

Technical Article

利用業界首款整合式 48V 整合熱插拔 (eFuse) 為現代 AI 資料中心供電



Kshitiz Khatri



隨著高效能運算和人工智慧的不斷發展，資料中心需要高功率密度、高效的解決方案來支援最新的中央處理單元、圖形處理單元 (GPU) 和硬體加速器。為了滿足處理需求，對更高功率密度的需求日益增加，同時電源架構也逐漸轉向 48V，這帶來了新的挑戰，特別是在管理超過 6kW 的功率時，如何保持可靠性、效率和可擴展性。

不斷增加的功率需求通常會導致解決方案尺寸變大、設計複雜化，以及故障檢測和保護效率低下。此外，在確保安全運行和最小化功率損耗的同時管理高電流也成為一個重要問題。傳統的熱插拔控制器與分立式場效電晶體 (FET) 在高功率應用中存在顯著限制。

為應對這些挑戰，TI 的 48V 熱插拔 eFuse 設備（具有電源路徑保護功能）專為資料中心應用而設計，是一套可靠且緊湊的解決方案。與需要外部感測電阻器和電流感測放大器進行電流監測的方法不同，TPS1689 和 [TPS1685](#) 透過集成這些功能簡化了設計，將解決方案尺寸減少多達 50%，同時實現無縫擴充以支援高功率水平。

TPS1689 的一個區別性特徵是消隱定時器，它透過使系統能夠區分峰值負載電流和實際故障條件來防止誤觸發。此功能增強了系統可靠性並避免了不必要的關機。該裝置還支援堆疊功能以增加電流處理能力，允許多個裝置在高功率應用中協同工作。

集成的故障記錄黑匣子、保證的 FET 安全工作區、主動電流共享和健康監測進一步增強了系統的穩健性。TPS1689 採用業界標準的通用封裝，提供了一種確保可靠運行的電源管理解決方案。

增強伺服器保護和性能

消隱定時器在企業伺服器系統中提供了系統保護與性能最佳化之間的平衡。如 [圖 1](#) 所示，此功能允許短暫的瞬態過載通過而不觸發斷路器，確保 AI、GPU 和處理器密集型應用中常見的臨時高幅度負載脈衝不會中斷系統。然而，eFuse 在持續過流事件期間會迅速關閉電路。

其他優勢包括：

- 成本最佳化。消隱定時器最大限度地減少對過大電源單元 (PSU) 的需求，並減少並聯配置中所需的 eFuse 數量。這顯著降低了物料清單成本，同時保持可靠運行。
- 提升功率密度。透過減少高電流元件的數量與尺寸，使系統設計更緊湊，釋放寶貴的印刷電路板 (PCB) 空間，並改善散熱管理。
- 靈活且可定制。透過可編程故障間隔時間，設計人員可以根據特定瞬態配置文件調整系統反應，進一步優化系統性能。

Part doesn't shut off for short load transient (~1ms)

Part shuts off for persistent fault (>2.2ms)

