

堅牢で信頼性の高い電力パス保護を実現する電源スイッチの過渡保護設計

Rakesh Panguloori
Applications manager

Kunal Goel
Applications engineer

はじめに

最新の電子システム内に部品を統合すると、機能が向上し、性能が向上します。これらのシステムの多くは、高感度で高価な電子デバイス (フィールド プログラマブル ゲート アレイ、特定用途向け IC、マイクロプロセッサ) を使用しているため、保護を必要とします。

ヒューズ、PTC (正の温度係数) 抵抗、ダイオード、ディスクリート回路 (ヒューズ、金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ、ダイオード) などの従来の保護ソリューションは、精度が低く、応答が遅く、構成や再現性にも欠けています。そのため、eFuse とホットスワップ ソリューションを使用したアクティブ回路保護が、多くのアプリケーションで個別のフロントエンド保護回路に取って代わり始めています [1]、[2]。

ただし、アクティブ回路保護 eFuse は多くの場合、過渡事象から保護するために追加の保護機能が必要とします。最も一般的な過渡イベントには、ホットプラグ、突然の電流中断、電源サージ、ハード スイッチング、逆電圧などがあります。

これらの過渡事象のいずれかがデバイスに電気的オーバーストレスを加え、故障につながります。この記事では、電気的オーバーストレス (EOS) と、配置やプリント基板 (PCB) レイアウトの検討事項も含め、200A eFuse エンタープライズ サーバーアプリケーションで使用する過渡保護部品の設計プロセスについて説明します。

EOS を理解する

ESD 業界協議会 は、**電気的過ストレス** [3] を、「デバイスにかかる電圧、電流、または消費電力のいずれかの最大限度を超えて、即時の損傷や故障、または予測できない寿命の短縮につながる潜在的な損傷が発生する場合」と定義しています。このような条件が発生した場合、ダイオードの順方向ブレイクダウンや逆方向ブレイクダウンなど、意図しない電流パスが開路になる可能性があるのは過電圧です。ダイオードや酸化物が集積回路 (IC) 内でブレイクダウン電圧に達することになります。過電圧が意図しない電流経路を開くと、電流は結果としてシリコンの溶断、金属の相互接続のヒューズ、パッケージ材料の熱的損傷、ボンドワイヤのヒューズなどの損傷を引き起こす可能性があります。これは、電気的に誘導される物理的損傷 (EIPD) につながります。

EOS をデバイスの電圧定格に固有の絶対最大定格に関連付けることができます。

- 領域 A: 安全な操作領域。
- 領域 B: デバイスの機能やパラメータ仕様については保証しません。物理的な損傷は予想されませんが、長時間動作すると信頼性の問題が発生する可能性があります。
- 領域 C: 絶対最大定格を超えると、デバイスの寿命に深刻な劣化が生じるほか、潜在的な故障のリスクが伴います。
- 領域 D: 直ちに物理的な損傷を受けることが予想されます。

図 1 に示すように、デバイスが絶対最大定格を超えて動作する場合に問題が発生することが予想されます。このため、過渡的な過電圧を絶対最大定格を超えて抑制するには、保護が必要です。

