

Technical White Paper

可对 800V 或 $\pm 400V$ 直流配电实现稳健保护的浮地热插拔架构



Avishek Pal, Applications Engineer, Input Power Protection and Distribution

Rakesh Panguloori, Applications Manager, Input Power Protection and Distribution

摘要

人工智能 (AI) 数据中心推动电力需求空前增长，单机架功率超 100kW，亟需从传统 50V 直流配电转向 800V 或 $\pm 400V$ 高压直流 (HVDC) 架构。为了克服这些 HVDC 系统中的保护难题，本文探讨了一种浮地热插拔架构，该架构采用低压控制器进行设计，并将其参考端连接至负载端，而非系统地。实验验证表明，该方案可实现 800V 稳定运行，具备可控浪涌电流与微秒级故障检测能力，同时减少 45% 铜材使用、提升 5% 效率。

内容

1 简介.....	2
2 浮地热插拔架构.....	2
3 系统设计注意事项.....	3
4 设计指南和元件选型.....	4
5 测试结果.....	6
6 结语.....	8
7 参考资料.....	8

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

人工智能 (AI)、高性能计算 (HPC) 和云服务的指数级增长正推动数据中心电力需求迎来前所未有的激增。传统的 50V 直流配电架构曾足以满足千瓦级 IT 机架的供电需求，但随着 AI 负载使机架功率密度从 10kW - 30kW 提升至 100kW 以上，最终迈向 1MW，该架构正快速逼近物理与经济极限。参考资料 1 显示，数据中心电源架构正在从传统的电源架向电源侧挂柜转型，在这一新架构中，电力通过 800V 或 $\pm 400V$ 的 HVDC 总线直接输送至 IT 机架。800VDC 系统通过大幅提升配电电压，可减少高达 45% 的铜材使用量，降低 I²R 损耗，并将端到端效率提升多达 5%。

如图 1-1 所示，在 HVDC 电源架构中，电网的三相 480V 交流电通过高效整流器转换为 800V 或 $\pm 400V$ 直流总线。HVDC 总线的电力经热插拔电路输送至中间总线转换器 (IBC) 模块，该模块可将 800V 或 $\pm 400V$ 直流电压转换为服务器机架所需的中间电压（例如 48V、12V 或 6V）。最后，使用多相直流/直流电源转换器将电源电压降至低于 1V，直接供给 GPU 使用。HVDC 领域为系统保护与监测带来了新的挑战，尤其是在热插拔场景下。为应对这些挑战，本文提出了一种浮地热插拔架构。本文档将详细阐述该方案的工作原理、系统设计、元件选型及实验结果。

