

Application Note

TPSI3133 DESAT により高価な SiC MOSFET と IGBT を保護する方法



Tilden Chen and Akshaya Ramachandran

概要

SiC MOSFET や IGBT のようなパワー半導体を過飽和による損傷から保護することは、パワー エレクトロニクス設計において極めて重要です。これらのデバイスが本来の動作領域を超えて動作すると、過剰な電力損失が発生し、熱ストレスや故障につながる可能性があります。

脱飽和 (DESAT) 保護回路は、半導体素子の両端電圧を監視し、過電流が発生した際にシャットダウンすることで、コスト効率の高い保護を提供します。この記事では、DESAT 保護の仕組み、主要な回路構成要素、TPSI3133 絶縁型スイッチドライバを用いた DESAT 回路の設計方法について解説します。

目次

1 DESAT Protection が必要な理由	2
1.1 DESAT 保護に関する主な考慮事項.....	3
2 DESAT 回路の主なコンポーネント	3
2.1 回路のスタートアップ動作.....	3
3 設計例	4
3.1 設計要件.....	4
3.2 スレッシュホールドの式.....	4
3.3 与えられたパラメータ.....	4
3.4 指定したパラメータを関係式に挿入.....	5
3.5 未知の方程式を解く.....	5
3.6 式を満たすための抵抗の選択.....	5
3.7 ブランキング容量の決定.....	5
3.8 最終部品の値.....	6
3.9 ラボ テスト.....	6
4 クロージング	6

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 DESAT Protection が必要な理由

MOSFET や IGBT などのパワー半導体は、理想的には完全に飽和した状態、すなわち MOSFET ではオーム領域、IGBT では飽和領域で動作します。MOSFET の場合の電圧 V_{DS} または IGBT の V_{CE} は、低い状態を維持して、消費電力を最小限に抑えます。ただし、図 1-1 に示すように、これらのデバイスが過飽和状態に移行すると、電流がわずかに増加すると大きな電圧が上昇し、過剰な消費電力と損傷の可能性があります。

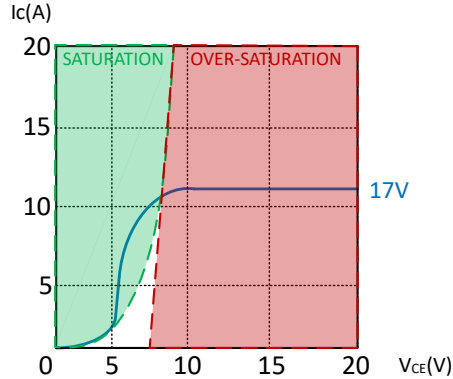


図 1-1. IGBT の I-V 曲線の例

一部の絶縁型スイッチドライバは、非飽和 (DESAT) 保護機能を搭載しています。この機能は、 V_{DS} または V_{CE} を監視し、過電流イベントが発生したときに半導体を迅速にシャットダウンします。TPSI31xx は、完全に統合された絶縁型スイッチドライバのファミリーで、外部のパワー スイッチと組み合わせることで、完全な絶縁型ソリッド ステートリレー ソリューションを構成します。

TPSI3133 は、図 1-2 に示すように、フォルト コンパレータ入力に内蔵プルダウン MOSFET があるため、DESAT の用途を想定したバリエーションです。この内部 MOSFET は、IGBT や SiC MOSFET がオフの間にフォルト比較器の入力をプルダウンして誤検出を防ぎ、さらに EN が High になった後も 100ns 間プルダウンを維持することで、IGBT や SiC MOSFET が完全にオンになる時間を確保します。

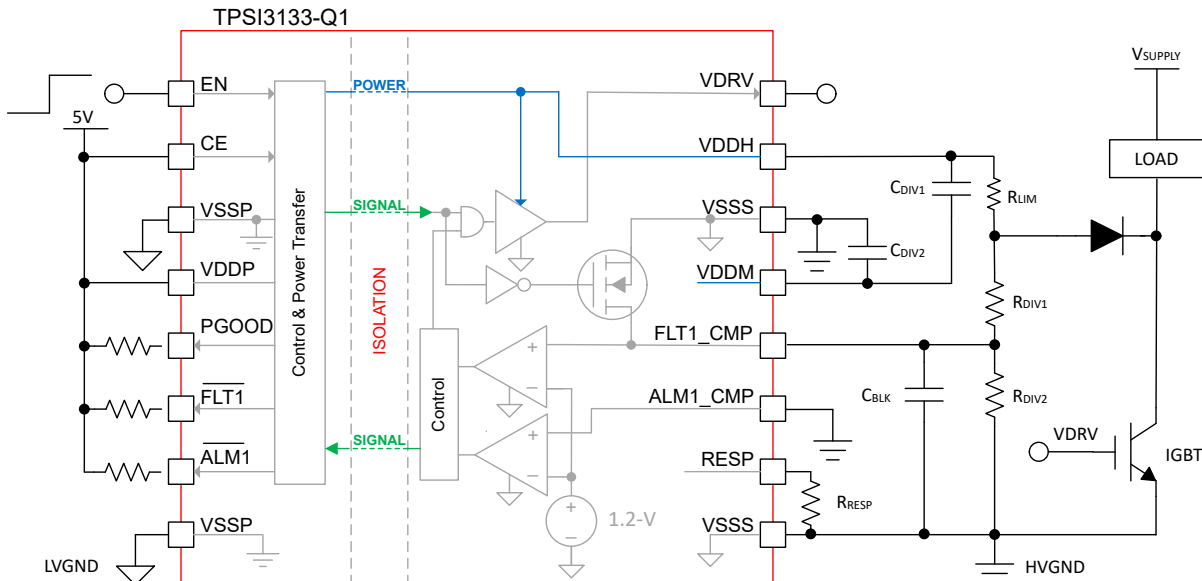


図 1-2. TPSI3133 を使用した DESAT

1.1 DESAT 保護に関する主な考慮事項

DESAT 保護回路は通常、IGBT を使用して構成されます。これは、IGBT は飽和領域で電流 (I_C) ごとに異なる電圧 (V_{CE}) を示すためです。これにより、検出が容易になり、アクティブ領域へのより鮮明な遷移が可能になり、ダイ・サイズが大きくなったことから、一般的により多くの電力に対応できます (短絡耐性定格を備えているものも多くあります)。

DESAT は SiC MOSFET との組み合わせでも動作することができます。低電圧 MOSFET の問題は、誤検出を避けるために過電流のしきい値が通常の動作よりもかなり高めに設定されていることが多くある、回路が過電流イベントを検出する前に、MOSFET が過熱によって損傷してしまう可能性がある点です。

DESAT 保護を実装することで、エンジニアはパワー半導体を安全動作領域内に保つことができます。

2 DESAT 回路の主なコンポーネント

1. ブロッキング ダイオード: IGBT/SiC MOSFET がオフのときは高電圧から回路を保護します。
2. ダイオードの順方向電流を制限するための電流制限抵抗 (R_{LIM})。
3. DESAT スレッシュホールド検出 (R_{DIV1} , R_{DIV2}): 過飽和を検出するための電圧スレッシュホールドを定義します。
4. ブランキング容量 (C_{BLK}): ノイズをフィルタし、誤トリガを防止します。ブランキング静電容量は誤検出の防止に役立ちますが、過電流イベント時に IGBT/SiC MOSFET のストレス時間を延ばすこともできます。

2.1 回路のスタートアップ動作

電源投入時に EN が Low の状態では、TPSI3133 は電力を受け取り、2 次側電源レール (V_{DDM} および V_{DDH}) への電力供給を開始します。内蔵 MOSFET はコンパレータ入力をプルダウンし、誤トリガを防止します。EN が High になると、2 つの電流パス (パス 1 と 2) はコンパレータの入力電圧を設定するように競合します (図 2-1 を参照)。通常、IGBT のターンオン遅延によりパス 1 の方がパス 2 よりも速くなるため、EN が High になると、TPSI3133 はフォルト検出が始まる前に IGBT が完全にオンになるよう、フォルト比較器の入力をさらに 100ns 間プルダウンし続けます。ブランキング容量 (C_{BLK}) を追加すると遅延が増大する可能性があります。ストレス時間を最小限に抑えるため、注意して選択する必要があります。過負荷状態中に、IGBT V_{CE} が上昇し、HV ダイオード/アノードの電圧が上昇して、フォルトコンパレータのスレッシュホールドがトリップします。TPSI3133 が異常を検出するとドライバがシャットオフされ、IGBT がオフになり、システムが保護されます。

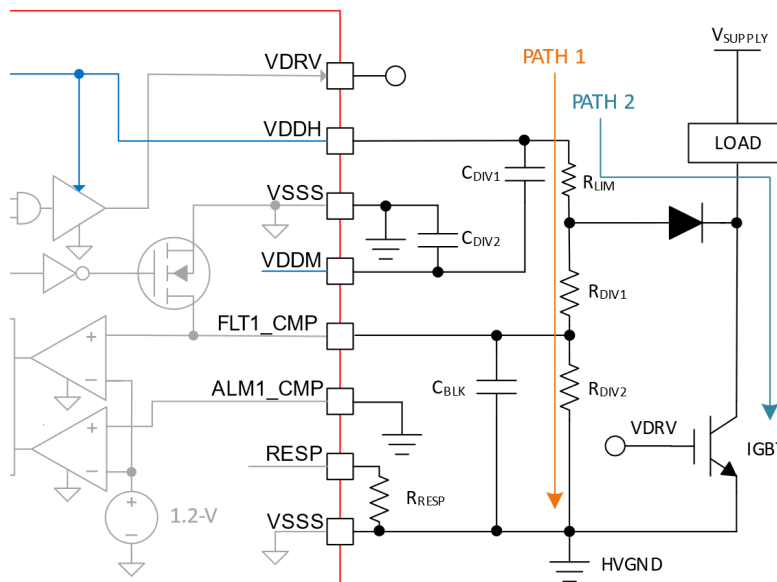


図 2-1. DESAT KVL パス

3 設計例

3.1 設計要件

表 3-1 DESAT 設計例の要件を示します。

表 3-1. 設計要件の例

パラメータ	値
過電流スレッシュヨルド	10A
最大応答時間	10 μ s

3.2 スレッシュヨルドの式

適切な抵抗値を選定することで、IGBT がオンの間にブロッキング ダイオードが順方向バイアスとなり、正しく電圧を検出できるようになります。

1. 電圧を検出するための条件は、IGBT がオンのときにブロッキング ダイオードが順方向バイアスになることです。

$$(V_{CE(DSAT)} + V_F(DIODE)) < \frac{R_{DIV1} + R_{DIV2}}{R_{DIV2} + R_{DIV1} + R_{LIM}} \times V_{DDH} \quad (1)$$

2. 過電流スレッシュヨルドの式で、コンパレータ (V_{REF+}) をトリップさせるための目的の電圧スレッシュヨルド ($V_{CE(DSAT)}$) を選択します。

$$V_{REF+} < \frac{R_{DIV2}}{R_{DIV2} + R_{DIV1}} \times (V_{CE(DSAT)} + V_F(DIODE)) \quad (2)$$

前述の IGBT の I-V 曲線の例を使用すると、 $V_{CE} = 7.5V$ において $I_C = 10A$ のようになります。この過電流スレッシュヨルド値を使用して、抵抗を求めます。I-V 曲線は標準値であり、各デバイスは個別に変動を持つ可能性があることに注意してください。

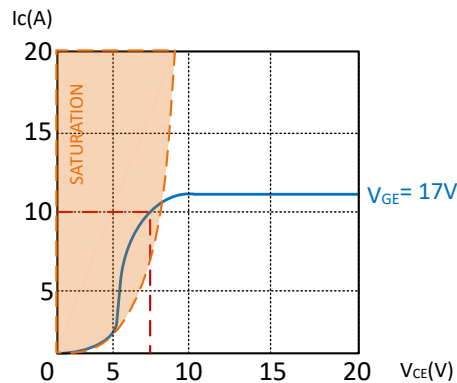


図 3-1. DESAT 選択 V_{CE} スレッシュヨルド

3.3 与えられたパラメータ

R_{LIM} を選択してダイオードの順方向電流を制限します。図 3-2 の HV ダイオードの I-V 曲線の例では、54.9k Ω を選択すると V_F が 0.7V に制限されます。TPSI3100 ファミリーは補助回路に電力を供給するために 25mW を使用でき、 $R_{LIM} = 54.9k\Omega$ の消費電力は最大 5.26mW であることに注意してください。