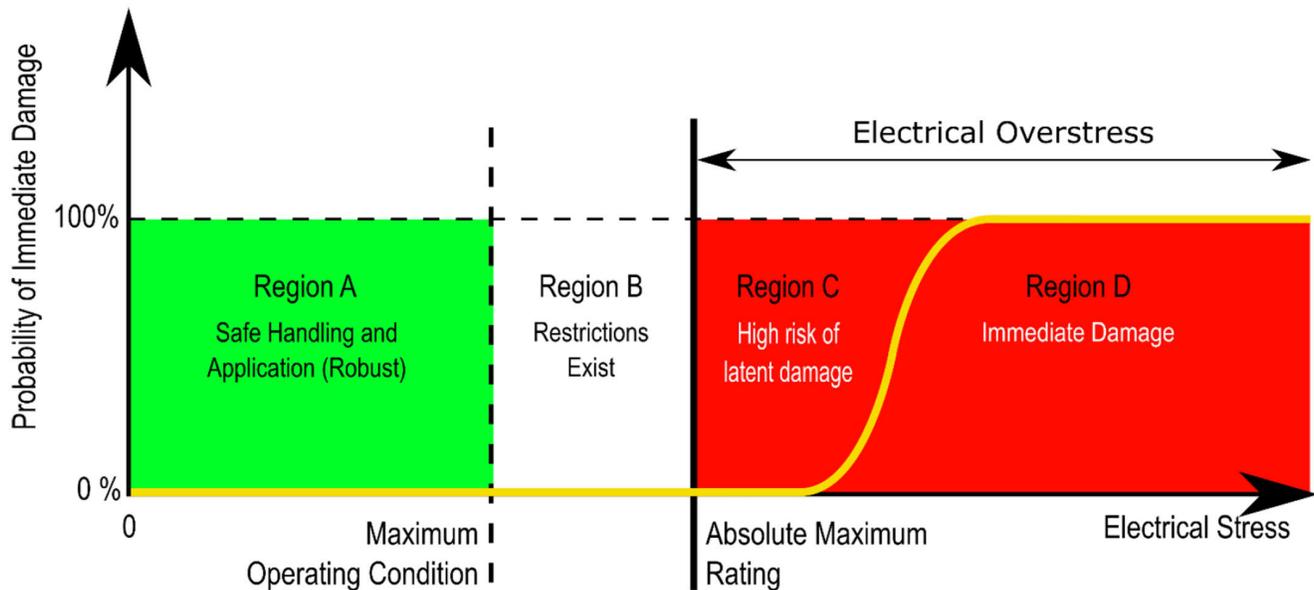


図 1. 絶対最大定格を EOS に解釈する。

エンタープライズ サーバシステムの例

eFuse は、入力保護とホットスワップ機能を実現するために、フロントエンドのラック サーバー モジュールで広く使用されています。図 2 に、ラックサーバーの代表的な電力分配アーキテクチャを示します。ここでは、入力は 12V バックプレーンから供給され、eFuse からすべてのダウンストリーム負荷に分配されます。バックプレーン、PCB パターン、およびインターフェイス コネクタを含むパワー パスにより、寄生インダクタンス (L) が発生し、故障イベント中に意図しない過渡電圧が発生することになります。

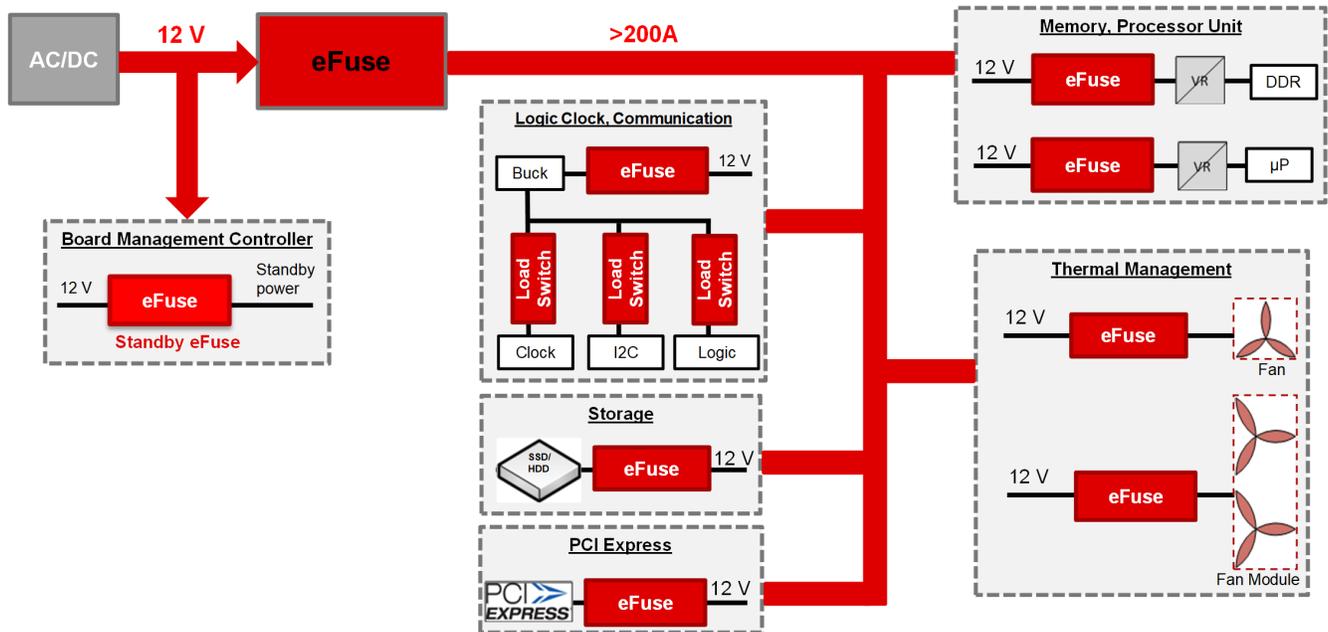


図 2. 12V ラックサーバーの配電を示す代表的なブロック図。

図 3 に示すように、L が eFuse に及ぼす影響を定量的に分析してみましょう。出力短絡の場合、eFuse は 1μs 内にある約 200A (過電流) から 0A (保護のためのシャットオフ) まで大電流を瞬時に割り込みます。その結果、式 1 に示すように大きな電流過渡 (di/dt) が発生します。

$$di/dt = (0A - 200A)/1\mu s = -2 \times 10^8 A/s \tag{1}$$

この電流は、寄生インダクタンスのエネルギーとして捕捉され、式 2 で表されるサージを生成します。

$$V_L = L \times di/dt = 100nH - 2 \times 10^8 A/s = -20V \tag{2}$$

この -20V のサージを 12V 入力電源に直列接続し、実質的に 32V の正の電圧スパイクを生成します。これは、テキサス・インスツルメンツ (TI) の TPS25984B eFuse の VIN の絶対最大定格 20V を上回ります。同様に、出力インダクタンスによって、出力に負の電圧スパイクが生じます。

これを防止するために、過渡電圧サプレッサ (TVS) ダイオードによって正側の電圧がクランプされ、低順方向電圧のフリーホイール ショットキー ダイオードによって負側の電圧がクランプされます。システム保護の信頼性を確保するには、これらの部品を慎重に選択する必要があります。

