電圧に関して、コレクタ電流とコレクタ-エミッタ間電圧を描いた一連の曲線が掲載されています。

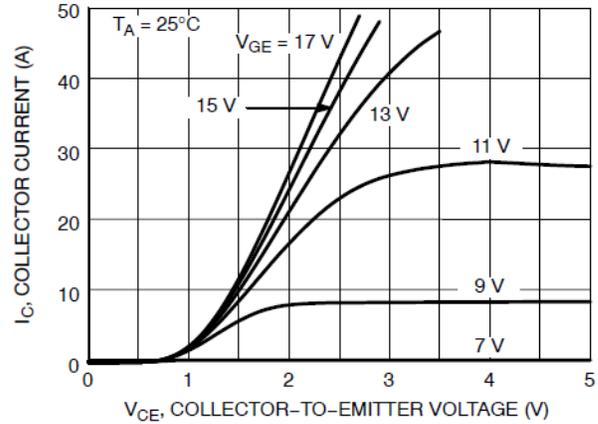


Figure 6. IGBT Output Characteristics for the NGTB15N60S1ETG

Figure 6に、NGTB15N60S1ETG IGBTのこのような曲線のうち1つを示します。この曲線は、25°Cの温度に対応しています。

これら3つの曲線から得られたデータを使用し、さまざまなゲート電圧に対応する形で $V_{CE(sat)}$ と温度のプロットを生成することができます(Figure 7)。このプロットでは、ゲート・ドライブ電圧が9.8 Vを上回っている場合は正の温度係数が達成されていること、およびゲート電圧が高くなるほど傾きが大きくなること示されています。

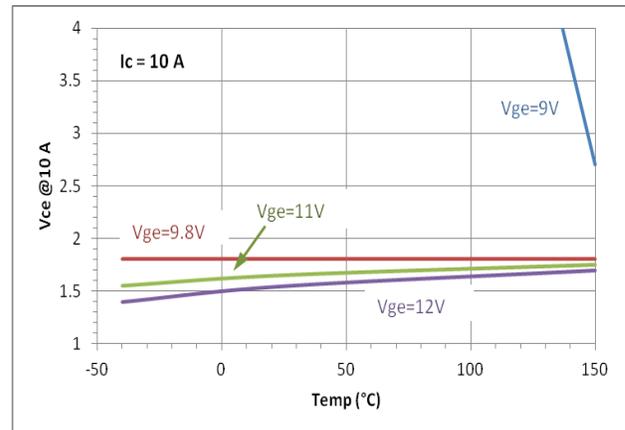


Figure 7. V_{CE} Temperature Coefficient for the NGTB15N60S1ETG

この簡潔な解析から、ゲート・ドライブ電圧を等温ポイントより高い値に維持することの重要性は明らかです。ゲート電圧が高くなるほど、電流の共有が均衡します。

ゲート抵抗

ゲート・ドライブとリターン・パス周辺のインピーダンスをマッチングさせることについて、何度か説明しました。インピーダンスのマッチングを向上させるほど、IGBT間での電力と電流の共有が改善されることはよく知られています。

この事項に関するほとんどの説明では、個別のゲート・ドライブ抵抗を使用することが必須であると示唆しています。各IGBTに1本のゲート抵抗を接続すると、並列接続されたデバイスの間で発振が生じる可能性が低下しますが、ターンオン時間とターンオフ時間の差異、およびデバイスのプロファイルの差異が大きくなります。