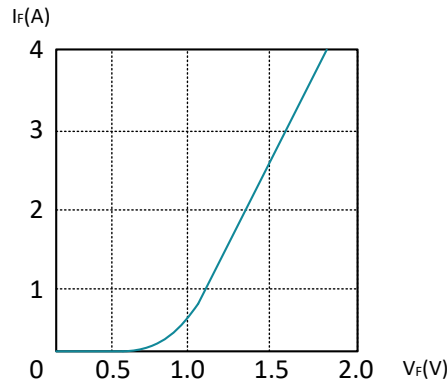


図 3-2. HV ダイオードの I-V 曲線の例

表 3-2. 指定された設計パラメータの値

パラメータ	値
$V_{CE(DSAT)}$	7.5V
$V_F(DIODE)$	0.7V
V_{REF+}	1.23V
R_{LIM}	54.9k Ω

3.4 指定したパラメータを関係式に挿入

- $(7.5V + 0.7V) \times 1.2(20\%margin) < \frac{R_{DIV1} + R_{DIV2}}{R_{DIV2} + R_{DIV1} + 54.9e3} \times 17V$
- $\frac{R_{DIV2}}{R_{DIV2} + R_{DIV1}} \times (7.5V + 0.7V) > 1.23V \times 1.2(20\%margin)$

3.5 未知の方程式を解く

- $R_{DIV1} > -\frac{41}{50}$
- $R_{DIV2} > \frac{1}{73}(5325300 - 73 \times R_{DIV1})$

3.6 式を満たすための抵抗の選択

表 3-3. 選択された設計抵抗

パラメータ	値
R_{DIV1}	23.9k Ω
R_{DIV2}	11.5k Ω

3.7 ブランキング容量の決定

一般的な RC の式から始まる 10 μ s の最大遅延要件に基づいて、 C_{BLK} の値を選択します。 $R_{RESP} < 10k\Omega$ を使用する場合、伝搬遅延時間は 460ns と長くなる可能性があり、その原因を考慮する必要があります。テブナンまたはノートン等価回路を使用して、 C_{BLK} で観測される等価抵抗を求めます。

$$V_C = V_S \times \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \quad (3)$$

$$V_{REF+} < VDDH \times \left(1 - e^{-\frac{(t_{MAXDELAY} - t_{RESP}) \times (R_{LIM} + R_{DIV1} + R_{DIV2})}{(R_{LIM} + R_{DIV1}) \times R_{DIV2} \times C_{BLK}}}\right) \quad (4)$$

$$1.23 < 17 \times \left(1 - e^{-\frac{(10\mu - 460n) \times (54.9e3 + 23.9e3 + 11.5e3)}{(54.9e3 + 23.9e3) \times 11.5e3 \times C_{BLK}}}\right) \quad (5)$$

$$0 < C_{BLK} < 12.66nF$$

(6)

