

摘要

DC+ (直流总线正极侧) 过流保护广泛用于工业系统。与传统的分立式解决方案相比，隔离式比较器 (AMC23C11) 可以实现更好的性能。本文介绍了一种具有成本效益的方法来为 DC+ 侧隔离式比较器生成电源。此方法使用自举电荷泵技术来在 DC+ 上生成稳定的电源。

内容

1 背景.....	2
2 DC+ 过流保护.....	3
3 DC+ 电源解决方案.....	4
3.1 选择电荷泵电容器.....	5
3.2 在 TI 的 PSpice® 中进行仿真.....	5
3.3 硬件测试.....	7
3.4 低成本电源解决方案.....	7
4 上电短路风险及解决方案.....	8
5 参考文献.....	9

插图清单

图 2-1. DC+ 过流保护.....	3
图 3-1. DC+ 电源解决方案.....	4
图 3-2. 仿真模型.....	5
图 3-3. 1kHz、20% 占空比电源.....	6
图 3-4. 将电容值从 1 μ F 增加到 30 μ F.....	6
图 3-5. 低成本电源解决方案.....	7
图 4-1. 导致基准电压趋稳时间过长时的输出行为 (AMC23C11).....	8
图 4-2. 添加 DC - 短路保护.....	8

表格清单

表 3-1. 1kHz 开关频率.....	7
表 3-2. 20kHz 开关频率.....	7

商标

PSpice® is a registered trademark of Cadence Design Systems, Inc..

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 背景

对于大功率工业系统（如电机驱动器和光伏逆变器）以及汽车系统（包括电动汽车（EV）充电器、牵引逆变器、车载充电器和直流/直流转换器）而言，故障检测机制必不可少。基于直流总线的过流保护广泛用于电机驱动。传统的过流（OC）故障检测实现方案是分立式方案，通过结合非隔离式多通道比较器和光耦合器或数字隔离器来实现的。为了满足日益增长的故障检测需求，TI 在其隔离产品系列中推出了一个新的基础型和增强型隔离式比较器系列。主要用例是高压工业和汽车 HEV/EV 系统中的超快速过流、过压和过热检测。其较小的 PCB 面积尤其适合具有小型化和高功率密度需求的应用。与传统解决方案相比，它在 CMTI、响应时间、阈值精度、迟滞和锁存功能方面具有显著优势。

用于过流保护的 DC+ 电源可以通过添加变压器或向现有变压器添加额外的次级绕组来生成。不过，变压器尺寸限制或这些变压器与实际 OC 实现的接近程度等技术挑战实际上会限制这种基于变压器的实现。

2 DC+ 过流保护

图 2-1 展示了基于 DC+ 总线的 OC 保护功能如何能够在以下三种短路情况下提供保护：IGBT 击穿故障（蓝色）、DC+ 接地故障（红色）和相间短路故障（黄色）。