発振を引き起こさずに、1本の共通ゲート抵抗を使用できる場合は、両方のゲートに対して同じ電位が同時に適用されるので、電流波形はより密接にマッチングされます。

Figure 8とFigure 9に、個別または共通のゲート抵抗を接続したときの2個のIGBTの並列動作を示します。

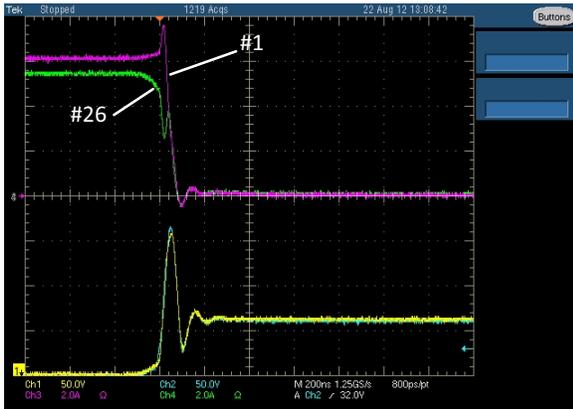


Figure 8. Turn-off Waveforms for Separate Gate Resistors

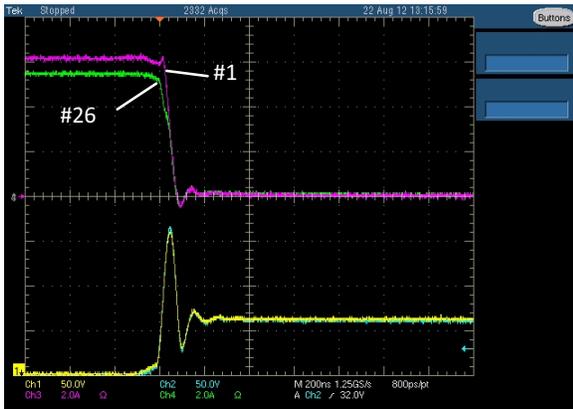


Figure 9. Turn-off Waveforms for a Common Gate Resistor

このテストで選択したIGBTは、特性が異なるものを意図的に選択しており、その結果、不整合ペアを使用する場合の差異を確認できます。テストに使用したIGBTの詳細については、以下の「経験的データ」セクションを参照してください。

IGBTの番号をラベルとして付けてある上側の波形はコレクタ電流を示し、下側のトレースはコレクタ電圧を示します。

このテストでは、個別のゲート抵抗によりドライブを行う例で2本の22 Ω抵抗を使用し、また共通のゲート抵抗を利用する例では1本の11 Ω抵抗を使用しました。IGBTとして、40 A、600 VのNGTB40N60IHLデバイスを使用しました。

オシロスコープの画像から理解できるように、共通のゲート抵抗を使用する場合であっても電流共有に影響を及ぼすことはなく、スイッチング波形のマッチングが大きく改善されています。

デバイス間で発振が発生する場合は、各IGBTで個別の抵抗を使用する必要があります。ただし、この場合も、個別の抵抗に加えて、1本の共通の抵抗を使用することが可能です。

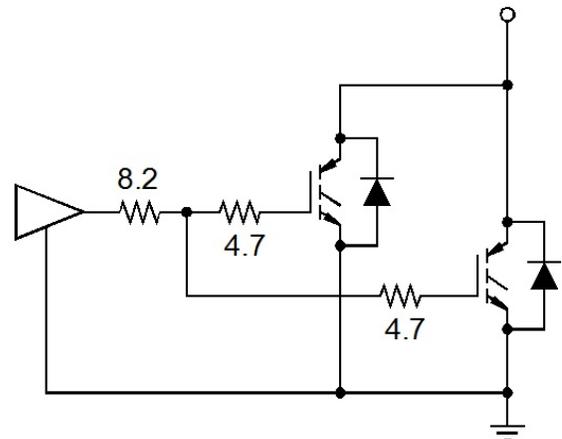


Figure 10. Combined Common and Separate Gate Resistors

Figure 10に示す回路では、共通のゲート抵抗と個別のゲート抵抗を組み合わせて使用しています。ユニットを形成した後、極値の間で値の調整を簡単に実行し、できるだけスイッチング特性を一致させると同時に、2個のIGBTの間での発振を排除することができます。

経験的なデータ

一連のNGTB40N60IHL IGBTを直列接続し、導通損失とスイッチング損失をテストしました。導通損失と全体的なスイッチング損失に基づいて、これらのデータをプロットしました。2セットのデバイスを選択しました。ユニット1と26は特性の異なるデバイスをテストする目的、またユニット2と27は類似のデバイスをテストする目的で使用しました。