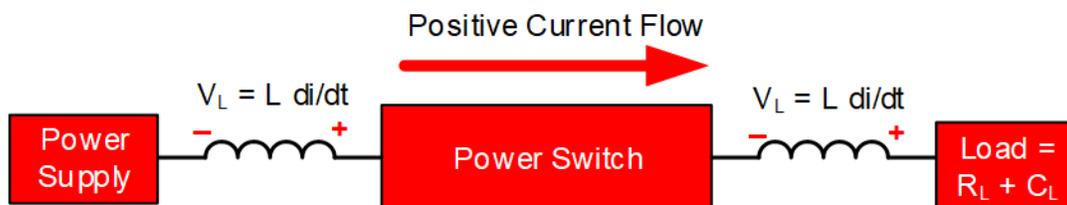


図 3. 電源スイッチ内の障害電流の突然の中断によって発生した誘導性キックバック電圧。

TVS ダイオードの選択

TVS ダイオードは、電圧スパイクから電子部品を保護するように設計されています。TVS ダイオードは、ダイオードの電圧がアバランシェブレークダウン電位を超えると動作を開始します。図 4 は、TVS ダイオードの電流電圧曲線のグラフです。

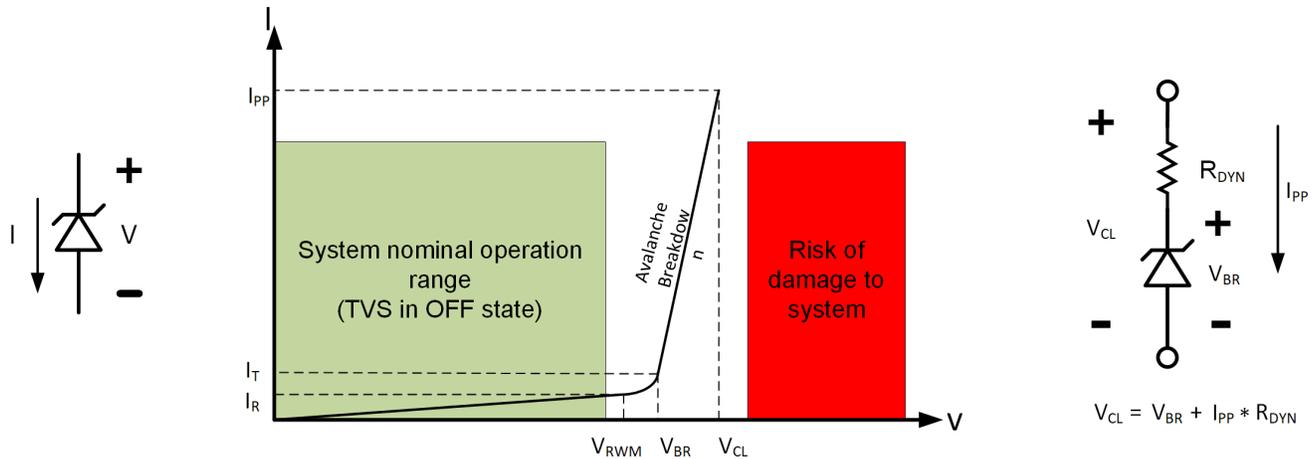


図 4. TVS ダイオードの特性。

図 4 から理解できるように、最終的なクランプ電圧は電流の関数になります。この電流は TVS ダイオードがシャントされ、TVS ダイオードの動的抵抗 (R_d) が変化します。ここでも動的抵抗は、ダイオード パッケージ サイズと、TVS ダイオードが電流をシャントする期間 (t_p) の関数です。

たとえば、SMAJ ダイオード (13.52mm^2) の R_d は SMBJ ダイオード (19.44mm^2) よりも高いため、SMAJ ダイオードは特定のシャント電流でより高いクランプ電圧につながります。

これらの R_d の値を使用してクランプ電圧を計算します。これらの値は、TVS ダイオードのメーカーのデータシートから取得しています。

$t_p \leq 20\mu\text{s}$ の場合：

$$R_d(t_p) = R_D(8/20\mu\text{s}) \quad (3)$$

$20\mu\text{s} < t_p < 1\text{ms}$ の場合：

$$R_d(t_p) = \frac{R_D(10/1,000\mu\text{s}) - R_D(8/20\mu\text{s})}{980} [t_p - 20\mu\text{s}] + R_d(8/20\mu\text{s}) \quad (4)$$

$t_p \geq 1\text{ms}$ の場合：

$$R_d(t_p) = R_D(10/1,000\mu\text{s}) \quad (5)$$

このマルチパラメータ依存性は、困難な反復設計プロセスをもたらします。設計を容易にするため、TI は TVS セレクション [5] 用のオンライン ツールをリリースしました。図 5 は設計方法をフローチャートとして示し、表 1 はラック サーバーの一般的な仕様をリストしています。