3.8 最終部品の値

これらの値を選択すると、設計によって過飽和が防止され、初期要件で指定された要求される遅延時間を満たします。

表 3-4. 最終設計部品の値

部品	値
R _{LIM}	54.9kΩ
R _{DIV1}	23.9kΩ
R _{DIV2}	11.5kΩ
C _{BLK}	<12.66nF

3.9 ラボ テスト

以下の波形は、DESAT 回路が動作している様子を示しており、過電流状態を検出して IGBT が損傷する前にシャットダウンできることを確認しています。

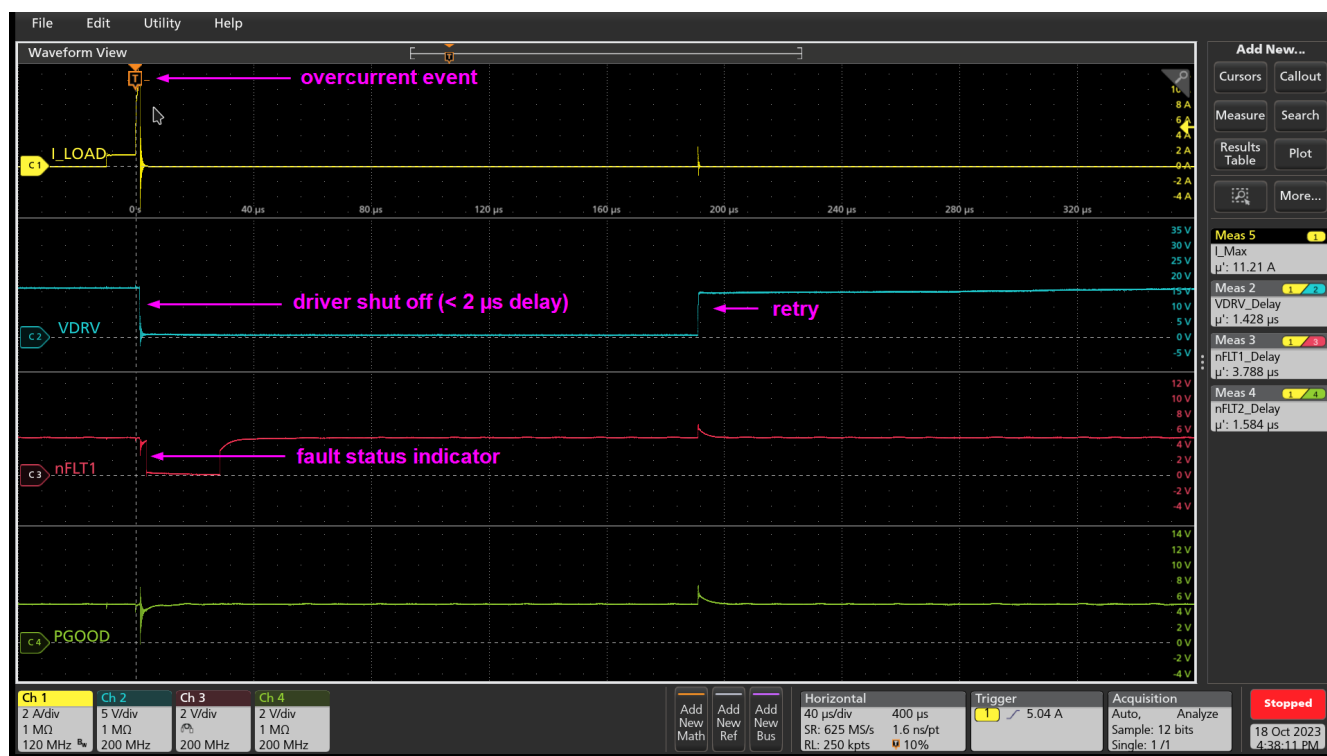


図 3-3. DESAT 回路の波形

4 クロージング

DESAT 保護機能を適切に実装すると、破壊的な過飽和を防止することで、SiC MOSFET と IGBT の信頼性と寿命を向上させることができます。DESAT 保護機能を備えた TPSI3133 のような絶縁型ゲートドライバを慎重に選定し、部品値を適切に計算することで、設計者はスイッチング速度を最適化しつつ、誤検出の防止も実現することができます。この記事では、特定の DESAT 設計要件を満たす部品を選択する方法の例を紹介します。エンジニアは過電流事象に対するパワー半導体の目的で DESAT 保護を使用することができ、大電力アプリケーションで効率と長期的な性能を確保することができます。

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、テキサス・インスツルメンツ製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとします。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツはその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。テキサス・インスツルメンツや第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる テキサス・インスツルメンツ製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツの保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、テキサス・インスツルメンツはそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、技術データと信頼性データ(データシートを含みます)、設計リソース(リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、テキサス・インスツルメンツ製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適したテキサス・インスツルメンツ製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとします。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されているテキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツはその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。テキサス・インスツルメンツや第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかるテキサス・インスツルメンツ製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツの保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、テキサス・インスツルメンツはそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated