

電源開關的暫態保護設計，可實現穩健、可靠的電源路徑保護

Rakesh Panguloori
Applications manager

Kunal Goel
Applications engineer

簡介

現代電子系統中的元件整合可提升功能性，進而強化性能。這些系統大多數使用敏感、昂貴且需要保護的電子裝置（現場可編程閘極陣列、特定應用積體電路和微處理器）。

傳統保護解決方案，如保險絲、正溫度係數電阻器、二極體和離散電路（包括保險絲，金屬氧化半導體場效電晶體和二極體）存在不準確，反應較慢，且缺乏可配置性和可重複性的缺點。因此，使用 eFuse 及熱插拔解決方案的主動電路保護已開始取代許多應用中的離散式前端保護電路 [1]、[2]。

但主動電路保護 eFuse 通常需要額外防護，用於保護自身免受暫態事件影響。最常見的暫態事件包括熱插拔、電流突然中斷、電源突波、硬切換和反向電壓。

這些暫態事件都會對裝置造成電性過壓，進而導致故障。在本文中，我們將討論 200A eFuse 企業伺服器應用中的電性過壓 (EOS) 和暫態保護元件設計流程，包括放置與印刷電路板 (PCB) 佈局考量。

了解 EOS

ESD 產業委員會將**電性過壓** [3] 定義為「裝置中的電壓、電流或功耗超出自身的最大限制並立即造成損壞或故障，或造成潛在損壞，從而導致無法預料的使用壽命縮短。」在這些狀況中，過電壓會開啟非預期的電流路徑，例如二極體的正向或反向擊穿，或使積體電路 (IC) 內的氧化物達到崩潰電壓。一旦過電壓開啟非預期的電流路徑，所產生的電流便會造成損壞，包括矽晶熔化、金屬互連的熔融、封裝材料的熱損壞以及接合線熔融，從而導致電氣誘發的物理損壞 (EIPD)。

您可將 EOS 與裝置額定電壓特有的絕對最大額定值相關聯：

- 區域 A：安全操作區。
- 區域 B：無法保證裝置功能或參數規格。儘管預計不會出現物理損壞，但延伸的操作可能存在可靠性問題。
- 區域 C：超過絕對最大額定值，裝置使用壽命會嚴重劣化，且有潛在故障的風險。
- 區域 D：預計會立即遭受物理損壞。

如 **圖 1** 所示，當裝置運作超出絕對最大額定值時，您應預期會發生問題。這也是為何我們要抑制超過絕對最大額定值的暫態過電壓並加以保護。

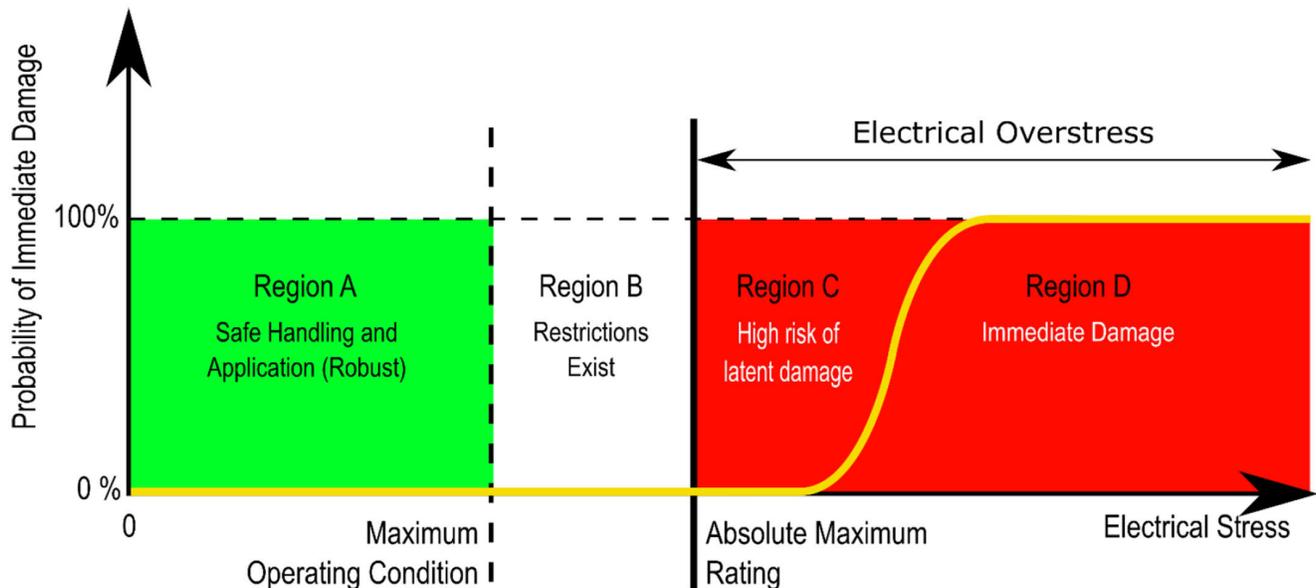


圖 1. 將絕對最大額定值轉譯為 EOS。

企業伺服器系統範例

eFuse 廣泛用於前端的機架式伺服器模組中，以提供輸入保護和熱插拔功能。**圖 2** 顯示機架式伺服器的典型配電架構，其中輸入來自 12V 背板，然後從 eFuse 分配至所有下游負載。包含背板、PCB 佈線與介連接器的電源路徑會引入寄生電感 (L)，並在故障事件期間產生非預期的暫態電壓。

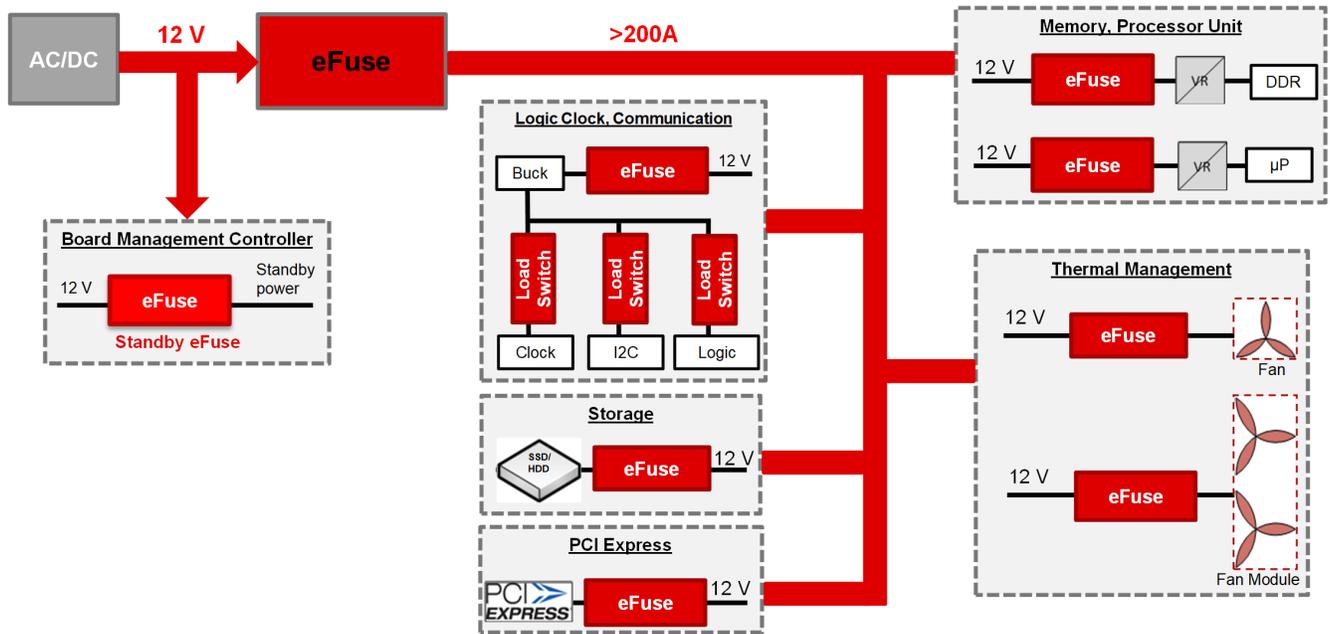


圖 2. 12V 機架式伺服器配電的典型方塊圖。

讓我們量化分析 L 對 eFuse 的影響，如 圖 3 中所示。若發生輸出短路，eFuse 會瞬時中斷大量電流，在 1μs 內從約 200A（過電流）降至 0A（關閉保護），進而產生大電流暫態 (di/dt)，如 方程式 1 中所示：

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

此電流會作為能量滯留在寄生電感中並產生突波，如 方程式 2 中所示：

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

該 -20V 突波將與 12V 輸入電源供應器串聯，並將實際產生 32V 的正電壓突波，超過德州儀器 (TI) TPS25984B eFuse 的 20V VIN 絕對最大額定值。同樣地，輸出電感也會在輸出上產生負電壓突波。

為防止發生這種情況，我們需使用暫態電壓抑制器 (TVS) 二極體對正極側電壓進行箝位保護，同時使用低順向電壓飛輪式肖特基二極體對負極側電壓進行箝位保護。必須謹慎選擇這些元件，以確保可靠的系統保護。