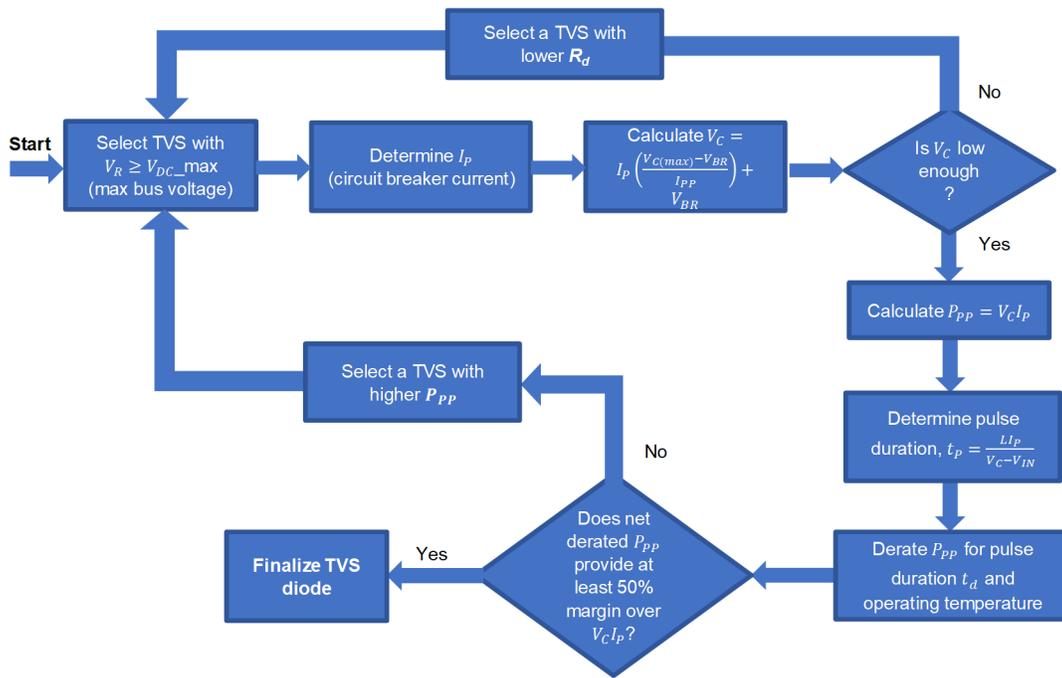


図5. TVS ダイオード選択のフローチャート。

パラメータ	値
公称動作電圧 (V _{IN})	12V
最大動作電圧 (V _{DC_max})	13.2V
サーキットブレーカ電流 (I _p)	200A
寄生インダクタンス (L)	100nH
最大許容電圧 (V _{C(max)})	20V
最大動作温度	75°C

表1. 代表的なシステム仕様。

設計手順

ラックサーバーの入力保護を設計する際は、TPS25984B eFuse のサポート部品の値をデータシートから選択し、TVS 選択に関する以下の設計手順に従ってください。まず、逆スタンドオフ電圧が V_{DC_max} 以上の単方向 TVS を選択します。Littelfuse SMDJ12A ダイオード [4] を出発点として選択しました。次に、サーキットブレーカ電流 I_p を求めます。クラмп電圧を計算します。R_d は t_p の関数なので、式 6 を使用して t_p を求めます。

$$t_p = \frac{L I_p}{V_{C(max)} - V_{IN}} = \frac{100\text{nH} \times 200\text{A}}{20\text{V} - 12\text{V}} = 2.5\mu\text{s} \quad (6)$$

20μs 以下のパルス幅では、8/20μs テストパルスでのダイナミック抵抗を近似できます。SMDJ12A データシートから、以下のよう な計算をしました。

$$V_{BR(max)} = 14.7\text{V} \quad (7)$$

$$V_{C(max)atI_{pp}(8/20\mu\text{s})} = 25.71\text{V}$$

$$I_{pp}(8/20\mu\text{s}) = 754\text{A}$$

次のようになります。

$$R_d(8/20\mu s) = \frac{V_C(\max) - V_{BR}(\max)}{I_{PP}} = \frac{25.71 - 14.7}{754} = 14.6m\Omega \quad (8)$$

次に、14.6mΩ の R_d を使用してクランプ電圧を計算します。

$$V_C = V_{BR}(\max) + I_P R_d = 14.7V + 200A \times 14.6m\Omega = 17.6V \quad (9)$$

クランプ電圧は最大許容電圧 $V_{C(\max)}$ (TPS25984B eFuse の絶対最大定格 20V) 未満であるため、SMDJ12A を使用してさらに進めることができます。それ以外の場合、 R_d がより低い TVS ダイオード、または並列 TVS ダイオードを検討する必要があります。

