

Technical White Paper

高压直流供电 AI 服务器热插拔解决方案



Rakesh Panguloori
Dilip Jain

摘要

服务器、网络交换机和电信系统等高可用性系统的设计要求在其整个使用寿命内几乎零停机。此类高可用性系统通常需要在不关闭整个系统电源的情况下插入或移除电路板。

作为托盘输入端的第一个电源接入点，热插拔电路提供全面的遥测功能，用于系统诊断和高效负载管理。该电路的可靠性会影响正常运行时间；因此，处理系统瞬变的能力对于避免计划外系统中断至关重要。

随着人工智能 (AI) 数据中心服务器功率呈指数级增长，IT 机架中的配电电压正从 48V_{DC} 过渡到 800V_{DC}。本白皮书讨论了热插拔架构为支持向 800V_{DC} 架构的过渡而发生的演进，以及围绕新兴系统级挑战的重要考虑因素。

内容

1 热插拔架构的演进.....	2
2 影响下一代热插拔技术的考虑因素.....	8
3 驱动热插拔 FET.....	8
4 安全与绝缘.....	8
5 结语.....	9
6 参考资料.....	9

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 热插拔架构的演进

如 [1] 中所述，为了满足 AI 的电源需求，数据中心电源架构正在从 IT 机架内的传统电源架过渡到电源侧板。热插拔技术即在不关闭系统的情况下更换或添加硬件组件的能力，该技术已从基础、专用的外设支持演变为现代数据中心和计算的关键高性能特性。该技术的演进从简单的连接器标准延伸至高级电源管理领域，其驱动力是对最大化运行时间与效率的需求。

早期 (USB 诞生之前)

最初，热插拔仅限于高可用性系统，如大型计算机，其中专用、昂贵的硬件使模块无需关机即可移除。小型计算机系统接口为外设引入了热插拔功能，但不如今标准可靠。

USB 革命

USB 的引入使热插拔在消费电子领域成为常态，允许在系统运行时安全地添加和移除键盘、鼠标、打印机、相机和闪存驱动器。演进过程从简单地对插槽断电（无源）转向使用有源 MOSFET 控制器安全地管理上电时序，保护组件和背板。

数据中心增长 (12V 时代)

随着数据中心停机成本变得过于昂贵，热插拔功能变得对实现高可用性至关重要。在刀片式服务器带电插入 12V 背板期间，热插拔控制器有助于管理浪涌电流并保护主总线。

第一代热插拔控制器（如图 1-1 所示）采用简单的功率限制架构，确保 MOSFET 在启动和故障恢复期间保持在安全工作区 (SOA) 内。该控制器由电流检测放大器和电压检测电路组成：电流检测放大器监测检测电阻器两端电压以获得电流信息，电压检测电路测量 FET 两端电压。

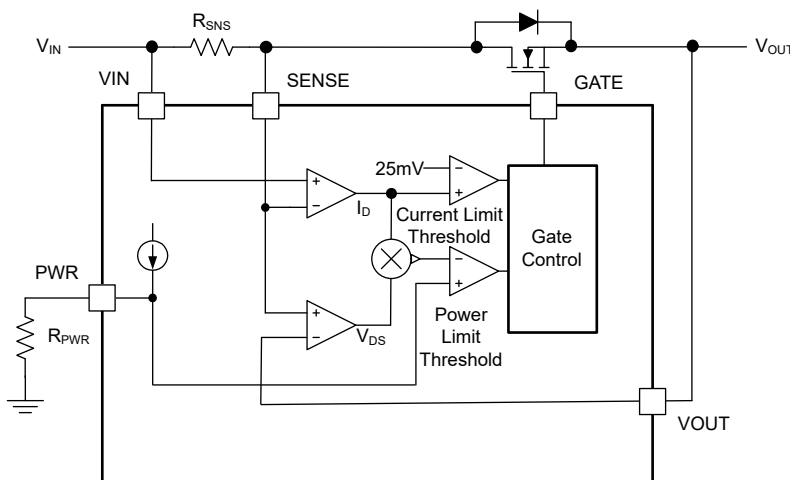


图 1-1. 功率限制热插拔架构

将电流检测放大器和电压检测电路的输出相乘，即得到 FET 中的功率损耗，必须对该损耗加以限制，以在管理系统浪涌电流或故障电流的同时保护热插拔 FET。

第二代热插拔控制器（如图 1-1 所示）提供了更复杂的特性，例如过热保护、用于系统诊断的遥测，以及机架服务器中托盘之间的数据流量管理。但随着机架托盘功率级别提高，输出电容也会增加；考虑到启动期间商用 FET 无法承受的严重 SOA 应力，这使得功率受限的控制器设计变得不切实际。另一种方法 [2] 是使用图 1-1 所示的输出电压转换率 (dv/dt) 控制电路来限制浪涌电流，该方法可降低启动期间的功率耗散，并将耗散分散到更长时间内，使 FET 能够安全地处理功率。