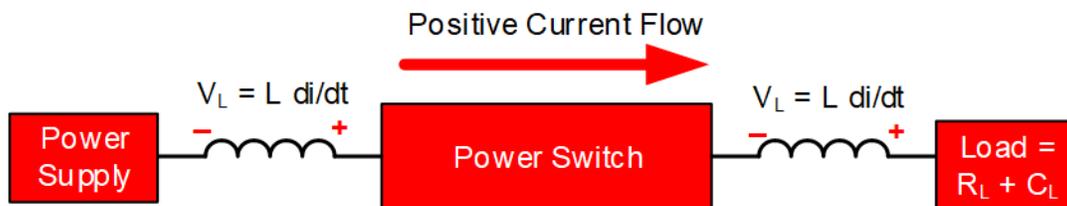


圖 3. 電源開關故障電流突然中斷所造成的電感回衝電壓。

TVS 二極體選擇

TVS 二極體的設計旨在保護電子元件免受電壓突波的影響。一旦二極體上的電壓超過雪崩擊穿電位，TVS 二極體就會開始運作。圖 4 顯示 TVS 二極體電流電壓曲線圖表。

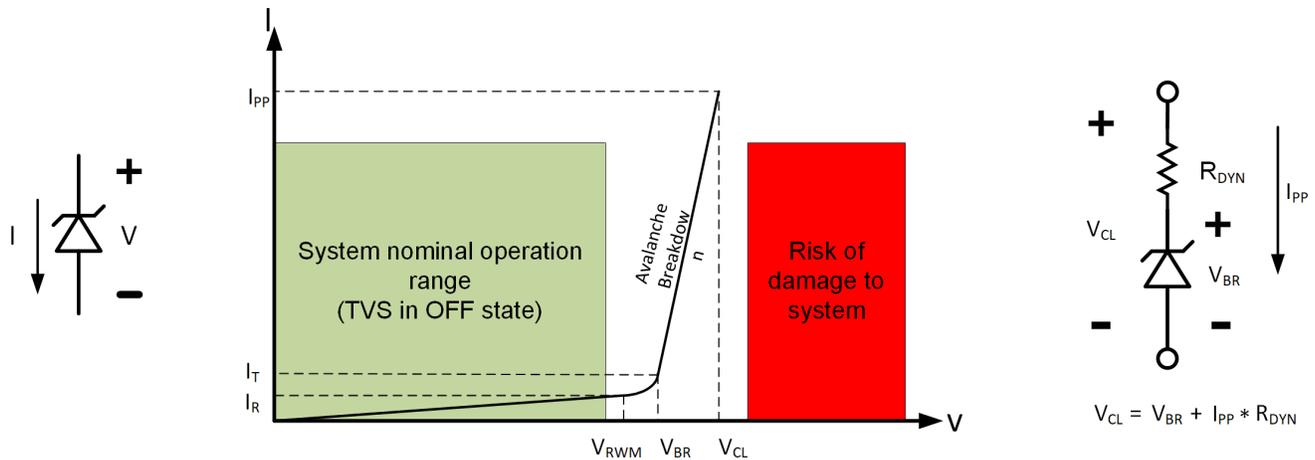


圖 4. TVS 二極體特性。

如圖 4 中所示，最終箝位電壓是 TVS 二極體分流的電流以及 TVS 二極體動態電阻 (R_d) 的函數。同樣地，動態電阻是二極體封裝尺寸和 TVS 二極體分流電流的時間 (t_p) 的函數。

例如，SMAJ 二極體 (13.52mm^2) 的 R_d 比 SMBJ 二極體 (19.44mm^2) 更高，因此 SMAJ 二極體在給定分流電流下會產生更高的箝位電壓。

使用這些 R_d 值計算箝位電壓，這些值可從 TVS 二極體製造商的產品規格表中取得。

對於 $t_p \leq 20\mu\text{s}$:

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

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

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

對於 $t_p \geq 1\text{ms}$:

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

這種多參數依賴性導致迭代設計過程充滿挑戰。為簡化設計程序，TI 推出適用 TVS 選擇的線上工具 [5]。圖 5 以流程圖的形式說明設計方法，同時表 1 列出機架式伺服器的典型規格。