以下を用いてピーク電力を計算します。

$$P_{PP} = V_C I_P = 17.6V \times 200A = 3.52kW \quad (10)$$

SMDJ12A は 2.5μs で 60kW のピーク電力をサポートしているため (図 6 を参照)、さらに進めることができます。

図 6 を使用して、温度に対する電力定格をデレーティングします。75°でサポートされる最大電力は次のとおりです。

$$P_{PP} \times \text{derating_factor} = 0.8 \times 60kW = 48kW \quad (11)$$

48kW > 3.52kW、 $V_C < 20V$ なので、SMDJ12A がこのアプリケーションに適しています。

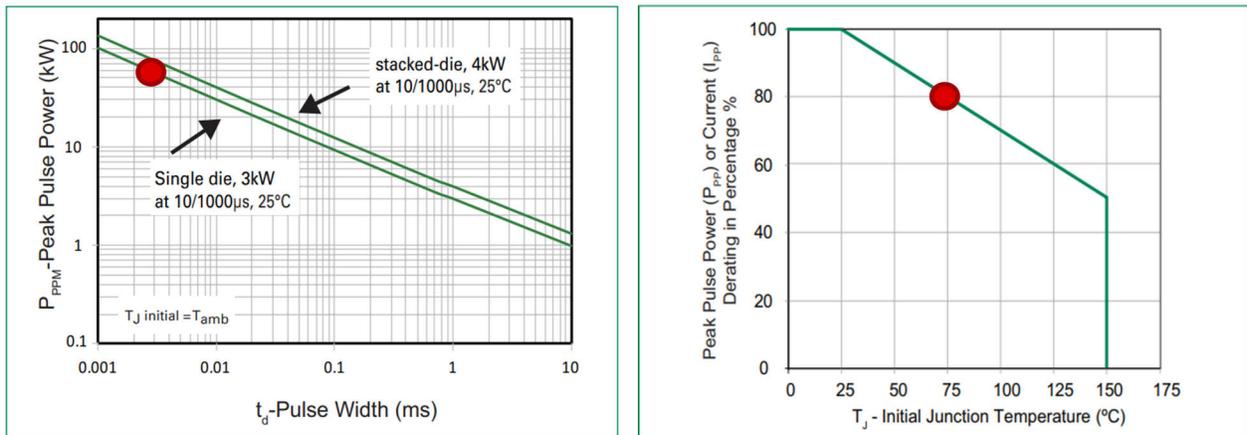


図 6. ピークパルス電力定格 (左) およびピークパルス電力デレーティング曲線 (右)。

図 7 に、TPS25984B システムの SMDJ12A のクランプ性能を示します。

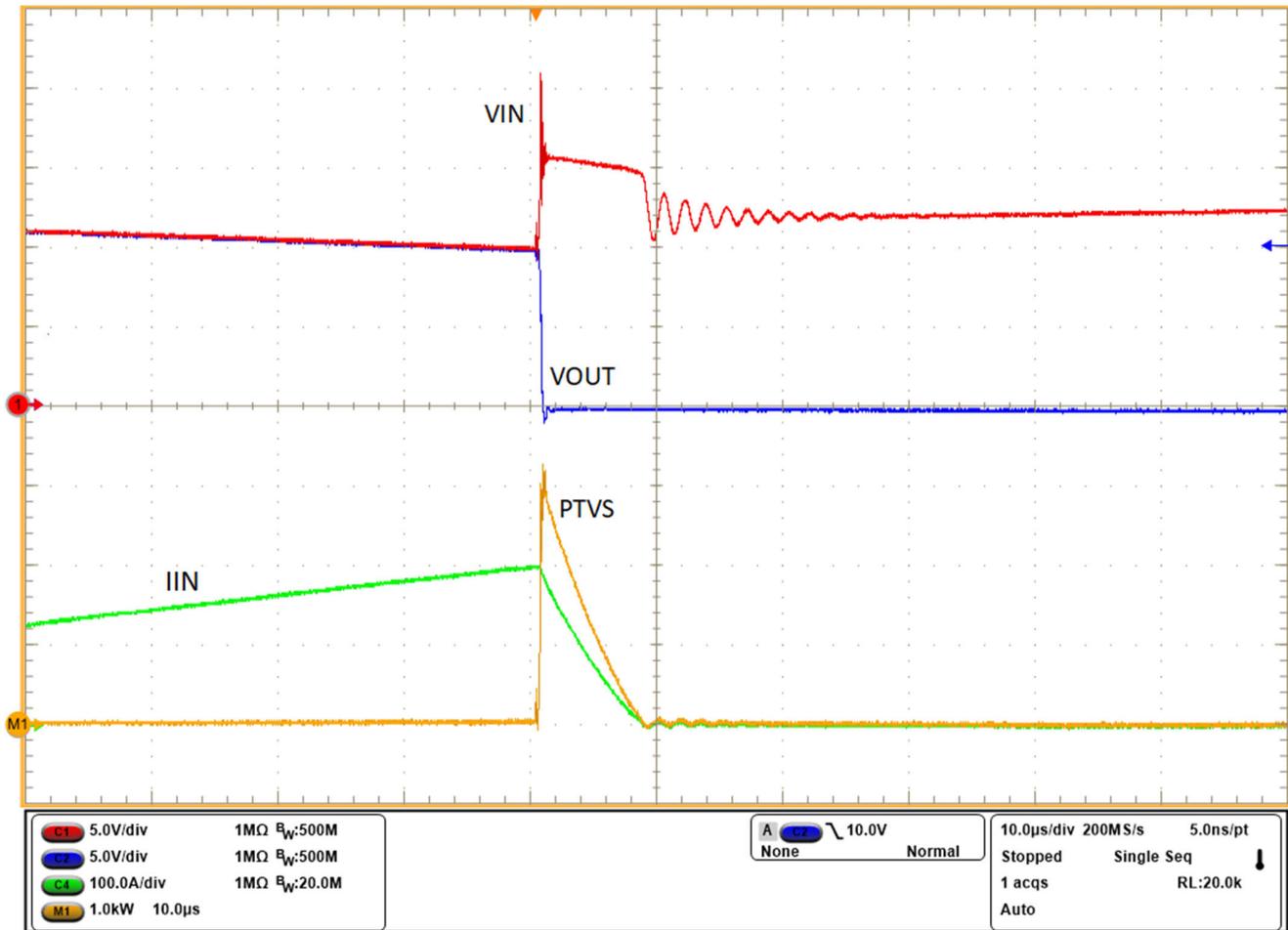


図 7. TPS25984B eFuse の入力に SMDJ12A ダイオードを使用した過渡保護。

出力ショットキー ダイオードの選択

図 8 に、OUT ピンをグランドより低い電位にすると、IC 内部で発生する可能性のあるイベントのシーケンスを示します。寄生 PN 接合ダイオードが導通し始め、それによって基板に自由電子が注入されます。これらの自由電子は、IC をリセットしたりラッチアップイベントを引き起こす可能性のある他の制御ユニットと干渉します。寄生 PN 接合ダイオードに大きな電流が導通した場合、EOS が発生し、EIPD につながる可能性があります。

これらの問題を防ぐには、OUT ピンのピーク負電圧を下げるか、OUT ピンを流れる電流を制限します。OUT ピンの近くに出カコンデンサを追加すると、負の電圧スパイクによってエネルギーの一部が吸収され、スルーレートが制御されて、負のピーク電圧が制限されます。OUT ピンに低い順方向電圧のショットキー ダイオードを追加すると、別の経路の電流が提供され、IC を流れる電流が制限されます。

効果的なクランプには、コンデンサとショットキー ダイオードの組み合わせが必要です。より大きな出力コンデンサが役に立つ場合がありますが、ショットキー ダイオードを選択する際には、以下のガイドラインを使用してください。

- DC ブロッキング電圧は最大入力動作電圧よりも高くなければなりません。
- 選択したダイオードの非反復ピーク順方向サージ電流は、 I_P より高くなければなりません。
- I_P での順方向電圧降下は、OUT ピンの絶対最大定格内 (TPS25984B では -1V) にする必要があります。

このアプリケーションでは、Diodes Incorporated の SBR10U45SP5 [6] ダイオードを 2 つ並列に使用しました。

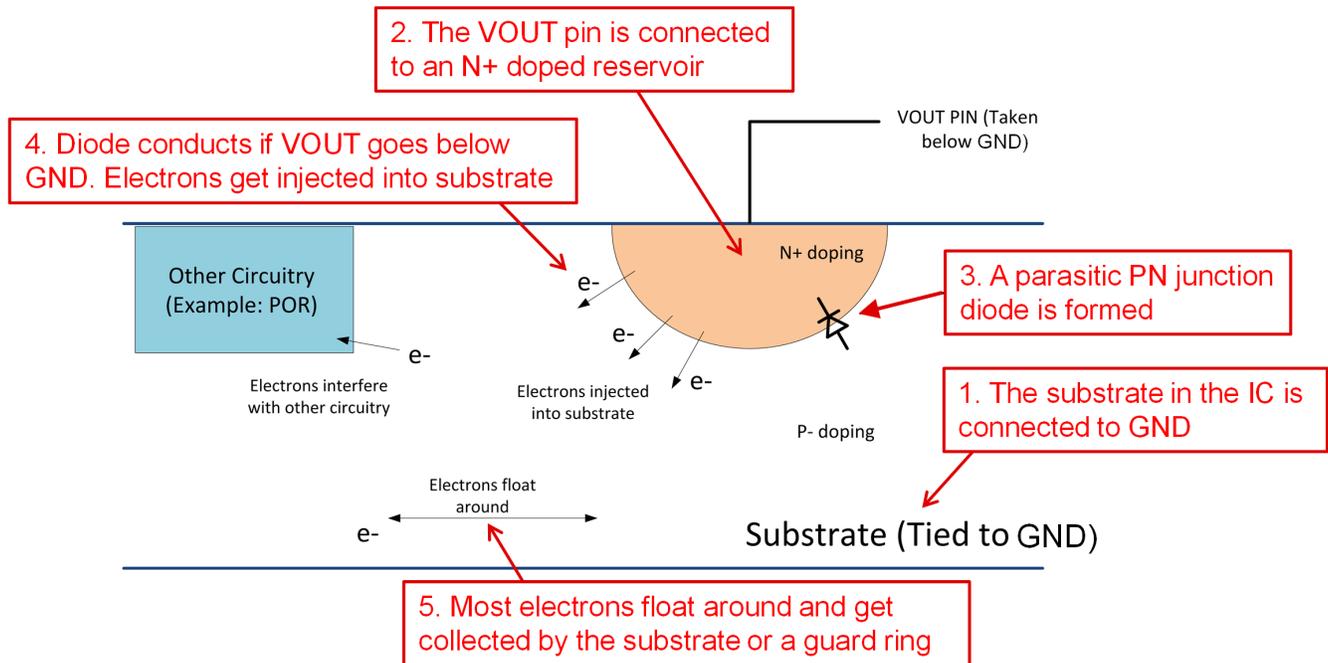


図 8. 出力をグラウンドより下にした場合の IC 内部の影響を示す図。

TPS25984B ソリューションでショットキー ダイオードを使用した場合と使用しない場合の出力クランプ性能を、**図 9** に示します。

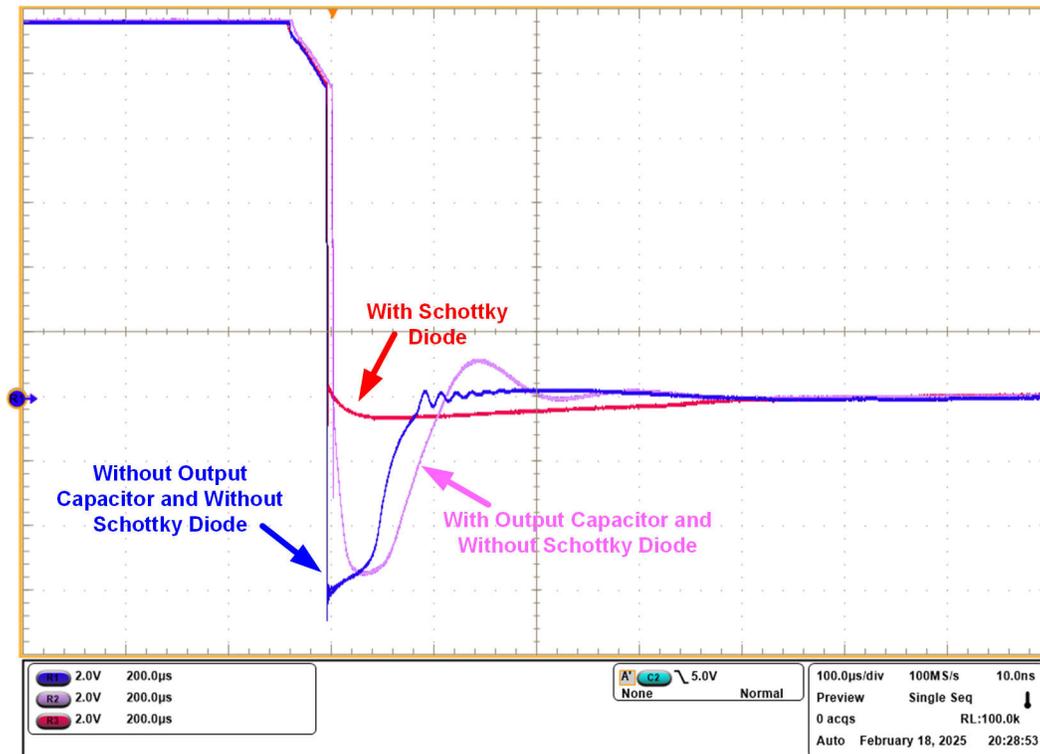


図 9. eFuse の出力側での過渡保護を実現します。

大電流ホットスワップソリューションを使用する場合、二次側保護 (**図 10** を参照) により、出力時のショットキー ダイオードの要件を最小限に抑えることができます。ご覧のように D1 は負の電圧過渡によってエネルギーの大部分を吸収します。47Ω などの値の小さい抵抗 (R1) と、SS13 などのダイオード (D2) を追加すると、残りのエネルギーが大幅に制限されます。

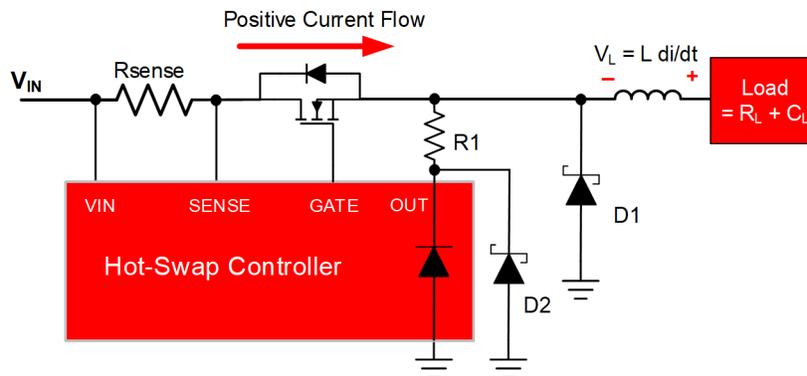


図 10. 大電流ホット スワップ ソリューションにおける二次側保護。

配置と PCB レイアウトの検討事項

TVS ダイオード、デカップリング コンデンサ、ショットキー ダイオードなどの保護デバイスは、物理的に保護対象のデバイスの近くに配置する必要があります。分布したインダクタンスにより、デカップリング コンデンサや TVS ダイオードなどのシャント素子の効果の帯域幅が制限されます。図 11 に示すように、サージ電流の流れを制限し、クランプ時の大きな過渡電圧スパイクも発生します。したがって、レイアウトはこれらのシャント素子の直列インピーダンスが最小になるようにする必要があります。配線時には、短いパターンと複数のビアを使用して、インダクタンスを小さくします。