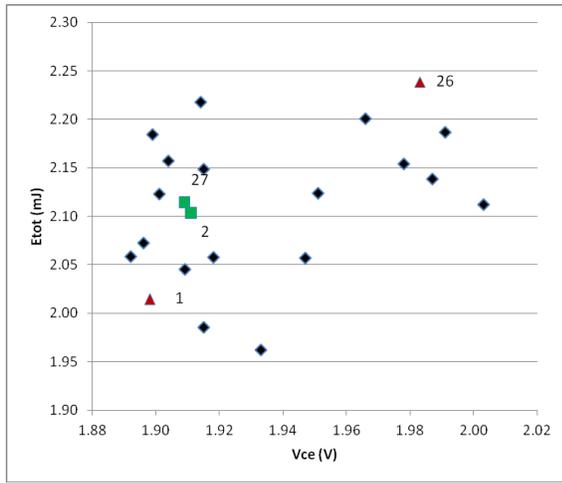


Figure 11. Scatter Plot of NGTB40N60IHL IGBT Sample

次に示すオシロスコープのトレースで、マッチングが最善である2個のデバイス(ユニット2と26)のコレクタ-エミッタ間電圧とコレクタ電流を示します。

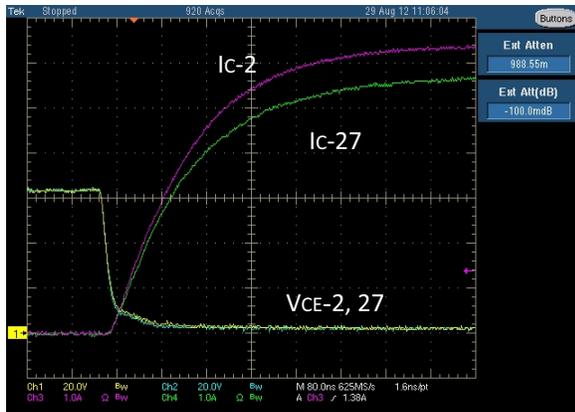


Figure 12. Turn-on Waveform for Matched Devices

2個のデバイスが密接にマッチングしている場合であっても、ターンオン時の電流に違いが存在します。ただし、この不均衡は長時間は継続せず、 $V_{CE(sat)}$ パラメータがマッチングしているため、安定状態での電流は本質的に等しいものです。

