EiceDRIVER™

パワーデバイス用ゲート抵抗

About this document

Scope and purpose

このアプリケーションノートでは、ゲート抵抗の役割について説明し、パワーデバイスのゲート抵抗を選定する際に考慮すべき最も重要な問題を指摘します。

Intended audience

信頼性が高く効率的なゲート駆動回路を設計したいパワーエレクトロニクスエンジニア

Table of contents

About this document **1**
Table of contents **1**
1 適用範囲 **2**
2 ゲート抵抗の基本 **3**
3 ゲートドライバ回路を設計する際にゲート抵抗について考慮すべきこと **4**
3.1 ゲート充電/放電ピーク電流 4
3.2 電力損失 5
3.3 スイッチング速度と EMC 6
3.4 ゲートリンギング 7
3.5 寄生ターンオン 8
3.6 標準的なゲート回路 10
4 適切なゲート抵抗をすばやく選択するための秘訣 **12**
4.1 ゲート抵抗の電力定格 12
4.2 経験則 12
5 参考資料 **13**
改訂履歴 **14**

1 適用範囲

このアプリケーションノートでは、パワーエレクトロニクスデバイスに適したゲート抵抗を選定するための最も一般的な関連問題について説明します。ゲート回路の物理的効果を示し、関連する方程式を明確にします。このアプリケーションノートは、すべてのパワートランジスタまたはパワーモジュールの推奨事項を示すものではなく、ディスクリートパワートランジスタおよびパワーモジュールのゲート抵抗の選定における重要な考慮事項について説明します。

2 ゲート抵抗の基本

- ゲート抵抗は、ドライバの出力とパワーデバイスの入力の間に挿入されます。**Figure 1** に示すように、一般的に R_G とラベル付けされます。

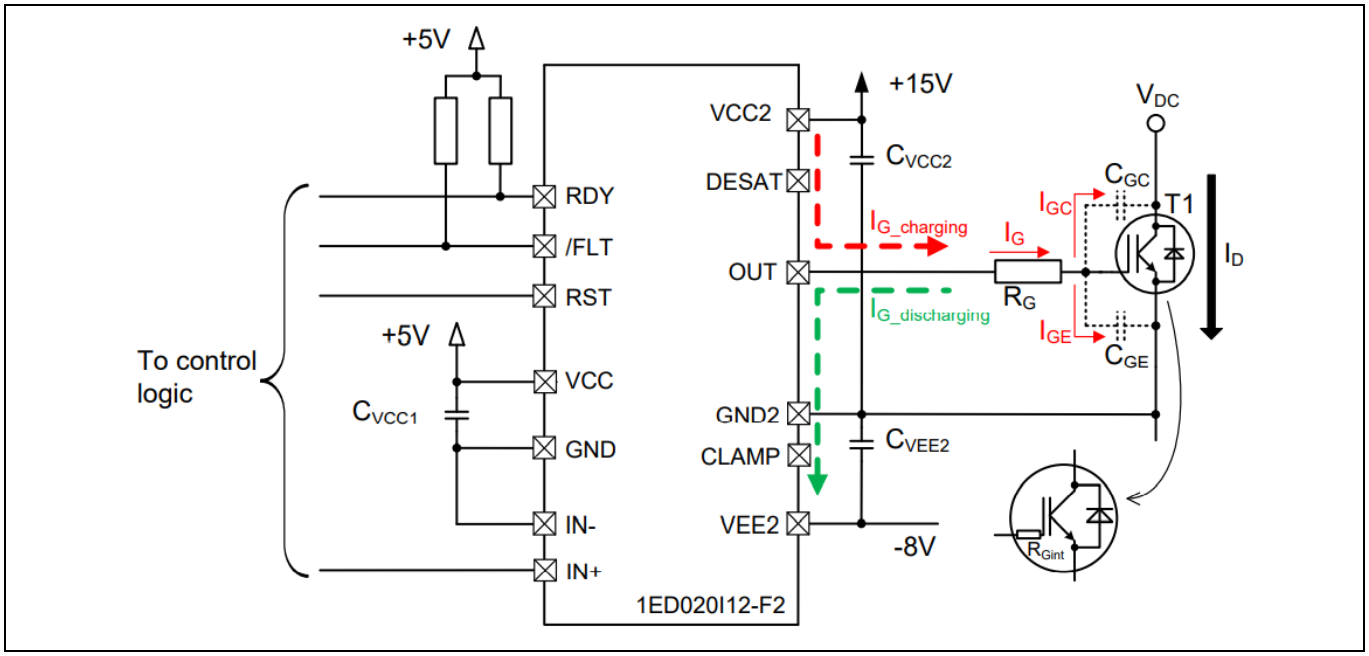


Figure 1 基本的なゲートドライバ回路

ゲート制御パワーデバイス (IGBT やパワーMOSFET など) のオン/オフステータスは、ゲート電圧によって定義されます。このゲート電圧の変化は、IGBT をこのアプリケーションノートの例として取り上げた場合に、ゲートコレクタコンデンサ C_{GC} とゲートエミッタコンデンサ C_{GE} で構成されるパワーデバイスのゲートコンデンサの充電と放電に影響を与えます。$I_{G_chargeing}$ によるゲートコンデンサの充電はパワーデバイスをオンにし、ゲートコンデンサの $I_{G_discharging}$ によるゲートコンデンサの放電はパワーデバイスをオフにします。

ゲートを充電および放電する電流は、ゲート抵抗 R_G によって制限されます。これは、パワーデバイスのスイッチング速度に影響します。これに加えて、ゲート抵抗からのいくつかの他の影響もあります。