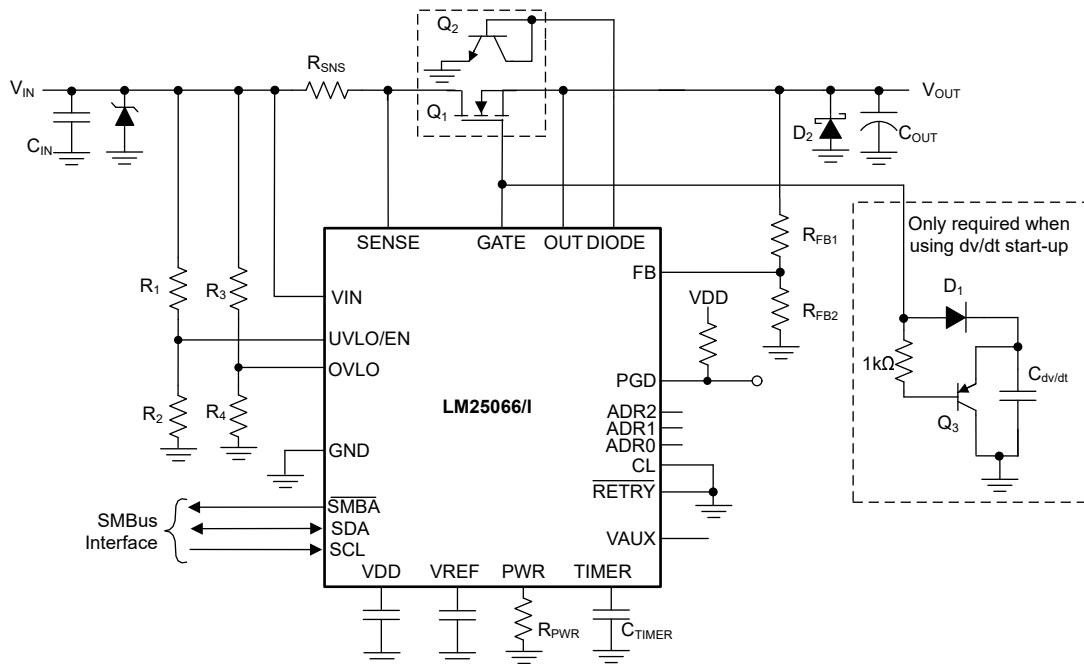


图 1-2. 具有输出 dv/dt 控制功能的 12V 电源轨热插拔解决方案

为了支持繁重的数据流量，数据中心运营商采用更快、更耗电的 CPU 和存储器来提高数据处理能力。这一做法将相同外形尺寸下每托盘的功率需求推高至 4kW，因此需要采用集成 FET（也称为电子保险丝）的高密度保护解决方案，如图 1-3 所示。TI 的 12V 高电流电子保险丝提供了差异化的特性 [3]，例如可调节过流消隐功能（用于支持下游计算负载的瞬态需求）、黑盒故障记录、主动同步，以及旨在实现无限可扩展性的启动和稳定状态期间负载共享，所有这些特性均集成在 4.5mm x 5mm 封装中，同时支持 60A 均方根 (RMS) 电流。

