

Technical White Paper

適用於高電壓直流供電 AI 伺服器的熱插拔解決方案



Rakesh Panguloori
Dilip Jain

摘要

高可用性系統（如伺服器、網路交換器與電信系統）的設計目標，是在其整個使用壽命期間實現近乎零停機。此類高可用性系統通常需要在不關閉整個系統電源的情況下，進行电路板的插拔。

作為機盤輸入端電源的首個進入點，熱插拔電路可為系統診斷與高效負載管理提供全面的遙測資料。此電路的可靠性直接影響系統的運作時間；因此，處理系統暫態的能力對於避免非計畫性系統停機極為重要。

隨著人工智慧 (AI) 資料中心伺服器功率的指數級成長，IT 機架中的配電電壓正從 48V_{DC} 轉向 800V_{DC}。本白皮書探討了支援 800V_{DC} 架構轉型的熱插拔架構演進，以及針對新興系統級挑戰的重要考量因素。

目錄

1 熱插拔架構的演進.....	2
2 構建下一代熱插拔的考慮事項.....	8
3 驅動熱插拔 FET.....	8
4 安全與絕緣.....	8
5 結論.....	9
6 參考資料.....	9

註冊商標

所有商標均為其各自所有者的財產。

1 熱插拔架構的演進

如文獻 [1] 所載，為了滿足 AI 的電力需求，資料中心的電力架構正從 IT 機架內部的傳統電源層架構轉向電源側車架構。熱插拔技術（即在不關閉系統的情況下更換或增加硬體組件的能力）已從基礎的專用週邊設備支援，演變成現代資料中心與運算中不可或缺的高性能特性。這項技術的演進涵蓋了從簡單的連接器標準到先進的電源管理，其驅動力來自於對最大化運作時間與效率的需求。

早期時代 (USB 出現前)

最初，熱插拔僅限於高可用性系統（如大型主機），透過專用且昂貴的硬體實現模組的無停機移除。隨後，小型電腦系統介面為週邊設備引入了熱插拔功能，儘管其可靠性不如今日的標準。

USB 革命

USB 的推出使消費性電子的熱插拔變得常態化，允許在系統運作時安全地增加及移除鍵盤、滑鼠、印表機、相機和隨身碟。技術演進也從單純的插槽斷電（被動式）轉向使用主動式 MOSFET 控制器，藉此安全地管理開機序列，保護元件與背板。

資料中心成長期 (12V 時代)

隨著資料中心停機成本變得過於高昂，熱插拔功能成為實現高可用性的必要條件。熱插拔控制器有助於管理突波電流，並在 12V 背板上的刀鋒伺服器進行活電插入時保護主匯流排。

第一代熱插拔控制器（如圖 1-1 所示）採用了簡單的功率限制架構，以確保 MOSFET 在啟動與故障恢復期間維持在安全操作區 (SOA) 內。控制器由一個監測感測電阻兩端電壓以取得電流資訊的電流感測放大器，以及一個測量 FET 兩端電壓的電壓感測電路組成。

