

使用热插拔控制器应对 48V AI 服务器的保护挑战

Avishek Pal
Power Switches

Rakesh Panguloori
Power Switches

简介

随着人工智能 (AI) 和机器学习技术不断进步，企业服务器需要同时处理大量数据和存储，能耗极高。每个服务器主板的稳态额定功率高达 5kW 或 6kW，而通用服务器的额定功率为 1kW 或 2kW。但外形尺寸保持不变，因此随着功率密度的增加，系统设计面临着诸多挑战。与通用服务器相比，AI 服务器上瞬态负载的负载幅度、压摆率和频率增加了三到四倍。

图 1 显示了 48V 机架式服务器中的典型配电情况，其中输入受到热插拔电路的保护，然后分配到所有下游系统负载。

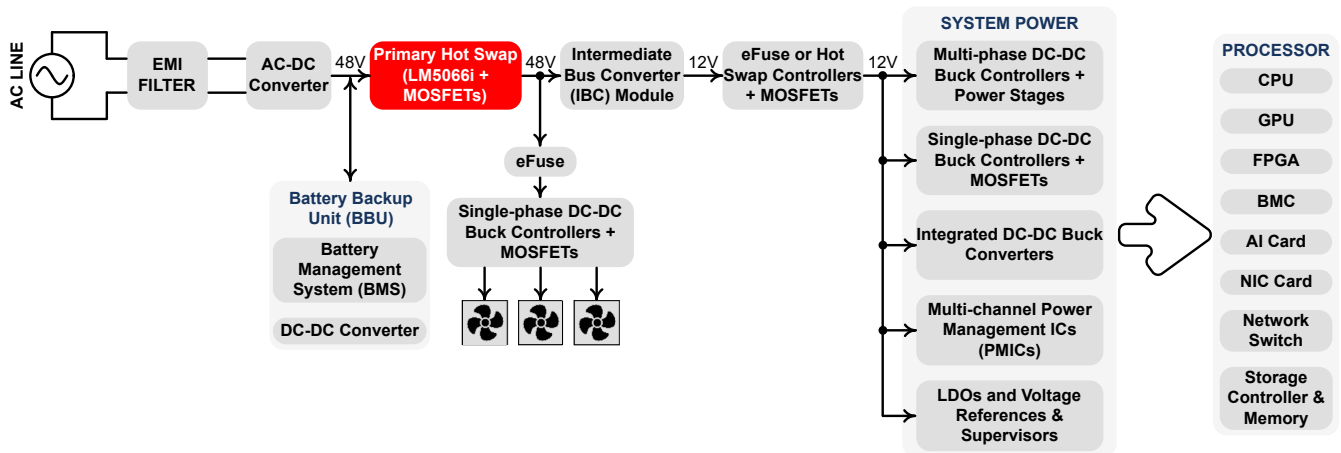


图 1. 48V 机架式服务器配电的典型方框图。

在本文中，我们将讨论基于 AI 的处理器在 48V 服务器设计中带来的各种挑战，以及设计指南和重要提示和技巧，用于实现符合表 1 中概述的系统规格的可靠热插拔解决方案。

设计参数	值
输入电压范围	40V 至 60V
输出电容	4.2mF
稳态热设计额定功率	6kW
瞬态功率额定值	400 μ s 下为 8kW
瞬态负载分布	占空比为 10% 时瞬态功率额定值的 15% 至 100%
负载压摆率	>2A/ μ s
瞬态负载的频率	> 1kHz

表 1. 典型系统规范。

设计 48V AI 服务器热插拔电路的挑战

每当回顾这些年来热插拔电路配置是如何演变的，都会发现有趣的现象。热插拔解决方案由三个主要组件组成：一个用作主电源控制开关的 N 沟道金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET)、一个测量电流的感应电阻器，以及一个热插拔控制器，其中包括一个完成环路以控制 MOSFET 的通电流的电流感应放大器。