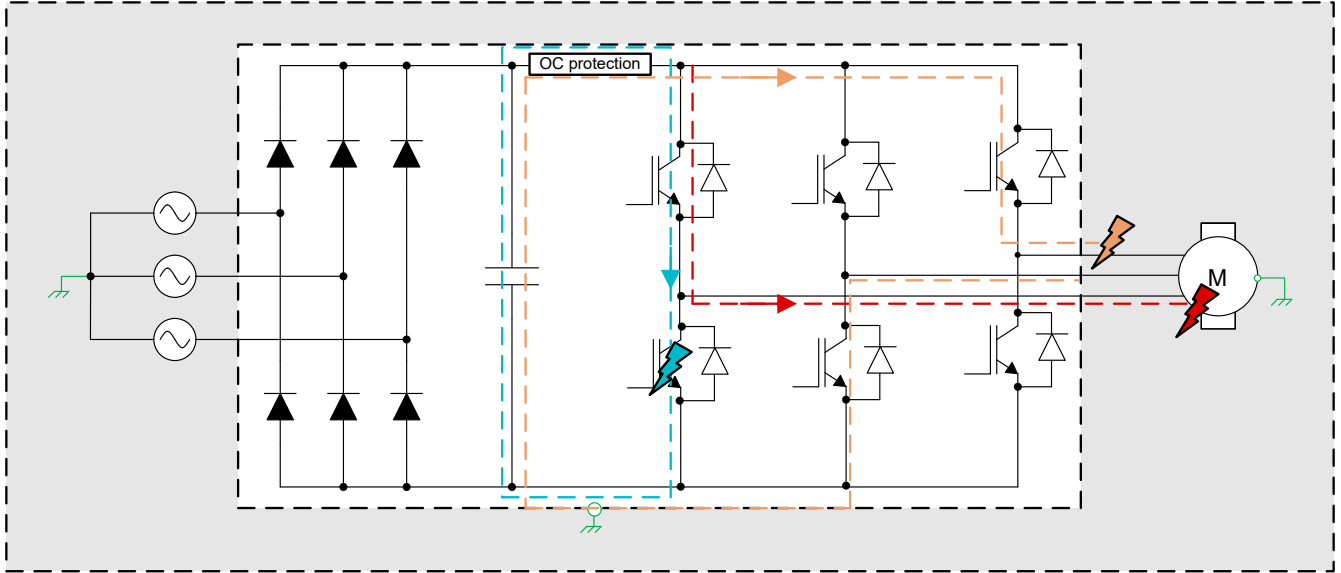


图 2-1. DC+ 过流保护

通过添加单阈值比较器 AMC23C11 等隔离式比较器来进行 OC 检测，可确保适当地检测这三种情况并针对这些情况为电源电路提供保护。双阈值版本 (AMC23C14) 可以同时实现短路和过载保护。

由于除了隔离式比较器外，DC+ 上不需要其他电源，因此简单、低成本和低 BOM 实现至关重要。

3 DC+ 电源解决方案

图 3-1 展示了 DC+ 电源的实现方式。

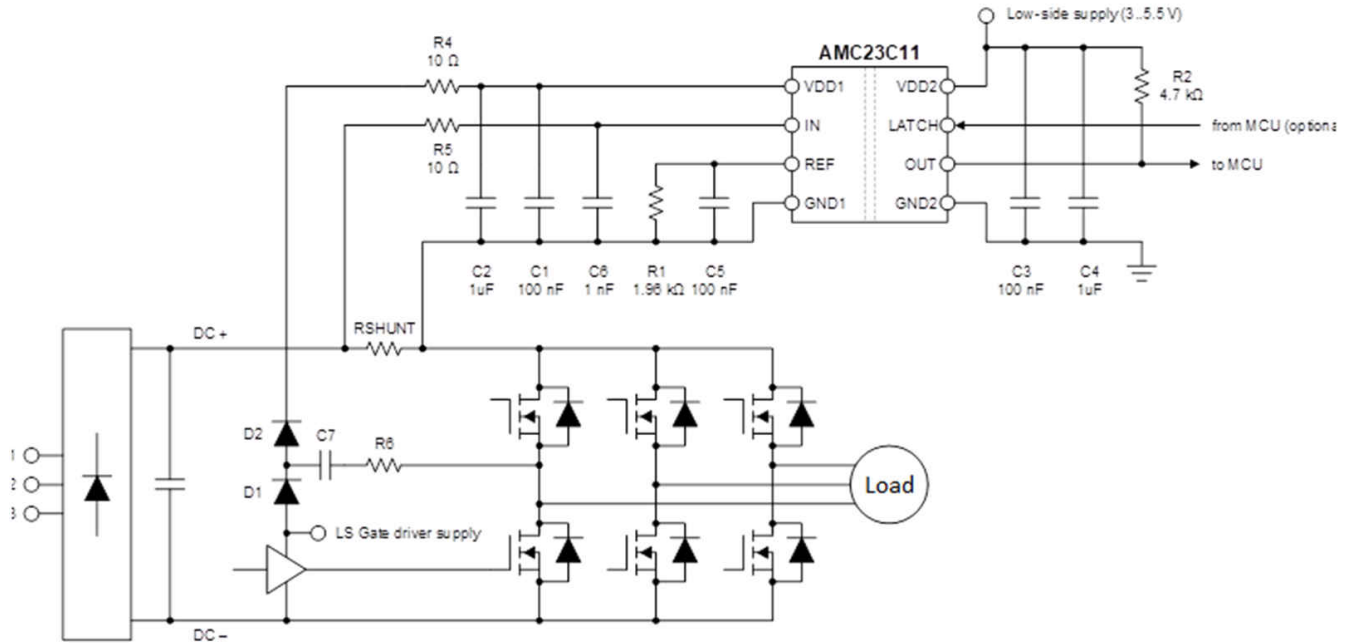


图 3-1. DC+ 电源解决方案

DC+ 电源解决方案由两部分组成。第一部分是自举电路，其中包含一个高压二极管 D1、一个电容器 C7 和限流电阻器 R6。C7 由低侧栅极驱动器电源充电。第二部分是电荷泵，其中包含一个高压二极管 D2、一个电容器 C2 和限流电阻器 R4。当半桥开始运行时，有以下三种运行状态：

- 当低侧 IGBT 导通时，C7 由低侧栅极驱动器的电源充电，而 D2 关断。
- 当高侧 IGBT 导通时，D2 导通，C7 为隔离式比较器和电容器 C2 充电。
- 当低侧 IGBT 再次导通时，C7 由低侧电源充电，C2 继续为隔离式比较器供电。

总之，这种基于电荷泵自举电路在 IGBT 开关阶段借助电容器 C7 和 C2 中存储的能量为隔离式比较器供电。

3.1 选择电荷泵电容器

C2 和 C7 这两个电容器的选择对于尽可能地减小所生成电源的纹波非常重要。下面举例说明了如何计算极端条件下的电容值。好消息是，AMC23C11 高侧的集成低压降 (LDO) 稳压器降低了该电源的预稳压要求。例如，此设计能够接受 3V 的纹波电压，其他参数如下：

- 半桥电路开关频率 $f = 1\text{kHz}$
- 占空比 $D = 20\%$
- 隔离式比较器所需的电流 $I = 3.3\text{mA}$ (最大值)
- 低侧驱动器电源 $U_{\text{low side}} = 15\text{V}$

电机驱动系统中的开关频率通常为 1kHz 至 20kHz。由于放电时间更长，较低的开关频率会导致较大的纹波。增大电容会减小纹波，但会增加充电时间。在极端情况下，假设开关频率为 1kHz，占空比为 20%。这种情况意味着隔离式比较器在 80% 的 PWM 周期内仅由电荷泵的电容器 C2 供电，这种情况下 C2 所需的最小电容为：

$$Q = I \times t = \Delta U \times C \quad (1)$$

$$C = \frac{I \times t}{\Delta U} = \frac{3.3\text{ mA} \times 0.8\text{ ms}}{3\text{ V}} = 0.88\ \mu\text{F} \quad (2)$$

本设计中，C2 的电容为 $1\ \mu\text{F}$ ，自举电容器 C7 的电容也是 $1\ \mu\text{F}$ 。R4 和 R6 会限制初始上电期间可能出现的高电流。该电阻器的典型值为 $5\ \Omega$ 至 $10\ \Omega$ 。较大的电阻会增加 RC 电路的时间常数，并延长达到最小电源所需的时间。当 R4 为 $10\ \Omega$ 时，初始上电时的最大电流为 1.36A：

$$I_{\text{Rboot}} = \frac{15\text{ V} - 0.7\text{ V} \times 2}{10\ \Omega} = 1.36\text{ A} \quad (3)$$

两个二极管 D1 和 D2 应能够承受直流总线的电压。对于输入电压为 380V VAC 的电机驱动系统，二极管需要承受 $\geq 1200\text{V}$ 的电压，并且必须具有快速反向恢复特性，以尽可能地减少恢复电荷，从而确保电源电路的稳定性。该电路理论上可产生 13.6V 的电源电压，即 15V 减去两个二极管的压降 (0.7V)。

3.2 在 TI 的 PSpice® 中进行仿真

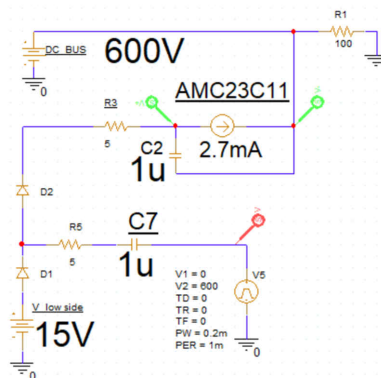


图 3-2. 仿真模型

仿真模型中的直流总线为 600V，并使用 2.7mA 电流源来模拟隔离式比较器，方波源 V5 则模拟半桥的开关。低侧电源为 15V。电容器 C2 和 C7 均为 $1\ \mu\text{F}$ ，而限流电阻器 R3 和 R5 为 $5\ \Omega$ 。

隔离式比较器的电源电压 (V_DC+) 和半桥中心点电压 (V_half bridge) 在 1kHz 开关频率和 20% 占空比下测量，如图 3-3 所示。

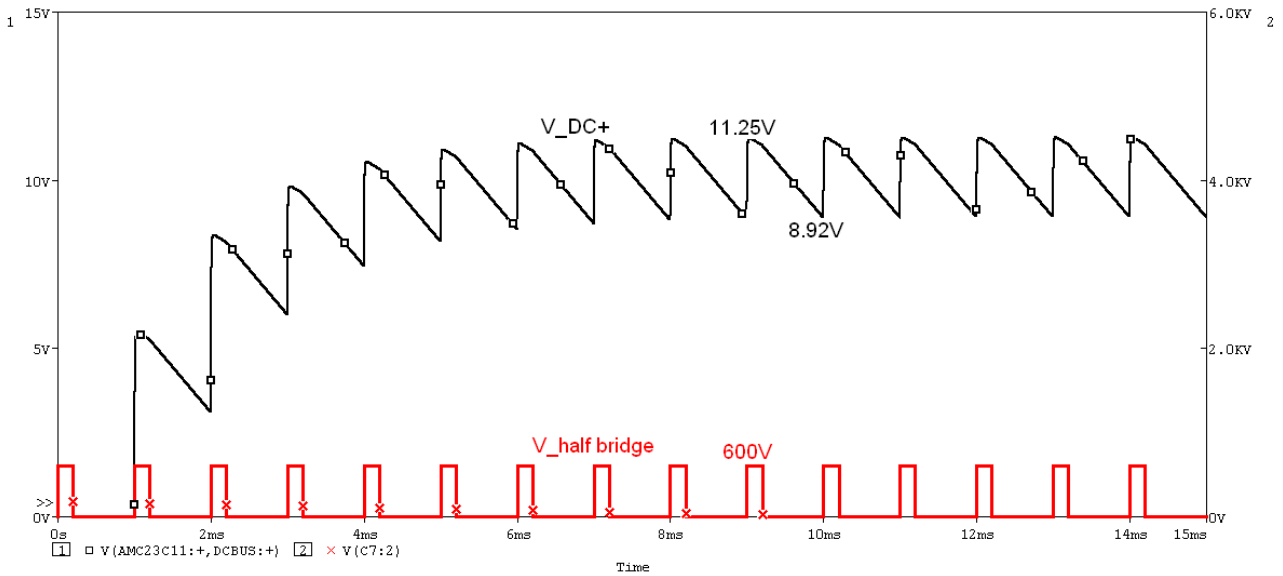


图 3-3. 1kHz、20% 占空比电源

在图 3-3 中，电源在几个 PWM 周期后稳定在 11.25V 和 8.92V 之间，也就是说，存在 2.33V 的纹波。由于半桥电路会在第一个周期中先导通高侧 IGBT，因此隔离式比较器直到一个周期后才通电，也就是说，系统在第一个周期中不受上电短路保护。节 4 中提供了一种能够尽可能降低风险的优化解决方案。

在相同的开关频率和占空比条件下，逐渐将 C2 和 C7 同步电容值从 1 μ F 增加到 30 μ F。这种方法表明，电源电压会逐渐增加并接近理想值 (13.6V)，而电源纹波也会减少。

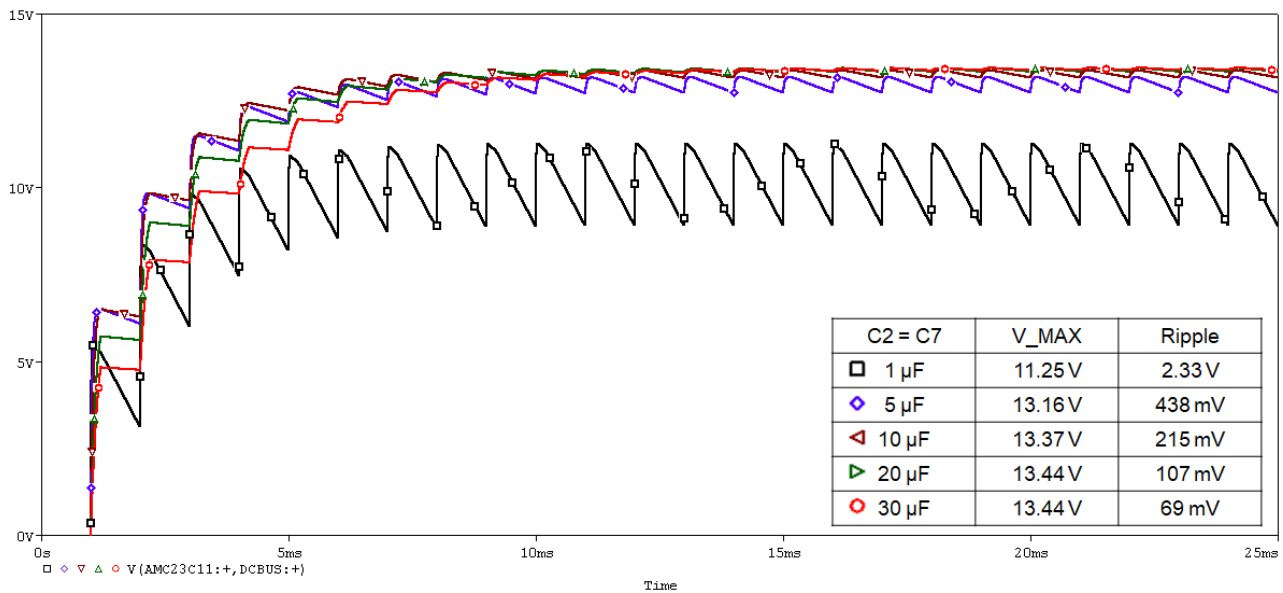


图 3-4. 将电容值从 1 μ F 增加到 30 μ F

在图 3-4 中，V_MAX 是可通过稳定电源实现的最大电压值。因此，建议将这两个电容器的电容值控制在 5 μ F 以上，以获得更稳定的电源电压。但电容值过大也会增加充电时间。

3.3 硬件测试

实际电路根据图 3-1 中的电路图构建，其中电容器 $C2 = C7 = 1 \mu\text{F}$ 、 $R4 = 10 \Omega$ 、 $R6 = 5 \Omega$ 、低侧驱动器电源为 15V，且直流总线电压为 10V。电源电压和纹波在 1kHz 和 20kHz 的不同占空比下进行测试。

表 3-1. 1kHz 开关频率

占空比	V_MAX	纹波
20%	11.4 V	3.44V
50%	11.9 V	2.96 V
80%	12.2 V	2.16 V

表 3-2. 20kHz 开关频率

占空比	V_MAX	纹波
20%	12.9 V	352 mV
80%	12.9 V	104 mV

表 3-1 和表 3-2 展示了较低的开关频率和较低的占空比会带来较低的电源电压 (V_MAX) 和更大的纹波。对于 150V 直流总线电压，可获得类似的结果。

3.4 低成本电源解决方案

节 3.1 中的自举电路类似于高侧栅极驱动器的电源。通过重复使用，该电源可以降低成本。如图 3-5 所示，VCC 是高侧栅极驱动器的电源引脚，此解决方案无需高压二极管 (D1) 和 RC (C7 和 R6)。

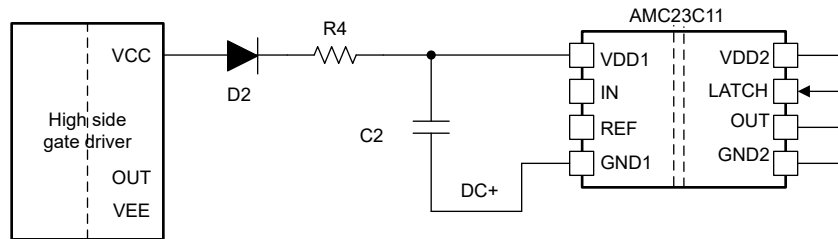


图 3-5. 低成本电源解决方案

图 3-5 所示的解决方案会增加栅极驱动器电源的负载，因此有必要注意栅极驱动器的影响。增大限流电阻 (R4) 可以降低影响。由于隔离式比较器电源取决于半桥电路运行，因此该解决方案仍然存在局限性。

4 上电短路风险及解决方案

自举电路和电荷泵需要等待一个半桥运行周期，然后才能为隔离式比较器供电。在 VDD1 上电至大于 3V 后，基准引脚上的电容器必须充电至阈值电压，然后隔离式比较器才能工作。图 4-1 展示了当基准电压位于设定值的 1% 以内时，隔离式比较器的输出有效。

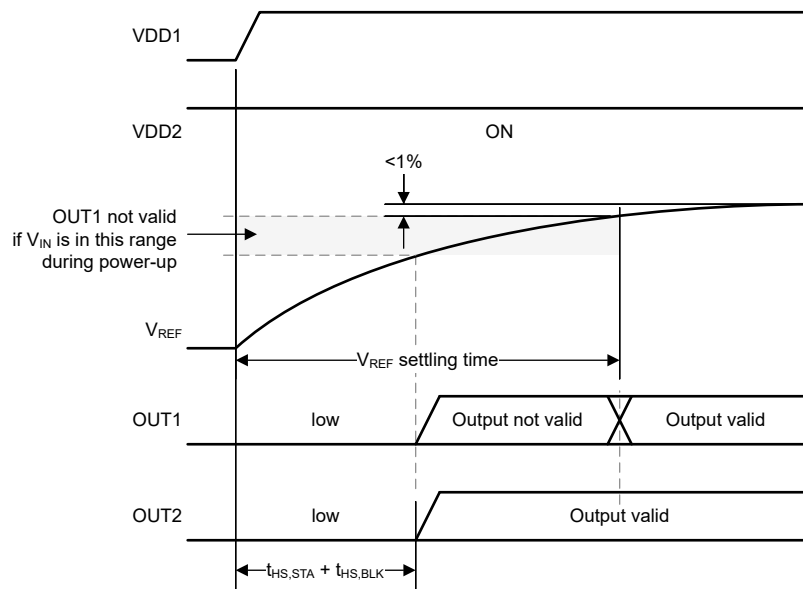


图 4-1. 导致基准电压趋稳时间过长时的输出行为 (AMC23C11)

因此，自举电荷泵解决方案无法在电机驱动器的初始启动期间提供 OC 保护。通过添加 DC - OC 保护和预接通三个低侧 IGBT，可以降低这种风险。

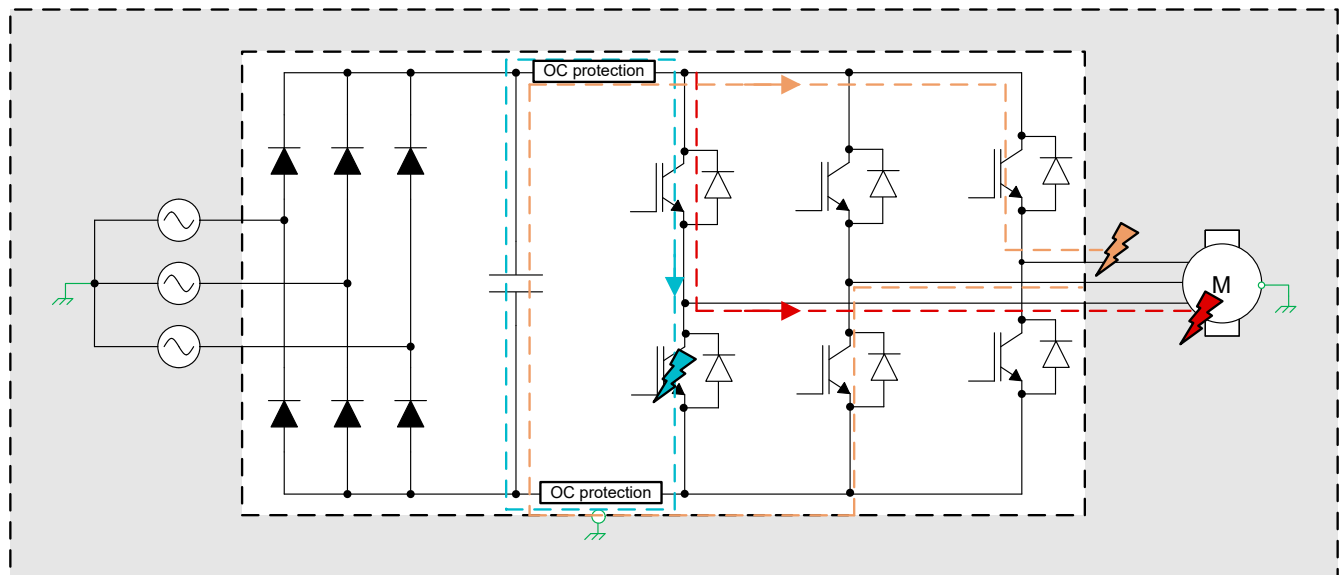


图 4-2. 添加 DC - 短路保护

添加的 DC - 保护功能可以与低侧驱动器共享电源，因此 DC - 始终具有保护功能。DC - 保护可防止击穿故障（蓝色）和相间短路故障（黄色）。但是，DC+ 接地故障（红色）无法直接通过 DC - 进行保护。可以在 IGBT 模块开始工作之前先接通三个低侧 IGBT，以检测是否存在对地短路，并为自举电容器充电。

5 参考文献

1. 德州仪器 (TI), [TIDA-010036 使用独立 ADC 的单相并联电表参考设计](#)
2. 德州仪器 (TI), [AMC23C11 具有可调阈值和锁存功能的快速响应增强型隔离式比较器](#) 数据表
3. 德州仪器 (TI), [在电机驱动器中使用隔离比较器进行故障检测](#) 模拟设计期刊

重要声明和免责声明

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。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

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司