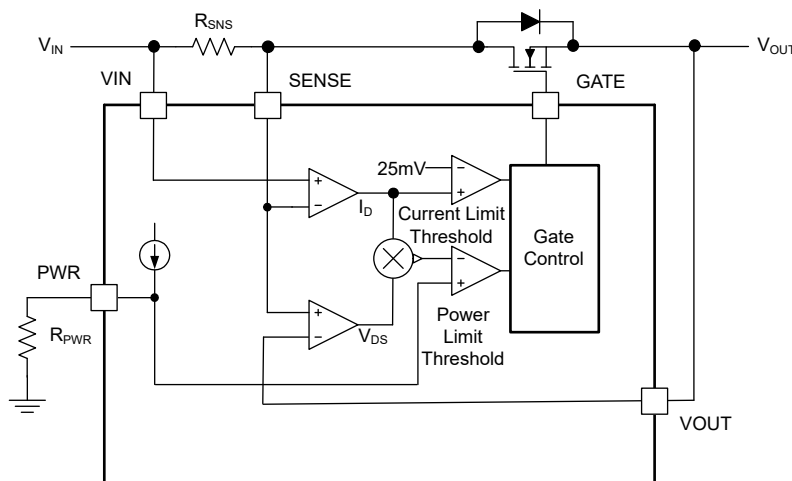


圖 1-1. 功率限制熱插拔架構

將電流感測放大器與電壓感測電路的輸出相乘，即可得到 FET 的功率損耗。在管理系統突波電流或故障電流時，必須限制此損耗以保護熱插拔 FET。

第二代熱插拔控制器（如圖 1-1 所示）提供了較複雜的功能，例如過熱保護、用於系統診斷的遙測功能，以及機架伺服器各機盤之間的資料流量管理。然而，隨著機架機盤功率位準的提升，輸出電容也隨之增加；由於啟動期間嚴苛的 SOA 壓力對商用 FET 而言無法承受，這使得基於功率限制的控制器設計變得不再切合實際。另一種方法 [2] 是透過輸出電壓轉率 (dv/dt) 控制電路（如圖 1-1 所示）來限制突波電流，這能減少啟動期間的功率耗散，並將耗散時間延長，使 FET 能夠安全地處理電力。

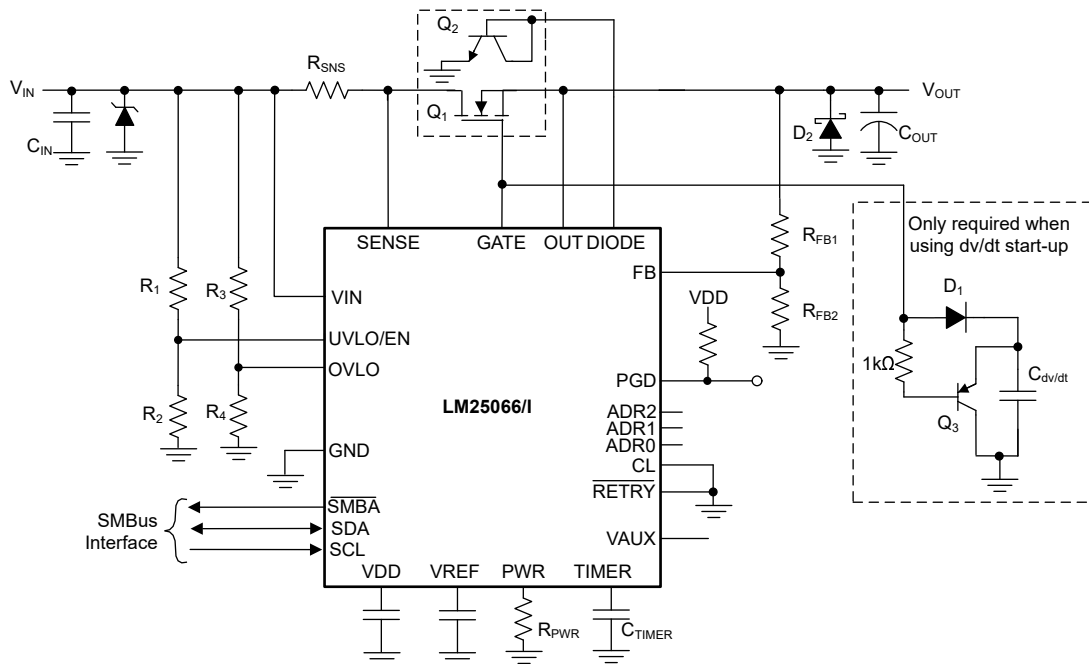


图 1-2. 具備 12V 電源軌輸出 dv/dt 控制的熱插拔解決方案

為了支援龐大的資料流量，數據中心營運商採用了速度更快、功耗更高的 CPU 和記憶體以提升資料處理能力。這使得在相同的外型規格下，每個機盤的電力需求高達 4kW，因此需要採用具備整合式 FET（亦稱為 eFuse）的高密度保護解決方案，如圖 1-3 所示。TI 的 12V 高電流 eFuse 具備差異化特性 [3]，例如：可調式過電流遮蔽以支援下游運算負載的暫態需求、黑盒子故障記錄、主動同步，以及在啟動與穩態期間的負載共享以實現無限擴充性，這一切都整合在 4.5mm x 5mm 的封裝中，並支援 60A 的均方根 (RMS) 電流。