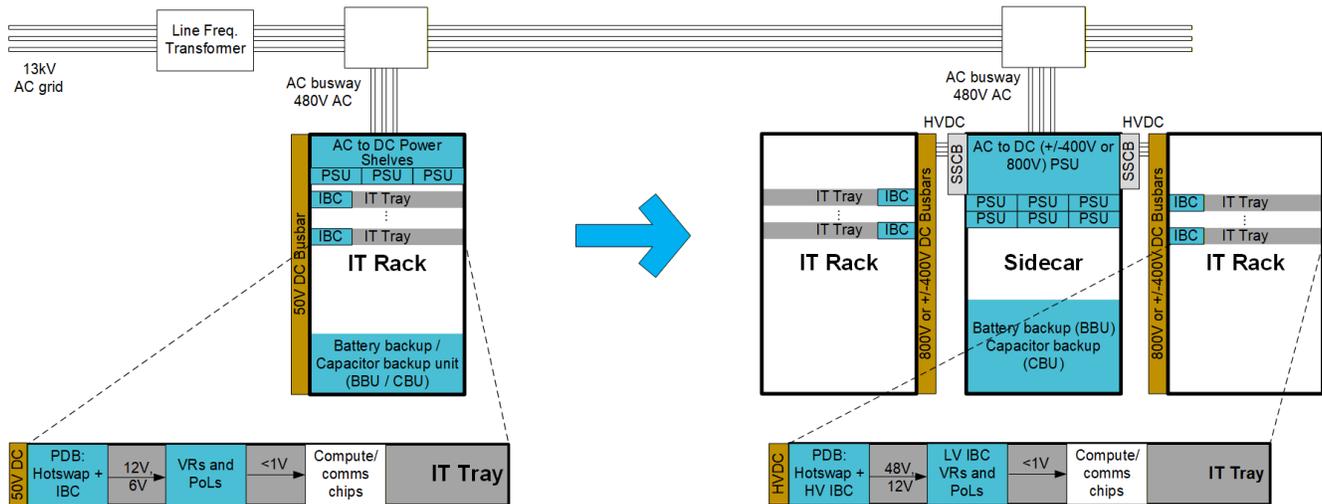


图 1-1. 数据中心配电架构演进

2 浮地热插拔架构

高压热插拔架构基于浮地概念而设计，采用 TI 现有的低压低侧热插拔控制器 TPS23521 器件。TPS23521 器件具备标准热插拔功能，包括热插拔操作、浪涌电流管理、欠压保护、过压保护、过流保护及短路保护。

如图 2-1 所示，TPS23521 器件使用 VEE 作为基准并以 VEE 为基准驱动热插拔 FET 的 GATE。与标准热插拔配置不同，该控制器的参考端 VEE 处于浮地状态，并非连接至系统地 GND，而是连接至负载端 VOUT。通过隔离偏置电源为 VCC 和 VEE 引脚之间供电，系统可实现可扩展的浮地热插拔架构，使 TPS23521 器件适用于 $\pm 400V$ 或 800V 供电轨。SS 引脚与 FET 漏极之间通过 1k Ω 电阻器连接的电容器 (CSS) 决定了启动期间 GATE 电压的压摆率。CSS 在内部连接到 GATE 引脚，用作 Q1 的栅漏电容器。当施加 VCC 电压时，TPS23521 器件开始对 GATE 充电并导通 Q1。一旦栅源电压超过阈值电压 V_{TH}，整个 GATE 电流会对电容器 CSS 放电，从而使 Q1 的漏源 (V_{DS}) 电压线性放电。FET Q1 在米勒平坦区域运行并充当源极跟随器，其中 V_{OUT} 跟随 GATE 变化，压摆率由 CSS 电容器确定。当 Q1 的 V_{DS} 达到零时，GATE 到 VEE 的电压会进一步升高至 VCC 到 VEE 的差值，从而使 Q1 能够在完全导通模式下运行。低侧电流检测功能可确保启动和稳态工况下，过流保护与短路保护功能均能正常生效。