- ドライバの出力段を保護するためピークゲート電流を制限
- ゲートループで電力を消費
- EMI (Electromagnetic interference)
- ゲートリンギングを防ぐ
- ゲート抵抗を慎重に選択して、寄生ターンオンを回避

3 ゲートドライバ回路を設計する際にゲート抵抗について考慮すべきこと

物理的な実体としてのゲート抵抗は、さまざまな面でその目的を十分に満たす必要があります。ここでは、ピーク電流を定義するゲート抵抗の機能、消費電力への影響、スイッチング速度、および相関するスイッチング損失に焦点を当てます。さらに、EMC (Electromagnetic Compatibility)、ゲートリンギング、およびゲート抵抗によっても影響を受ける寄生ターンオンについても説明します。最後に、標準的なゲート回路を紹介します。

3.1 ゲート充電/放電ピーク電流

ゲートドライバ IC の出力段には、ターンオン用の最大許容ピーク電流値 I_{OH_PEAK} とターンオフ用の I_{OL_PEAK} があり、これらはしばしばドライバ IC のデータシートで規定されます。ドライバ IC の出力電流がこのピーク電流値よりも大きい場合、出力段が損傷する可能性があります。したがって、安全上の理由から出力電流を制限することが重要です。**Figure 2** は例を示しており、詳細に理解するのに役立ちます。

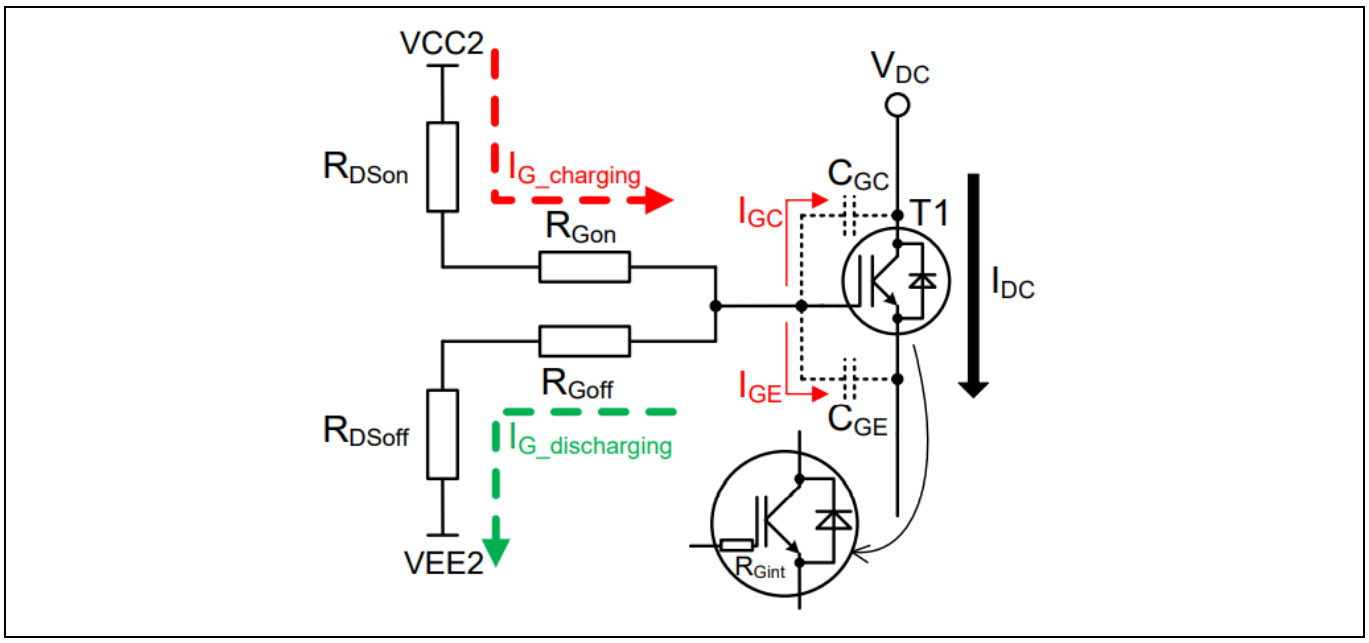


Figure 2 ゲート充電/放電図

ここで、R_{DSon} はターンオン時のドライバ IC の出力段の抵抗を示し、R_{DSoff} はターンオフ時の抵抗を示します。どちらもドライバ IC の内部パラメーターです。抵抗 R_{Gon} はターンオンゲート抵抗を表し、R_{Goff} はターンオフゲート抵抗を表します。IGBT T1 のターンオン中、ゲート充電電流 $I_{G_charging}$ は、ドライバ IC の電源 VCC2 によって R_{DSon} および R_{Gon} を介して IGBT のゲートに駆動されます。IGBT のターンオフ中、ゲート放電電流 $I_{G_discharging}$ は、IGBT のゲートから R_{Goff} および R_{DSoff} を経由してドライバ IC の電源グランドに流れます。この充電/放電経路に従って、ピーク電流値は式 (1) および (2) によって導き出せます。

$$I_{G_charging_peak} = \frac{VCC2 - VEE2}{R_{DSon} + R_{Gon}} \quad (1)$$

$$and\ I_{G_discharging_peak} = \frac{VCC2 - VEE2}{R_{DSoff} + R_{Goff}}. \quad (2)$$