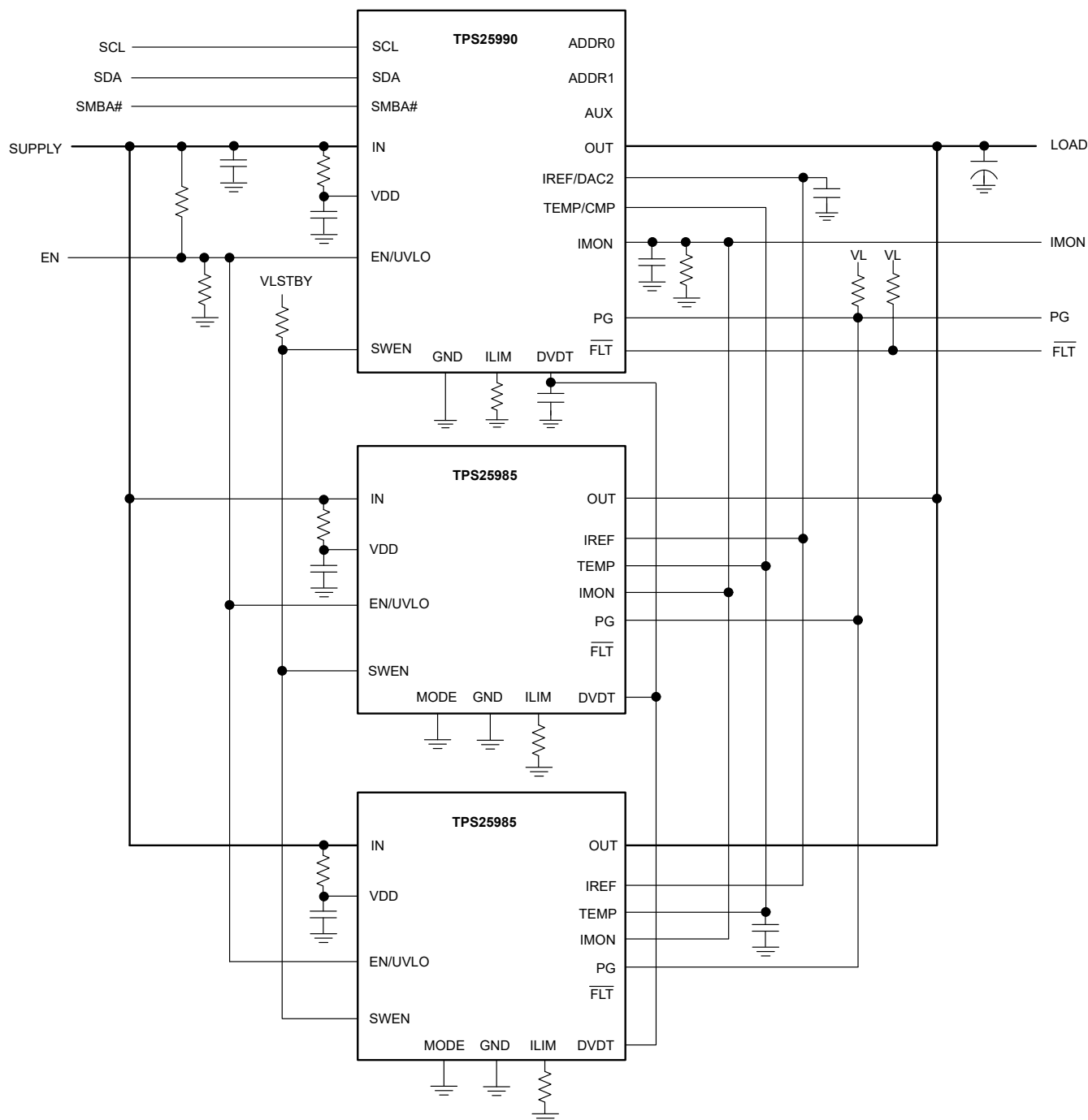


图 1-3. 適用於 12V 電源軌的可堆疊高電流 eFuse 解決方案

雲端運算 (48V 時代)

隨著雲端運算應用需求成長，企業級伺服器因需同時處理大量資料與儲存而變得高度耗能。目前每台伺服器主機板的穩態額定功率已達 5kW 至 6kW，這使得 12V 軌的電力分配變得效率低下。從 12V 轉向 48V 伺服器架構，在相同功率下可減少 75% 的電流。這種降幅使電阻功率損耗 (I^2R) 降低了 16 倍，減少了高達 90% 的銅製匯流排與電纜需求，並顯著降低了機架散熱負載。

圖形處理器 (GPU) 是 48V 伺服器系統中的主要負載，其負載振幅、轉率和暫態負載頻率比一般伺服器高出三到四倍。如 [4] 中所述，當使用 TI 第一代 [LM5066I](#) 熱插拔控制器支援高功率 48V 設計時，需要進行一些電路增強。

TI 的下一代熱插拔控制器 LM5066H2 採用雙閘極驅動架構 (圖 1-4)，使單個 SOA FET 即可處理啟動與故障條件下的電力壓力。結合多個低導通電阻 ($R_{DS(ON)}$) FET 用於正常負載電流運行，LM5066H2 有助於將 4kW 以上設計的總體方案尺寸縮小 40%。

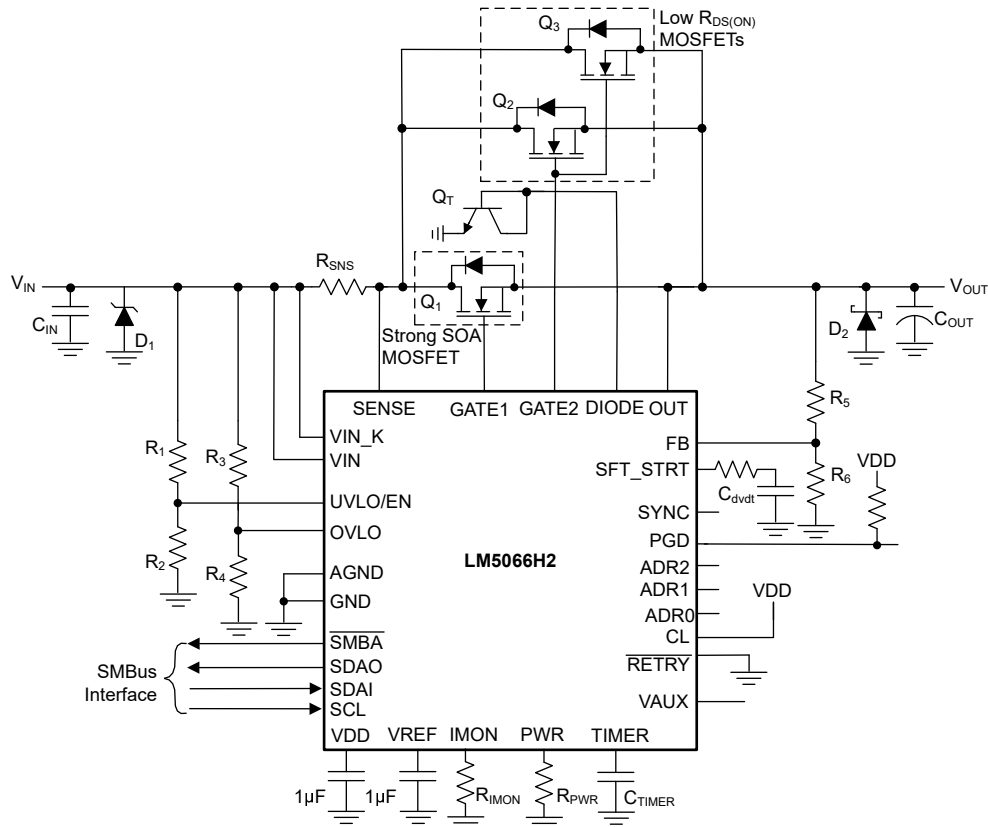


圖 1-4. 適用於 48V 機架伺服器配電的熱插拔解決方案。

業界首款 48V eFuse (TI 的 [TPS1685](#)) 可實現增強型 FET 保護並易於擴充，以達成高密度、高功率設計。圖 1-5 說明了採用 48V eFuse 的電路配置。

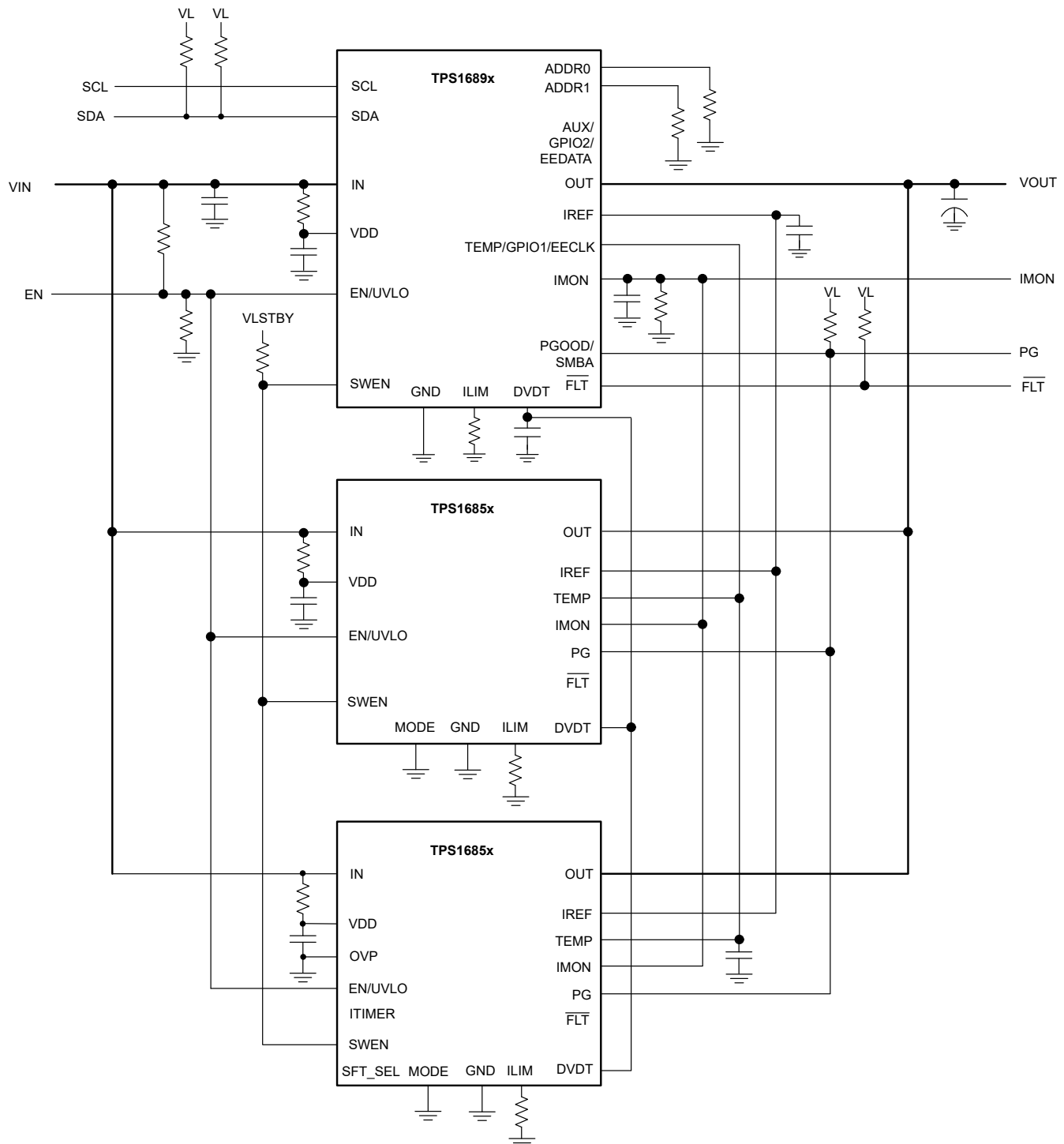


图 1-5. 適用於 48V 電源軌的可堆疊式高電流 eFuse 解決方案。

AI 運算 ($\pm 400V_{DC}$ 或 $800V_{DC}$ 時代)

AI 處理能力的激增促使伺服器機架從 12V 轉向 48V 架構，以減少電力損耗並提高效率。基於 AI 的 IT 機架使用數百個處理器來快速處理 AI 運作所需的大量運算，因此在不久的將來，機架電力需求將達到 100kW 至 1MW 的範圍 [5]。在 48V 軌上分配如此龐大的電力會導致電流超過 20kA，這需要笨重且昂貴的匯流排，在實作上並不切實際。因此，AI IT 伺服器機架的電力分配必須採用更高的 $\pm 400V_{DC}$ 或 $800V_{DC}$ 匯流排電壓。低電壓直流架構需要先進的熱插拔控制器來處理更高電壓的突波電流並提供精確的遙測，同時採取適當的安全與絕緣措施。

領先的超大規模業者和雲端服務供應商目前正在評估幾種設施級架構，例如 $\pm 400V_{DC}$ （雙線制）、 $\pm 400V_{DC}$ （三線制）和 $800V_{DC}$ 。這些架構直接影響了熱插拔保護的要求。

图 1-6、图 1-7、图 1-8 和图 1-9 展示了各種架構 [6]，以及 IT 機架端的熱插拔保護插座。

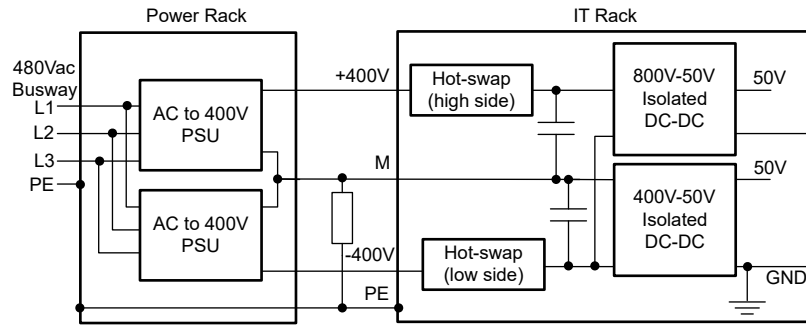


图 1-6. 三線 $\pm 400V_{DC}$ 配電系統

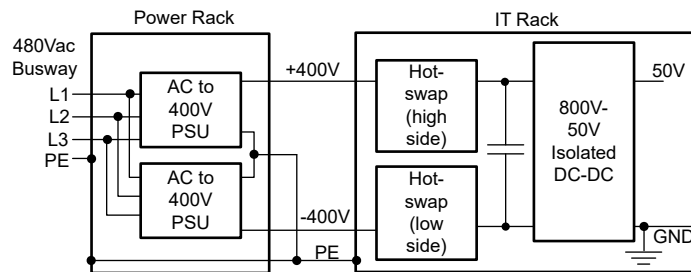


图 1-7. 雙線 $\pm 400V_{DC}$ 配電系統

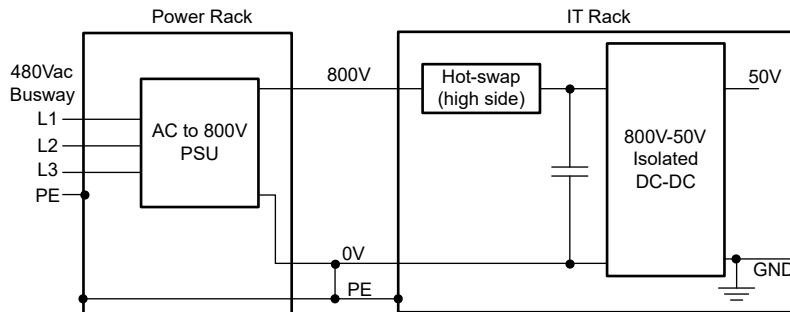


图 1-8. 雙線 $800V_{DC}$ 配電系統

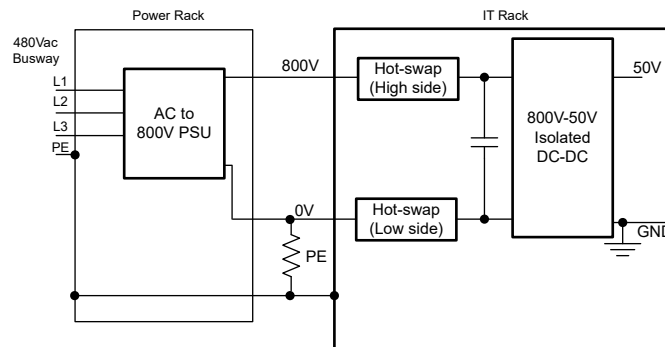


图 1-9. 雙線 $800V_{DC}$ 配電系統，具有高電阻接地保護性接地

2 構建下一代熱插拔的考慮事項

隨著 AI 模型與科學模擬的複雜度日益增加，單一處理器通常已不足以應付需求。IT 機盤需要容納多個高功率的 CPU 與 GPU。由於這是機架中價值最高的區域，在有限的空間內配置熱插拔電路與中間匯流排轉換器，需要更精巧的 800V 熱插拔解決方案。離散式實作方案 [7] 包含隔離式閘極驅動器、電流與電壓感測放大器、數位隔離器、多繞組輔助電源以及微控制器。

TI 的 800V **LMI800PS** 熱插拔控制器具備所有傳統熱插拔控制器的元件，並整合了電源與訊號隔離功能，以實現更高功率密度的熱插拔解決方案。

图 2-1 展示了基於 LMI800PS 的熱插拔解決方案，適用於 $\pm 400V_{DC}$ 雙線系統架構。

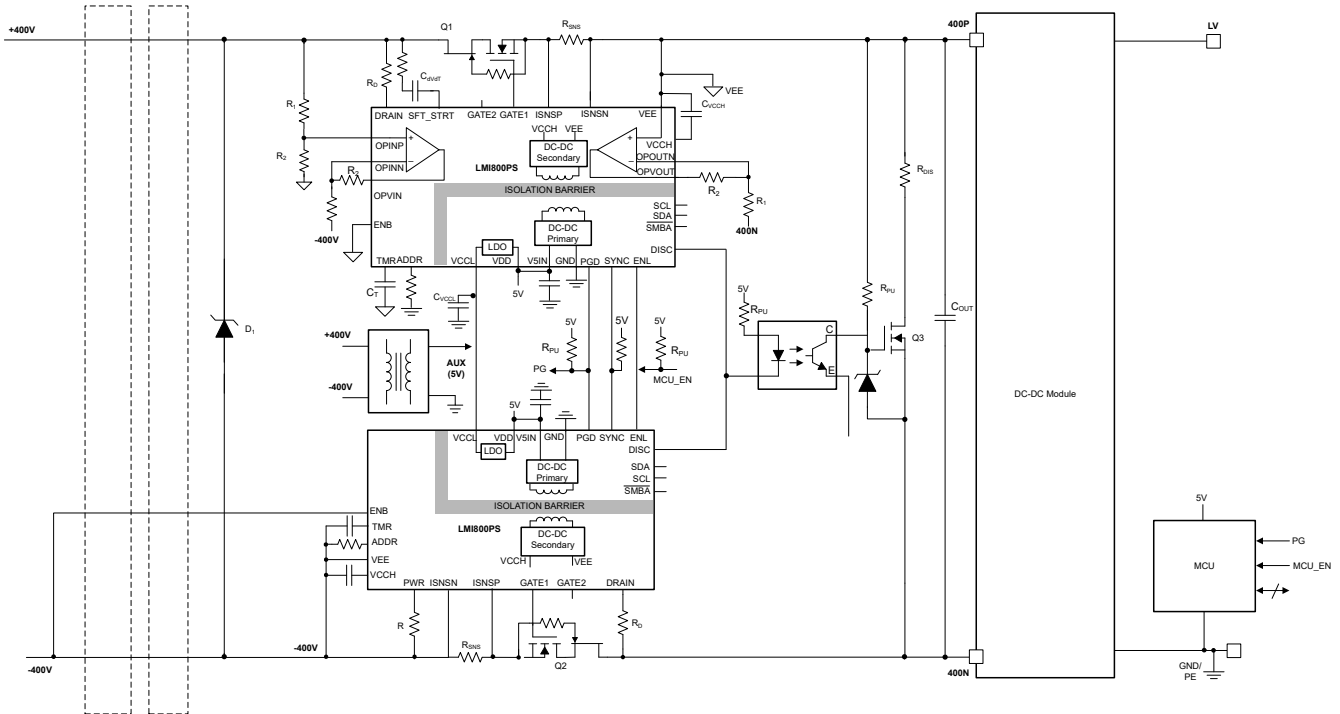


图 2-1. LMI800PS 熱插拔解決方案

通用型隔離式熱插拔控制器架構

如圖 1-6、圖 1-7、圖 1-8 和圖 1-9 所示，根據系統架構與接地方案，熱插拔電路可位於輸入電源軌的高壓側或低壓側。LMI800PS 控制器透過使晶片局部接地 (GND) 浮接，並跨越隔離屏障提供必要的訊號與偏壓電源，使其能在兩種電源軌上使用。

3 驅動熱插拔 FET

對於 800V_{DC} 系統，功率 FET 的主要選擇為額定汲極至源極電壓 (V_{DS}) 達 1.2kV 的碳化矽 (SiC) FET 或 SiC 疊接界面場效應電晶體 (JFET)。SiC FET 需要 18V 的閘極驅動才能使 FET 完全導通，以實現最低的導通電阻；而 SiC 疊接界面 FET 則需要 12V 的閘極驅動。在熱插拔應用中，FET 通常在突波電流限制階段以線性模式運作。因此，請務必必要適當設計熱插拔電路以確保突波階段的 SOA 應力維持在 FET 的 SOA 限制範圍內。此外，在故障情境下（例如開機時發生輸出短路）保護 FET，也需要相應的保護機制。過載保護無法讓開關進入主動模式，因為這會導致元件快速過熱。