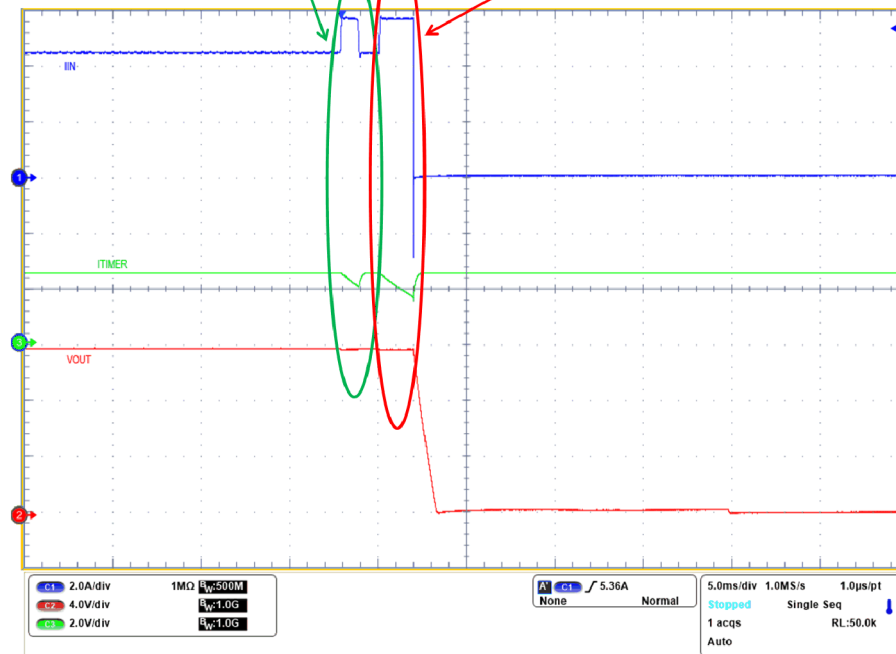


图 1. 使用者定義的消隱後的過電流響應 (斷路器)

您可以將過流保護閾值設置為熱設計電流的 1.1 倍，而不是考慮最大瞬態負載 (通常為 1.7 倍)。傳統設計要求 PSU 支援峰值瞬態電流，與之相比，這種方法減小了 PSU 的尺寸和成本。這些優勢使消隱定時器成為高性能伺服器系統的關鍵功能。

進階堆疊和電流分載解決方案

AI 驅動處理器和伺服器的功率需求持續增加，因此需要高效的配電系統，而智慧 eFuse 在其中扮演了重要角色。傳統的 eFuse 並聯操作（如 圖 2 所示）由於漏源導通電阻 ($R_{DS(on)}$)、PCB 走線電阻和比較器閾值的不匹配而面臨重大挑戰。這些不匹配導致 eFuse 之間的電流分配不均（某些 eFuse 承載更多電流），並經常導致個別 eFuse 過早觸發，即使總系統電流低於觸發閾值。這種誤觸發可能導致不必要的系統停機、可靠性降低和操作效率下降。

為應對這些挑戰，TI 在其 eFuse 中引入了總系統電流限制方法，該方法利用互連的 IMON 引腳。此方法指定一個 eFuse 作為主控制器來監測總系統電流。透過依賴總電流而不是個別 eFuse 電流，系統避免了因路徑電阻不匹配而導致的誤差，並確保系統僅在必要時觸發，從而增強操作穩定性。