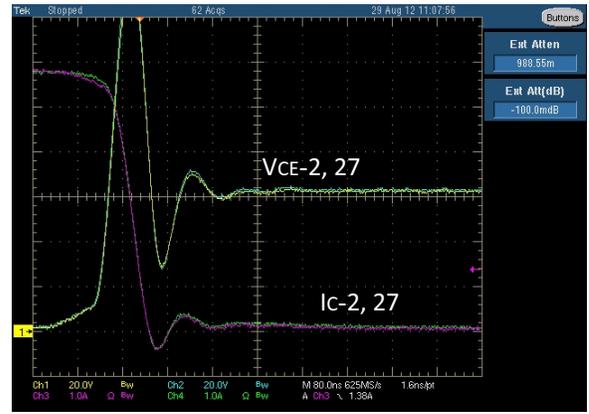


Figure 13. Turn-off Waveform for Matched Devices

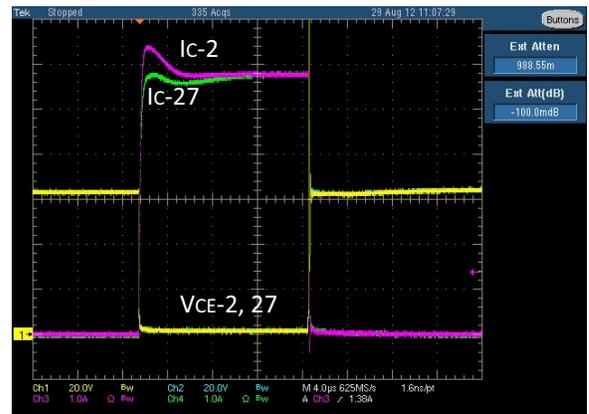


Figure 14. Pulse Waveform for Matched Devices

上記の波形から、2個のパーツの間でターンオンが均衡した形で発生しない場合であっても、電流は整合した形で流入し、ターンオフの波形が同一であることが理解できます。Figure 14は、個別のゲート・ドライブ抵抗を使用してテストを再現したもので、波形に変化は生じていません。

また、合計のスイッチング損失に基づいてIGBTをマッチングさせた場合は、個別のターンオン損失とターンオフ損失は厳密にマッチングしているとは限らないことに注意してください。

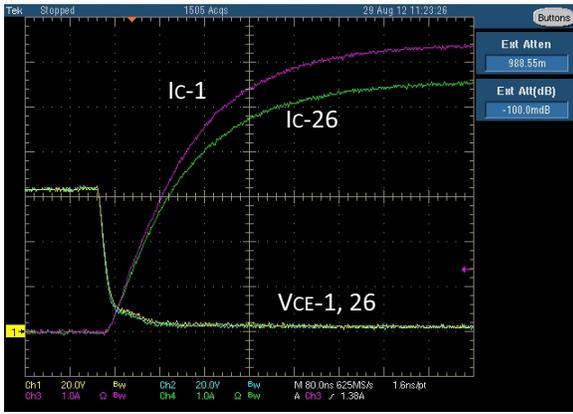


Figure 15. Turn-on Waveform for Mismatched Devices

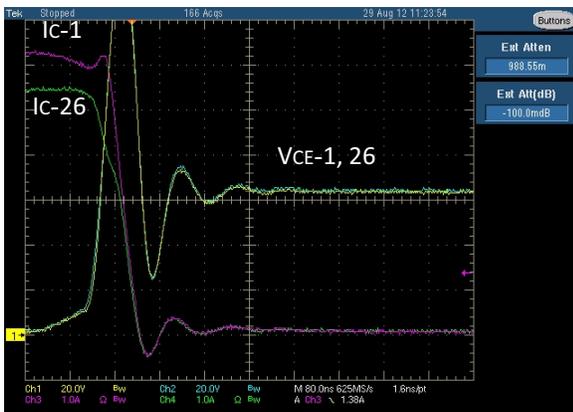


Figure 16. Turn-off Waveform for Mismatched Devices

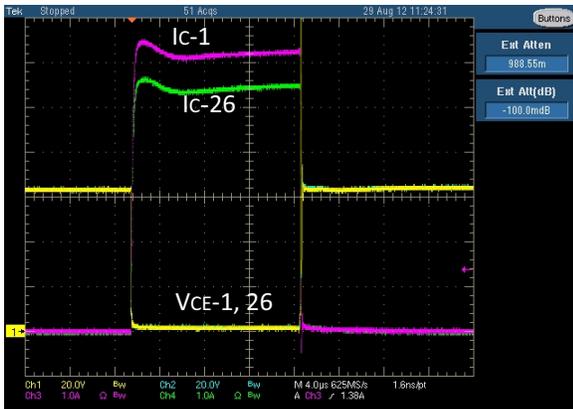


Figure 17. Pulsed Waveform for Mismatched Devices

不整合のIGBTを使用する場合、ターンオンとターンオフでは波形が類似していますが、導通電流は大きく異なり、パルスの持続期間全体にわたってこの違いが存在します。

密接にマッチングしたパーツを使用することが望まれますが、パラメータにある程度の変動が存在することは許容されます。これらの違いを考慮して熱管理システムを設計する必要があります。 $V_{CE(sat)}$ パラメータは、2個(またはそれ以上)のデバイス間の電力損失の差異に最大の影響を及ぼします。