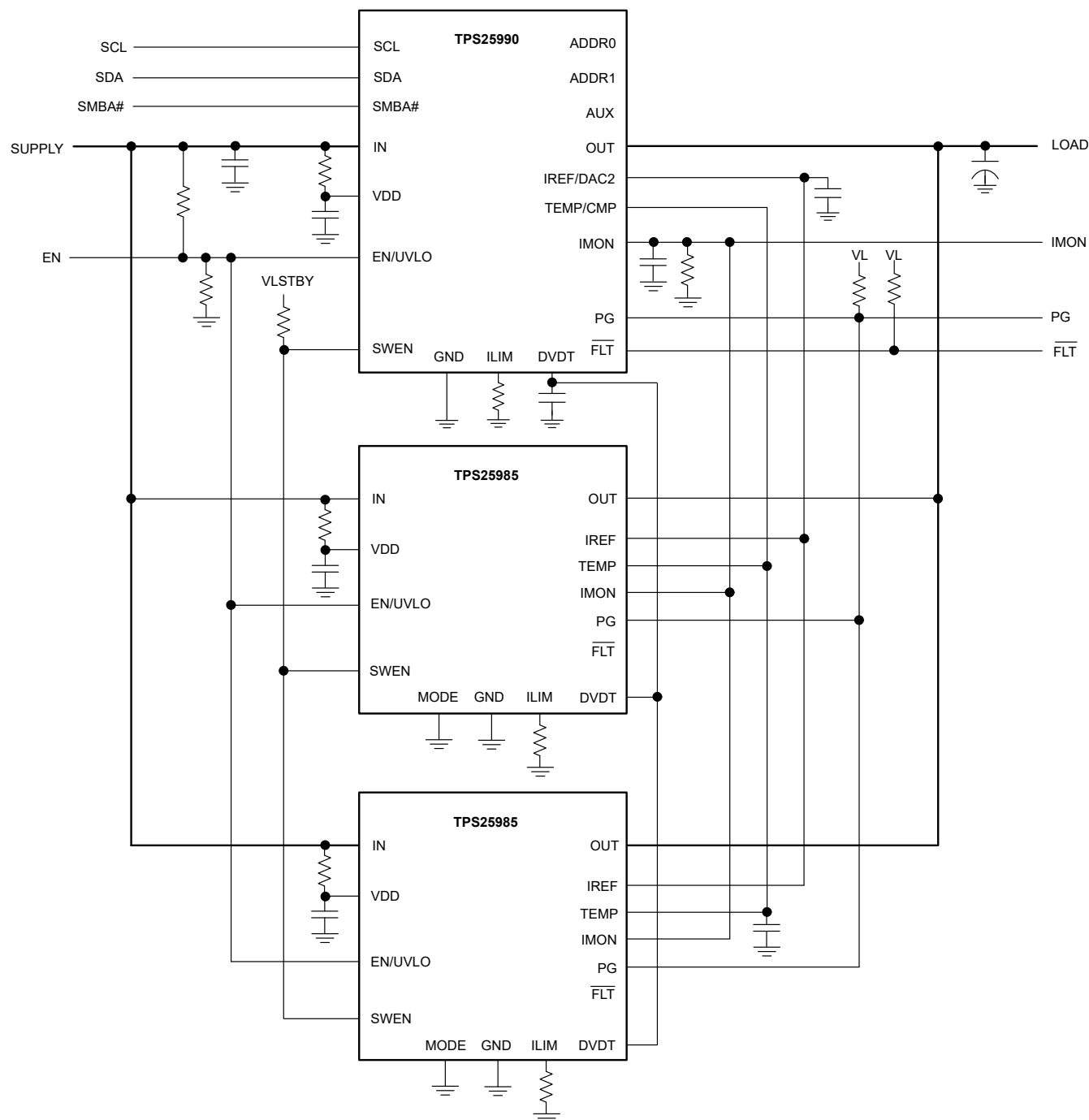


图 1-3. 12V 电源轨可堆叠高电流电子保险丝解决方案

云计算 (48V 时代)

随着云计算应用需求持续增长，企业服务器的功耗已相当高，因为这些服务器要同时处理大量数据和存储。每块服务器主板的稳定状态额定功率现在已达到 **5kW 至 6kW**，这使得 12V 电源轨上的配电方案变得效率低下。在相同功率下，从 12V 服务器架构转向 48V 可将电流降低 75%。这一降低使阻性功率损耗 (I^2R) 减少为原来的 1/16，铜母线和电缆需求最多减少 90%，并显著降低机架热损耗。

图形处理单元 (GPU) 构成 48V 服务器系统中的主要负载，与通用服务器相比，其负载幅度、转换率和瞬态负载频率高出三到四倍。使用 TI 的第一代 [LM50661](#) 热插拔控制器支持高功率 48V 设计时，这一情况需要一些电路增强功能 (如 [4] 所述)。

作为业界首款 **48V** 电子保险丝，TI 的 **TPS1685** 可增强 FET 保护并简化可扩展性，从而实现高密度大功率设计。
图 1-5 所示为使用 48V 电子保险丝的电路配置。

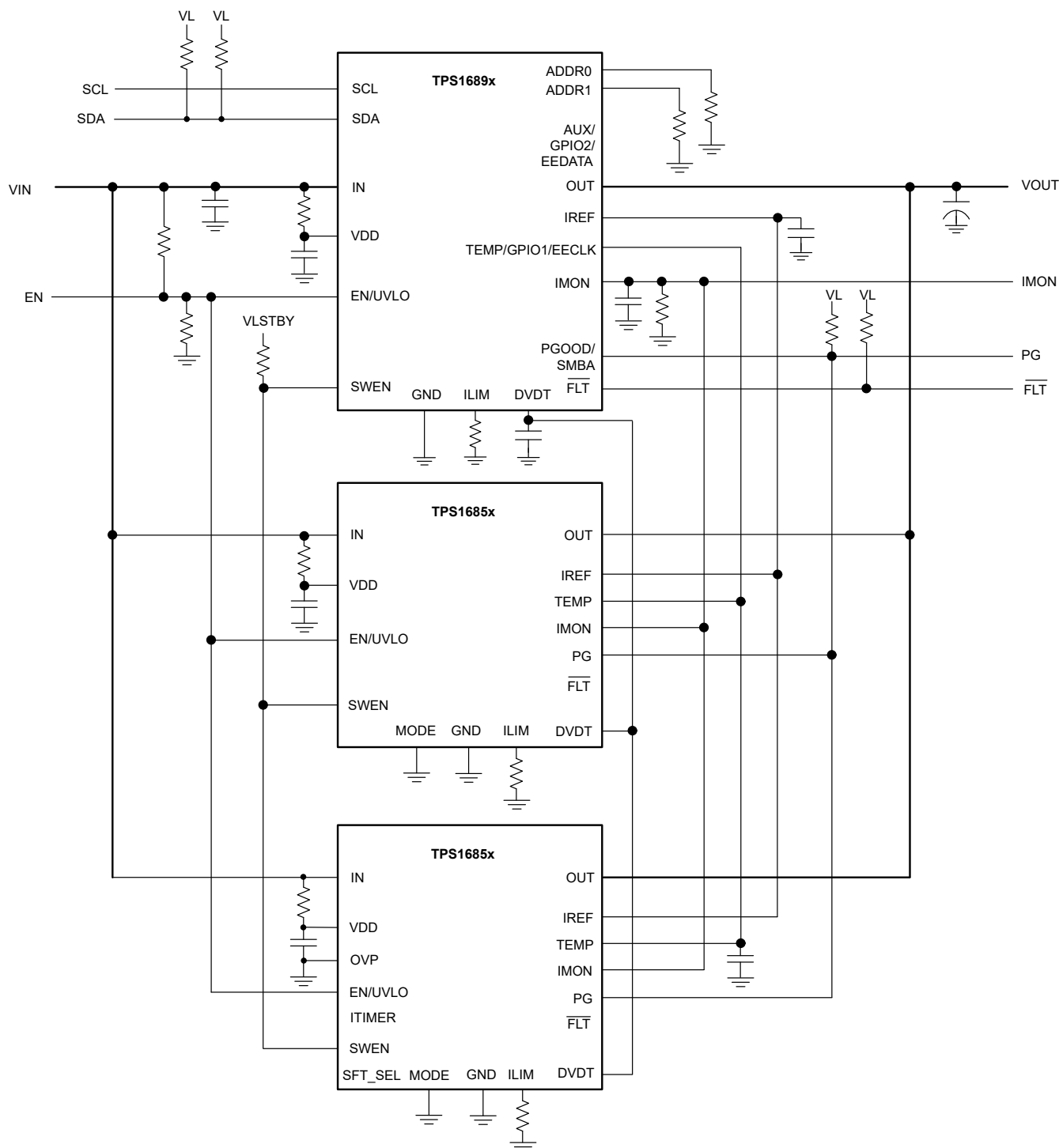


图 1-5. 48V 电源轨可堆叠高电流电子保险丝解决方案。

AI 计算 ($\pm 400V_{DC}$ 或 $800V_{DC}$ 时代)

AI 处理能力的激增推动了服务器机架从 12V 架构过渡到 48V 架构，以降低功率损耗并提高效率。基于 AI 的 IT 机架使用数百个处理器来快速处理让 AI 发挥最佳功能所需的计算量，因此在不久的将来需要 100kW 到 1MW 的机架功率 [5]。在 48V 电源轨上分配如此大的功率会导致电流超过 20kA，需要沉重且昂贵的母线，实施起来不切实际，因此 AI IT 服务器机架中的配电需要更高的 $\pm 400V_{DC}$ 或 $800V_{DC}$ 总线电压。低压直流架构需要高级热插拔控制器来处理更高电压的浪涌电流并提供准确的遥测，同时还需要采取适当的安全和绝缘措施。

领先的超大规模企业和云服务提供商目前正在评估多种设施级架构，例如 $\pm 400\text{V}_{\text{DC}}$ （两线）、 $\pm 400\text{V}_{\text{DC}}$ （三线）和 800V_{DC} 。这些架构直接影响着热插拔保护要求。

图 1-6、图 1-7、图 1-8 和图 1-9 展示了各种架构 [6] 以及 IT 机架侧热插拔保护插座。

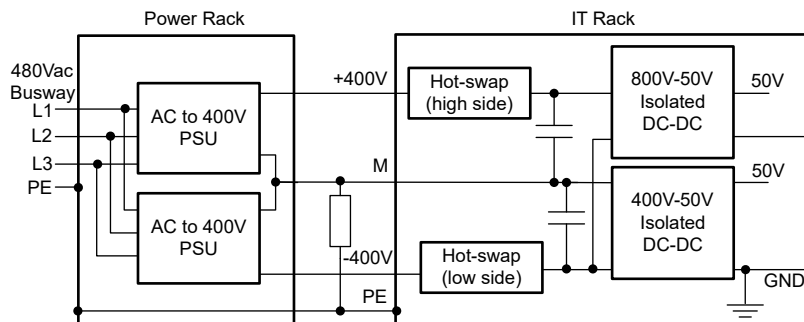


图 1-6. 三线 $\pm 400\text{V}_{\text{DC}}$ 配电系统

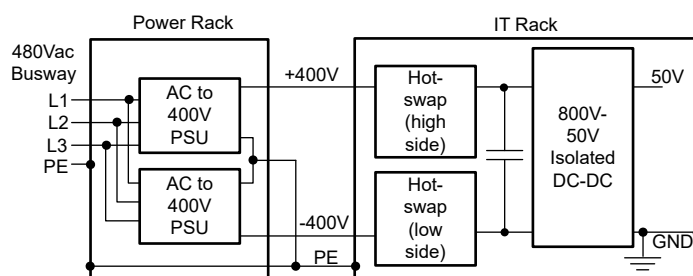


图 1-7. 两线 $\pm 400\text{V}_{\text{DC}}$ 配电系统

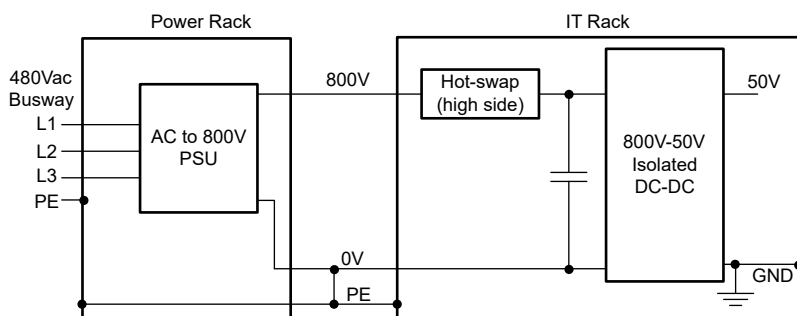


图 1-8. 两线 800V_{DC} 配电系统

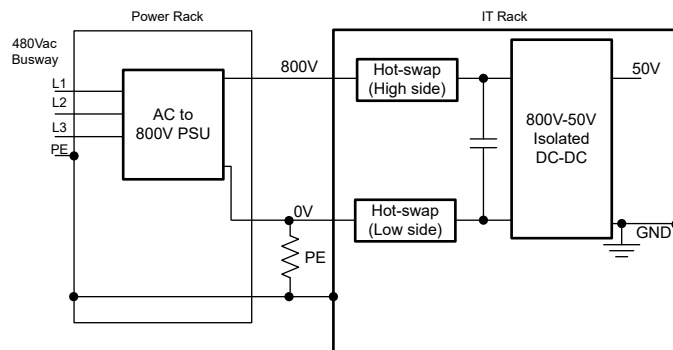


图 1-9. 带高电阻接地保护地的两线 800V_{DC} 配电系统

2 影响下一代热插拔技术的考虑因素

随着 AI 模型和科学仿真的复杂度不断提升，单个处理器往往不够用。IT 托盘需要容纳多个大功率 CPU 和 GPU。由于这是机架中价值最高的空间，可用于容纳热插拔电路和中间总线转换器的空间有限，因此需要紧凑的 800V 热插拔解决方案。分立式实现 [7] 包括隔离式栅极驱动器、电流和电压检测放大器、数字隔离器、多绕组辅助电源和微控制器。

TI 的 800V LMI800PS 热插拔控制器具备所有传统热插拔控制器元件，并集成电源和信号隔离功能，可实现更高功率密度的热插拔解决方案。

图 2-1 展示了用于 $\pm 400V_{DC}$ 两线系统架构的基于 LMI800PS 的热插拔解决方案。

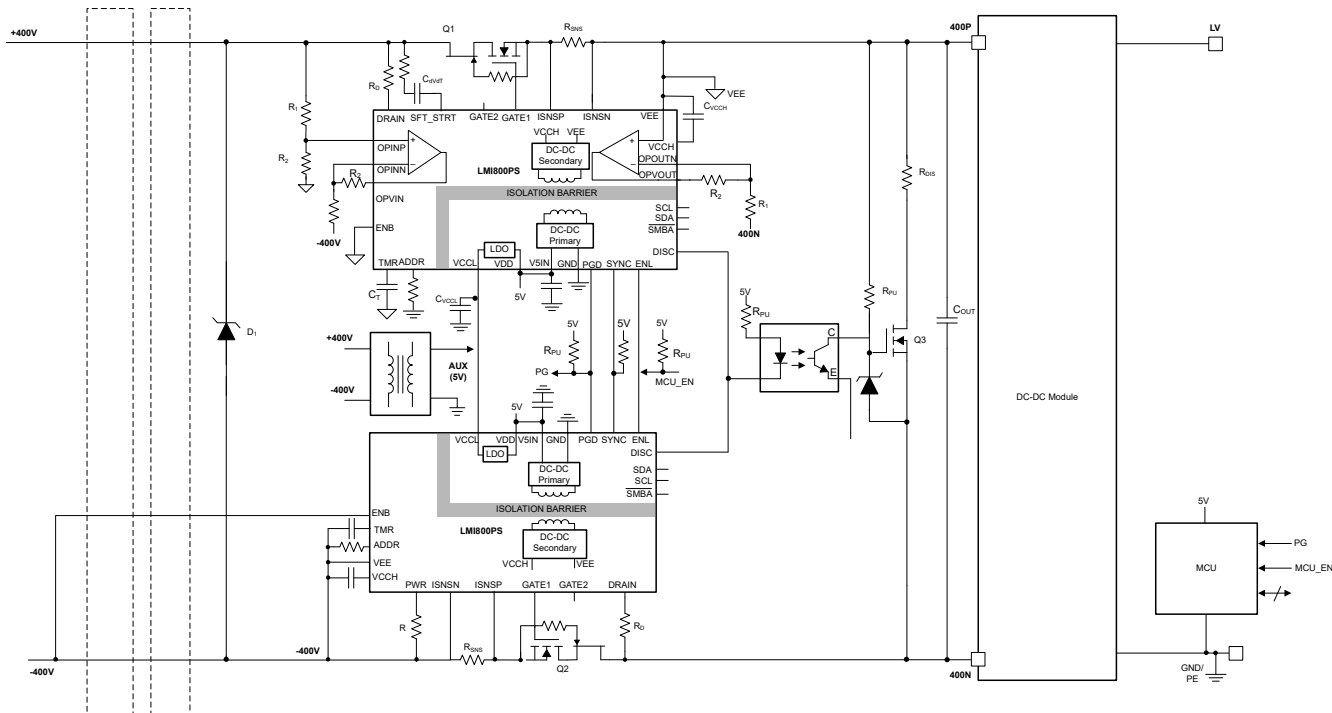


图 2-1. LMI800PS 热插拔解决方案

通用隔离式热插拔控制器架构

如图 1-6、图 1-7、图 1-8 和图 1-9 所示，根据系统架构和接地方案，热插拔电路既可位于输入电源轨的高侧，也可位于低侧。LMI800PS 控制器通过将本地芯片 GND 悬空，并跨隔离栅提供必要的信号和偏置电源，从而支持在两个电源轨上同时使用。

3 驱动热插拔 FET

对于 800V_{DC} 系统，功率 FET 的主要选择是额定 1.2kV 漏源电压 (V_{DS}) 的碳化硅 (SiC) 或 SiC 共源共栅结型 FET。SiC FET 需要 18V 栅极驱动电压才能完全增强 FET 以获得最低的导通电阻；SiC 共源共栅结型 FET 需要 12V 栅极驱动电压。在热插拔应用中，FET 通常在浪涌电流限制阶段以线性模式运行。重要的是要适当设计热插拔电路，使浪涌阶段的 SOA 应力保持在 FET 的 SOA 限值内。在输出短路状态下加电等故障场景中，也需要专门的保护方案来保护 FET。过载保护不能将开关置于有源模式，因为这会导致快速过热。

LMI800PS 具备可配置的栅极驱动特性和较低功率限制阈值（低至 200W）以及可配置的计时器，使系统设计人员能够灵活开发可靠的热插拔解决方案。

4 安全与绝缘

将控制和指示信号（管理信号）与高压部分隔离，并使系统能够与热插拔控制器通信，这一点很重要。这些信号的绝缘必须符合污染等级 2、10% 至 90% 湿度非冷凝条件下的增强型绝缘要求（依据安全标准国际电工委员会 [IEC] 62368-1），并满足海拔最高 3,050 米（最好是 5,000 米）的电气间隙和爬电距离要求。

LMI800PS 器件封装满足总体安全要求：高压域和低压域之间爬电距离 $\geq 8\text{mm}$ 、 5kVrms 隔离耐受电压 (V_{ISO}) 额定值和 10kV 浪涌能力。

其中一项安全要求是，当 IT 托盘与机架断开或输出断开时，在 2 秒内将输出大容量电容器放电至 $< 120\text{V}$ 。将带串联放电电阻器的 FET 与输出电容器并联可实现此特性。LMI800PS 具有放电 FET 控制输出信号，可简化输出放电设计。

5 结语

AI 处理能力的激增推动了 AI 服务器机架向 800V_{DC} 电力输送发生关键转变，以满足高级 AI 处理器日益增长的功率需求并支持高计算密度。这一转变为系统保护与监测带来了新的挑战，尤其是在热插拔事件期间。

TI 凭借 LMI800PS 高压热插拔控制器处于发展的前沿，该控制器可有效管理浪涌电流，为系统诊断和安全提供全面的遥测功能，并保持可靠运行。

6 参考资料

1. [Diablo 400 Project: Rack and Power](#) (版本 0.5.2)。(2025 年 5 月 30 日)。Open Compute Project：德克萨斯州奥斯汀。
2. Huntington, J. 和 Tu, M. (无日期)。 [800VDC Architecture for Next Generation AI Infrastructure](#)。Nvidia 白皮书。访问时间：2026 年 9 月 28 日。
3. McDonald, B. (2025 年 11 月)。 [数据中心不断演进以满足 AI 的巨大电力需求](#) (文献编号 SSZTDB4)。德州仪器 (TI) 技术文章。
4. Pal, A. 和 Panguloori, R. (2026 年 3 月)。 [可对 800V 或 \$\pm 400\text{V}\$ 直流配电实现稳健保护的浮地热插拔架构](#) (文献编号 STDA029)。德州仪器 (TI)。
5. Pal, A. 和 Panguloori, R. (2025 年第二季度)。 [使用热插拔控制器应对 48V AI 服务器的保护挑战](#) (文献编号 SLYT863)。德州仪器 (TI)《模拟设计期刊》。
6. Pal, A. 和 Sagar, S. (2025 年 1 月)。 [使用 TI 智能电子保险丝的高级功能增强服务器电源设计](#) (文献编号 SLVAFR8)。德州仪器 (TI)。
7. Rogachev, A. (2014 年 11 月)。 [稳健热插拔设计](#) (文献编号 SLVA673 修订版 A)。德州仪器 (TI)。

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月