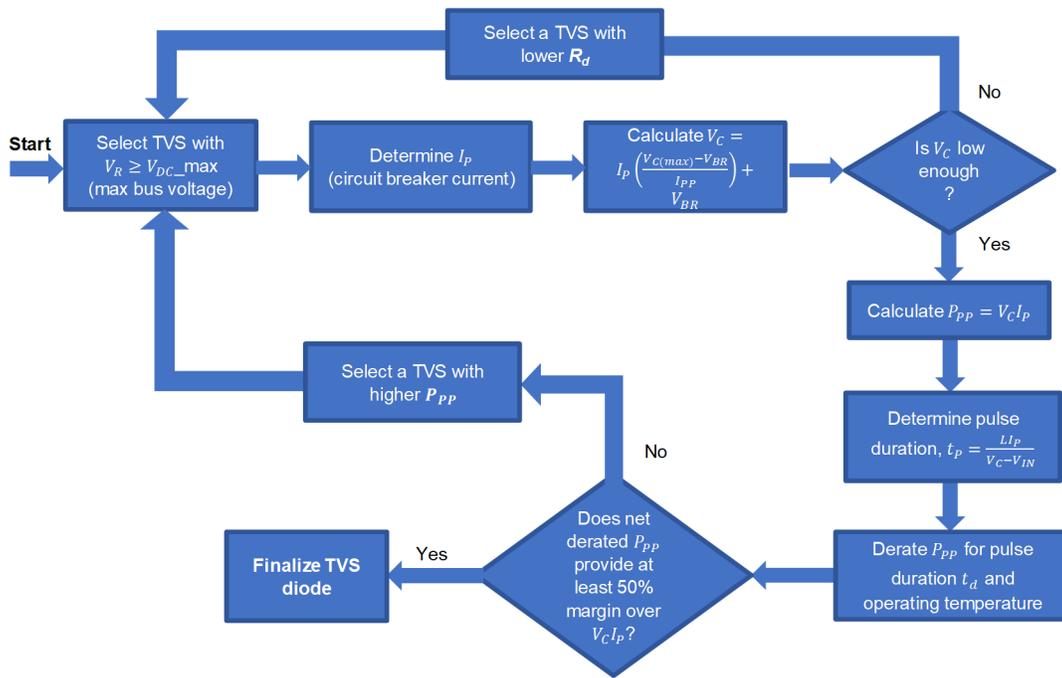


圖 5. TVS 二極體選擇的流程圖。

參數	值
額定操作電壓 (V_{IN})	12V
最大操作電壓 (V_{DC_max})	13.2V
斷路器電流 (I_p)	200A
寄生電感 (L)	100nH
最大耐受電壓 ($V_{C(max)}$)	20V
最大操作溫度	75°C

表 1. 典型系統規格。

設計步驟

設計機架式伺服器輸入保護時，請從其產品規格表中選擇 TPS25984B eFuse 的支援元件值，然後遵循以下 TVS 選擇設計步驟。首先，選擇反向標準電壓等於或大於 V_{DC_max} 的單向 TVS。我們選擇 Littlefuse SMDJ12A 二極體 [4] 作為起點。接下來確定 I_p ，即斷路器電流。然後計算箝位電壓。因為 R_d 是 t_p 的函數，所以使用 方程式 6 來查找 t_p ：

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

若脈衝寬度小於 $20\mu\text{s}$ ，可將動態電阻近似為 $8/20\mu\text{s}$ 測試脈衝時的動態電阻。在 SMDJ12A 產品規格表中，我們的計算結果為：

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

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

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

因而：

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

現在，使用 14.6mΩ 的 R_d 計算箝位電壓：

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

由於箝位電壓小於最大容許電壓 $V_{C(\max)}$ (TPS25984B eFuse 的 20V 絕對最大額定值)，您可以繼續使用 SMDJ12A；否則，您須考慮具有較低 R_d 的 TVS 二極體或並聯 TVS 二極體。