LM1800PS 具備可配置的閾極驅動功能、較低的功率限制閾值（低至 200W）以及可配置的定時器，為系統設計人員開發可靠的熱插拔解決方案提供了極大的靈活性。

4 安全與絕緣

將控制與指示訊號（管理訊號）與高電壓部分隔離，並使系統能與熱插拔控制器進行通訊非常重要。這些訊號的絕緣必須符合污染等級 2、濕度 10% 至 90% 非冷凝（依據國際電工委員會 [IEC] 62368-1 安全標準）的加強絕緣要求，且其電氣間隙與爬電距離須滿足最高 3.050 公尺（建議為 5.000 公尺）的海拔高度要求。

LMI800PS 裝置封裝在高低電壓區域之間具備 $\geq 8\text{mm}$ 的爬電距離、 5kVrms 的絕緣耐壓 (V_{ISO}) 額定值以及 10kV 的突波能力，符合整體的安全要求。

其中一項安全要求是，當 IT 機盤與機架斷開連接或輸出斷開時，必須在 2 秒內將輸出大容量電容放電至低於 120V 。在輸出電容上並聯一個具有串聯放電電阻的 FET 即可實現此功能。LMI800PS 具備放電 FET 控制輸出訊號，可簡化輸出放電設計。

5 結論

AI 運算能力的激增推動了 AI 伺服器機架向 800V_{DC} 供電架構的關鍵轉型，以滿足先進 AI 處理器日益增長的電力需求並支援高運算密度。這一轉變為系統保護與監控帶來了新挑戰，尤其是在熱插拔事件期間。

TI 憑藉 LMI800PS 高壓熱插拔控制器而身處開發的先驅，該控制器能有效管理突波電流，提供全面的遙測資料以進行系統診斷與安全維護，並確保系統穩定運作。

6 參考資料

1. [Diablo 400 專案：機架與電力](#) (版本 0.5.2)。(2025 年 5 月 30 日)。開放運算專案：德州奧斯汀。
2. Huntington, J. 與 Tu, M. (日期不詳)。[下一代 AI 基礎設施的 \$800\text{VDC}\$ 架構](#)。NVIDIA 白皮書。存取日期：2026 年 9 月 28 日。
3. McDonald, B. (2025 年 11 月)。[資料中心演進以滿足 AI 的龐大電力需求](#) (文獻編號：SSZTDB4)。德州儀器技術文章。
4. Pal, A. 與 Panguloori, R. (2026 年 3 月)。[浮動接地熱插拔架構，可對 \$800\text{V}\$ 或 \$\pm 400\text{V DC}\$ 配電提供穩固的保護](#) (文獻編號：STDA029)。德州儀器。
5. Pal, A. 與 Panguloori, R. (2025 年第 2 季)。[使用熱插拔控制器應對 \$48\text{V AI}\$ 伺服器的保護挑戰](#) (文獻編號：SLYT863)。德州儀器類比設計期刊。
6. Pal, A. 與 Sagar, S. (2025 年 1 月)。[利用 TI 智慧型電子保險絲 \(eFuse\) 的進階功能強化伺服器電源設計](#) (文獻編號：SLVAFR8)。德州儀器。
7. Rogachev, A. (2014 年 11 月)。[強韌的熱插拔設計](#) (文獻編號：SLVA673 修訂版 A)。德州儀器。

重要聲明與免責聲明

TI 以「現狀」及所含一切錯誤提供技術與可靠數據 (包含產品規格書)、設計資源 (包含參考設計)、應用或其他設計建議、網頁工具、安全資訊和其他資源，且不承擔所有明示或默示保證，包括但不限於適銷性或用於特定用途之適用性的任何默示保證，或不侵害第三方智慧財產的任何默示保證。

所述資源可供專業開發人員應用 TI 產品進行設計使用。您應自行負責 (1) 選擇適合您應用的 TI 產品，(2) 設計、驗證與測試您的應用，與 (3) 確保應用符合適用標準，以及任何其他安全、安保、法規或其他要求。

這些資源得進行修改且無需通知。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 或任何第三方的智慧財產權授權許可。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](#)、[TI 的通用品質指南](#) 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 提供此等資源並不會擴大或以其他方式改變 TI 對於 TI 產品的適用保證或保證免責聲明。除非 TI 明確將某產品指定為自訂或客戶指定型號，否則 TI 產品均為標準、類比、通用裝置。

TI 反對並拒絕您可能提出的任何附加或不同條款。

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

上次更新 10/2025

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), 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 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](#), [TI's General Quality Guidelines](#), 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. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

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

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025