この充電/放電電流は、安全な動作を保証するために、ドライバ IC の出力段に許容されるピーク電流よりも低くする必要があります。

$$I_{\text{G_charging_peak}} < I_{\text{OH_PEAK}} \quad (3)$$

$$I_{\text{G_discharging_peak}} < I_{\text{OL_PEAK}} \quad (4)$$

3.2 電力損失

ゲート抵抗には非常に重要な機能があり、ドライバ IC の出力段での消費電力を制限するのに役立ちます。抵抗を大きくすると電流が減少するため、ドライバ IC で消費される電力が減少します。Figure 2 によると、ターンオン時の内部抵抗 R_{DSon} での消費電力は次のように計算できます。

$$P_{\text{G_charging}} = \frac{1}{2} Q_G \cdot (VCC2 - VEE2) \cdot f_{SW} \cdot \frac{R_{\text{DSon}}}{R_{\text{DSon}} + R_{\text{Gon}}}. \quad (5)$$

ターンオフ時、内部抵抗 R_{DSoff} での消費電力は次のように計算できます。

$$P_{\text{G_discharging}} = \frac{1}{2} Q_G \cdot (VCC2 - VEE2) \cdot f_{SW} \cdot \frac{R_{\text{DSoff}}}{R_{\text{DSoff}} + R_{\text{Goff}}}. \quad (6)$$

ここで、f_{SW} はスイッチング周波数、*VCC2 –VEE2* はゲート容量の充電と放電の間のゲート電圧ステップです。考慮すべき電荷 Q_G の値は、ゲート-エミッタ間電圧 V_{GE} に依存し、**Figure 3** に示すようにゲート電荷曲線[1]を使用して正確な近似を行えます。

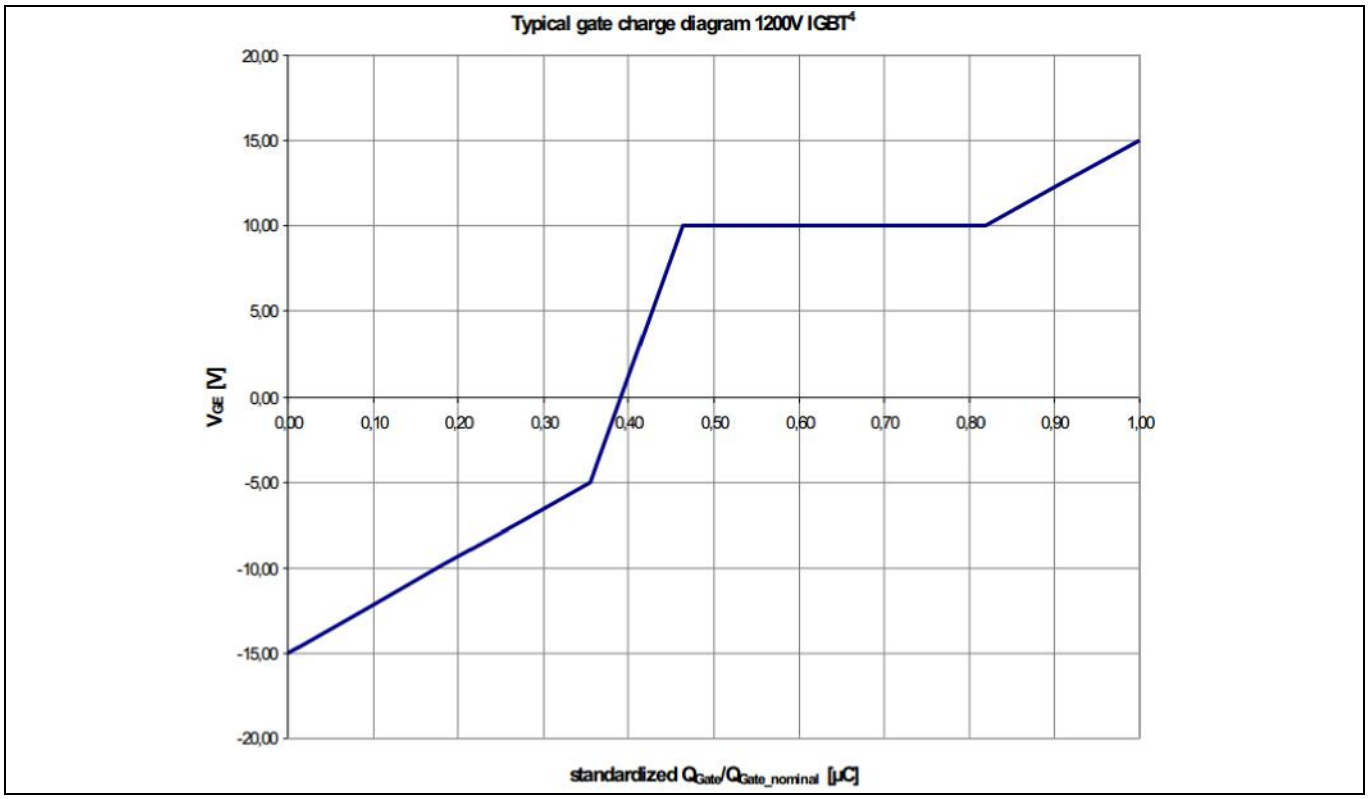


Figure 3　ゲート電荷図

迅速な計算を行うために、一部のデータシート[2]は、V_{GE} = -15V ... +15V の条件でゲート電荷 Q_G を直接指定します。この場合、ドライバ IC からのターンオン電圧が+15V、ターンオフ電圧が-15V の場合、この値は式 (5) および (6) で直接使用できます。ターンオフ電圧 V_{GE} = 0V または V_{GE} = -8V の場合、それぞれの値 Q_G 'は式 (7) および (8) で与えられるように概算できます。

$$Q_G'|_{V_{GE}=0..15V} = 0.62 \cdot Q_G \tag{7}$$

$$Q_G'|_{V_{GE}=-8..15V} = 0.75 \cdot Q_G. \tag{8}$$

ドライバ IC の全体的な消費電力は、最大許容消費電力値 P_{D_max} を下回っている必要があり、これを以下に示します。

$$P_{G_charging} + P_{G_discharging} + P_Q < P_{D_max}. \tag{9}$$

この式で、P_Q はドライバ IC の静止電力を表します。式 (5)、(6)、(9) を組み合わせると、ゲート抵抗 R_{Gon} と R_{Goff} の値を大きくすると、ドライバ IC の出力段での消費電力が減少し、コンポーネントの安全な動作保証に役立つことが簡単にわかります。