計算峰值功率時，使用：

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

由於 SMDJ12A 可支援 60kW 的峰值功率並持續 2.5μs (請參閱 圖 6)，因此您可以進一步操作。

現在，使用 圖 6 將額定功率與溫度一起降額。75° 時的最大功率支援為：

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

由於 48kW > 3.52kW 且 $V_C < 20V$ ，故 SMDJ12A 是此應用的理想選擇。

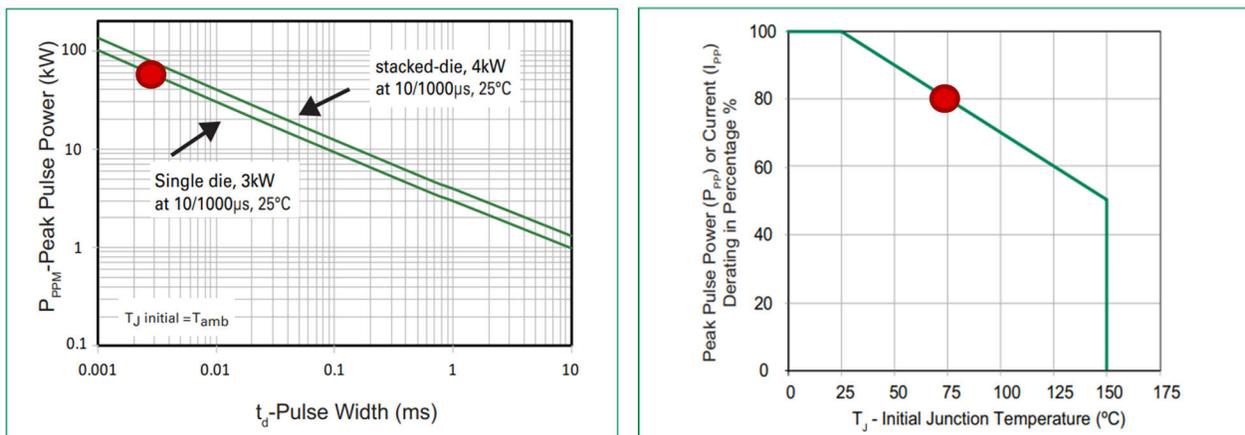


圖 6. 峰值脈衝功率額定值 (左) 和峰值脈衝功率降額曲線 (右)。

图 7 顯示 TPS25984B 系統上 SMDJ12A 的箝位性能。

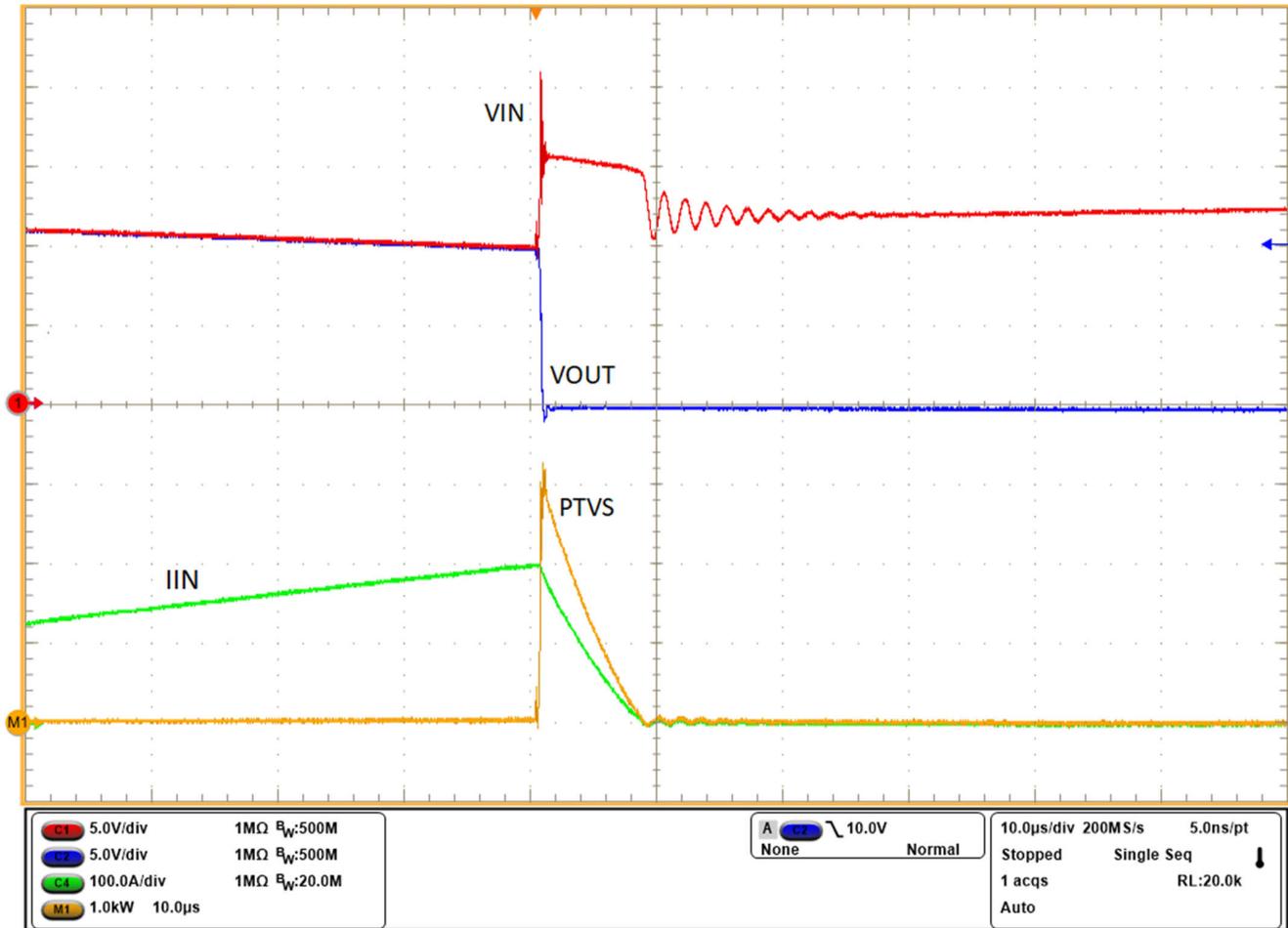


图 7. 在 TPS25984B eFuse 輸入端使用 SMDJ12A 二極體進行暫態保護。

輸出肖特基二極體選擇

图 8 顯示將 OUT 接腳移動至低於接地時，IC 內部可能發生的事件順序。寄生 PN 接點二極體開始導通，將自由電子注入基板。這些自由電子會干擾其他可能重設 IC 或導致門鎖效應事件的控制單元。若流經寄生 PN 接面二極體的導通電流過大，可能會造成 EOS 並導致 EIPD。