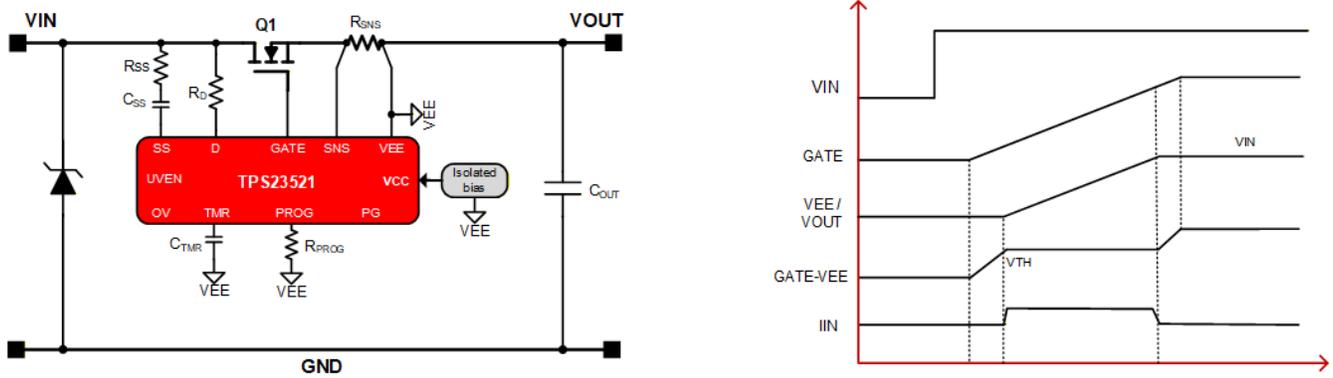


图 2-1. 浮地热插拔架构及启动时序图说明

3 系统设计注意事项

基于上一节所述的浮地热插拔架构，选用下面所列若干 TI 元件构建了一个完整的热插拔解决方案。

- **TPS23521**：采用低侧高性能热插拔控制器作为核心元件，实现热插拔操作、浪涌电流管理、欠压保护、过压保护、过流保护及短路保护功能。
- **UCC28704**：采用反激控制器为所有功能模块提供偏置电源。
- **OPA210**：采用运算放大器构成差分电路，对 800V 输入电源电压进行衰减缩放，并与 TPS23521 器件的 UVEN 和 OV 引脚对接。
- **INA238**：通过 I2C 实现精确的电流、电压和功率监控，经 ISO1644 (I2C 隔离器) 器件传输数字遥测数据，支撑智能机架管理。
- **ISOM8110**：光耦仿真器在控制电路和输出放电电路之间构建隔离屏障。

如方框图中所示 (请参阅图 3-1)，无论是功率级别还是 $\pm 400V/800V$ 电源轨电压，浮地热插拔架构均能实现真正可扩展的解决方案。因此，该架构兼容二线制或三线制 (含机壳接地) 的安装场景。

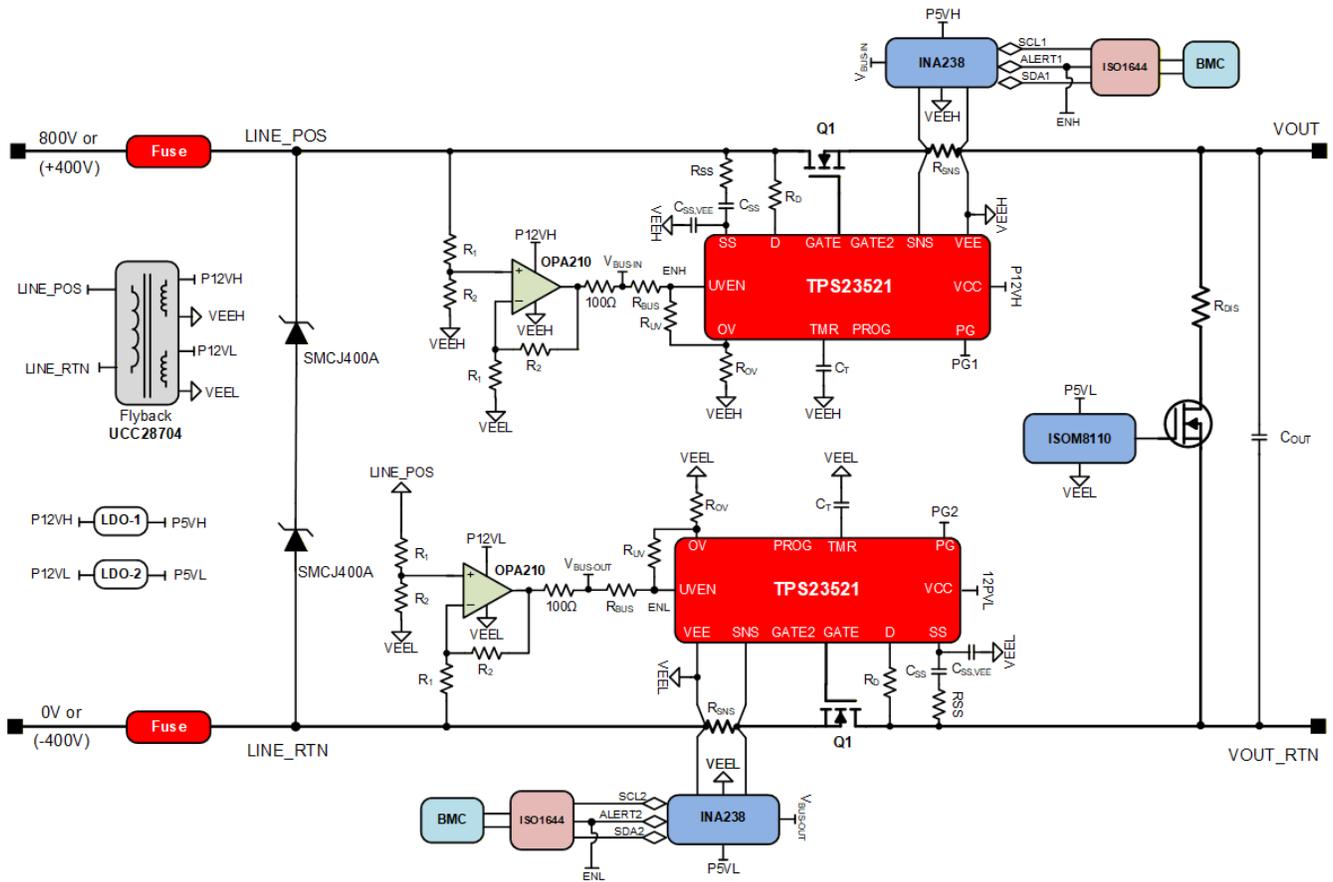


图 3-1. 高侧和低侧电源路径上的浮地热插拔解决方案方框图

4 设计指南和元件选型

本节将针对表 4-1 中概述的系统规格给出元件选型方案。

表 4-1. 典型系统规格

设计参数	值
输入电压范围	2 线 ± 400V 或 800V
输出电容	100μF
稳态热设计功率 (TDP) 额定值	17kW
过流保护	25A
故障计时器持续时间 (典型值)	200μs
最高环境温度	60°C
欠压锁定阈值	720V
过压锁定阈值	880V

- **电流检测电阻 R_{SNS} 的选型**：最大负载电流为 $17000W/720V = 23.6A$ 。为了预留一些裕度，将目标电流限制设置为 25A。PROG 引脚允许选择 25mV 或 40mV 的检测电压。为降低功耗，选择 25mV 检测电压，然后通过方程式 1 计算 R_{SNS} 。

$$R_{SNS} = \frac{V_{SNS,CL1}}{I_{CL1}} = \frac{25mV}{25A} = 1m\Omega \quad (1)$$

本设计采用 1mΩ、3W 的电流检测电阻 (WSL39211L000FEA)。

- **软启动电容器的选型， C_{SS} 和 $C_{SS,VEE}$** ：使用方程式 2 计算启动期间计时器运行时的最小浪涌电流。

$$I_{\text{INR, TMR, min}} = \frac{V_{\text{SNS, TMR2, min}}}{R_{\text{SNS}}} = \frac{1.5\text{mV}}{1\text{m}\Omega} = 1.5\text{A} \quad (2)$$

为了避免在浪涌期间运行计时器，浪涌电流必须远低于 1.5A。目标浪涌电流设为 200mA 可在启动期间获得更好的 FET SOA 裕度。使用 [方程式 3](#) 计算目标 C_{SS} 。

$$C_{\text{SS}} = \frac{C_{\text{OUT}} \times I_{\text{GATE, SRS, START}}}{I_{\text{INR, TGT}}} = \frac{100\mu\text{F} \times 20\mu\text{A}}{200\text{mA}} = 10\text{nF} \quad (3)$$

采用两个多层陶瓷电容器 (GRM32E5C2J223FWA3L)，规格为 0.022 μF 、630VDC，C0G 材质，以串联方式用于 C_{SS} 。此外，TI 建议在 SS 引脚与 VEE 之间加装容量为 C_{SS} 三倍的电容器 $C_{\text{SS, VEE}}$ ，以提升软启动期间的瞬态抗扰度。

最后，可以使用 [方程式 4](#) 计算启动时间。

$$T_{\text{START}} = \frac{C_{\text{SS}} \times V_{\text{IN}}}{I_{\text{GATE, SRS, START}}} = \frac{11\text{nF} \times 800\text{V}}{20\mu\text{A}} = 440\text{ms} \quad (4)$$

- **选择 VDS 切换阈值：**TPS23521 器件从较低电流阈值 (3mV/ R_{SNS}) 切换至较高电流阈值 (25mV/ R_{SNS}) 的阈值电压可通过电阻器 R_{D} 进行选择。较高的 VDS 阈值可提供更好的瞬态抗扰度，但会使 FET 暴露在更高的 SOA 应力下。初始设定 100V 的 VDS 切换电压，然后使用 [方程式 5](#) 计算 R_{D} 。

$$R_{\text{D}} = 30\text{k}\Omega \times \left(\frac{V_{\text{DS, SW}}}{1.5\text{V}} - 1 \right) = 30\text{k}\Omega \times \left(\frac{100\text{V}}{1.5\text{V}} - 1 \right) = 1970\text{k}\Omega \quad (5)$$

使用三个规格为 680K Ω 和 700V 的电阻器 (TNPV1206680KBEEN) 串联。获得的有效切换电压为 103.5V。

- **故障计时器选择：**计时器确定热插拔在超时前允许过载的时间长度，并且可以使用 C_{T} 进行编程。如需设置 200 μs ，请使用 [方程式 6](#)。

$$C_{\text{T}} = \frac{T_{\text{FLT}} \times I_{\text{TMR, SRS}}}{V_{\text{TMR}}} = \frac{200\mu\text{s} \times 10\mu\text{A}}{1.5\text{V}} = 1.3\text{nF} \quad (6)$$

采用 1.5nF 陶瓷电容器 (CC0603JRX7R8BB152)。

- **输入电压监测：**OPA210 器件用作差分放大器，对输入总线电压进行衰减缩放 (增益为 R_2/R_1)，并实现对该电压的监测功能。选择电阻器 R_1 和 R_2 以将增益设置为 1/10，如 [方程式 7](#) 所示。

$$V_{\text{BUS-IN}} = \{\text{INPUT}(+) - \text{INPUT}(-)\} \times \frac{R_2}{R_1} = 800\text{V} \times \frac{20.5\text{k}\Omega}{3 \times 680\text{k}\Omega} = 8\text{V} \quad (7)$$

按照 TPS23521 数据手册的标准流程，利用衰减后的总线电压 $V_{\text{BUS-IN}}$ 设定输入总线上的欠压和过压阈值。

- **FET 选型和 SOA 分析：**本设计中使用了碳化硅 (SiC) 组合 JFET (UG3SC120009K4S)，规格为 1200V 和 8.8m Ω 。如参考资料 2 所述，需针对三类应力事件对 FET SOA 进行分析，包括启动过程、带短路故障启动及过流事件。
 1. 启动期间，浪涌电流为 100mA 时，系统将 100 μF 输出电容从 0V 充至 800V 约需 440ms。UG3SC120009K4S FET 在 70 $^{\circ}\text{C}$ 、800V 漏源电压下可承受超过 300mA 电流，因此 SOA 裕度大于 50%
 2. 带短路故障启动时，因 SS 引脚处栅极电容较大，栅极电压上升速率极慢。要评估 FET 应力，需将电流脉冲近似为矩形脉冲。在本设计中，FET 应力通过 500 μs (电流波形的等效矩形脉冲)、1.5A 和 880V 的脉冲参数进行近似计算。在 880V、结温 100 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下，UG3SC120009K4S FET 可承受 500 μs 的 2.2A 电流脉冲，因此具备 50% 的 SOA 裕度。
 3. 在过载事件期间，TPS23521 器件以限流模式运行，此举会对热插拔 FET 造成风险。为规避该风险，INA238 器件配置有 22A 的过流警报，且 INA238 器件的警报输出用于禁用 UVEN 引脚上的 TPS23521 器件。该功能可模拟断路器的断电效果，且不会对 FET 产生任何应力。

- **面向下游负载的电源正常接口**：TPS23521 器件以 TPS23521 器件的接地端 VEEH 和 VEEL 为基准生成电源正常 (PG) 信号。这些信号经数字隔离器传输后合并，用于控制下游负载，可避免启动过程中出现负载冲击，从而大幅降低热插拔 FET 的 SOA 应力。
- **输出放电电路**：为满足 IEC 62368-1 标准的安全要求，本热插拔解决方案内置放电电路，可在 2 秒内完成输出电容的放电。当热插拔 FET 关断或者输入断开时，会启用放电电阻器 (R_{DIS}) 对 COUT 放电。此处选用 $2k\Omega$ 、10W 电阻器 (AC10AT0002001JAB00)，可在 1.5 秒内完成 $100\mu F$ 的放电。
- **TVS 二极管选型**：瞬态保护元件 TVS 二极管的选型，需遵循参考资料 3 中列出的指南。在输入侧放置两个串联连接的 SMCJ400A 二极管。

5 测试结果

建议的解决方案已经过验证并在本节介绍所有应力事件的测试结果。图 5-1 展示了将 $100\mu F$ 电容充电至 800V 时启动期间的浪涌行为。图 5-2 显示了在输出端子处发生短路的电路的启动行为。如测试所示，电流峰值达到 3A（电流限制下限），TPS23521 器件检测到故障并切断故障路径。发生缓升型过流故障时，INA238 器件在 22A 时发出告警，拉低 TPS23521 的 EN 引脚，在 $10\mu s$ 内关断热插拔 FET，如图 5-3 所示。

图 5-4 显示了在稳定状态下发生输出短路故障时的电路行为。INA238 和 TPS23521 器件均可检测到快速上升的短路电流，并在数微秒内禁用 FET。

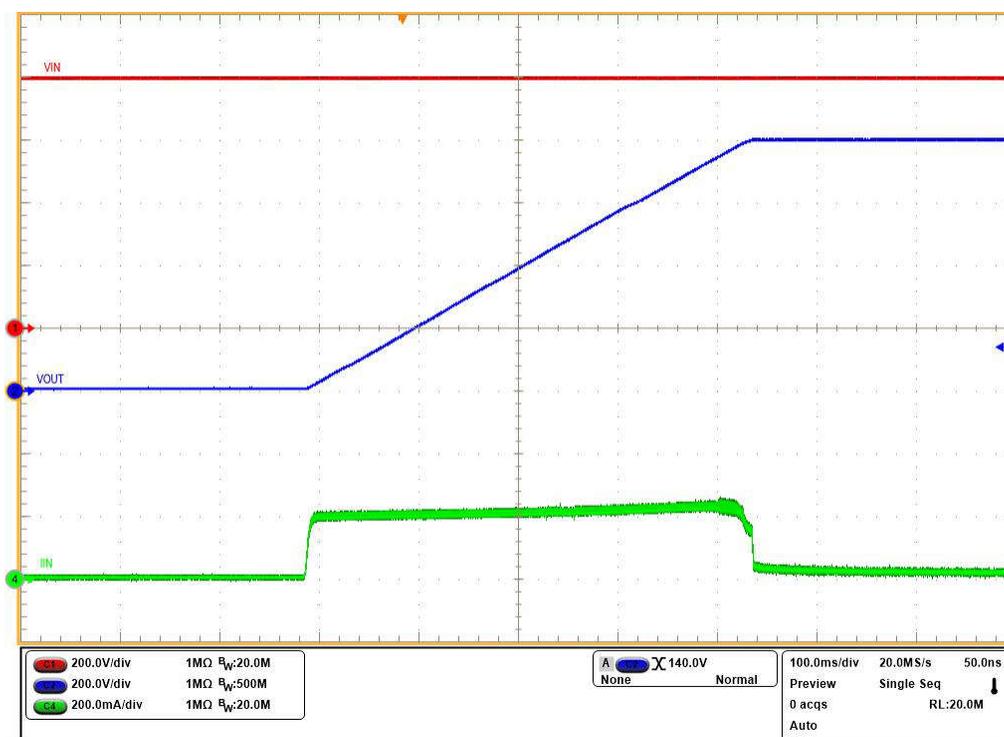


图 5-1. 在 800V 下使用 $100\mu F$ 电容启动

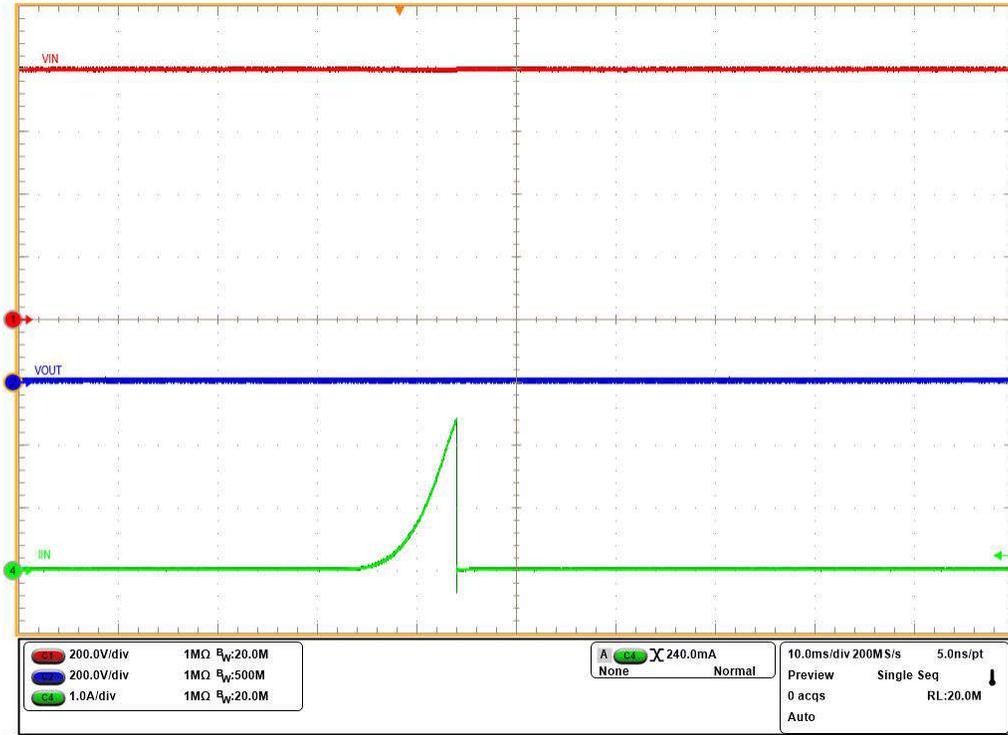


图 5-2. 在 800V VIN 下的带短路故障启动

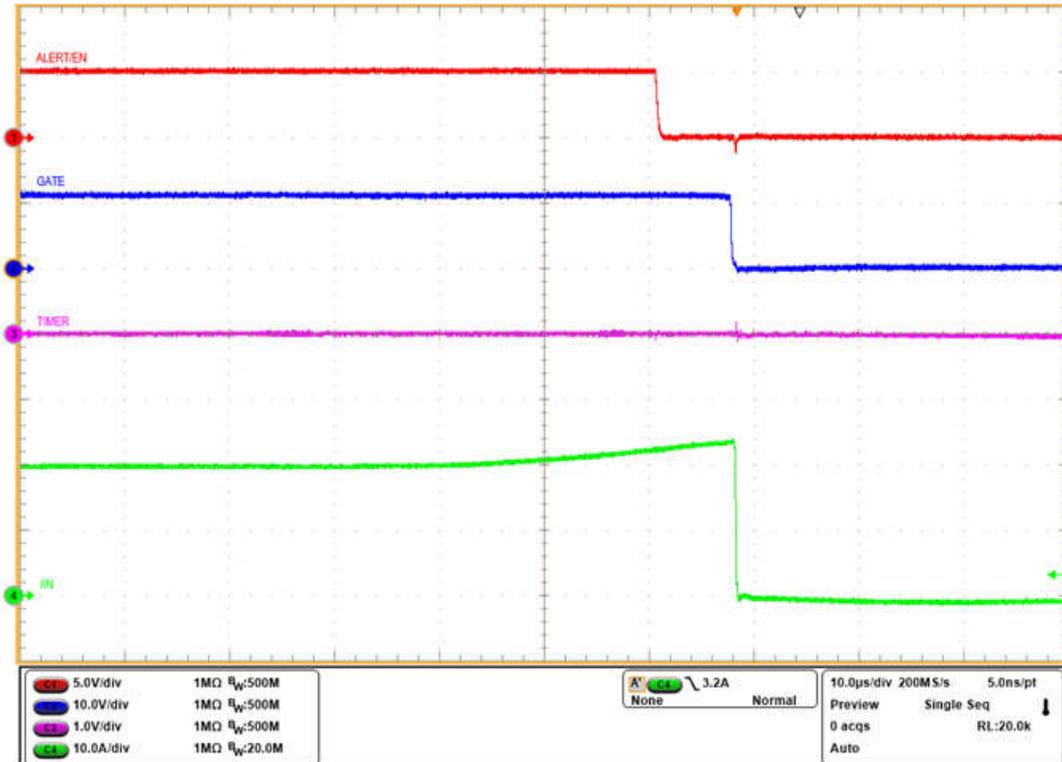


图 5-3. 缓升型过流时的电路响应

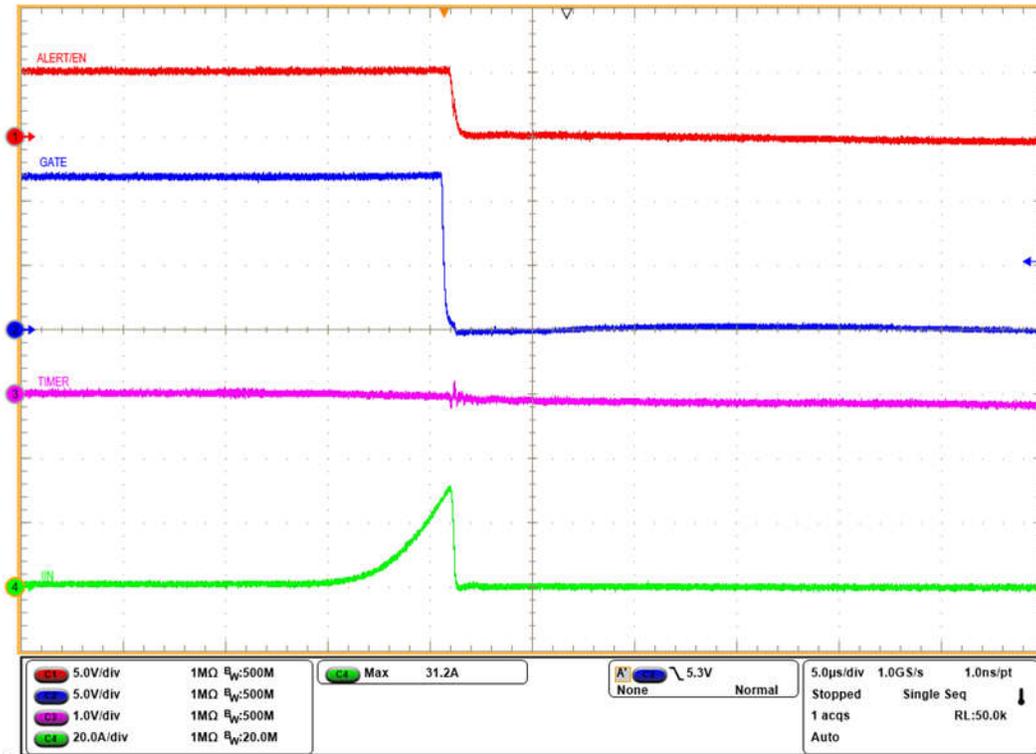


图 5-4. 输出短路期间的电路响应

6 结语

服务器系统功率的持续提升，促使数据中心从传统交流配电转向 HVDC 总线供电，这为系统保护与监测带来了新的挑战，尤其在热插拔场景下。所提出的浮地热插拔架构可实现可扩展、高可靠性的保护解决方案，助力现代数据中心更快普及 HVDC 配电方案。

7 参考资料

1. MacDonald, Brent , (2025 年)。 [数据中心不断演进以满足 AI 的巨大电力需求](#)。德州仪器 (TI) 技术文章。
2. Panguloori, Rakesh 和 Goel, Kunal (2025 年)。 [电源开关瞬态保护设计，实现稳健可靠的电源路径保护](#)。德州仪器 (TI) 模拟设计期刊。
3. Rogachev, Artem (2014 年)。 [可靠的热插拔设计](#)。德州仪器 (TI) 应用报告。

相关网站

- 德州仪器 (TI) , [TPS23521](#) 数据表。
- 德州仪器 (TI) , [UCC28704](#) 数据表。
- 德州仪器 (TI) , [OPA210](#) 数据表。
- 德州仪器 (TI) , [INA238](#) 数据表。
- 德州仪器 (TI) , [ISO1644](#) 数据表。
- 德州仪器 (TI) , [ISOM8110](#) 数据表。

关键字： TPS23521、热插拔、企业 系统、AI 服务器、输入 保护

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