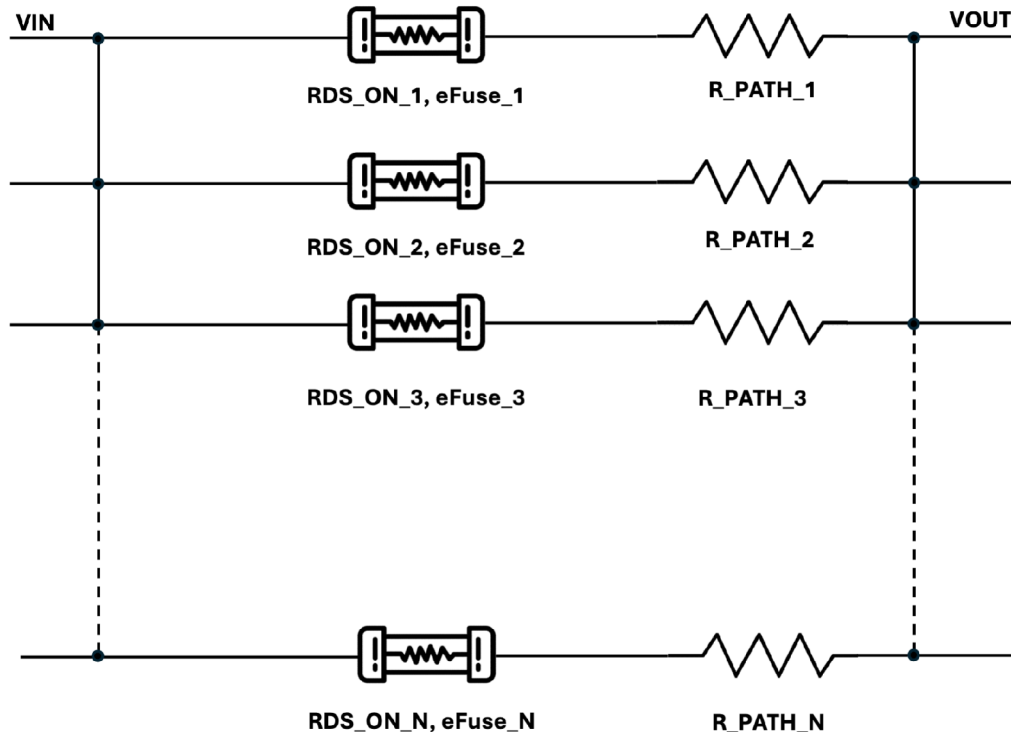


圖 2. eFuse 的並聯堆疊，支援更高的電流負載

主動電流分載技術可動態調整 FET 的 $R_{DS(on)}$ 來實現 eFuse 之間的電流平衡，從而實現高效的電源分配。當一個 eFuse 輸送的電流過高時，略微增加其 $R_{DS(on)}$ 可以將電流更均勻地分配到所有裝置上。此動態穩壓可將個別 eFuse 的熱應力降到最低，提高系統的長期可靠性。

主動電流分載發生在過電流保護閾值附近，可確保僅在必要時運作，以避免在較低電流下產生不必要的功率損耗。系統透過在最佳閾值啟動主動電流分載，可在高電流運作期間實現均勻的熱應力分布，進而提升長期可靠性。

結論

透過提高功率密度、簡化設計、增強保護和成本最佳化，熱插拔 eFuse 裝置為高性能計算應用提供了更高效和可靠的電源管理。消隱定時器和堆疊功能等功能的整合，進一步強化了這些裝置的適用性，以支援現代 AI 資料中心不斷增長的電源需求。

其他資源

- 下載 [具有精確和快速電流監控器的 TPS1685x 9V - 80V、3.65mΩ、20A 可堆疊整合式熱插拔 \(eFuse\) 產品規格表](#)。
- 查看 [「適用於 eFuse EVM 的 TPS1685 評估模組使用手冊」](#)。

註冊商標

所有商標皆屬於其各自所有者之財產。

重要聲明與免責聲明

TI 均以「原樣」提供技術性及可靠性數據（包括數據表）、設計資源（包括參考設計）、應用或其他設計建議、網絡工具、安全訊息和其他資源，不保證其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的擔保，包括但不限於對適銷性、適合某特定用途或不侵犯任何第三方知識產權的暗示擔保。

所述資源可供專業開發人員應用 TI 產品進行設計使用。您將對以下行為獨自承擔全部責任：(1) 針對您的應用選擇合適的 TI 產品；(2) 設計、驗證並測試您的應用；(3) 確保您的應用滿足相應標準以及任何其他安全、安保或其他要求。

所述資源如有變更，恕不另行通知。TI 對您使用所述資源的授權僅限於開發資源所涉及 TI 產品的相關應用。除此之外不得複製或展示所述資源，也不提供其它 TI 或任何第三方的知識產權授權許可。如因使用所述資源而產生任何索賠、賠償、成本、損失及債務等，TI 對此概不負責，並且您須賠償由此對 TI 及其代表造成的損害。

TI 的產品均受 [TI 的銷售條款](#) 或 [ti.com](#) 上其他適用條款，或連同這類 TI 產品提供之適用條款所約束。TI 提供所述資源並不擴展或以其他方式更改 TI 針對 TI 產品所發布的可適用的擔保範圍或擔保免責聲明。

TI 不接受您可能提出的任何附加或不同條款。

郵寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

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