為避免發生前述問題，您可降低 OUT 接腳的峰值負電壓，或限制流經 OUT 接腳的電流。在 OUT 接腳附近增加輸出電容器可吸收負電壓突波的部分能量，並控制電壓轉換速率以限制峰值負電壓。在 OUT 接腳處增加低順向電壓的肖特基二極體可提供替代電流路徑，並限制流經 IC 的電流。

有效箝位需要結合電容器與肖特基二極體。雖然較高輸出的電容器會有所幫助，但在選擇肖特基二極體時請遵循以下準則：

- DC 阻斷電壓必須大於最大輸入操作電壓。
- 所選二極體的非重複尖峰順向突波電流必須高於 I_P 。
- I_P 的順向壓降必須在 OUT 接腳的絕對最大額定值範圍內（TPS25984B 的額定值為 -1V）。

在本應用中，我們並聯使用了兩個 Diodes Incorporated 公司的 SBR10U45SP5 [6] 二極體。

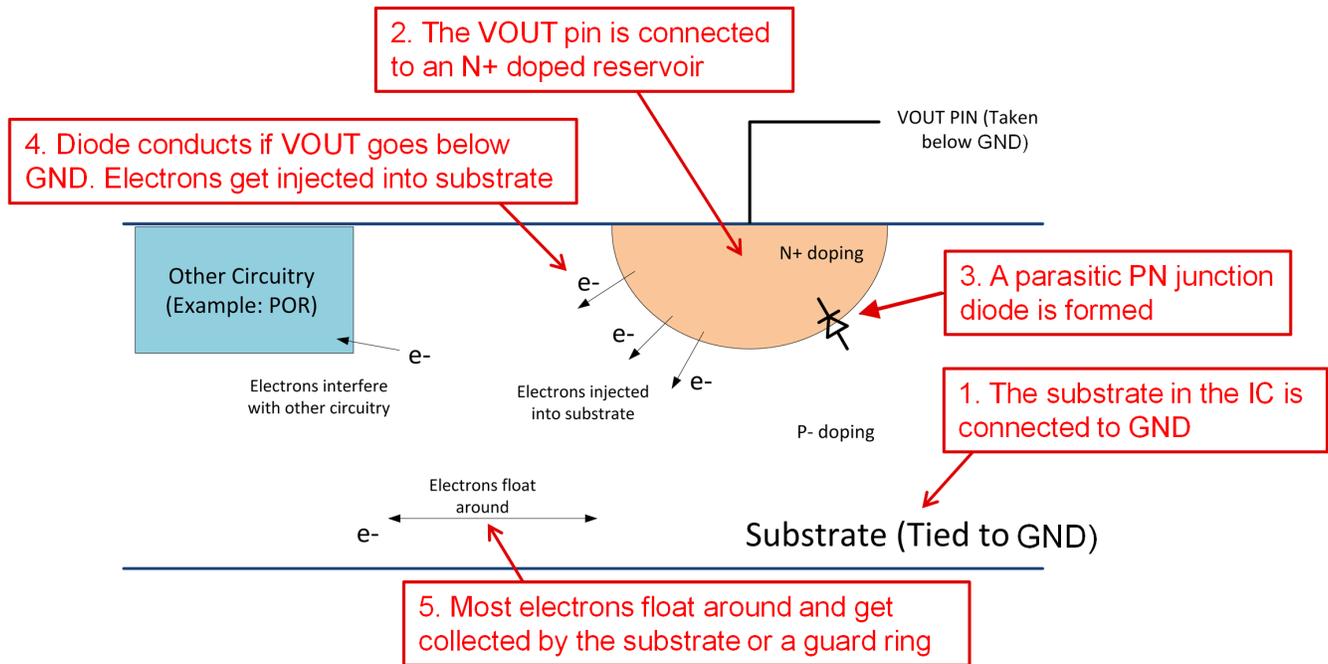


圖 8. 顯示輸出低於接地時 IC 內部後果的圖示說明。