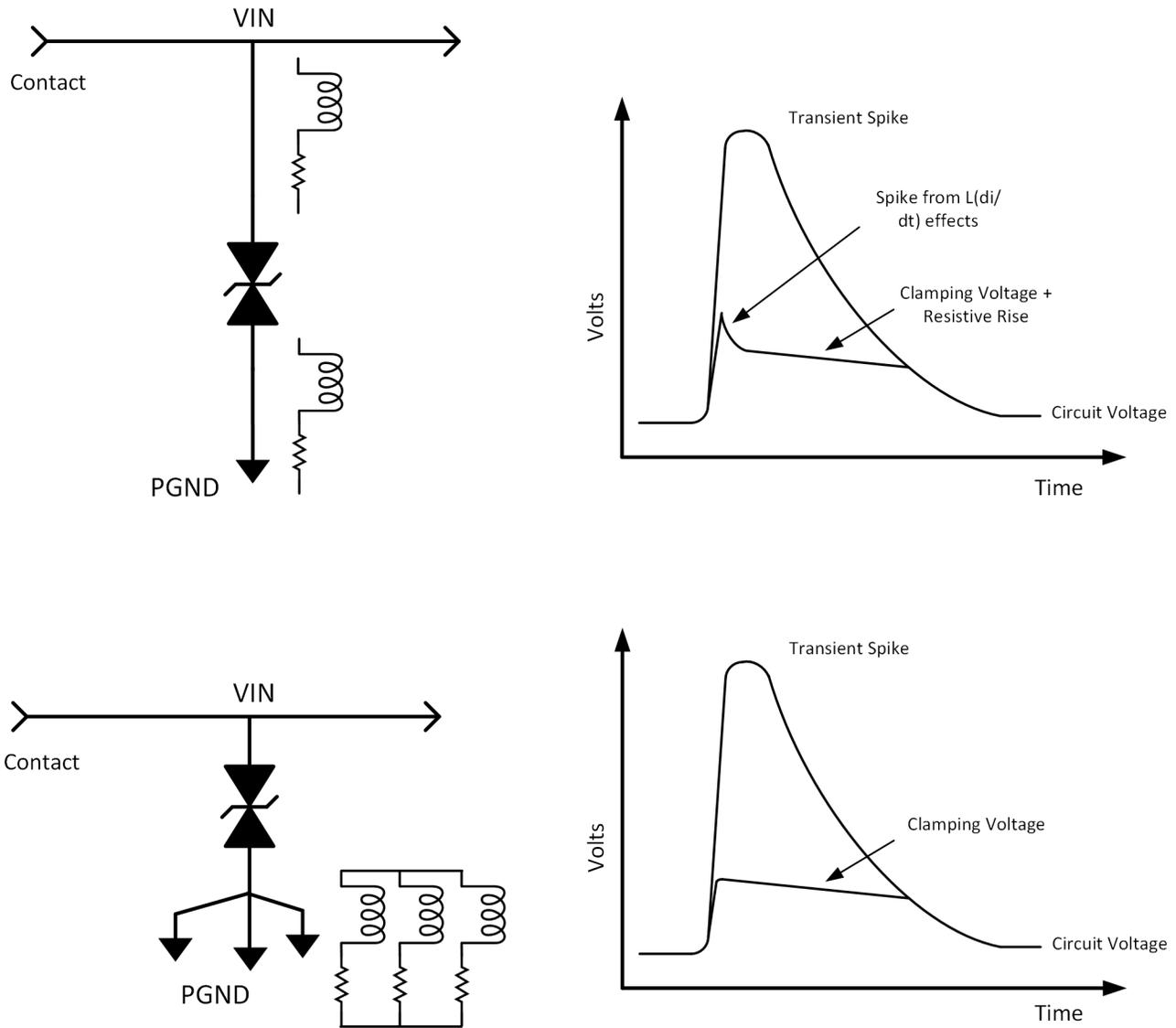


図 11. PCB レイアウトに対する TVS クランプ性能の影響。

まとめ

性能向上のため、ディスクリート フロントエンド保護回路は eFuse などのアクティブ回路保護デバイスに置き換えられています。ただし、eFuse は多くの場合、絶対最大仕様違反を防止するために、過渡保護機能を必要とします。この記事で説明している部品選定のガイドラインとレイアウトに関する検討事項を参照すると、信頼性の高い電源パス保護を実現するソリューションを設計する際に役立ちます。

参考資料

1. Panguloori, Rakesh. 2016.『**eFuse の基礎**』テキサス・インスツルメンツ アプリケーション レポート、文献番号 SLVA862A、2016 年 12 月
2. Rogachev, Artem. 2014.『**堅牢なホットスワップ設計**』、テキサス・インスツルメンツ アプリケーション レポート、文献番号 SLVA673A、2014 年 4 月
3. ESD に関する業界協議会。『**ホワイトペーパー 4: 電氣的過負荷を理解する – EOS.**』2016 年 8 月。
4. 『**SMDJ12A TVS 3KW 12V 5%UNI DO-214AB TR13 RoHS**』Littlefuse データシート。2025.
5. テキサス・インスツルメンツ (発行年記載なし) **TVS ダイオード推奨ツール**。2023 年 6 月 26 日。
6. 『**SBR10U45SP5 10A SBR スーパーバリア整流器.**』Diodes Inc. データシート、文献番号. DS31371、2024 年 1 月。

関連ウェブサイト

- [TPS25984B](#)
- [LM5066I](#)

重要なお知らせ:ここに記載されているテキサス・インスツルメンツ社および子会社の製品およびサービスの購入には、TI の販売に関する標準の使用許諾契約への同意が必要です。お客様には、ご注文の前に、TI 製品とサービスに関する完全な最新情報のご入手をお勧め致します。TI は、アプリケーションに対する援助、お客様のアプリケーションまたは製品の設計、ソフトウェアのパフォーマンス、または特許の侵害に対して一切責任を負いません。ここに記載されている他の会社の製品またはサービスに関する情報は、TI による同意、保証、または承認を意図するものではありません。

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

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