

Application Brief

符合数据中心 mCRPS 标准的高速电流检测



简介

随着数据中心向高密度人工智能 (AI) 工作负载过渡，对功能、功率级别、效率和复杂传感的要求也不断提高。这一要求会继续按照最新的服务器电源要求规范进行推进，包括模块化硬件系统通用冗余电源 (M-CRPS) 和开放计算项目开放机架 v3 (OCP ORv3)。

为了扩展服务器电源单元 (PSU) 功能，新的碳化硅 (SiC) 或氮化镓 (GaN) 开关位于服务器 PSU 内的多个位置，包括 DC-DC 功率级内隔离变压器的初级侧和次级侧。图 1 演示了主要系统功能的简化信号链方框图，包括在典型 12V 输出 PSU 中进行的电压转换。

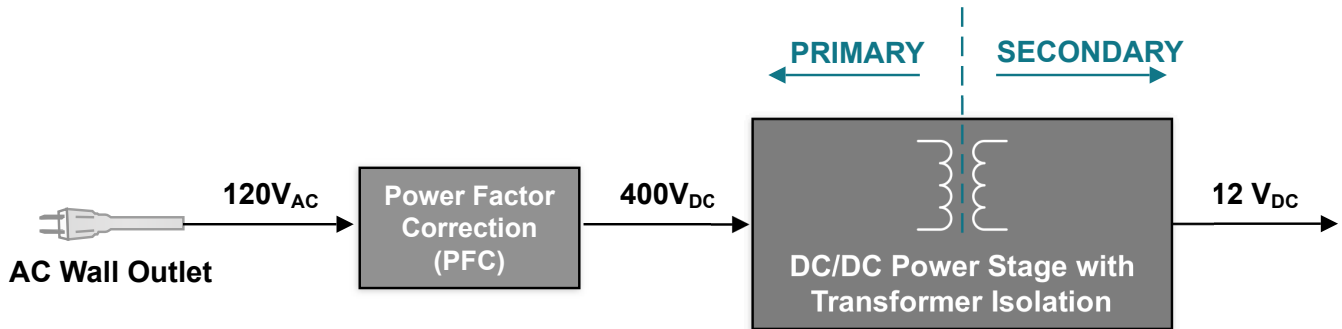


图 1. 服务器 PSU 方框图

SiC 或 GaN 开关容易受到影响且对过流事件很敏感。如果在超快响应时间内无法识别是否发生了短路，并随后通过降低流过电源开关的电流来解决，则存在损坏开关和周围电路的风险。典型 PSU 的开关频率为数十万赫兹 (100-500kHz)，因此总周期为 $10 - 2 \mu s$ 。因此，必须在该周期的一小部分内检测到过流事件并向下游发出信号，以便有足够的时间采取操作，从而产生 $1 \mu s$ 至 $2 \mu s$ 的响应时间。这种安全功能被称为过流保护 (OCP)，可发生在功率因数校正 (PFC) 级和系统输出轨中最常见的敏感 SiC 或 GaN 开关所在的位置。

Open Compute Project 标准对过流保护有哪些规定？

根据 Open Compute Project m-CPRS 标准 1.05 版第 9.5 节的规定，电源模块应集成一路输出电流监测引脚 (I_{MON})，该引脚作为主 12V 输出的电流镜像信号，系统中来自其他电源的 I_{MON} 信号可并联在一起，为系统提供一种测量所有电源总输出电流的机制(9)。表 1 列出了标准要求的后续 I_{MON} 信号特性。

表 1. Open Compute 标准中的 I_{MON} 信号特性⁹

信号类型	电流源
灵敏度	0mA 至 2mA (表示额定电流的 0% 至 200%)
最小带宽	40kHz
信号延迟	$\leq 20 \mu s$ (在主输出端未连接外部电容的情况下，使用 5% 至 105% 的负载阶跃和 $8A/\mu s$ 的 di/dt 进行测试)

通常通过直接分流电阻电路从主系统检测直流电流值，然后将其拆分以实现各种功能，并镜像用于最终的 I_{MON} 输出，如图 2 中的系统方框图所示。

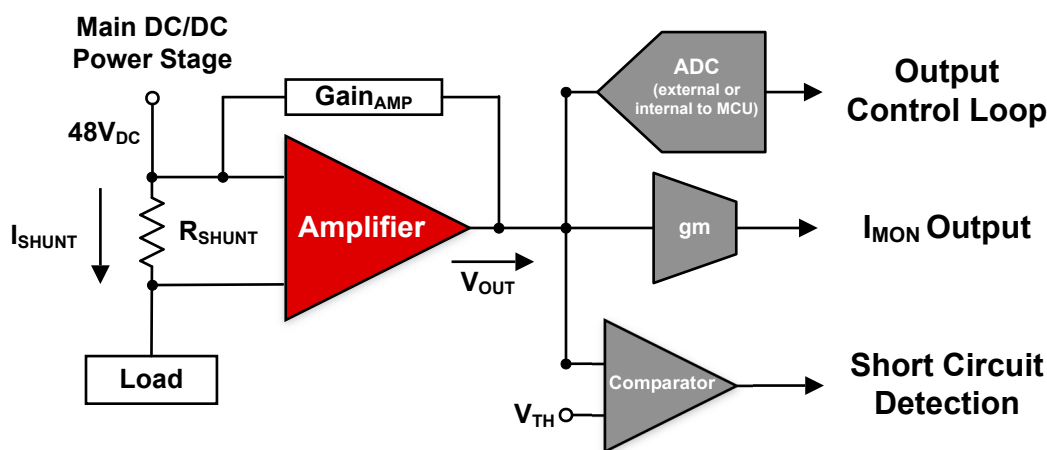


图 2. I_{MON} 检测方框图

要将此标准转换为电流检测电路的元件选择，需要进行多种计算。以采用 48V 电压轨的 3.5kW AI 服务器为例，100% 负载下的典型输出电流约为 73A (方程式 1)。因此，在 200% 负载下，输出约为 146A，如方程式 2 所示。

$$I_{OUT@100\%load} = \frac{P}{V} = \frac{3500W}{48V} = 73A \quad (1)$$

$$I_{OUT@200\%load} = 2 \times 73A = 146A \quad (2)$$

假设采用 $0.5m\Omega$ 分流电阻器，则使用作为电流流动函数的欧姆定律来计算分流电阻器上的压降。

$$V_{SENSE@100\%} = I_{OUT@100\%} \times R_{SHUNT} = 73A \times 0.0005\Omega = 36.5mV \quad (3)$$

$$V_{SENSE@200\%} = I_{OUT@200\%} \times R_{SHUNT} = 146A \times 0.0005\Omega = 73mV \quad (4)$$

一旦确定分流电阻器上的压降，就可以通过近似所需的峰值间输出电压来确定放大感测到的电压变化所需的增益 (与电流成正比)。该电压随后可用于后续分析，例如过流检测情况下的比较器或用于输出控制环路的模数转换器 (ADC)。可用电压范围示例为 0.5V 至 2V。增益为 $25V/V$ 时，最小值和最大值的相应输出电压都处于目标范围内，如下所示。

$$V_{out@100\%} = Gain_{amplifier} \times V_{sense@100\%} = 25V/V \times 36.5mV = 0.913V \quad (5)$$

$$V_{out@200\%} = Gain_{amplifier} \times V_{sense@200\%} = 25V/V \times 73mV = 1.83V \quad (6)$$

信号链计算

使用相同的放大器和分流电阻器，检测到的电流可用于过流保护信号 (OCP)。图 2 演示了一个示例信号链，说明如何使用高速比较器在 12V 或 48V 电压轨上进行高侧电流检测以实现过流保护，如上所述。使用计算得出的系统参数，可以相应地计算所需的放大器带宽。

$$T_{OCP} = T_{Amplifier} + T_{Comparator} \leq 1\mu s \quad (7)$$

$$T_{Amplifier} \leq 0.3\mu s, \text{ to leave sufficient time delay for other analysis components} \quad (8)$$

$$Bandwidth = \frac{0.35}{T_{Amplifier}} = \frac{0.35}{0.3\mu s} \cong 1MHz \quad (9)$$

$$Gain \text{ Bandwidth Product}(GBW) = Gain \times BW = 25V/V \times 1MHz = 25MHz \quad (10)$$

在此系统计算中，25MHz GBW 放大器是具有足够容差以实现整体系统性能的最小速度器件。可以使用 20 μs 的最大信号延迟来完成类似计算，以便使用 I_{MON} 实现。

$$T_{I_{MON}} = T_{Amplifier} + T_{gm} + T_{other} \leq 20\mu s \quad (11)$$

$$T_{Amplifier} \leq 0.3\mu s, \text{ assuming using the same device from the OCP calculation} \quad (12)$$

$$Bandwidth = \frac{0.35}{T_{Amplifier}} = \frac{0.35}{0.3\mu s} \cong 1MHz \quad (13)$$

$$Gain \text{ Bandwidth Product}(GBW) = Gain \times BW = 25V/V \times 1MHz = 25MHz \quad (14)$$

表 2. 示例设计摘要

参数	值
服务器额定功率	3.5kW
输出电压	48V
分流电阻	0.5mΩ
放大器增益	25V/V
要求的最小放大器增益带宽积	25MHz

放大器选择

如方程式 10 和方程式 14 所示，选择具有宽增益带宽积的放大器对于实现验证过流保护关闭所需的总体系统响应时间以及进一步的系统级监控和反馈非常重要。

除了带宽要求之外，放大器的精密性能对于总体电流检测性能也很重要。失调电压和输入偏置电流越低，检测测量中的误差就越低。实现此性能的一种常用架构是零漂移¹放大器，例如 OPA488。零漂移¹放大器利用内部开关架构，无需任何额外的修整或后处理校准，即可显著降低失调电压和失调电压漂移性能。

或者，OPA863A 或 OPA620 等器件也可以实现高速和高精度性能之间的平衡，这些器件采用 TI 的 e-Trim™ 技术进行封装后应力修整。

总结

德州仪器 (TI) 的高速、高精度放大器产品系列可助力未来的服务器 PSU 电流检测设计，从而满足 AI 数据中心不断增长的需求。

表 3. 推荐的放大器

器件型号	架构	GBW (MHz)	最大电源电压 (V)	输入偏置电流 (pA, 最大值)	失调电压 (V _{OS}) (mV, 最大值)	CMRR (典型值, dB)
OPA488	零漂移 ¹	14	48	0.35	0.0075	150
OPA620	e-Trim™ ²	100	5.5	50	0.3	96

表 3. 推荐的放大器 (续)

器件型号	架构	GBW (MHz)	最大电源电压 (V)	输入偏置电流 (pA, 最大值)	失调电压 (V_{OS}) (mV, 最大值)	CMRR (典型值, dB)
OPA863A	e-Trim™ ²	50	12.6	730	0.095	120
OPA810	FET 输入 ⁸	70	27	0.02	0.5	100

表 4. 推荐的比较器

器件型号	输出类型	传播延迟 (ns)	最大电源电压 (V)	输入共模 (V_{CM})	失调电压 (V_{OS}) (mV, 最大值)	功耗 (I_Q) (μA)
TLV3201	推挽	40	5.5	轨到轨	1	40
TLV7021	开漏	260	5.5	轨到轨	0.5	5
TLV1805	推挽	250	40	轨到轨	4.5	150

表 5. 推荐的模数转换器

器件型号	架构	分辨率 (位)	最大采样率 (kSPS)	接口类型	SNR (dB)
ADS7042	SAR	12	1000	SPI	70
ADS127L11	$\Delta \Sigma$	24	1000	SPI	110
ADS7138	SAR	12	140	I2C	73

参考资料

- 德州仪器 (TI), [零漂移放大器：特性和优势](#) 应用简报。
- 德州仪器 (TI), [失调电压校正方法：激光修整、e-Trim™ 和斩波器](#) 应用简报。
- 德州仪器 (TI), [参考设计：高速电流分流监控器](#) 产品页面。
- 德州仪器 (TI), [使用 C2000™ 实时微控制器的 1kW、12V HHC LLC 参考设计](#) 产品页面。
- 德州仪器 (TI), [参考设计：稳定时间小于 1μs 的单分流、双分流和三分流 FOC 电流检测三相逆变器](#) 产品页面。
- 德州仪器 (TI), [使用 SiC 或 GaN 开关所需的低侧电流分流测量方法快速检测过流故障](#) 应用简报。
- 德州仪器 (TI), [简化高压系统中的电源转换](#) 营销白皮书。
- 德州仪器 (TI), [在高速应用中使用 JFET 输入放大器有哪些优势？](#) 技术文章。
- Open Compute Project, [Server/MHS](#) 网页。

商标

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、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