图 9 顯示 TPS25984B 解決方案中有無肖特基二極體的輸出箝位性能。

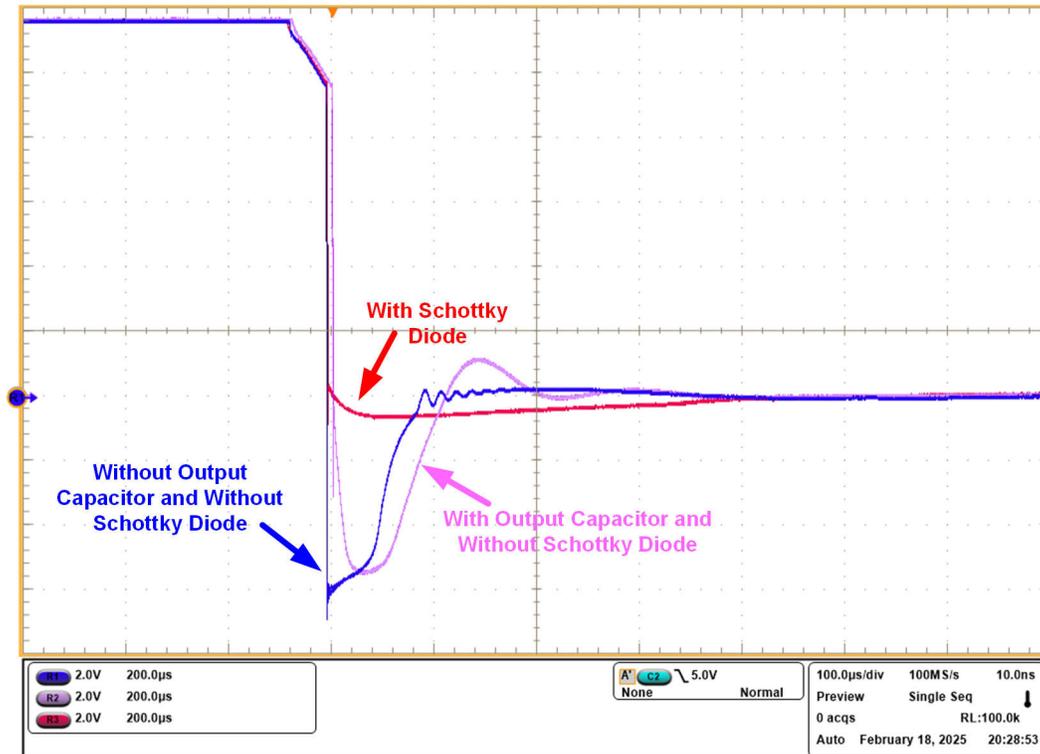


图 9. eFuse 輸出時的暫態保護。

處理高電流熱插拔解決方案時，二次保護（如 图 10 所示）可將輸出時的肖特基二極體需求降到最低。如您所見，D1 會吸收負電壓暫態中的大部分能量。增加 47Ω 等小值電阻器 (R1) 和 SS13 等二極體 (D2) 將會大幅限制剩餘能量。

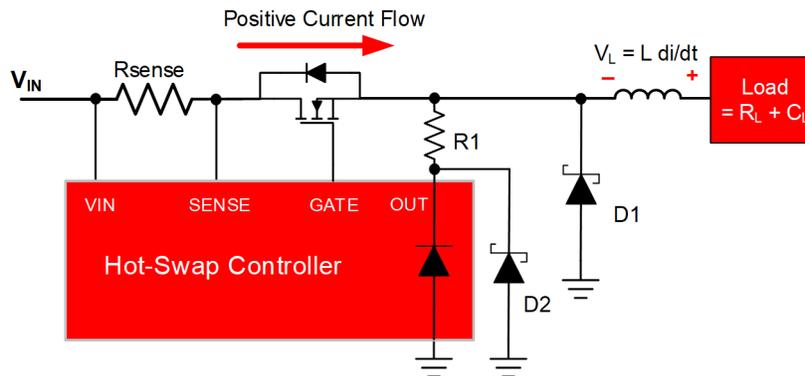


图 10. 高電流熱插拔解決方案中的二次保護。

放置與 PCB 佈局考量

您必須將 TVS 二極體，去耦電容器和肖特基二極體等保護裝置實際放置在要保護的裝置附近。分散式電感會限制去耦電容器和 TVS 二極體等分流元件的有效頻寬。它會限制突波電流流動，並在箝位過程中導致更大的暫態電壓突波，如 圖 11 中所示。因此，佈局時應讓分流元件的串聯阻抗降至最小。佈線時，請使用短佈線與多個導孔以降低電感。

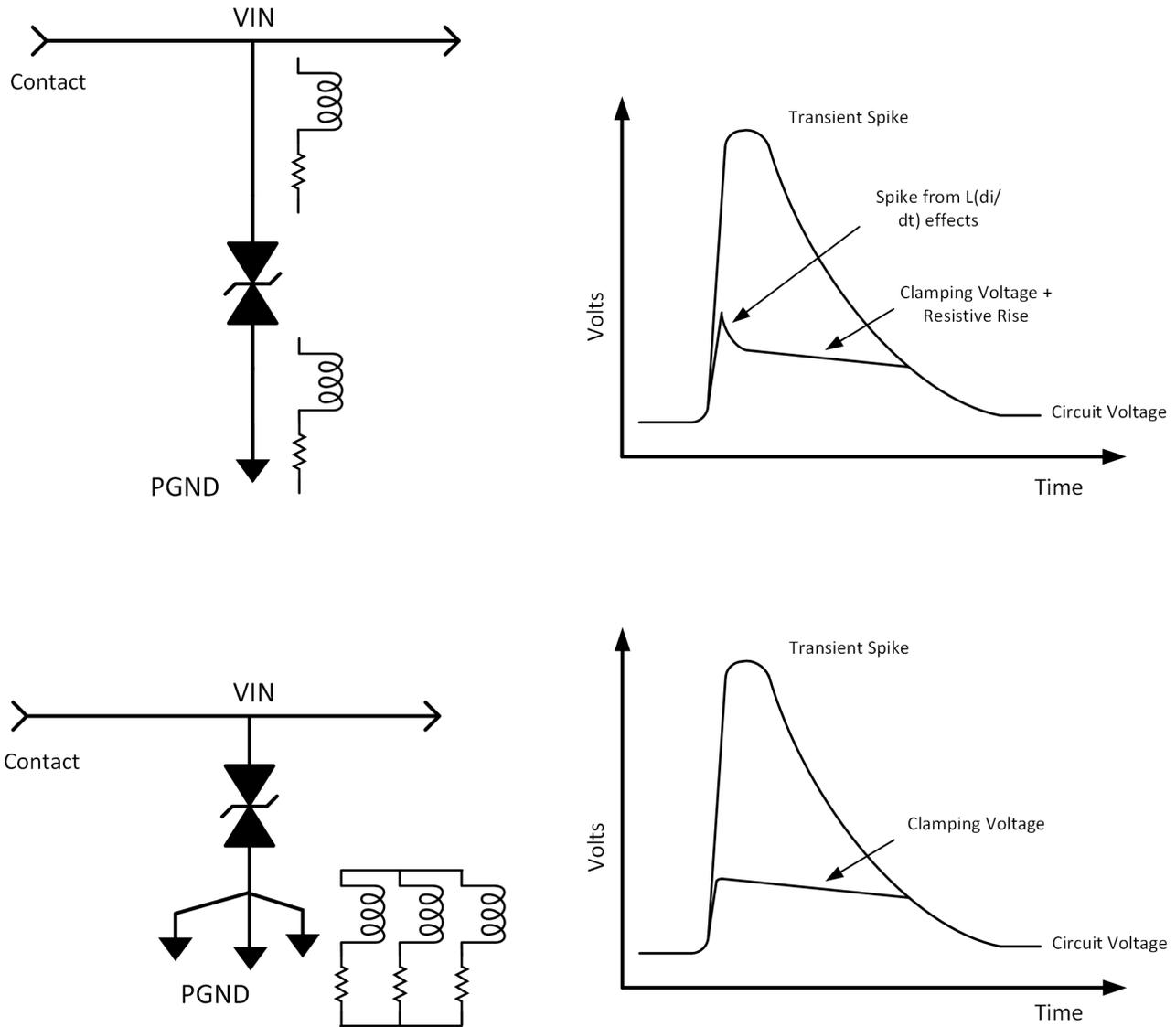


圖 11. TVS 箝位性能對 PCB 佈局的影響。

結論

eFuse 等主動電路保護裝置正逐漸取代離散式前端保護電路，從而提升性能。然而，eFuse 通常需要暫態保護，以防止超過其絕對最大規格。本文討論的元件選擇準則和佈局考量可幫助您設計解決方案，確保可靠的電源路徑保護。

參考資料

1. Rakesh Panguloori。2016. 「[eFuse 基礎](#)。」德州儀器應用報告，文獻編號 SLVA862A，2016 年 12 月。
2. Artem Rogachev。2014. 「[耐用的熱插拔設計](#)」。德州儀器應用報告，文獻編號 SLVA673A，2014 年 4 月。
3. ESD 產業委員會。「[白皮書 4：了解電性過壓 - EOS](#)。」2016 年 8 月。
4. 「[SMDJ12A TVS 3kW 12V 5%UNI DO-214AB TR13 RoHS](#)。」Littlefuse 產品規格表。2025.
5. Texas Instruments. n.d. [TVS 二極體建議工具](#)。2023 年 6 月 26 日。
6. 「[SBR10U45SP5 10A SBR 超級勢量整流器](#)。」Diodes 公司產品規格表，文件編號 DS31371，2024 年 1 月。

相關網站

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

重要聲明：本文所述德州儀器及其子公司相關產品與服務經根據 TI 標準銷售條款及條件。建議客戶在開出訂單前先取得 TI 產品及服務的最新完整資訊。TI 不負責應用協助、客戶的應用或產品設計、軟體效能或侵害專利等問題。其他任何公司產品或服務的相關發佈資訊不構成 TI 認可、保證或同意等表示。

所有商標均為其各自所有者的財產。

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATA SHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you will fully indemnify TI and its representatives against, any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#) or other applicable terms available either on [ti.com](https://www.ti.com) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may have proposed.

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated