Application Brief

使用 TI 负载驱动器进行 48V 至 12V/5V 短路测试

Miguel Robertson

简介

在同时采用 12V 和 48V 供电的汽车混合电源系统中，电源轨之间容易发生短路事件。图 1 展示了车辆 ECU 中发生此类事件时的情况。在发生此类事件时，48V 电源轨会向 12V 电源轨注入大量电流。这会导致几个问题：

1. 48V 电源轨的电流消耗大幅增加
2. 12V 电源轨的电压升高
3. 12V/5V 负载驱动器承受反向能量冲击

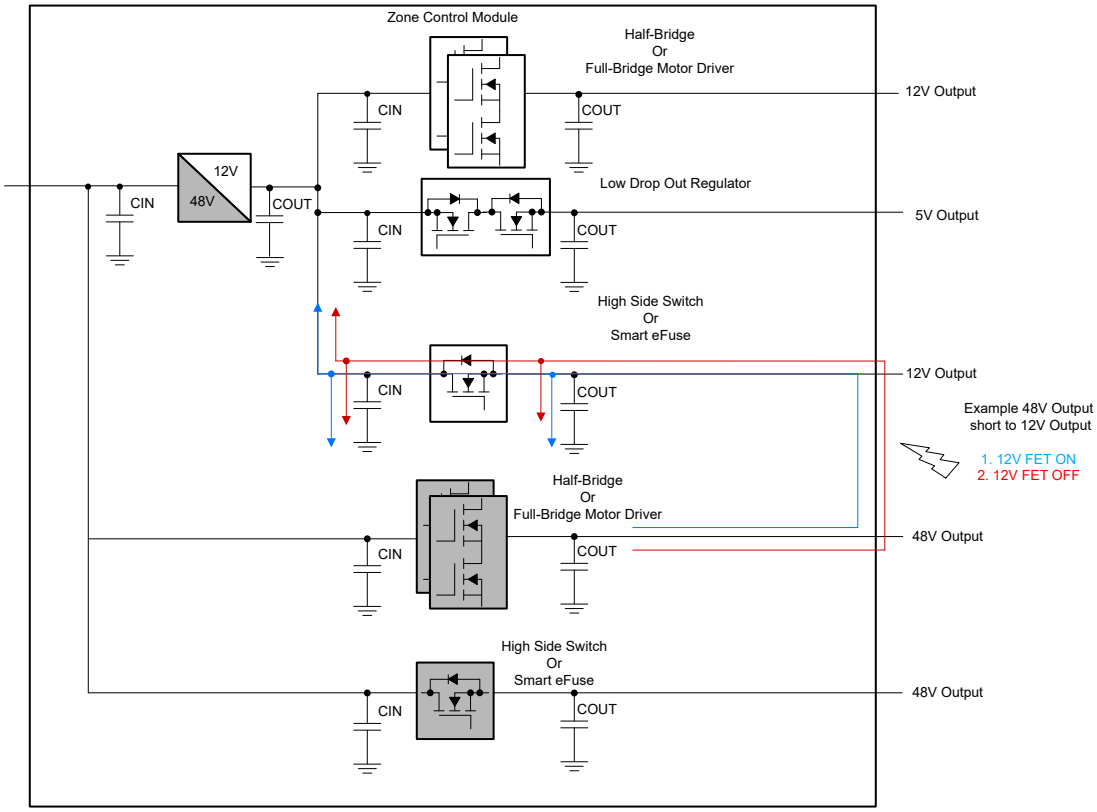


图 1. 48V 至 12V 短路示意图

在区域控制模块 (ZCM) 应用中，许多器件都容易受到此类短路事件的影响。受影响的器件可分为两类：*输入器件*和*输出器件*。本文重点讨论以下输出（板外负载驱动器）器件类型：

1. 智能电子保险丝
2. 高侧开关 (HSS)
3. 电机驱动器 (MD)
4. 电压跟踪型低压差稳压器 (LDO)

English Document: SBAA825
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

48V 负载驱动器的关断行为

发生任何 48V 至 12V/5V 短路时，低电压器件能否保持安全，取决于 48V 负载驱动器能否及时切断电源。因此，必须考虑 48V 负载驱动器的关断行为，因为这会显著影响下游 12V 和 5V 器件能否在短路事件中保持正常工作而不受损坏。过流保护行为主要有两种：

1. 立即关断：达到短路电流阈值时，FET 立即关断。
2. 电流调节：器件对电流进行调节，仅在达到热关断 (TSD) 条件时才会关断 FET。

智能电子保险丝

选用 TPS2HCS08-Q1 作为 12V 智能电子保险丝被测器件 (DUT)。测试中分别采用 48V 高侧开关 (TPS1HTC30-Q1) 和 48V 电机驱动器 (DRV8163-Q1) 作为 48V 负载驱动器，因为二者不同的响应特性会影响下游 12V 器件能否在短路事件中保持正常工作。

图 2 展示了第一种测试配置，其中采用 TPS1HTC30-Q1 作为 48V 高侧开关，采用 TPS2HCS08-Q1 作为智能电子保险丝。

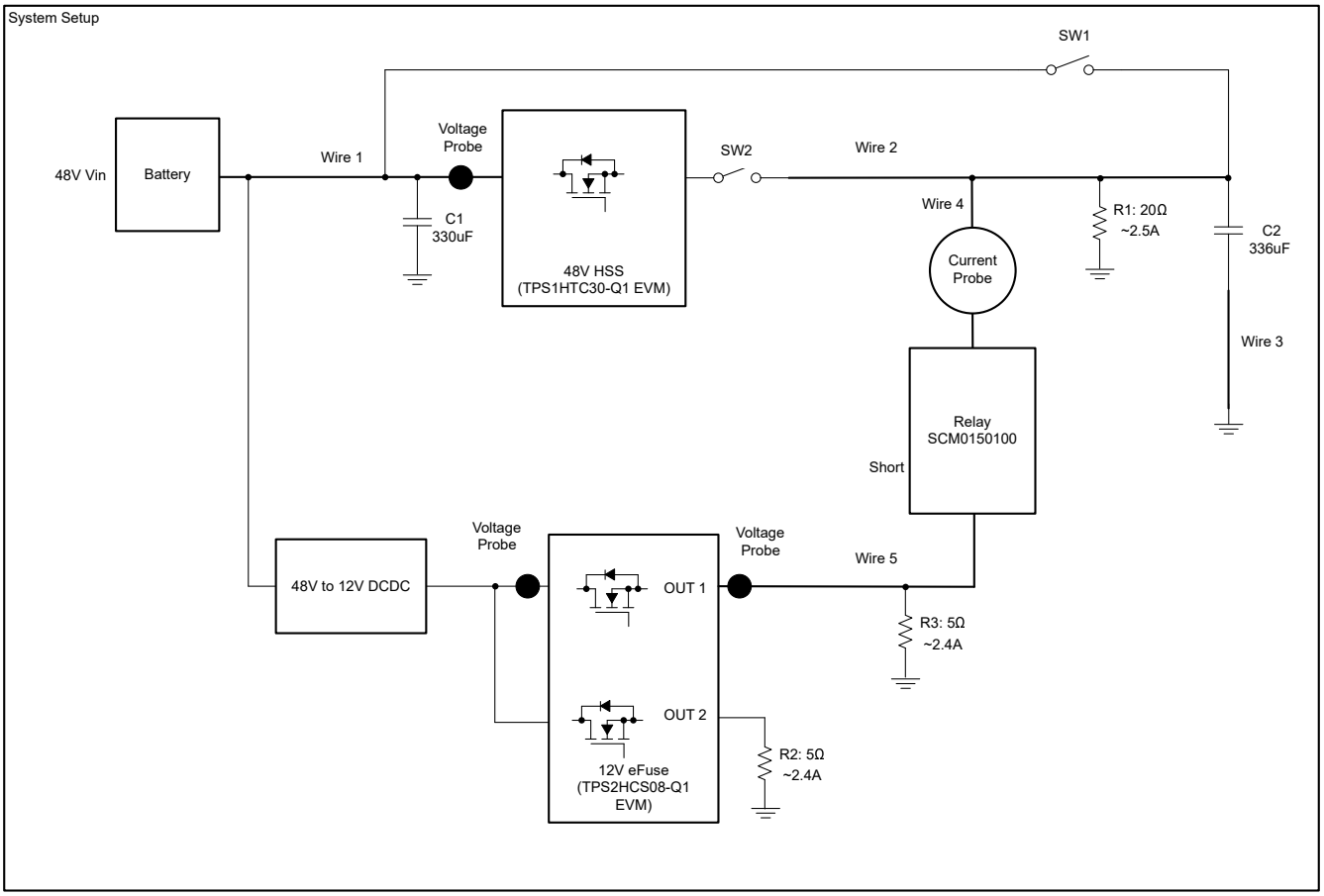


图 2. 使用 TPS2HCS08-Q1 和 TPS1HTC30-Q1 的测试配置

具体测试步骤请参见 测试流程和配置参数。

图 3 和 图 4 展示了测试结果。

English Document: SBAA825
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

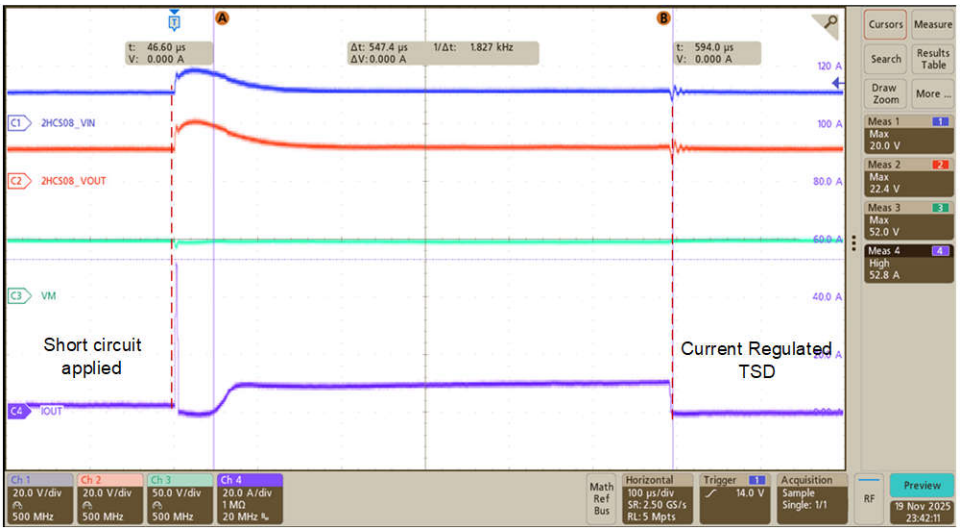


图 3. TPS2HCS08-Q1 的 FET 导通时与 TPS1HTC30-Q1 发生短路

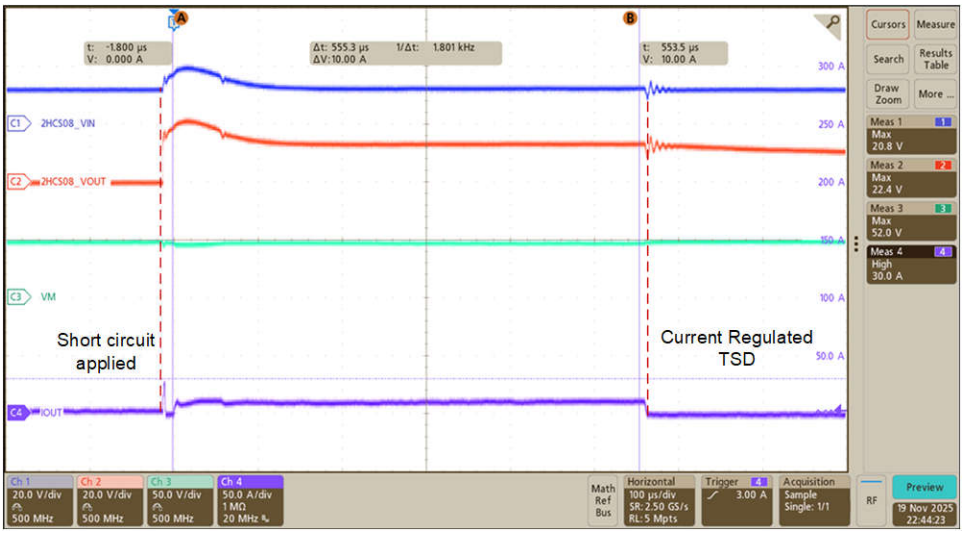


图 4. TPS2HCS08-Q1 的 FET 关断时与 TPS1HTC30-Q1 发生短路

图 3 和 图 4 展示了将 12V 电子保险丝的输出端与 48V 高侧开关的输出端短接时的测试结果，其中 12V 电子保险丝的 FET 分别处于初始导通状态 (图 3) 和初始关断状态 (图 4)。两组测试结果均显示，12V 电子保险丝通道的输入端和输出端电压均有所升高，而 48V 输入电源轨保持稳定。短路电流与 TPS1HTC30-Q1 数据手册中所述的预期行为一致。多次重复测试均未发现器件故障。

图 5 展示了第二种测试配置，其中采用 DRV8163-Q1 作为 48V 高侧开关，采用 TPS2HCS08-Q1 作为智能电子保险丝。

English Document: SBAA825
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

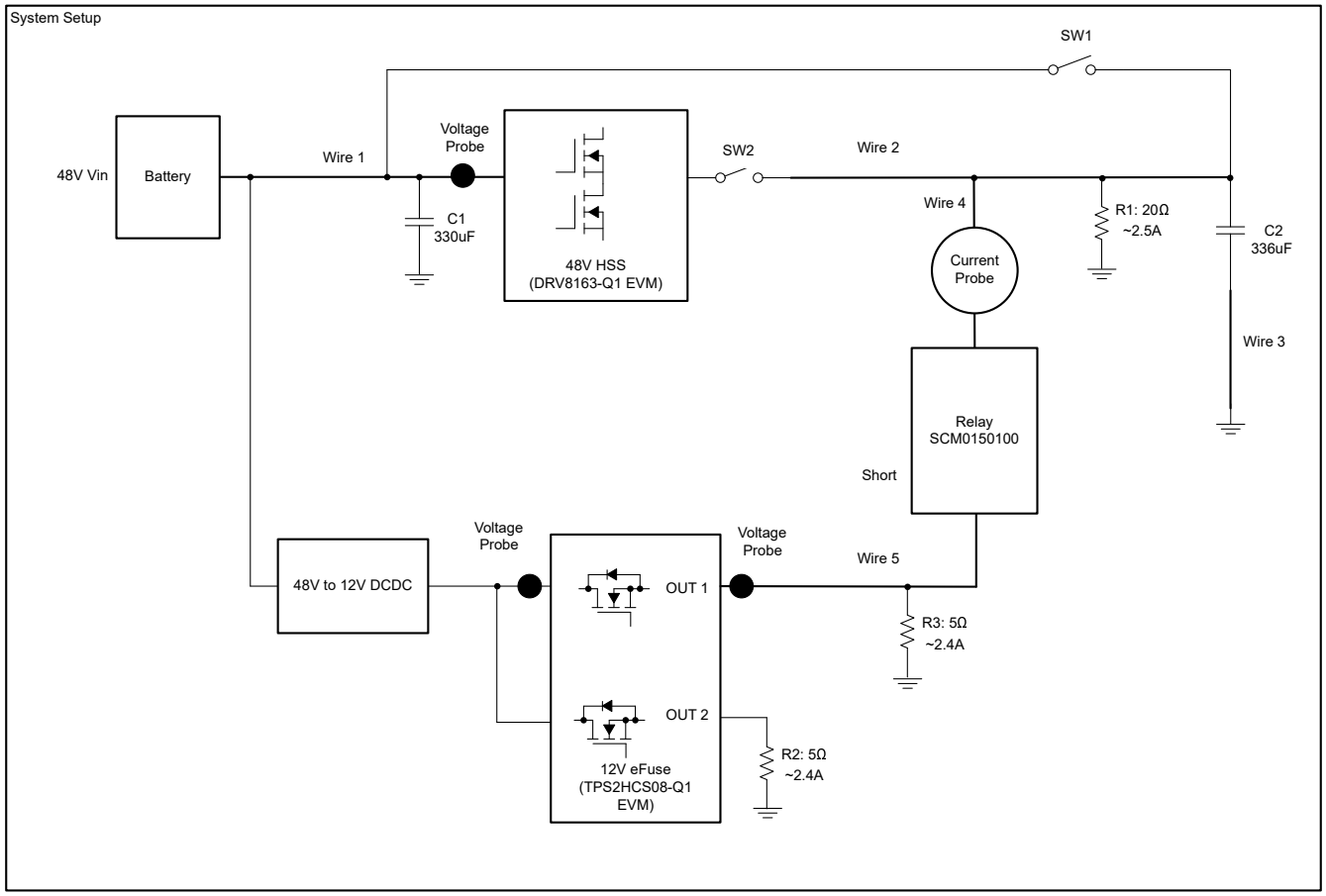


图 5. 使用 TPS2HCS08-Q1 和 DRV8163-Q1 的测试配置

具体测试步骤请参见 测试流程和配置参数。

图 6 和 图 7 展示了测试结果。

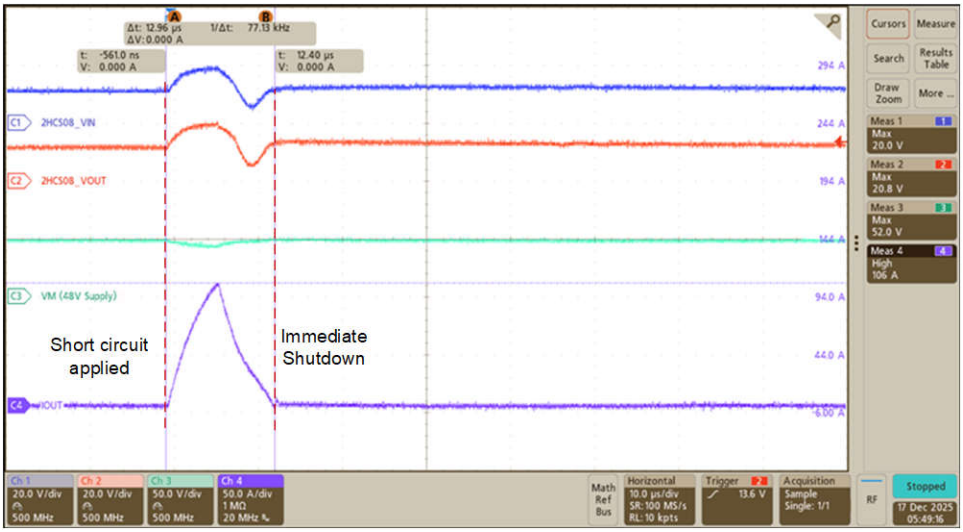


图 6. TPS2HCS08-Q1 的 FET 导通时与 DRV8163-Q1 发生短路

English Document: SBAA825
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

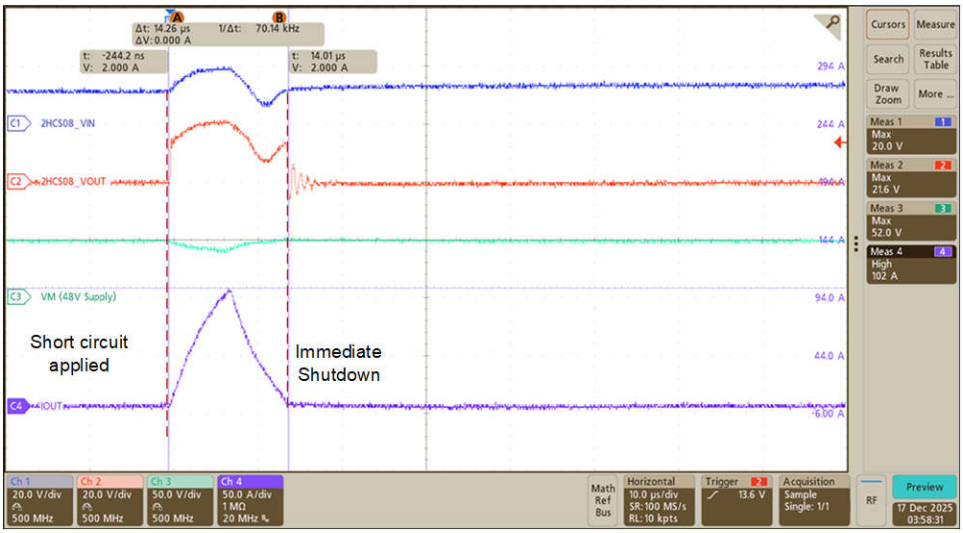


图 7. TPS2HCS08-Q1 的 FET 关断时与 DRV8163-Q1 发生短路

图 6 和 图 7 展示了将 12V 电子保险丝的输出端与 48V 电机驱动器的输出端短接时的测试结果，其中 12V 电子保险丝的 FET 分别处于初始导通状态 (图 6) 和初始关断状态 (图 7)。两组测试结果均显示，12V 电子保险丝通道的输入端和输出端电压均有所升高，而 48V 电池电源轨基本保持稳定。短路电流与 DRV8163-Q1 在所配置短路电流阈值下的预期行为一致。多次重复测试均未发现器件故障。

智能电子保险丝测试总结：

上述所有测试均未发现器件损坏。根据测试结果，12V 智能电子保险丝无需增加额外的保护电路。

总的来说，与高侧开关相比，导线电感对电机驱动器（或具有短路立即关断功能的 IC）的影响可能更大。根据公式 V = Ldi/dt，在电压 V 保持恒定的情况下，L 增大，di/dt 就会降低。因此，电缆电感可能会使此类器件的短路电流曲线下方面积*增大*，从而影响 TPS2HCS08 两端承受的能量。对于高侧开关而言，导线电感似乎没有那么关键，因为此类器件会在达到热关断 (TSD) 条件后关断。虽然不同高侧开关器件承受的能量可能有所不同，但其持续承受该能量的时间也会相应不同。归根结底，对于高侧开关而言，真正需要关注的并非电感，而是电容。电容决定了有多少能量会释放到该器件上，进而决定器件能够承受这种能量冲击的时间。

高侧开关 (HSS)

选用 TPS4HC120-Q1 作为 12V 被测器件。具体测试步骤请参见 测试流程和配置参数。

图 8 展示了第一种测试配置，其中采用 TPS1HTC30-Q1 作为 48V 高侧开关和 TPS4HC120-Q1 高侧开关。

English Document: SBAA825
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

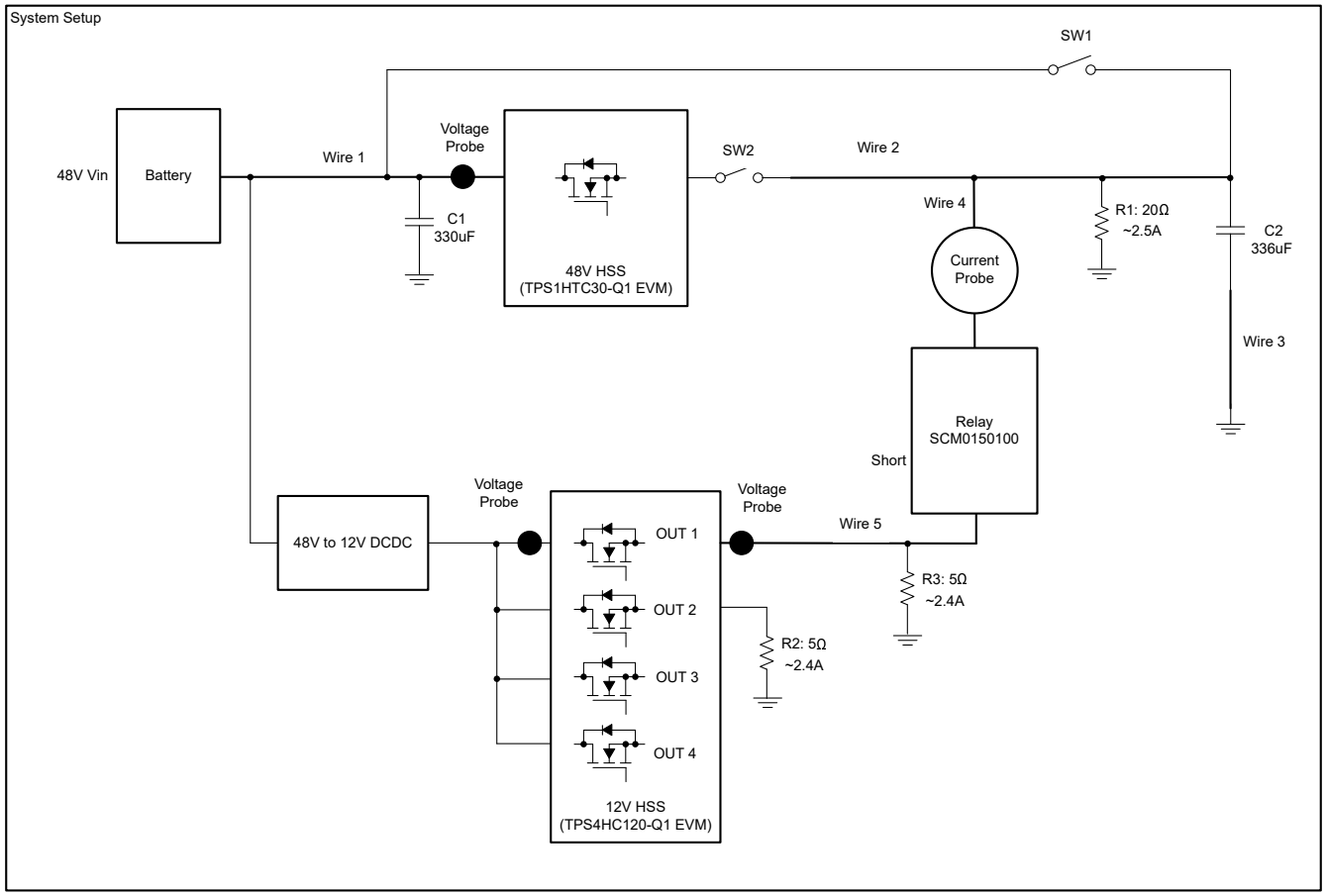


图 8. 使用 TPS4HC120-Q1 和 TPS1HTC30-Q1 的测试配置

图 9 和 图 10 展示了测试结果。

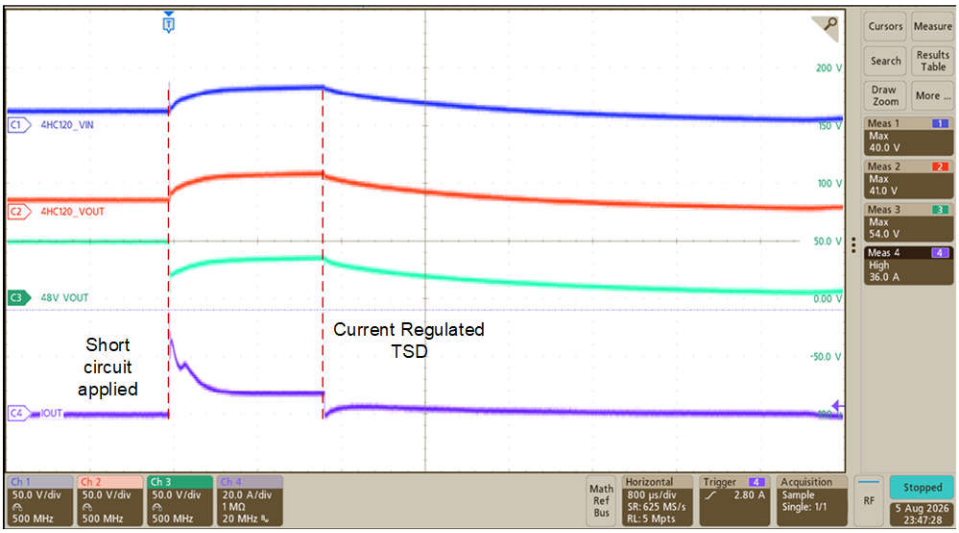


图 9. TPS4HC120-Q1 的 FET 导通时与 TPS1HTC30-Q1 发生短路 (8A CL)

English Document: SBAA825
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated



图 10. TPS4HC120-Q1 的 FET 导通时与 TPS1HTC30-Q1 发生短路 (16A CL)

图 11 展示了第二种测试配置，其中采用 DRV8163-Q1 作为 48V 高侧开关和 TPS4HC120-Q1 高侧开关。

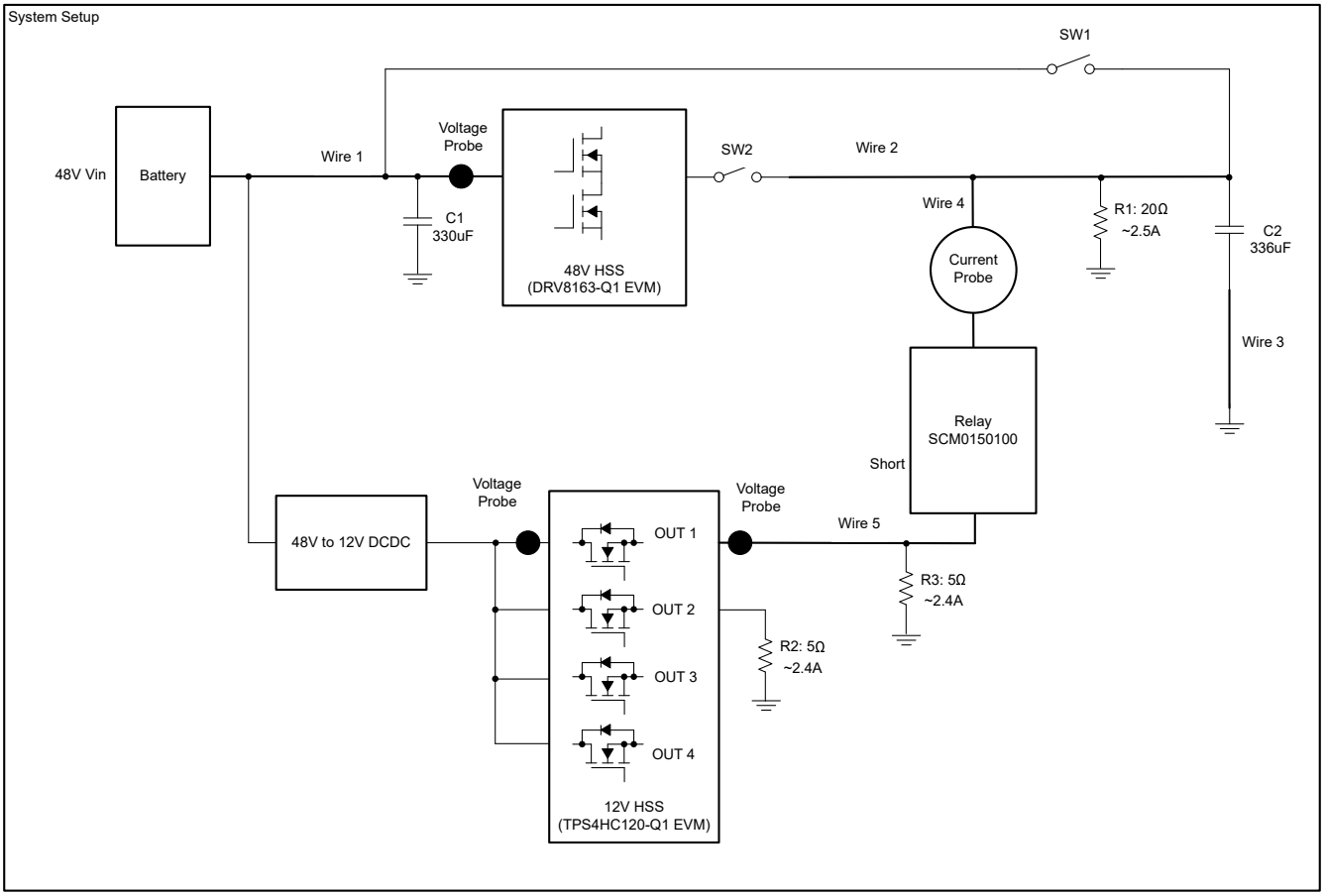


图 11. 使用 TPS4HC120-Q1 和 DRV8163-Q1 的测试配置

图 12 展示了测试结果。

English Document: SBAA825
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

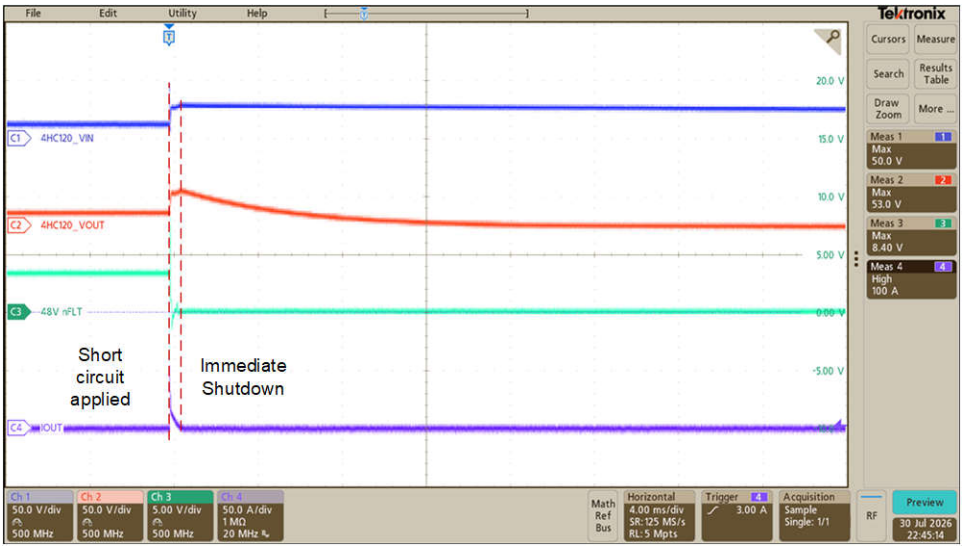


图 12. TPS4HC120-Q1 的 FET 与 DRV8163-Q1 发生短路

高侧开关测试总结

当与 DRV8163-Q1 发生短路时，其短路保护 (SCP) 功能会关断输出，从而保护下游的 TPS4HC120-Q1。而当与 TPS1HTC30-Q1 发生短路时，其限流响应无法确保在 TPS4HC120-Q1 发生损坏之前切断电流。

建议的保护措施：在高侧开关的输入端串联一个阻断二极管，以防止反向电流损坏器件。

电机驱动器 (MD)

选用 DRV8245-Q1 作为 12V 被测器件。具体测试步骤请参见 测试流程和配置参数。

图 13 展示了第一种测试配置的详细信息，其中采用 TPS1HTC30-Q1 作为 48V 高侧开关和 DRV8245-Q1 电机驱动器。

English Document: SBAA825
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

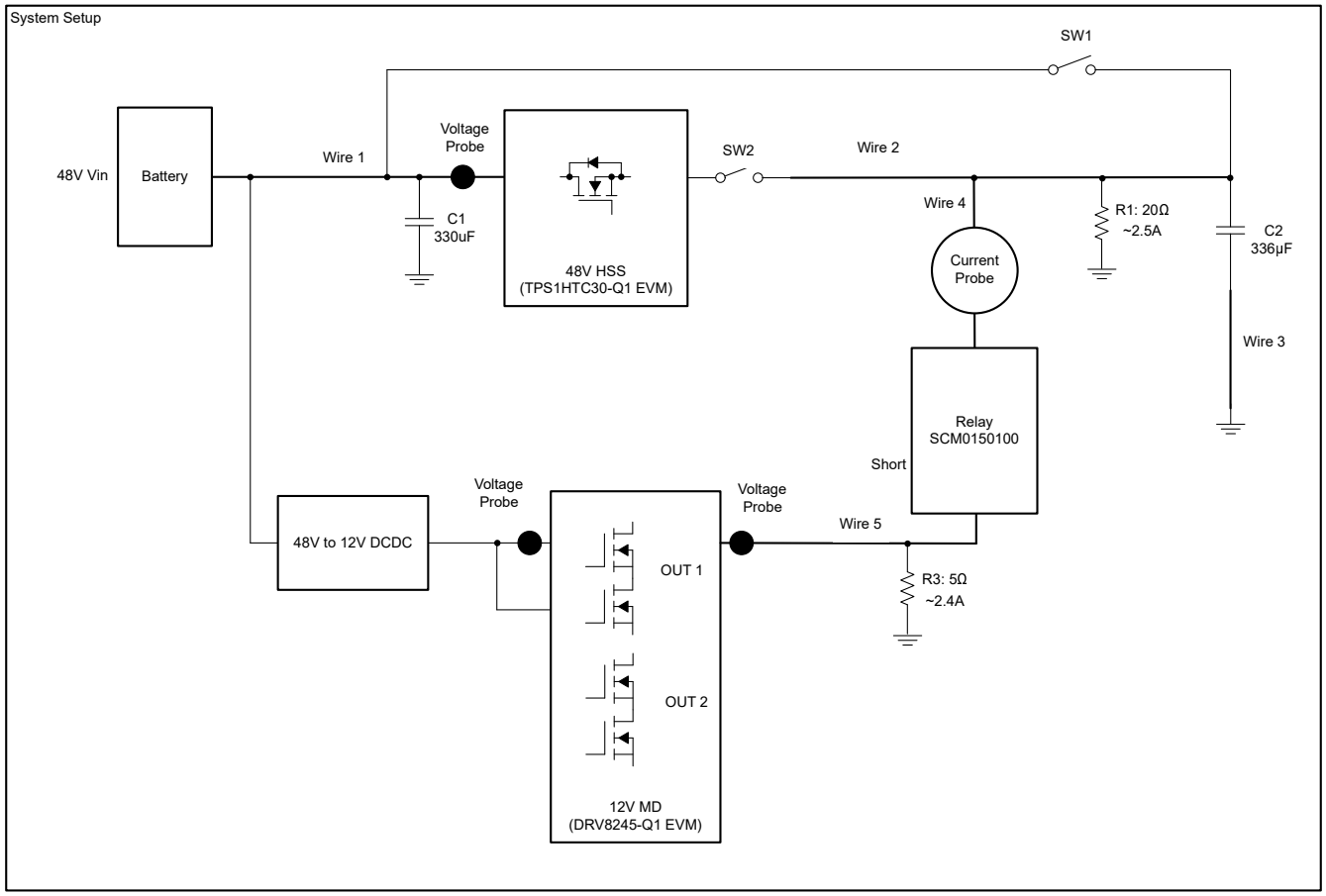


图 13. 使用 DRV8245-Q1 和 TPS1HTC30-Q1 的测试配置

图 14 和 图 15 展示了测试结果。

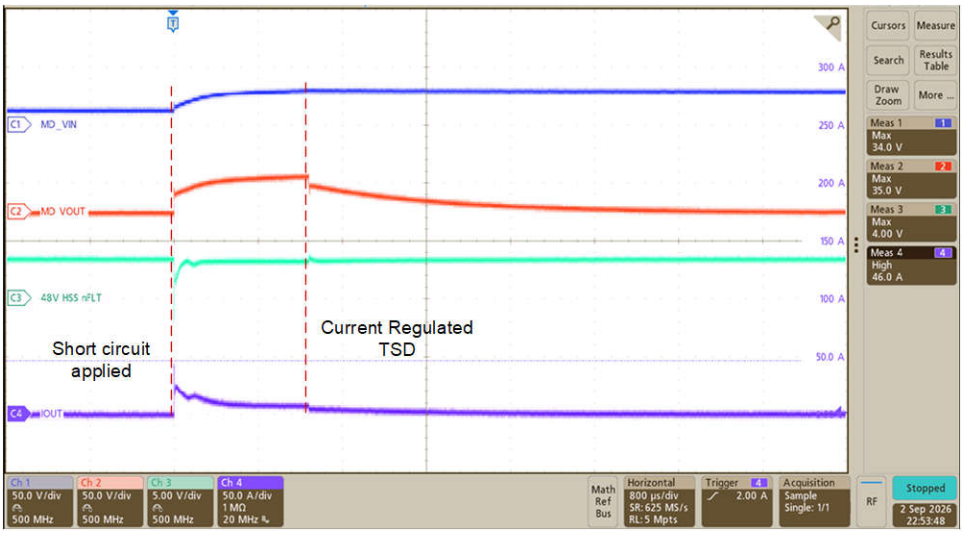


图 14. DRV8245-Q1 的 FET 与 TPS1HTC30-Q1 发生短路 (8A CL)

English Document: SBAA825
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

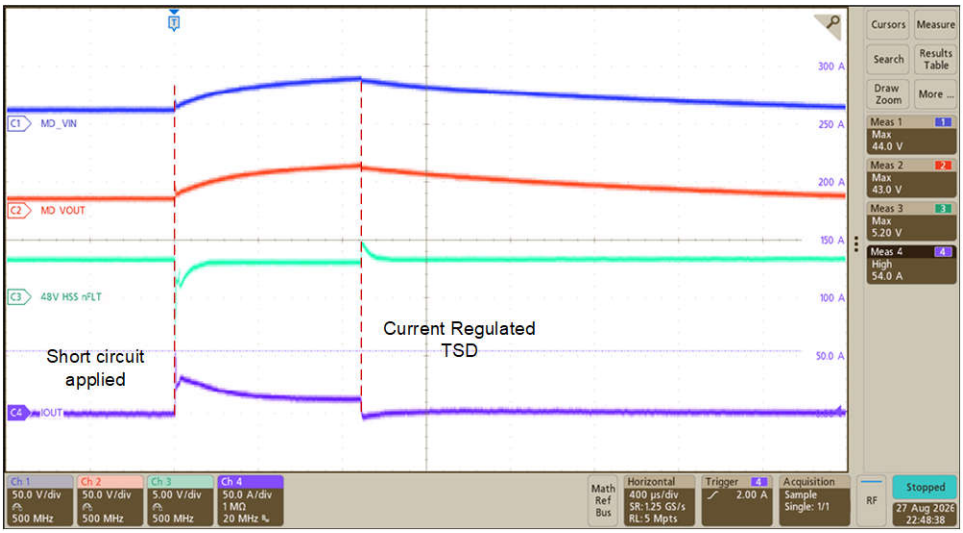


图 15. DRV8245-Q1 的 FET 与 TPS1HTC30-Q1 发生短路 (16A CL)