如图 2 所示，您可以对低功耗设计使用单一基于 MOSFET 的热插拔解决方案。从根本上说，热插拔控制器具有电流和功率限制功能，可限制浪涌和故障电流，同时保障 MOSFET 的安全工作区 (SOA)。这些功能足以用于设计低功耗 (<500W) 热插拔解决方案。

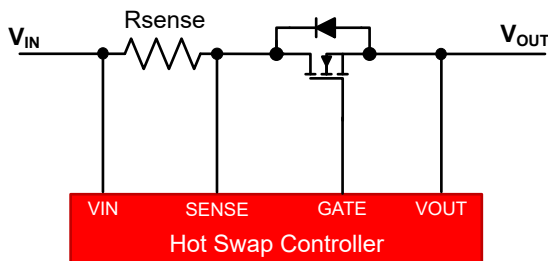


图 2. 传统功率限制热插拔电路。

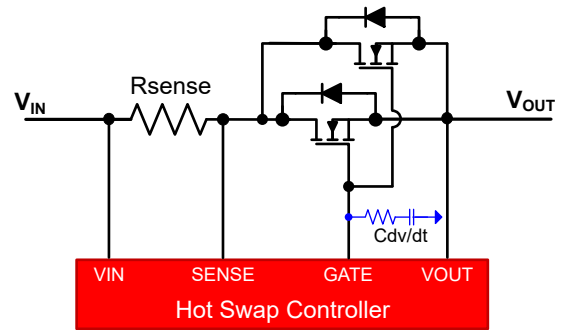


图 3. 具有栅极压摆率控制功能的热插拔电路。

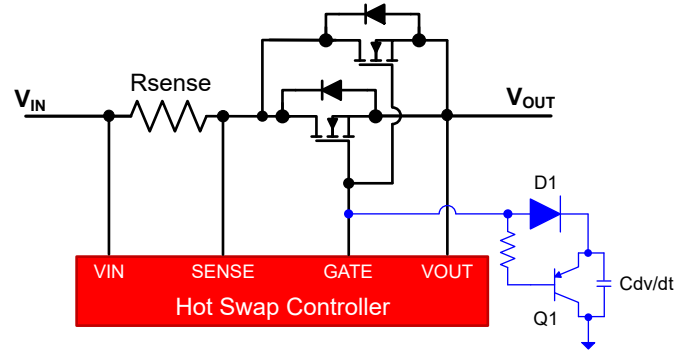


图 4. 具有针对 $C_{dv/dt}$ 的局部放电路径的热插拔电路。

随着数字负载的增加，系统需要更高的输出电容 (>SOA 470 μ F)，要求并联 MOSFET 支持稳态电流并采用输出电压压摆率控制 [1]，以使 MOSFET 保持在其 SOA 范围内。

在输出电压压摆率控制方法中，放置在栅极-GND 之间的电容器 $C_{dv/dt}$ (参阅图 3) 可限制栅极和输出电压的压摆率，从而限制浪涌电流。当 MOSFET 中的功率损耗降低且分布在较长的时间段内时，它们可以处理更多能量。因此，随着输出电容增加，您需要更高的 $C_{dv/dt}$ 来降低 MOSFET 在启动期间的浪涌电流和功率损耗。

更高的 $C_{dv/dt}$ 会干扰关断过程，但热插拔控制器的下拉强度有限。这需要针对 $C_{dv/dt}$ 采用基于本地 P 沟道 N 沟道 P 沟道 (PNP) 的放电电路，如图 4 所示。在启动期间， $C_{dv/dt}$ 以相同的方式控制压摆率，但在关断事件期间，Q1 PNP 晶体管激活并在本地对 $C_{dv/dt}$ 放电。二极管 D1 会阻止 $C_{dv/dt}$ 放电到栅极引脚，从而降低栅极引脚上的应力，同时确保控制器正常运行。

在 AI 驱动型图形处理单元应用中，热插拔解决方案必须支持 150A 左右的电流，并且必须支持高频、高压摆率负载瞬态，而这带来了三个新的挑战。

挑战 1: 输出短路期间的关断延迟

随着负载电流的增加，需要并联更多的 MOSFET，以将最高稳态 MOSFET 结温限制为安全值（100°C 至 125°C）。例如，为了在 70°C 环境温度下支持 150A 的稳态负载电流，需要并联八个德州仪器 (TI) CSD19536KTT MOSFET，以将稳态 MOSFET 结温限制在 100°C 范围内。并联 MOSFET 有助于散热，但会增加热插拔控制器栅极引脚上的有效电容并影响关断响应。

在输出短路期间，MOSFET 需要足够快地关断，以防止故障电流进一步累积，并避免损坏 MOSFET、输入电源或印刷电路板 (PCB)。TI LM5066I 热插拔控制器的栅极下拉强度限制为 160mA，这不足以在短路事件期间完全关断所有八个 MOSFET，如图 5 所示。

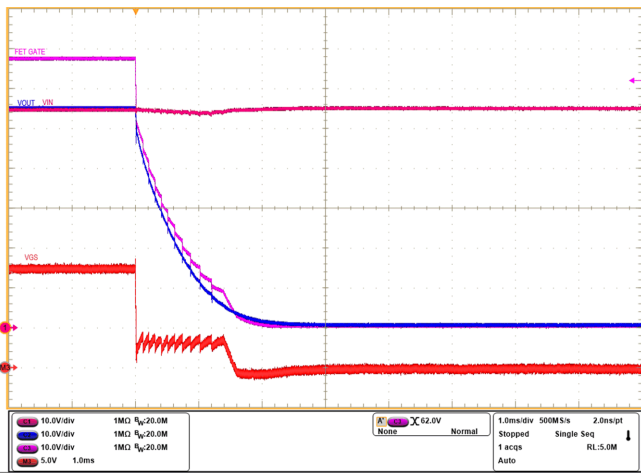


图 5. LM5066I 控制器采用八个 MOSFET 时的短路响应。

挑战 2: 在负载瞬态期间出现错误的栅极关断

尽管基于 PNP 的局部 Cdv/dt 放电电路有助于在输出短路事件期间可靠地关断 MOSFET，但会在存在高频、高压摆率负载瞬态的情况下导致栅极错误关断。在负载升压期间，由于热插拔电路的输入和输出阻抗有限，MOSFET 源极节点会下降。源极节点上的压降通过 MOSFET 的 C_{GS} 电容耦合到 MOSFET 栅极节点，并导致栅极节点也下降。MOSFET 源极节点在负载降压期间恢复。由于 LM5066I 热插拔控制器的栅极电流有限（典型值为 20 μ A），栅极节点无法完全恢复到之前的水平。因此，热插拔控制器栅极在后续负载瞬态周期中继续进一步下降，从而为 Q1 产生基极-发射极电压。最后，PNP 双极晶体管 Q1 导通，导致

错误地关断系统。图 6 展示了整个过程，而图 7 展示了相应的测试结果。

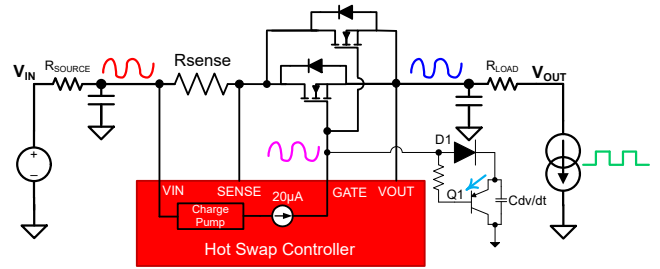


图 6. 动态负载的热插拔电路图示。

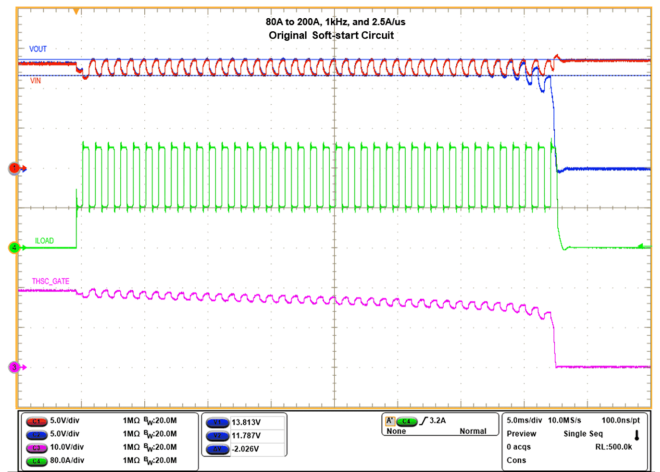


图 7. 热插拔电路对动态负载的响应。

挑战 3: 受控（慢速）导通期间的并联谐振

通常，在线性工作区域内，与单个 MOSFET 相比，并联 MOSFET 更容易发生寄生振荡。这是因为漏极、源极和栅极节点上存在寄生杂散封装电感和电容，它们会形成一个类似于 Colpitts 振荡器的谐振回路。与栅极驱动强度 >2A 的开关稳压器不同，具有较低栅极驱动强度 (20 μ A) 的热插拔控制器通过在线性区域中运行 MOSFET 来限制启动期间的浪涌电流。因此，热插拔 MOSFET 的并联组合非常敏感，更有可能产生持续振荡。这种现象会导致在电源短路故障期间违反 MOSFET SOA，从而导致 MOSFET 损坏。

建议的电路增强

下面我们将探讨有助于解决这三个挑战的电路增强。

改善关断响应

在图 8 所示的建议解决方案中，使用 PNP 晶体管 (Q_{PD} 和 R_{PD}) 引入外部快速下拉电路将提高关断速度。在输出短路事件期间，160mA 的栅极下拉电流会在 R_{PD} 电阻器上产生较大的压降，并启用 PNP 晶体管的快速下拉 (Q_{PD})。这进而会使所有并联 MOSFET 的栅极至源极短路，立即关断 MOSFET 以快速断开电源路径。图 9 展示了快速下拉电路中短路事件的实验结果。

克服动态负载的关断错误

在该解决方案中，热插拔栅极节点通过在 MOSFET 栅极端子之间放置 D_{SS} 二极管来从 MOSFET 栅极端子去耦，同样如图 8 所示。此修改有助于消除输出电压纹波到热插拔控制器栅极节点的反射，并避免软启动 PNP 晶体管 Q_{SS} 发生错误导通。更改二极管的位置不会影响启动期间的控制器行为或任何故障事件。如测试结果（请参阅图 10）所示，即使在频率为 1kHz、负载阶跃为 20A 至 120A 的情况下，系统也能连续运行。

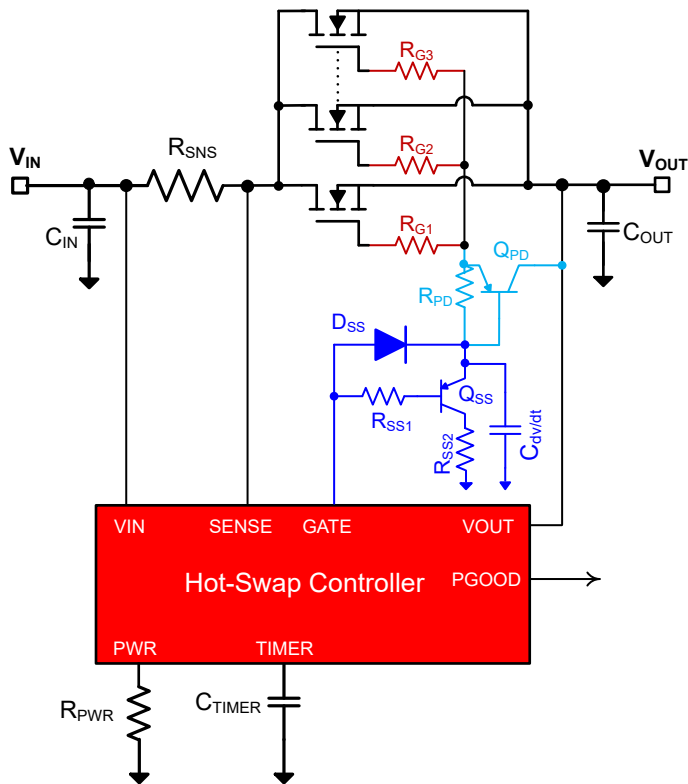


图 8. 建议的热插拔电路配置。

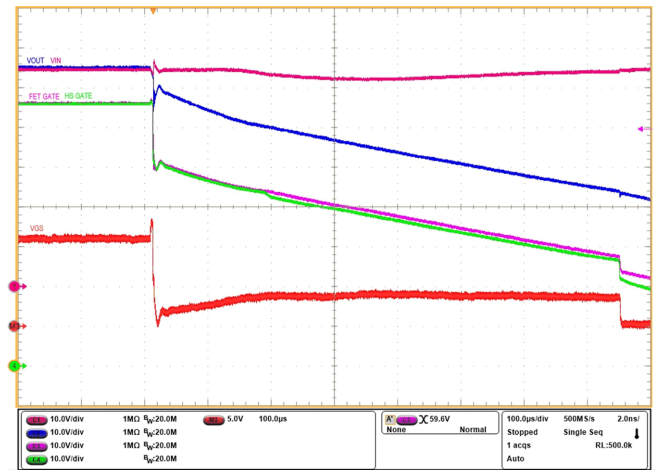


图 9. 具有快速下拉电路的输出短路响应。

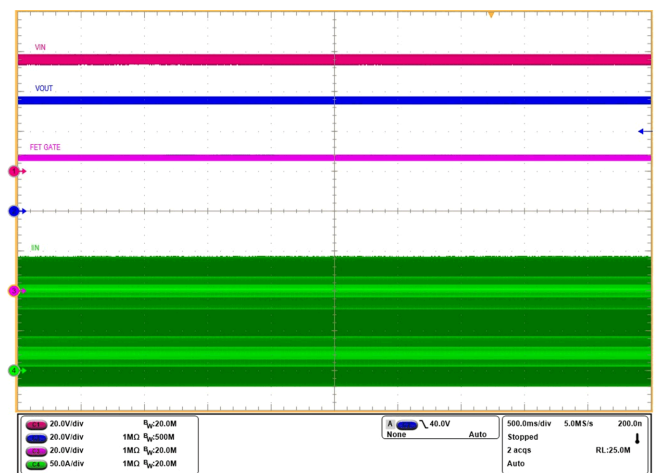


图 10. 在 1kHz 频率下，20A 至 120A 步进至 20A 的负载瞬态性能。

阻尼寄生振荡

添加与每个 MOSFET 栅极串联的阻尼电阻器 (R_{G1} 、 R_{G2} 、 R_{G3}) 可以消除系统中的寄生振荡。通常，我们推荐使用 10Ω 0603 封装电阻，但根据寄生效应，1Ω 左右的低值也可能有用。我们建议在您的 PCB 上进行测试并确定阻尼电阻器的值。

设计指南和器件选择

参考文献 [1] 重复执行了设计热插拔电路以保护系统和 MOSFET 的过程。我们建议您查看参考文献 [1] 以熟悉该设计。

将表 1 中所示的系统规格馈入 [LM5066I 设计计算器](#) 将获得并联的所选 MOSFET 的电流感应电阻器 (R_{SNS})、功率限制

电阻器 (R_{PWR})、故障计时器电容器 (C_{TIMER})、软启动电容器 ($C_{dv/dt}$) 和数量 (N) 的值。在[适用于 48V 人工智能服务器的 8kW 热插拔参考设计](#) [2] 中, $R_{SNS} = 330\mu\Omega$ 、 $R_{PWR} = 28.7k\Omega$ 、 $C_{TIMER} = 10nF$ 、 $C_{dv/dt} = 47nF$ 且 $N = 8$ 。

查看[图 8](#), 使用[方程式 1](#) 择 R_{PD} 电阻器:

$$R_{PD} > \frac{V_{BE(sat)}}{I_{GATE(CB)}} \quad (1)$$

其中, $V_{BE(sat)}$ 是 Q_{PD} PNP 晶体管的基极-发射极饱和电压, 而 $I_{GATE(CB)}$ 是 LM5066I 热插拔控制器中的上电复位断路器灌电流。8kW 热插拔参考设计使用的 R_{PD} 值 = 20 Ω 。

$C_{dv/dt}$ 放电电路

[图 8](#) 为 D_{SS} 使用 100V 信号二极管。二极管应处理几十毫安的正向电流。此 8kW 热插拔参考设计使用 Diodes Inc. 的 BAV16W-7-F

您必须反复选择 R_{SS1} 、 R_{SS2} 和 Q_{SS} , 以确保在关断期间三个分量中的任何一个都不会受到应力。对于 Q_{SS} , 您可以选择集电极-发射极 (V_{CEO}) 和集电极-基极 (V_{BEO}) 电压 $>100V_{DC}$ 且集电极连续电流 $>200mA$ 的任何标准 PNP 晶体管。选择 R_{SS1} 和 R_{SS2} 的值及其各自的额定功率, 将流过 Q_{SS} 晶体管的电流限制在安全值。您必须为 R_{SS2} 使用特殊的高功率电阻器, 以便管理关断期间的瞬态峰值功率应力。8kW 热插拔参考设计将 onsemi MMBT5401LT1G 用于 Q_{SS} , $R_{SS1} = 100\Omega$ 且 $R_{SS2} = 499\Omega$ (Vishay RCS0805499RFKEA)。

需要使用输入瞬态电压抑制 (TVS) 二极管, 以便在输入热插拔和输出短路事件期间防止瞬态过压。TI [TVS 二极管推荐工具](#) 可帮助您获取 TVS 二极管的器件型号 (电压和功率额定值), 以及并联的 TVS 二极管数量。8kW 热插拔参考设计使用三个 Littelfuse 8.0SMDJ60A TVS 二极管。有关 TVS 二极管选择的更深入分析, 请参见参考文献 [3]。

您将需要输出肖特基二极管, 以免热插拔控制器的输出引脚在发生输出短路事件时受到负瞬态的影响。8kW 热插拔参考设计使用三个 onsemi FSV20100V 肖特基二极管。

结语

与传统服务器相比, 新兴的 48V AI 服务器在峰值和稳定状态下都需要更大的功率。在使用热插拔控制器和并联 MOSFET 设计前端保护时, 高功耗以及快速和瞬态动态特性带来了挑战。面临的挑战包括如何针对实际故障快速关断并联 MOSFET, 同时避免计算负载产生高频瞬态的错误关断。本文中的建议解决方案消除了传统热插拔控制器的局限性, 并支持为 48V AI 服务器设计可靠的输入保护解决方案。

参考资料

1. Artem Rogachev, “[可靠的热插拔设计](#)”, 德州仪器 (TI) 应用报告, 文献编号 SLVA673A, 2014 年 4 月。
2. 德州仪器 (TI)。“[适用于 48V 人工智能服务器的 8kW 热插拔参考设计](#)。”德州仪器 (TI) 测试报告, 文献编号 PMP23496, 2024 年 8 月。
3. Hegarty, Timothy. 2011. “热插拔电路中的 TVS 钳位。” Power Electronics Technology, 2011 年 10 月。

相关网站

- [LM5066I](#)
- [PMP23496](#)

重要声明: 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

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、某特定用途方面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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司