3.3　スイッチング速度と EMC

セクション **3.2** で説明したように、ゲート抵抗値を高くすると、ドライバ IC の損失状況と熱の観点から有益な場合があります。さらに、ゲート抵抗の変化はパワーデバイスのスイッチング速度に影響を与え、効率とノイズの 2 つの方向に影響を与えます。

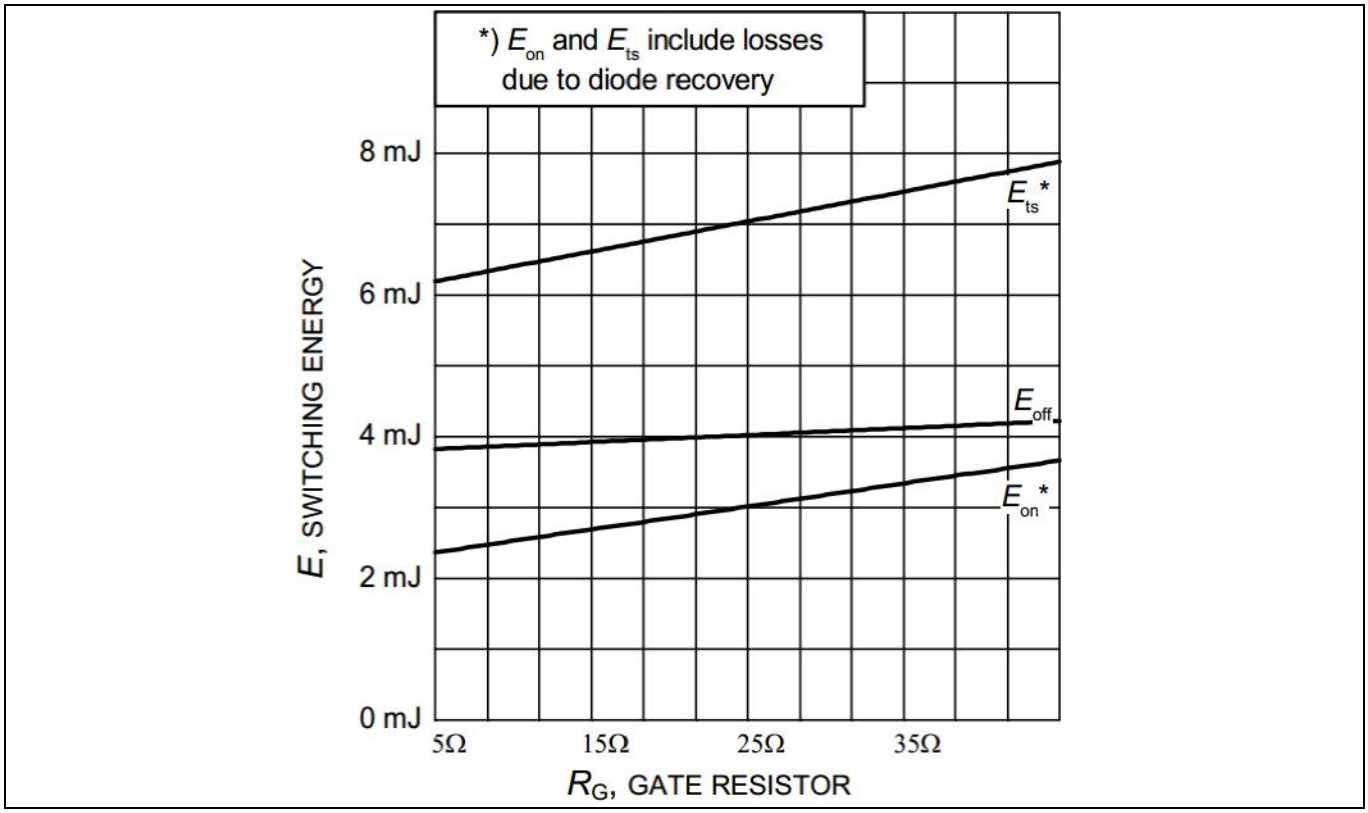


Figure 4　インフィニオン IKW25T120 [3]のゲート抵抗の関数としての一般的なスイッチング損失

一般的に、ゲート抵抗値が高くなると、パワーデバイスのスイッチング速度が低下します。これは、例として **Figure 4** に示すように、スイッチング損失が増加することを意味します。これは最終的に効率に影響を与えます。対照的に、より低いゲート抵抗が適用されると、スイッチングが速くなり、スイッチング損失を減らせます。一方、di/dt と dv/dt によって引き起こされるノイズは、スイッチング速度が速くなると増加します。電磁両立性 (EMC) 規制を満たす必要があるため、ゲート抵抗値は慎重に選択する必要があります。

このトピックの詳細については、インフィニオンの文書「Balancing losses and noise – considerations for choosing the gate resistor」**[4]**を参照してください。

3.4　ゲートリンギング

パワーエレクトロニクスアプリケーションでは、ゲートループに沿った寄生成分が原因となる現象のゲートリンギングがよく観察されます。**Figure 5** で示されるように、OUT は電源デバイスを駆動するために使用されるドライバ IC の出力です。I_G は、ゲートループに沿ったゲート電流です。L_P と C_{GE} は、共振タンクを形成するゲートループに沿った寄生成分です。励起すると、振動が発生する可能性があります。

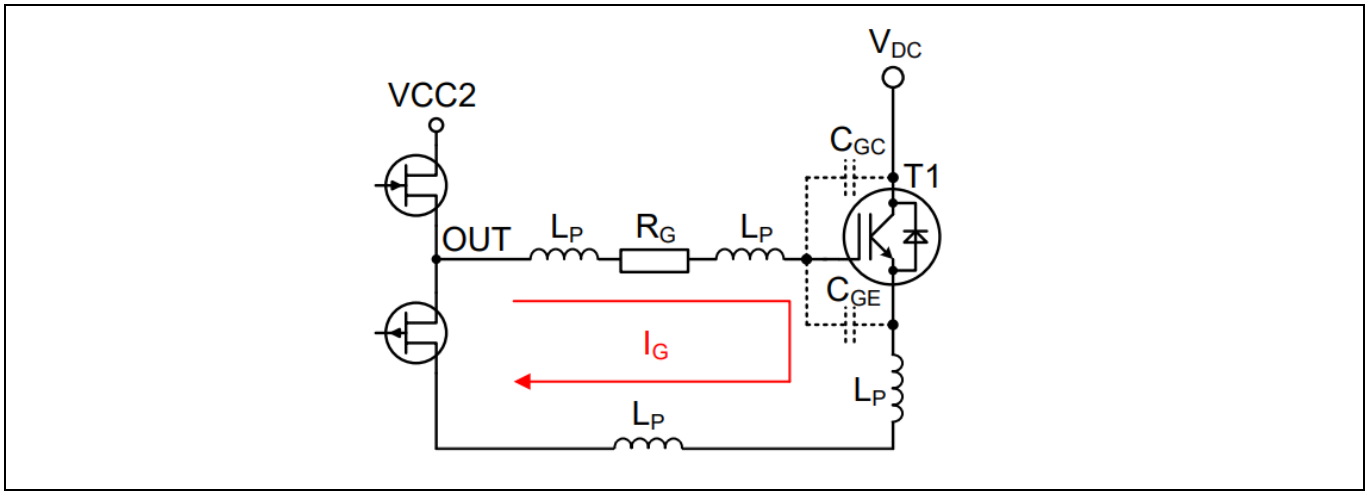


Figure 5　寄生要素のあるゲートループ

パワーMOSFET を使用するアプリケーションの場合、特に並列駆動の場合は、より多くの共振タンクが形成されるため、このゲートリンギング効果は通常より深刻です。リンギング効果を回避するための重要な対策の 1 つは、レイアウトの最適化によって寄生インダクタンス L_P を制限することです。

- トレース長を短くして、ゲートループを物理的にできるだけ小さくしてください。これにより、通常、寄生インダクタンスを 1nH/mm 減らせます。
- ケルビンエミッタ/ソースが電源デバイスで利用可能な場合は、接続してください

一部の設計では、実装要因によりこれを実現できません。この場合、より大きなゲート抵抗値を使用することで回避策が得られ、ダンピング効果が高まり、最終的にリンギング効果が抑制されます。設計者は、セクション **3.3** ですでに述べたように、ゲート抵抗値を大きくすると効率が低下することに注意する必要があります。また、シグナルインテグリティを考慮すると、ゲート抵抗値が高すぎると、ドライバの出力段からのゲート信号が分離されます。これにより、遅延時間が長くなり、動作不良さえ起こしかねません。したがって、ゲート抵抗の選定は慎重に選択する必要があります。

定数選定に加えて、ゲート抵抗のレイアウトも重要です。物理的に可能な場合は、ゲート抵抗をパワーデバイスのゲートにできるだけ近づけて配置する必要があります。

3.5　寄生ターンオン

寄生ターンオンは、多くの状況で一般的な現象です。これは、寄生ミラー容量と組み合わされた高い dv/dt による物理的影響です。

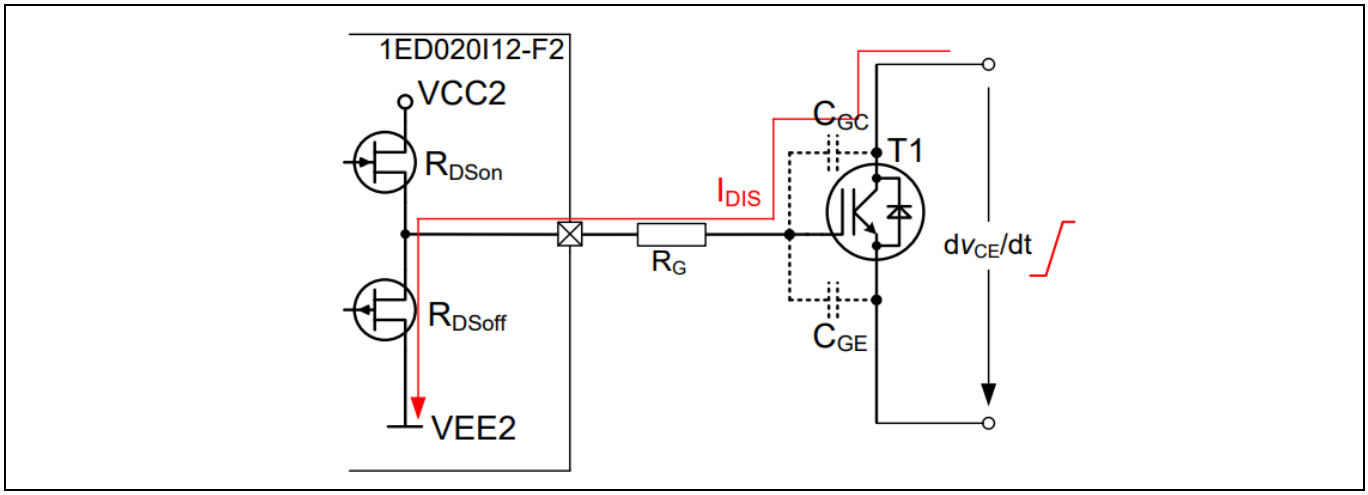


Figure 6　寄生ターンオン

Figure 6 に示されるように、パワーデバイス T1 の両端の高い dv_{CE}/dt は、ミラーコンデンサ C_{GC} を介して変位電流 I_{DIS} を生成します。これは多くの場合、ハーフブリッジトポロジでペアリングされたデバイスをオンにすることによってトリガーされます。ゲート抵抗 R_G を介して、この変位電流 I_{DIS} はゲート抵抗の両端に電圧降下を生成し、パワーデバイスのゲート電圧を上昇させます。これは、式 (10) および (11) に従って計算できます。

$$I_{DIS} = C_{GC} \cdot \frac{dv_{CE}}{dt} \tag{10}$$

$$V_G = I_{DIS} \cdot (R_G + R_{DSoff}). \tag{11}$$

RDSoff は、ドライバ IC のプルダウンデバイスの抵抗を示します。ここで、パワーデバイス T1 がオフのとき、プルダウンデバイスはオンです。V_G は、パワーデバイスのゲートに現れる電圧です。V_G がパワーデバイス T1 のしきい値電圧よりも高い場合、寄生ターンオンが発生します。これは、ブリッジのシュートスルーが発生する可能性があるため、システムの安全性に影響を与えます。

パワーデバイスのゲートしきい値電圧は通常、温度に負の比例関係にあるため、この寄生ターンオン効果は、温度が上昇するとさらに深刻になる可能性があります。**Figure 7** に、インフィニオンの IGBTIKW25T120 のデータシート[3]に基づく例を示します。

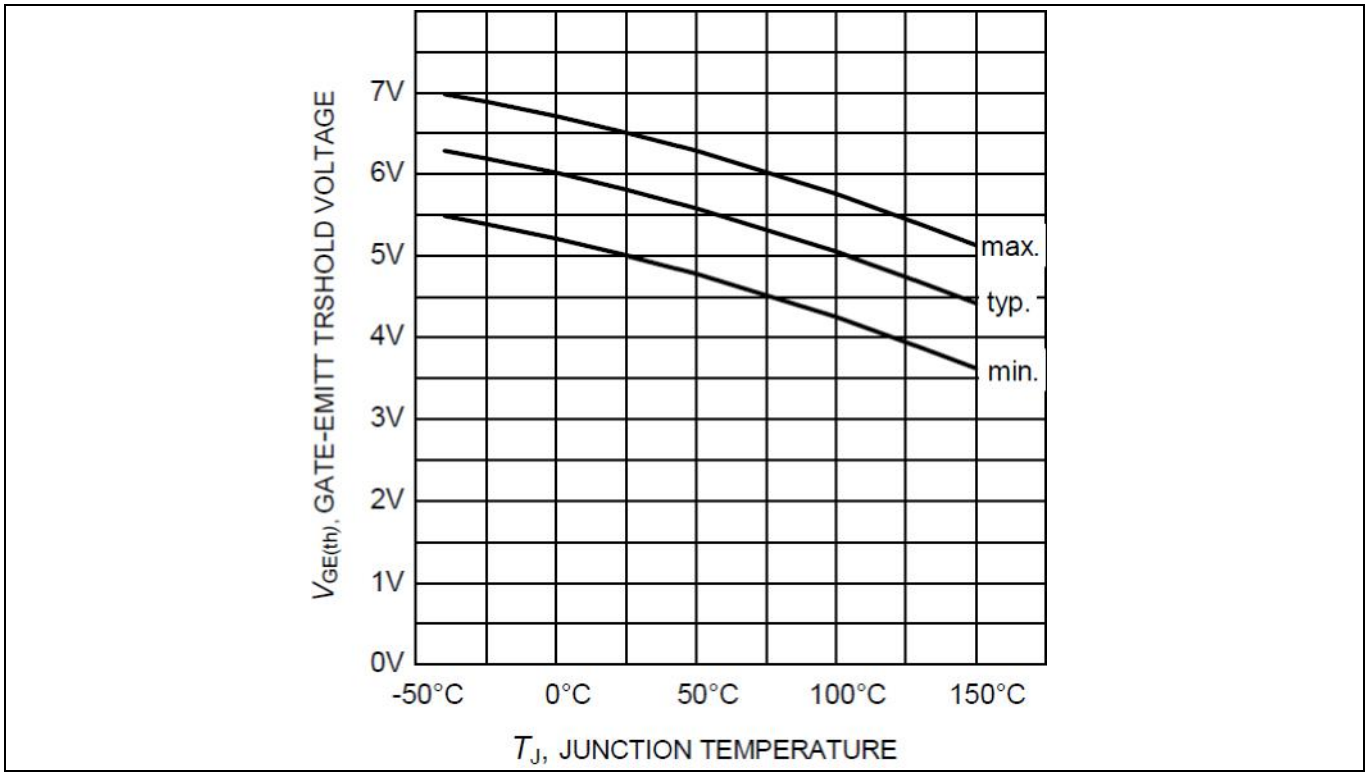


Figure 7　接合部温度の関数としてのゲート-エミッタしきい値電圧[3]

この寄生ターンオン効果を制限する 1 つの方法は、式 (11) に従ってゲート抵抗値を減らすことです。

3.6　標準的なゲート回路

多くのアプリケーションでは、**Figure 8** に示すように、分離されたターンオンゲート抵抗とターンオフゲート抵抗が使用されます。直列接続された高速回復ダイオード D_{Goff} は、ターンオフ時のゲート抵抗をターンオン時のゲート抵抗よりも低く保つために使用されます。これが行われるのは、一部のパワーデバイスのターンオフ遅延時間がターンオン遅延時間よりも長い場合が多いためです。また、セクション **3.5** で説明したように、ミラー容量を介した容量性ターンオンを防ぐのにも役立ちます。一方、R_{Goff} に選択した値が低すぎると、ターンオフ時の di/dt が高すぎるため、パワーデバイス全体で大きな電圧オーバーシュートが発生する可能性があります。したがって、これは常にスイッチング速度と堅牢性の間のトレードオフです。経験則としては、$R_{Gon}=2 \cdot R_{Goff}$ です。

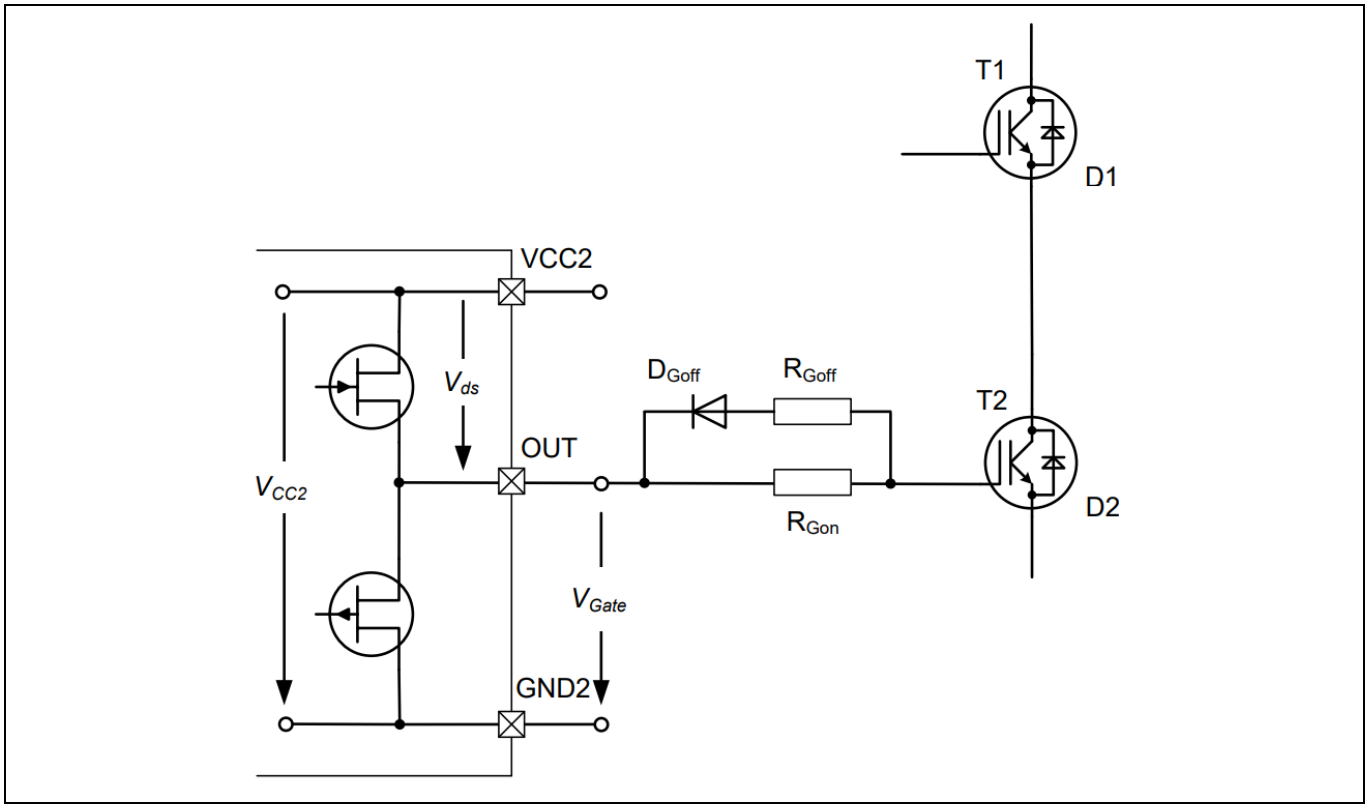


Figure 8　基本ゲート回路

4 適切なゲート抵抗をすばやく選択するための秘訣

適切なゲート抵抗を選択する際に見られるさまざまな影響があっても、いくつかの基本的なヒントを考慮すれば、設計者はすぐに始めることができます。ここでは、ゲート抵抗の電力定格と、すばやく選択するための経験則に焦点を当てます。

4.1 ゲート抵抗の電力定格

ゲートの駆動は、典型的なパルス動作です。ゲート抵抗は、ゲートの充電と放電のパルス電流を繰り返し維持する必要があります。適切なゲート抵抗を選択するには、パルス電力能力をチェックする必要があります。セクション **3.1** で説明したように、ゲートの充電/放電中のピークパルス電流は式 (1) および (2) に従って計算できます。次に、パルスパワーは式 (12) および (13) から導出できます。

$$P_{G_charing_peak} = I^2_{G_charging_peak} \cdot R_G \tag{12}$$

$$P_{G_discharing_peak} = I^2_{G_discharging_peak} \cdot R_G. \tag{13}$$

この計算されたパルス電力は、安全で信頼性の高い動作を保証するために、例として **Figure 9** に示すように、最大許容連続パルス負荷の範囲内にある必要があります。

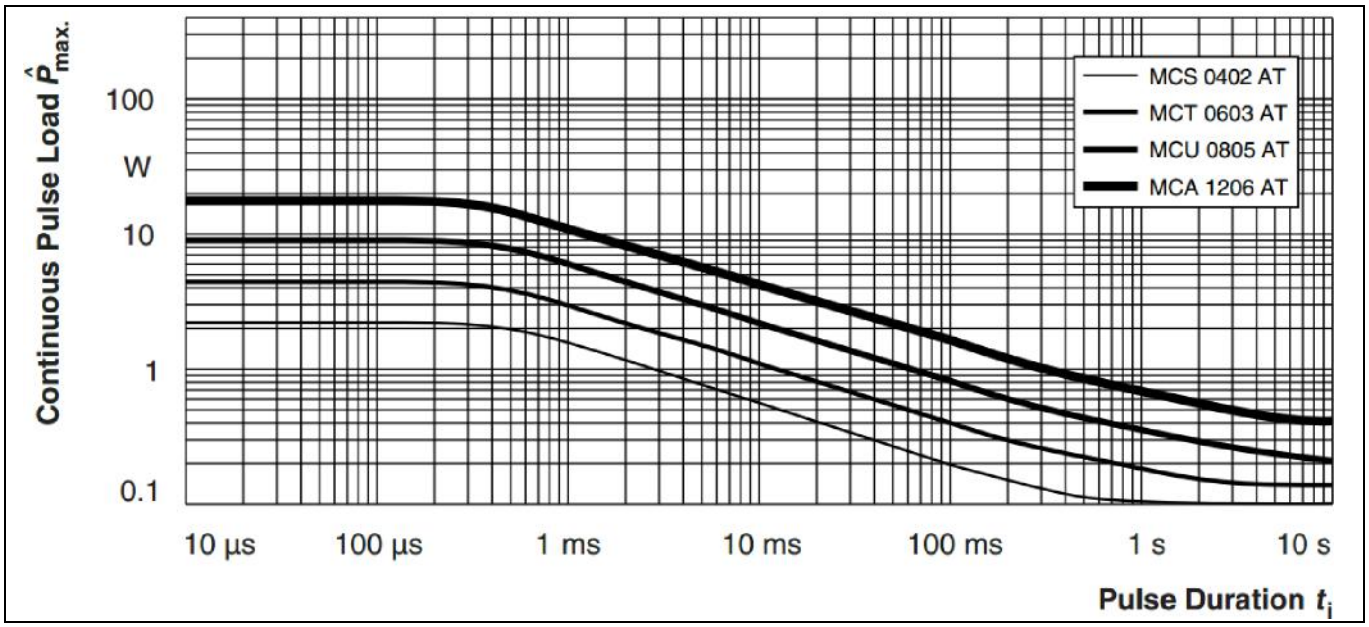


Figure 9 最大パルス負荷、連続パルス、Vishay 薄膜抵抗器 [5]

4.2 経験則

安定性と効率のバランスポイントをすばやく見つけるために、データシートで指定された公称値とこの公称値の 2 倍の間のゲート抵抗値を出発点と見なせます。これは、上記の章で説明されているすべての関連する問題を確認する時間がない場合にのみ当てはまります。ゲート抵抗が指定されたアプリケーションに実際に適合することを確認するには、実際のシステムに基づいて個別のテストを適用する必要があります。

5 参考資料

[1] Infineon Technologies: Application Note; Industrial IGBT Modules Explanation of Technical Information; Infineon Technologies, Germany

[2] Infineon Technologies: Datasheet; DF200R12W1H3_B27; Infineon Technologies, Germany

[3] Infineon Technologies: Datasheet; IKW25T120; Infineon Technologies, Germany

[4] Infineon Technologies: Paper; Balancing losses and noise - considerations for choosing the gate resistor; Infineon Technologies, Germany

[5] Vishay: Datasheet; MCA1206AT; Vishay, USA

改訂履歴

Document version	Date of release	Description of changes
1.0	2021-05-27	本版は英語版 Application Note AN2015-06 Revision 1.0 について、CYPRESS DEVELOPER COMMUNITY の参画者によって日本語に翻訳されたドキュメントです。

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

Edition 2021-05-27

Published by

Infineon Technologies AG

81726 Munich, Germany

© 2021 Infineon Technologies AG. All Rights Reserved.

Do you have a question about this document?

Email: erratum@infineon.com

Document reference
Application Note AN2015-06

重要事項

本文書に記載された情報は、いかなる場合も、条件または特性の保証とみなされるものではありません（「品質の保証」）。本文に記された一切の事例、手引き、もしくは一般的価値、および／または本製品の用途に関する一切の情報に関し、インフィニオンテクノロジーズ（以下、「インフィニオン」）はここに、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。

さらに、本文書に記載された一切の情報は、お客様の用途におけるお客様の製品およびインフィニオン製品の一切の使用に関し、本文書に記載された義務ならびに一切の関連する法的要件、規範、および基準をお客様が遵守することを条件としています。

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。

本製品、技術、納品条件、および価格についての詳しい情報は、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（**www.infineon.com**）。

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。