图 16 展示了第二种测试配置，其中采用 DRV8163-Q1 作为 48V 高侧开关和 DRV8245-Q1 电机驱动器。

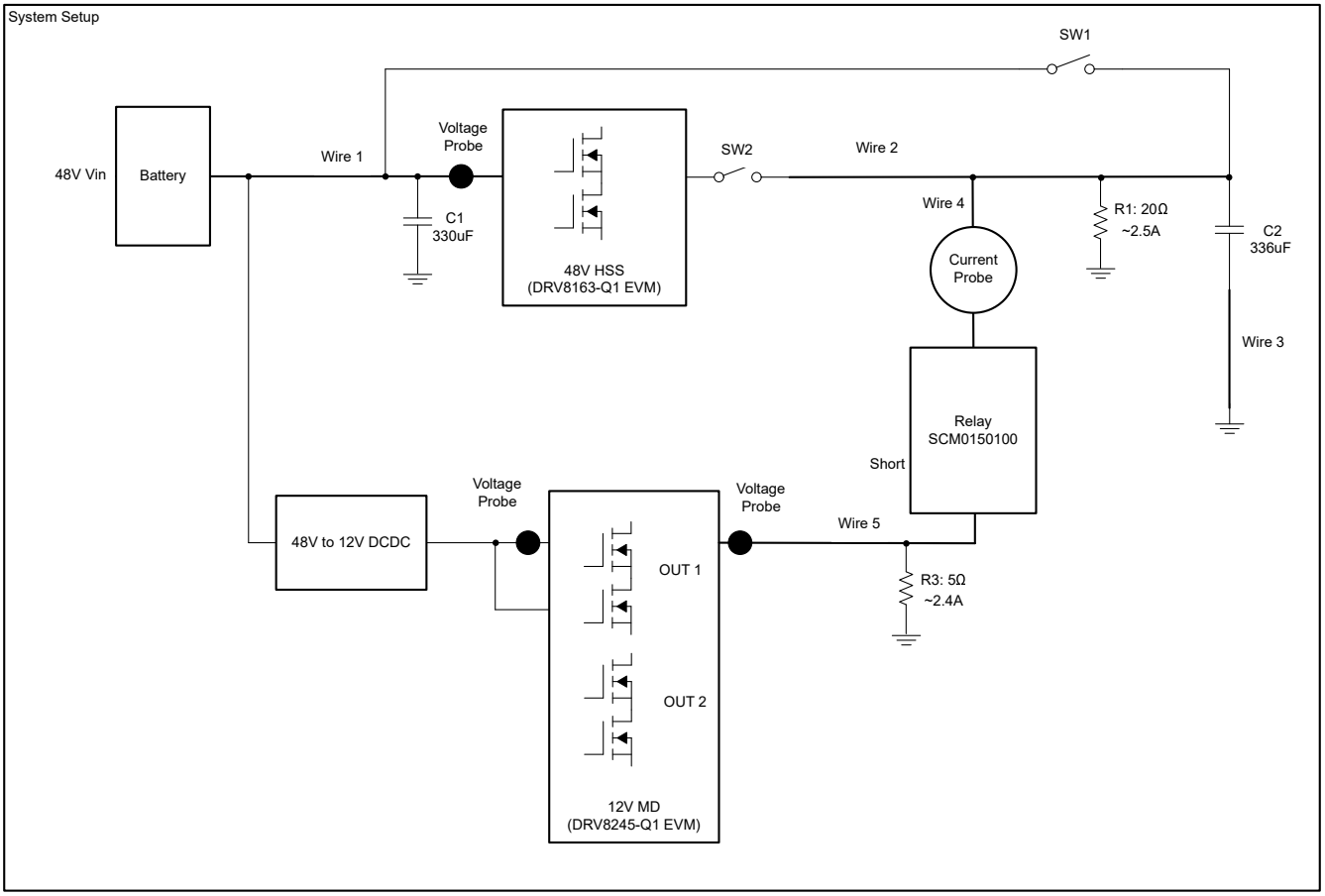


图 16. 使用 DRV8245-Q1 和 DRV8163-Q1 的测试配置

具体测试步骤请参见 测试流程和配置参数。

图 17 展示了测试结果。

English Document: SBAA825
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

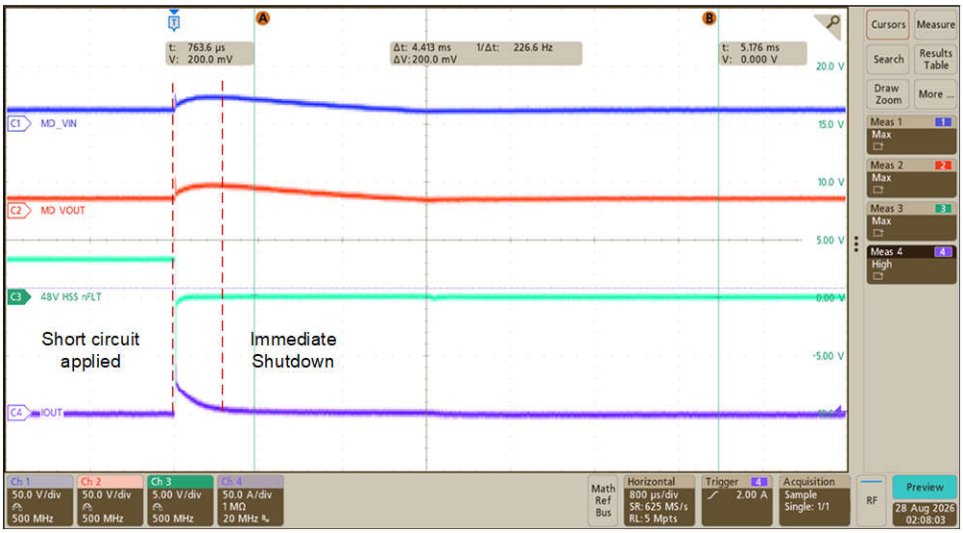


图 17. DRV8245-Q1 的 FET 导通时与 DRV8163-Q1 发生短路

电机驱动器测试总结：

当与 TPS1HTC30-Q1 发生短路时，尚未验证该器件能否及时关断，从而防止反向电流流入 DRV8245-Q1。当与 DRV8163-Q1 发生短路时，尽管 DRV8163-Q1 会通过 SCP 功能关断，但其关断动作发生时，DRV8245-Q1 两端的电压已经超过了其绝对最大额定值。

建议的保护措施

- 在 12V 电机驱动器的输入端串联阻断二极管，以防止反向电流损坏器件
- 在 12V 电机驱动器的输出端增加 TVS 二极管，以钳位输出电压，确保其不超过器件的绝对最大额定值

电压跟踪型 LDO

跟踪型 LDO 通过较长的线束向板外负载和传感器供电，因此容易受到输出端与 48V 电池短路的影响，即使其本身由 12V 电源供电也是如此。选用 TPS7B4255-Q1 作为被测器件。具体测试步骤请参见测试流程部分。

图 18 展示了第一种测试配置，其中采用 TPS1HTC30-Q1 作为 48V 高侧开关和 TPS7B4255-Q1 LDO。

English Document: SBAA825
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

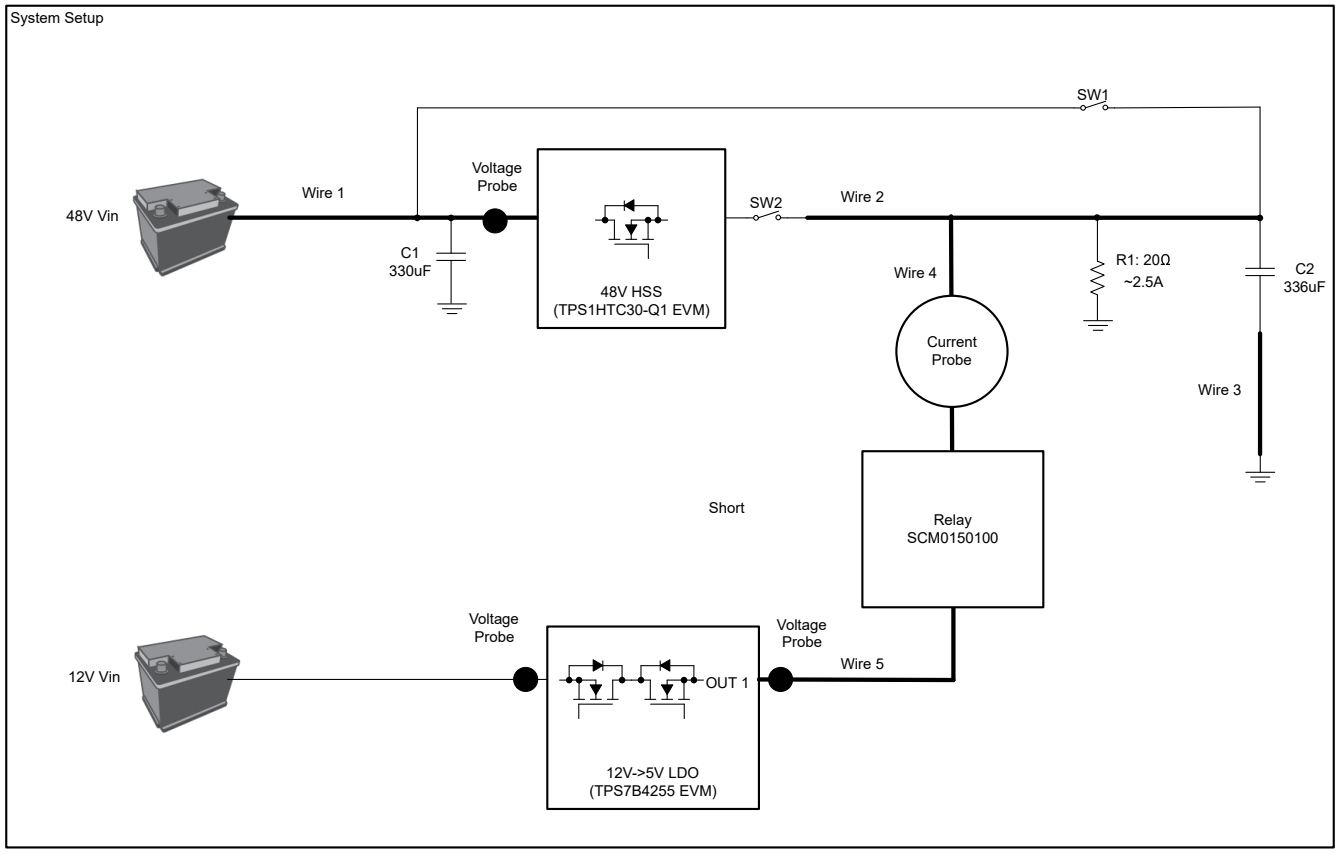


图 18. 使用 TPS7B4255-Q1 和 TPS1HTC30-Q1 的测试配置

图 19 展示了测试结果。

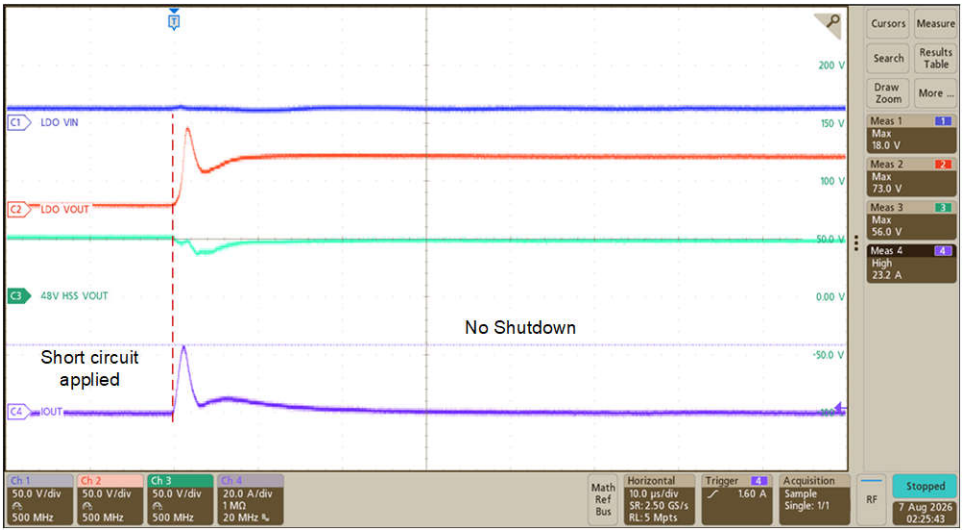


图 19. TPS7B4255-Q1 与 TPS1HTC30-Q1 发生短路 (8A CL)

图 20 展示了第二种测试配置，其中采用 DRV8163-Q1 作为 48V 高侧开关和 TPS7B4255-Q1 LDO。

English Document: SBAA825
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

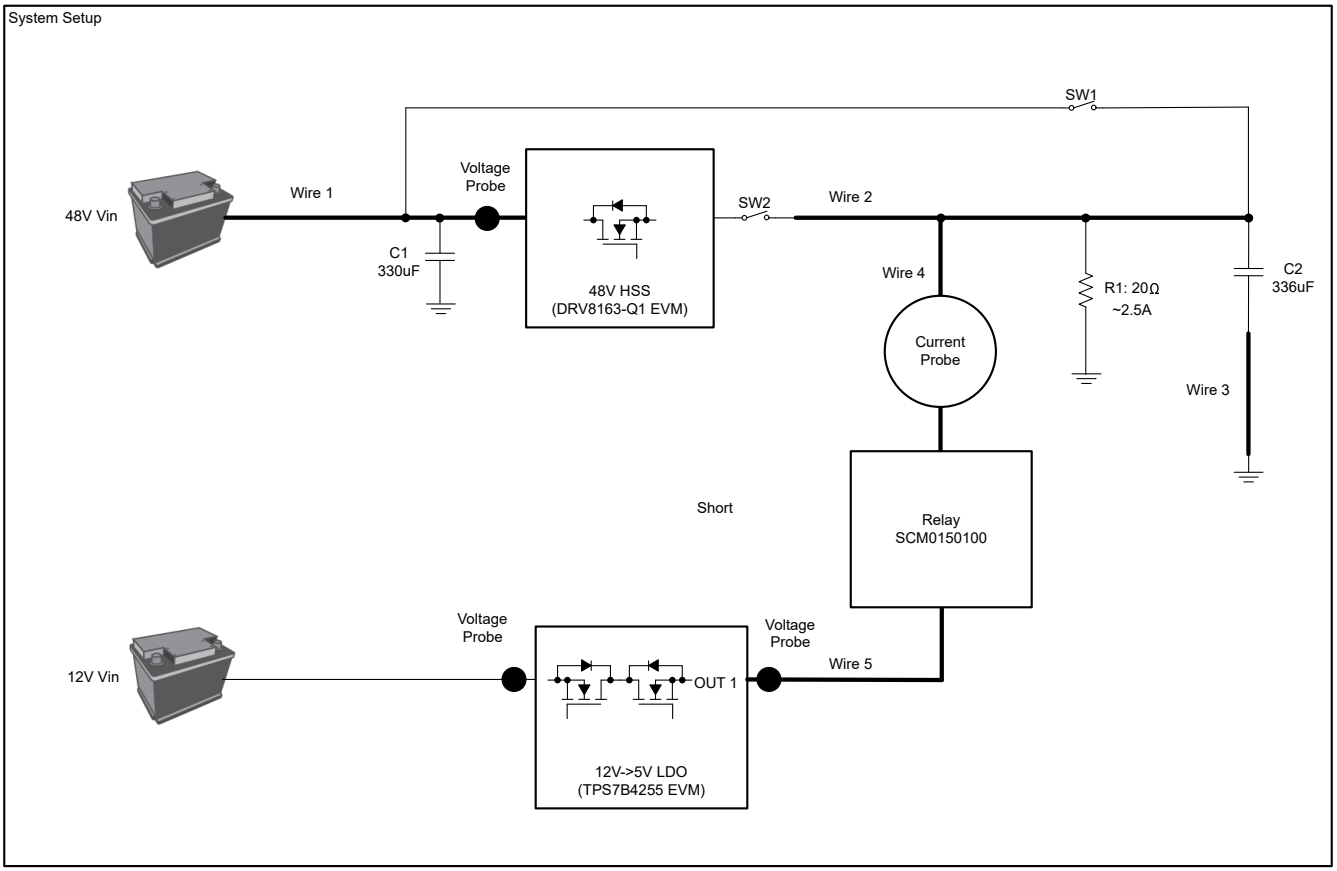


图 20. 使用 TPS7B4255-Q1 和 DRV8163-Q1 的测试配置

图 21 和 图 22 展示了测试结果。

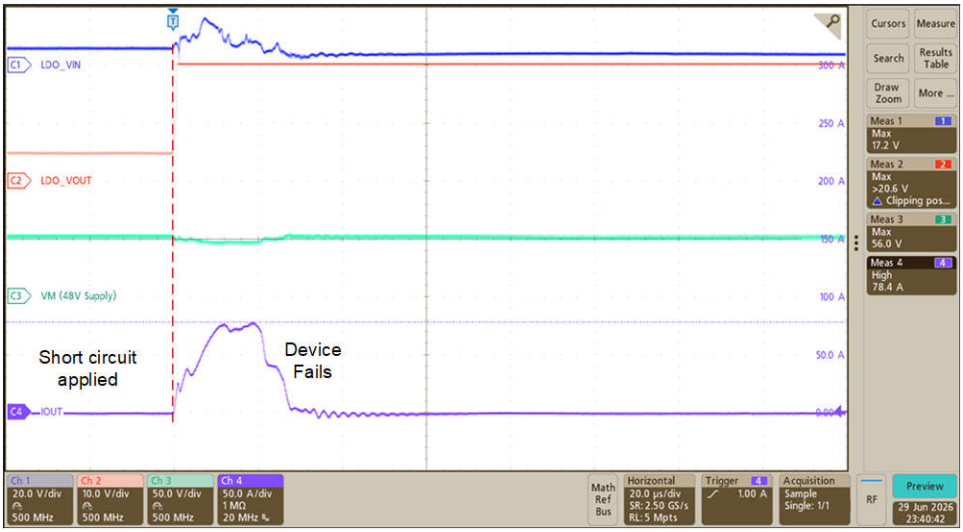


图 21. TPS7B4255-Q1 与 DRV8163-Q1 发生短路（额外 C_{OUT} = 0uF）

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

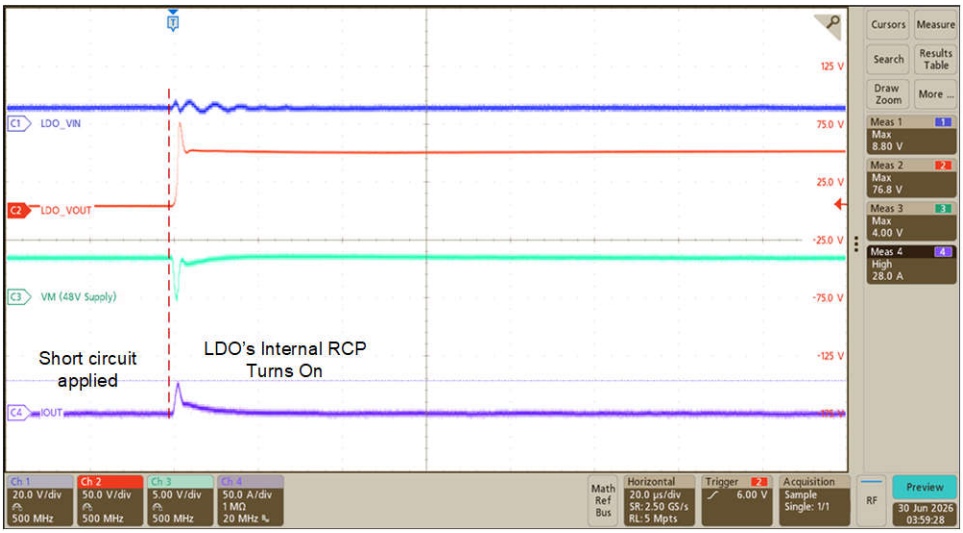


图 22. TPS7B4255-Q1 与 DRV8163-Q1 发生短路（额外 C_{OUT} = 2.2uF）

跟踪型 LDO 测试总结

无额外输出电容时：器件内部的反向电流保护 (RCP) 响应不够迅速，导致大电流流经内部 FET 并造成器件损坏。在给定测试条件下，TPS7B4255-Q1 的 RCP 响应时间最长为 0.5µs。因此可以推断，反向电流条件会在小于 0.5µs 的时间内形成，其发生速度快于 12V 汽车蓄电池输出短路所需的响应时间

有额外输出电容时（测试中低至 2.2µF）：器件能够经受住测试。额外的电容为 LDO 启动 RCP 提供了足够的响应时间（0.5µs 内），从而避免器件损坏。然而，尽管器件未发生损坏，V_{OUT} 仍然超过了其绝对最大额定值。因此，仅通过增加 C_{OUT} 并不足以构成有效的保护。

有关如何防止 LDO 中反向电流的更多信息，请参见 *LDO 基础知识：防止反向电流*

为验证跟踪型 LDO 能否获得有效保护，建议采用 图 23 所示的电路：

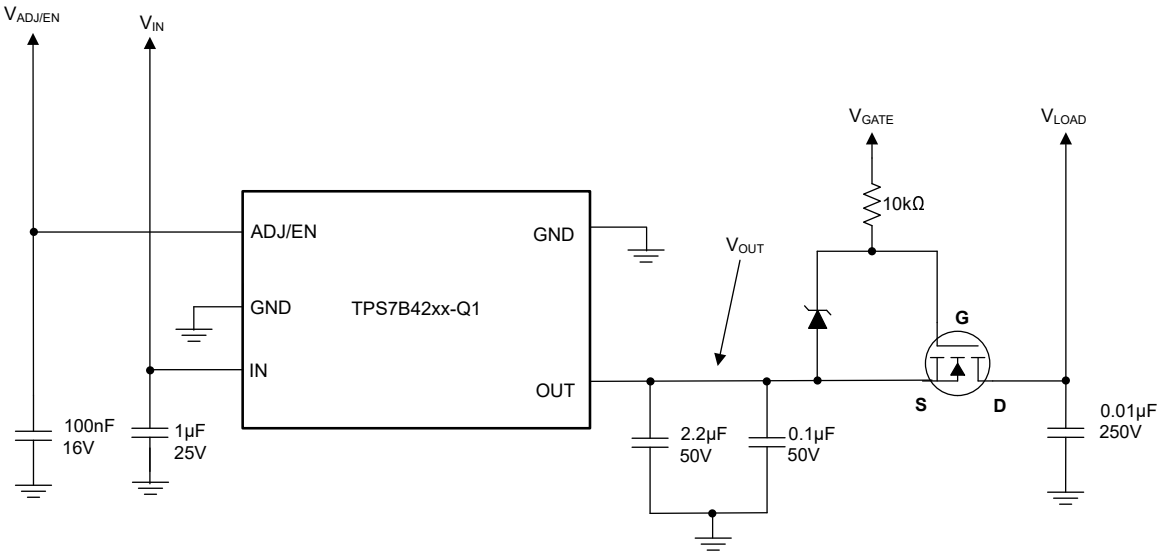


图 23. LDO 保护电路

当输出端与 $_{48V}$ 电池发生短路时，该保护电路可将 OUT 端电压限制在稳态下的 V_{GATE} + V_{DIODE}。

在从正常工作状态快速切换至输出短路状态的瞬态过程中，保护 FET 的漏电流可能导致 OUT 端电压在初始阶段出现较高电压。当 TPS7B4255-Q1 的标称 V_{OUT} 设定值最高为 35V 时，该瞬态电压仍可限制在器件的绝对最大额

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

定值范围内。如果短路状态持续存在，OUT 端电压最终将稳定在 V_{GATE} + V_{DIODE}。这是因为 LDO 检测到 OUT 端电压升高后，会尝试将输出电压调低，从而使 V_{GATE} 降低并关断保护 FET。如果 LDO 输出端的短路消除，输出电压便会恢复正常，保护 FET 也会重新导通。

测试结果与保护方案总结

表 1. 测试结果

12V DUT	48V 负载驱动器（关断行为）	是否发生故障/异常？	是否需要额外保护？
智能电子保险丝 (TPS2HCS08-Q1)	立即	否	否
	电流调节	否	
HSS (TPS4HC120-Q1)	立即	否	是
	电流调节	是	
MD (DRV8245-Q1)	立即	是	是
	电流调节	是	
电压跟踪型 LDO (TPS7B4255-Q1)	立即	是	是
	电流调节	是	

表 2. 保护设计

用例	设计	成本	优点	缺点
单向、低电流负载驱动器	输入端阻断二极管	低	设计简单	效率低
大电流/低 Rds(on) 高侧开关	反向电流阻断 FET	高	功率效率高	体积较大
			稳健	
电压跟踪型 LDO	LDO 主动钳位电路	中	功率效率高	体积较大
			稳健	
全桥（H 桥）电机驱动器（双向负载驱动器）	输出端 TVS 钳位电路	中	设计简单	能量限制

测试流程和配置参数

使用 TPS1HTC30-Q1 48V 高侧开关时的测试流程：

1. 确保两个开关 (SW1、SW2) 和继电器均处于断开状态。
2. 闭合 SW1。
3. 接通 48V 电源。
4. 启用 TPS1HTC30-Q1 的 FET。
5. 闭合 SW2。
6. 断开 SW1。
7. 驱动继电器，使 48V 电源轨与低电压电源轨之间形成短路。

使用 DRV8163-Q1 48V 电机驱动器时的测试流程：

1. 确保两个开关 (SW1、SW2) 和继电器均处于断开状态。
2. 闭合 SW1。
3. 接通 48V 电源。
4. 驱动 DRV8163-Q1 HS FET。
5. 闭合 SW2。
6. 断开 SW1。
7. 驱动继电器，使 48V 电源轨与低电压电源轨之间形成短路。

所有测试配置均采用以下参数。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

表 3. 测试配置参数

标识符	值
C1	330uF
C2	336uF
R1	20 Ω
R2	5 Ω
R3	5 Ω
导线 1	3.5m (18AWG)
导线 2	1m (18AWG)
导线 3	1m (18AWG)
导线 4	300mm (18AWG)
导线 5	300mm (18AWG)

结语

TI 不仅是 48V 兼容器件领域的市场领军者，还积极开展测试并解决汽车应用中采用 48V 方案所面临的系统级挑战。其中，最亟待解决的问题之一，就是负载驱动器之间发生 48V 至 12V/5V 电源轨短路的风险。无论特定器件能否独立承受此类短路事件，还是需要额外的保护电路，TI 都能够为客户提供完整的系统级解决方案，助力客户顺利向 48V 架构转型。

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

English Document: SBAA825
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

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出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