上記の波形はいずれも、11 Ω の共通のゲート抵抗を1本使用しています。



Figure 18. Test Board and Heat Sink for Parallel Testing

このセットアップを使用してIGBTをテストし、本アプリケーション・ノートで使用した波形を生成

AND9100/D

しました。2個のIGBTの間で配線のインピーダンスをマッチングさせるためにあらゆる面で努力を払いました。2個のドライバを取り付けましたが、1個のみを使用したのもので、ドライバに起因するタイミングの差異は生じませんでした。

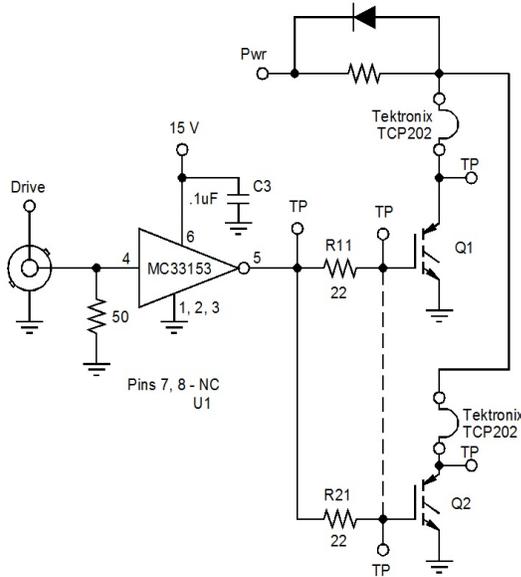


Figure 19. Schematic of Test Circuit

並列接続デバイスのチェック・リスト

- 電気的インピーダンスをできるだけ密接にマッチングさせます。
- 熱抵抗をできるだけ密接にマッチングさせます。
- ゲート電圧を高い値に維持します。
- 発振が発生しない場合は、共通のゲート抵抗を1本使用します。

まとめ

このアプリケーション・ノートでは、並列接続するIGBTに関連するいくつかの事項について説明しました。電流共有を均衡させるために、高いゲート・ドライブ電圧と適切なゲート抵抗の構成を選択すること、およびサーマル・レイアウトと電気的レイアウトをマッチングさせることが重要です。ここで説明した情報は信頼性の高い設計を実現するのに役立ちます。

onsemi, Onsemi, and other names, marks, and brands are registered and/or common law trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC dba "onsemi" or its affiliates and/or subsidiaries in the United States and/or other countries. onsemi owns the rights to a number of patents, trademarks, copyrights, trade secrets, and other intellectual property. A listing of onsemi's product/patent coverage may be accessed at www.onsemi.com/site/pdf/Patent-Marking.pdf. onsemi reserves the right to make changes at any time to any products or information herein, without notice. The information herein is provided "as-is" and onsemi makes no warranty, representation or guarantee regarding the accuracy of the information, product features, availability, functionality, or suitability of its products for any particular purpose, nor does onsemi assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. Buyer is responsible for its products and applications using onsemi products, including compliance with all laws, regulations and safety requirements or standards, regardless of any support or applications information provided by onsemi. "Typical" parameters which may be provided in onsemi data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. onsemi does not convey any license under any of its intellectual property rights nor the rights of others. onsemi products are not designed, intended, or authorized for use as a critical component in life support systems or any FDA Class 3 medical devices or medical devices with a same or similar classification in a foreign jurisdiction or any devices intended for implantation in the human body. Should Buyer purchase or use onsemi products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold onsemi and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that onsemi was negligent regarding the design or manufacture of the part. onsemi is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer. This literature is subject to all applicable copyright laws and is not for resale in any manner.

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

LITERATURE FULFILLMENT:
Email Requests to: orderlit@onsemi.com

onsemi Website: www.onsemi.com

TECHNICAL SUPPORT
North American Technical Support:
Voice Mail: 1 800-282-9855 Toll Free USA/Canada
Phone: 011 421 33 790 2910

Europe, Middle East and Africa Technical Support:
Phone: 00421 33 790 2910
For additional information, please contact your local Sales Representative