

TI Designs: TIDA-01349

采用单封装六通道数字隔离器的逆变器 IPM 接口参考设计



说明

该参考设计使用一个使用智能电源模块 (IPM) 实现了一款适用于交流逆变器驱动器和伺服驱动器的三相逆变器子系统。在微控制器 (MCU) 和基于 IPM 的功率级之间使用了一个增强型隔离。PWM 信号使用单封装六通道数字隔离器 ISO7760 进行了隔离。同相电流检测通过隔离式 Δ - Σ 调制器 AMC1303M0520 在两个电机相位中完成。直流总线电压反馈和模块温度反馈通过隔离式 Δ - Σ 调制器 AMC1303M2520 提供给 MCU。该参考设计由 C2000™MCU 进行控制。

资源

TIDA-01349	设计文件夹
ISO7760	产品文件夹
AMC1303M0520	产品文件夹
AMC1303M2520	产品文件夹
TLV760	产品文件夹
TPS7A4201	产品文件夹
TPS706	产品文件夹
TMDSCNCD28379D	工具文件夹

1200V、
15A IPM

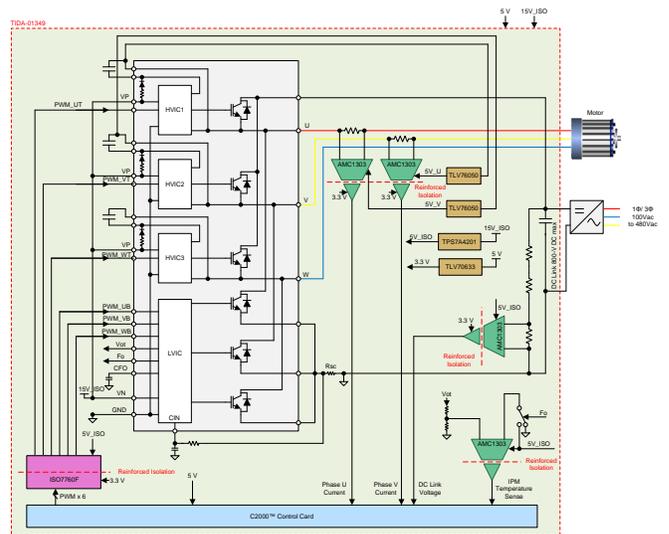
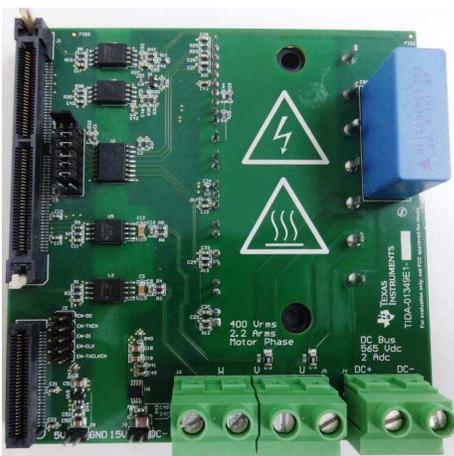
- 微控制器和功率级之间使用了增强隔离
- 与使用多个光电隔离器相比，适用于六个 PWM 信号的单封装增强型隔离器 ISO7760 减少了 BOM 数量和 PCB 占用空间
- 隔离器通道具有出色的传播延迟匹配功能，可缩短死区时间，减少逆变器输出失真并提高效率
- PWM 隔离器具有极低的电流消耗和自发热，能够通过小型 LDO 利用 15V IPM 电源供电
- 在高达 4kV 的电机电源线上进行 EFT 测试符合 IEC 61800-3 EMC 标准

应用

- 伺服 CNC 和机器人
- 交流逆变器和变频驱动器



咨询我们的 E2E™ 专家



特性

- 功率级适用于 200V 至 480V 交流驱动，连续电流额定值高达 $5A_{RMS}$ ，峰值电流额定值 $10A_{PK}$ ，采用



该 TI 参考设计末尾的重要声明表述了授权使用、知识产权问题和其他重要的免责声明和信息。

1 系统 说明

三相逆变器功率级是工业电机驱动 应用（如泵、压缩机、机器人、机床和数控机器）的基础构建块。逆变器将直流电压转换为变频功率交流输出以驱动电机。对于空间受限的逆变器 应用，逆变器功率级的外形尺寸必须很小。对于紧凑型小逆变器，使用 IPM 可大幅节省空间。

IPM 是一款高度集成的逆变器功率级。栅极驱动器集成在模块内部，只需要外部数字 PWM 信号就能控制 IPM。IPM 还提供诊断 特性，如栅极驱动器电源的欠压保护、相位半桥中的击穿检测以及过热检测。可以大大降低逆变器 PCB BOM 数量、栅极驱动器子系统设计以及 PCB 布线复杂度。通常，从 PWM 输入角度来看，主要有三种 IPM 类型，如图 1 所示。

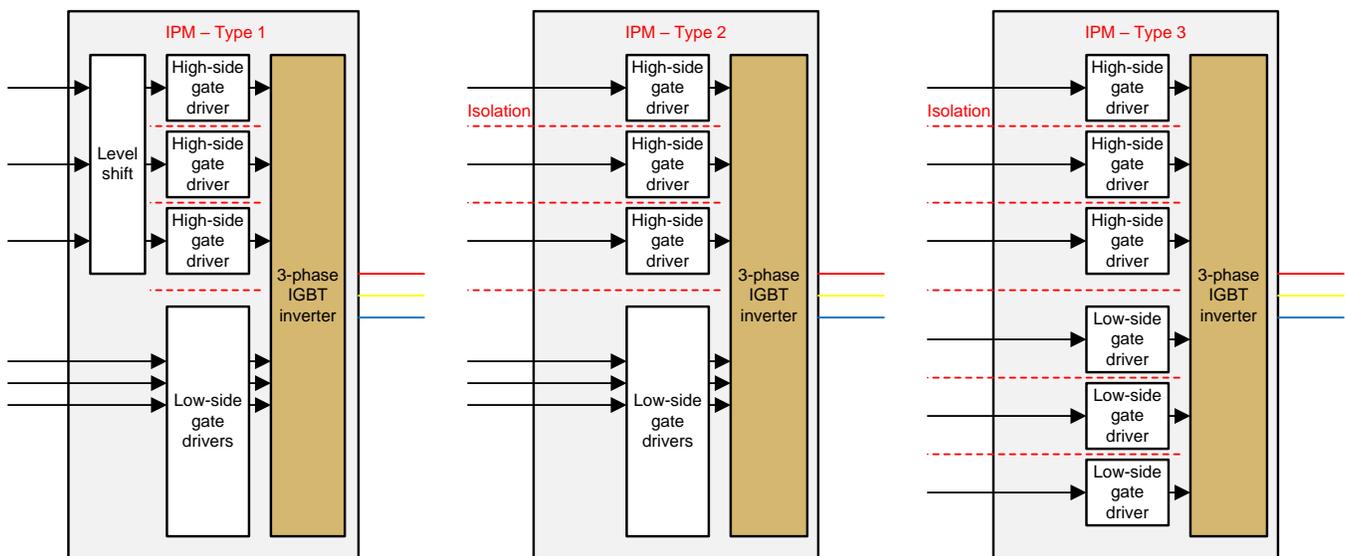


图 1. IPM 类型 - PWM 输入角度

对于 1 型 IPM，所有 PWM 输入信号都有一个参考。高侧 PWM 信号可以在模块内进行电平位移。对于 2 型 IPM，低侧 PWM 输入有一个参考，但高侧 PWM 信号彼此隔离。对于 3 型 IPM，所有六个输入信号都彼此隔离。3 型 IPM 通常用于高功率逆变器。

如果 IPM 的所有 PWM 输入信号都有一个参考（1 型 IPM），那么可以使用六通道隔离器，如图 2 左半部分所示。与六个光电隔离器器件相比，六通道数字隔离器仅使用一个器件，如图 2 右半部分所示。六通道数字隔离器大幅节省空间。另外，与光耦合器的 LED 输入级相比，数字隔离器的输入级基于 CMOS，需要的驱动器电流要小得多。这样，可以直接从 MCU 驱动数字隔离器，无需任何外部缓冲器。多个数字隔离器通道之间出色传播延时和延时匹配功能能够减少死区时间失真。基于电容技术的数字隔离器具有 100kV/μs 的典型共模瞬态抗扰度 (CMTI)，这使其成为高度稳健的解决方案，在逆变器中实现 PWM 隔离。

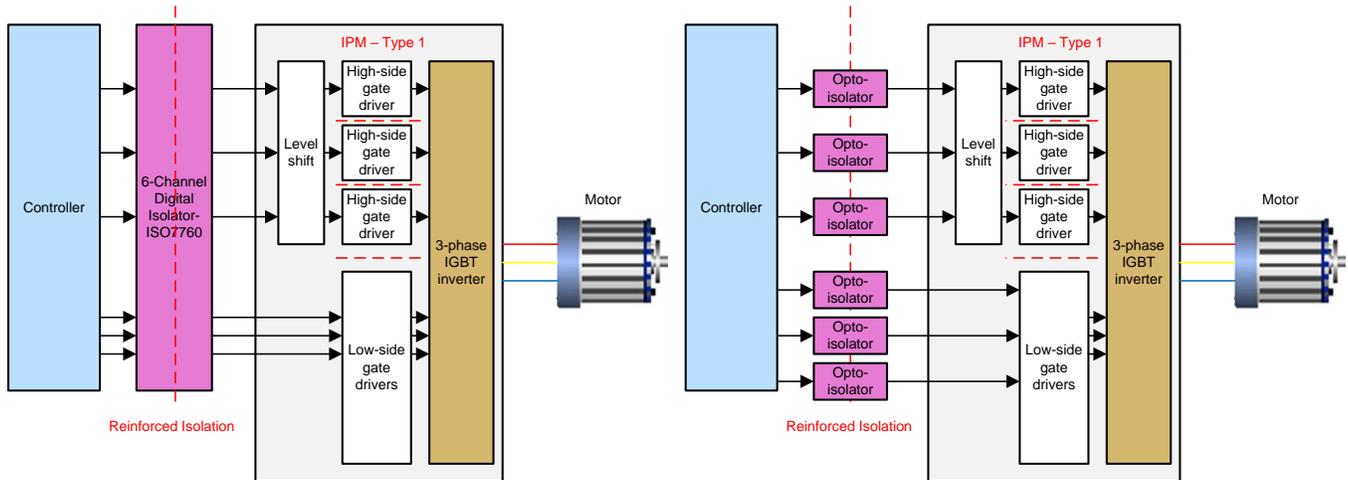


图 2. 使用六通道数字隔离器

此参考设计展示了使用 IPM 实现的三相逆变器功能。基于电容技术的六通道数字隔离器用于 PWM 隔离，隔离式 Δ - Σ 调制器用于相电流、直流总线电压和模块温度检测。此设计指南给出以下测试结果：

- 隔离栅上的 PWM 传播延时
- PWM 频率达到最大时的隔离器热像图
- 不同开关条件下的开关节点电压
- 电源接口上的 EFT 显示 PWM 隔离器的稳健性

1.1 主要系统规格

表 1. 主要系统规格

小节	参数	规格	备注
逆变器	直流总线输入电压	200 至 800V _{DC}	
	持续输出额定电流	5A _{RMS}	
	输出频率	0 至 100Hz	
	PWM 开关频率	4 至 20kHz	具有较高开关频率的输出功率必须降额。
	IPM 使用	六组 1200V、15A 的逆变器 DIPIPM 模块，带有集成式栅极驱动器和模拟温度输出	器件型号：PSS15SA2FT
电机相电流检测	线性测量范围	± 10A _{PK} (典型值)	使用 5mΩ 的分流电阻器。精度取决于软件中配置的 SINC 滤波器和 OSR 的顺序。
	满标量程	± 12.8A _{PK} (典型值)	
直流总线电压检测	线性测量范围	0 至 800V _{PK} (典型值)	精度取决于软件中配置的 SINC 滤波器和 OSR 的顺序。
	满标量程	0 至 1027V _{PK} (典型值)	
IPM 温度检测	线性测量范围	100°C (典型值)	精度取决于软件中配置的 SINC 滤波器和 OSR 的顺序。
	满标量程	131°C (典型值)	
保护	直流总线电压	过压和欠压检测	用户软件实现
	模块温度	过热关机并降低提供的输出功率	用户软件实现
	隔离	可承受 5000V _{RMS} 的隔离电压，符合 UL 1577 标准	数字隔离器用于电流、电压和温度检测中的 PWM 信号和隔离式 ΔΣ 调制器
接口连接器	MCU 接口	用于 C2000 控制卡的 180 引脚双列直插式连接器插座	有关连接器上引脚的分配，请参阅表 2。
	电源	15V	用于为 IPM 控制电源和 LDO 供电，该 LDO 产生直流基准隔离器次级侧电源
		5V	用于为 C2000 控制卡和 LDO 供电，该 LDO 生成隔离器初级侧。
	位置反馈	数字编码器	10 引脚插头。有关连接器 J2 上引脚的分配，请参考原理图。可以使用 TIDA-00172、TIDA-00179 参考设计
PCB 信息	PCB 层堆栈	4 层	2 盎司外层，1 盎司内层
	层压	FR4，高 Tg	
	PCB 厚度	1.6mm	
	PCB 尺寸	110mm x 110mm	

2 系统概述

2.1 方框图

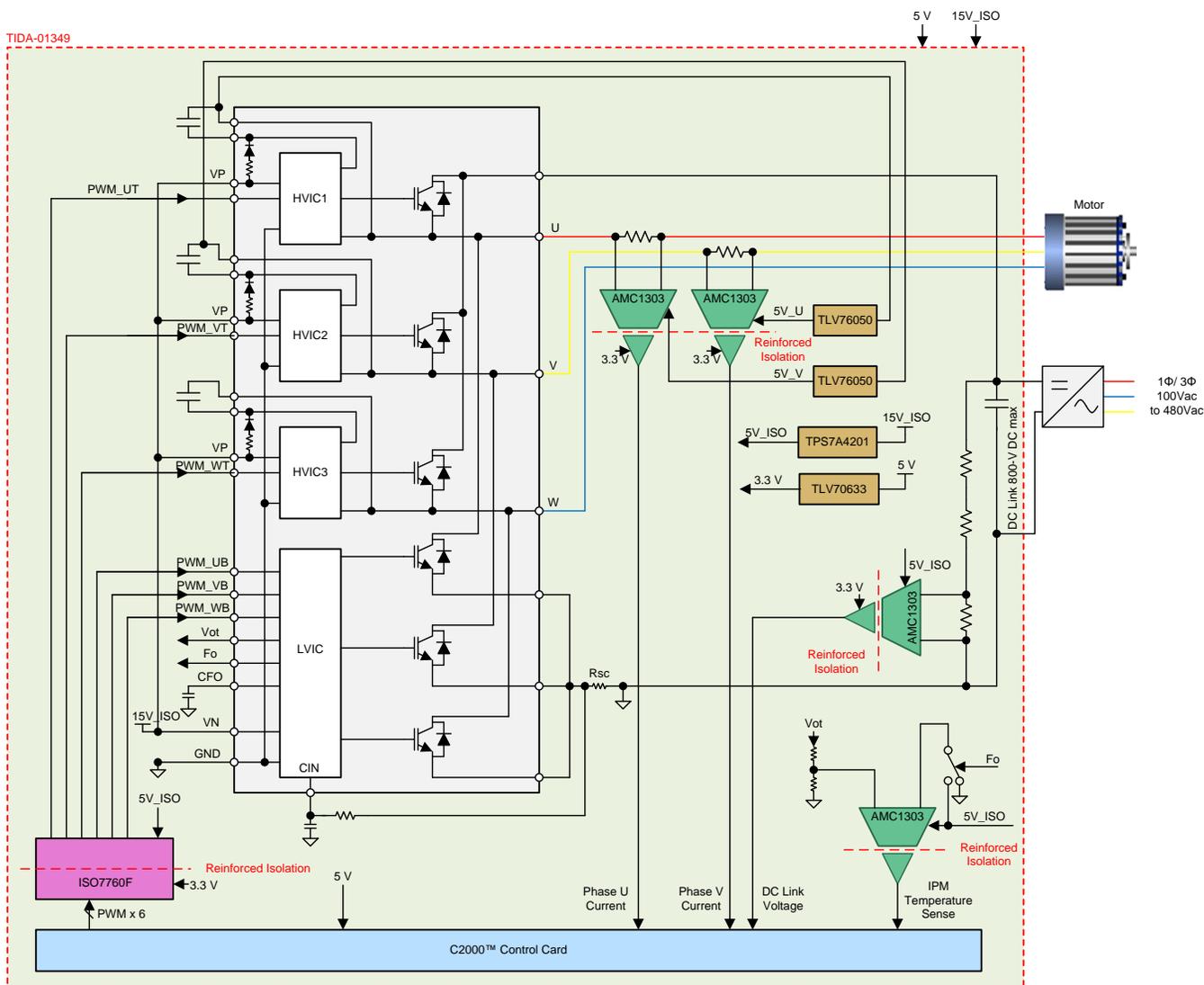


图 3. TIDA-01349 方框图

逆变器部分使用 IPM 实现。IPM 在其内部集成了三个基于 IGBT 的半桥。IPM 内的低压 IC (LVIC) 驱动三个低侧 IGBT 栅极，三个独立高压 IC (HVIC) 驱动三个高侧 IGBT。LVIC 和 HVIC 控制电路和低侧 IGBT 栅极由单个 15V 电压轨供电。高侧 IGBT 栅极由单独的隔离电源驱动。隔离电源通过引导低侧 15V 电压轨生成。高压自举二极管和自举电容器浪涌限制电阻器集成在 IPM 内。只有自举电容器必须在外部添加。电路板的高压直流总线输入必须在外部提供。

对于本参考设计中使用的 IPM，所有六个 PWM 信号都参考直流链路负极。高侧 PWM 信号可以在 IPM 内进行电平位移。使用单封装六通道数字隔离器 ISO7760F 对 PWM 信号进行了强化隔离。初级侧由 3.3V 电源供电，使隔离器输入与 3.3V I/O MCU 兼容。次级侧由 5V 电源供电，使隔离器输出与 IPM 的 5V 输入兼容。

同相电流检测通过分流电阻器在两个电机相位中完成。20MHz、输入范围为 $\pm 50\text{mV}$ 的 AMC1303 用于感应分流电阻器上的压降。初级侧采用 3.3V 电源供电。每个电流检测 AMC1303 的次级侧采用隔离的 5V 电源供电，该电源由使用 TLV76050 LDO 的相应自举电容器产生。

逆变器直流总线电压检测通过高阻抗分压器网络及 20MHz、 $\pm 250\text{mV}$ 版本的 AMC1303 调制器完成。IPM 在其内部集成了一个模拟温度传感器。温度传感器输出利用分压器网络进行降低，然后馈送至 AMC1303 调制器的输入级。初级侧由基准接地电压为 3.3V 的电源供电，次级侧由 5V 直流基准电压供电。

3.3V 的初级侧接地基准通过 TPS70633 LDO 从电路板的外部 5V 输入产生。5V 直流基准电压通过 TPS7A4201 LDO 从电路板的外部 15V 强化隔离输入产生。

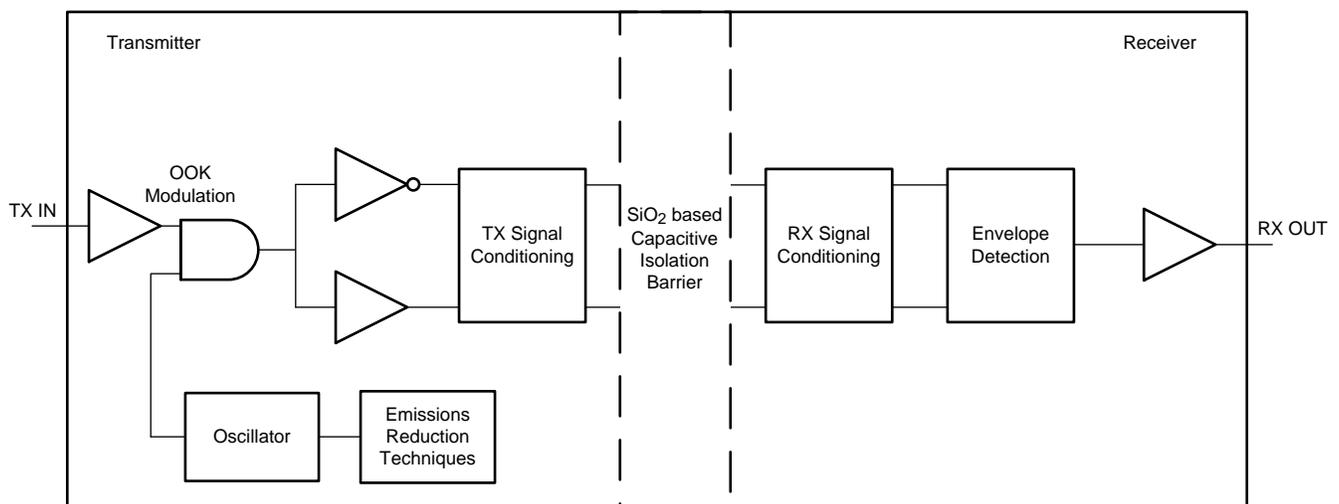
IPM 具有诊断特性，可以检测低侧 IGBT 的短路和 IPM 控制电源是否欠压。发生短路事件时，低侧 IGBT 将关闭，故障引脚在可配置的时间段内被拉低。UVLO 保护适用于 IGBT 高侧和低侧栅极驱动器电源。在进行 UVLO 检测时，即使使用 PWM 信号，IGBT 也不会切换。欠压检测时故障引脚持续保持低电平；故障引脚只在低侧响应 UVLO。通过多路复用，故障信号与温度信号一起在隔离栅上传输。

2.2 主要产品

2.2.1 ISO7760

ISO776x 器件是高性能六通道数字隔离器，隔离 CMOS 或 LVCMOS 数字 I/O。每个隔离通道都有一个由二氧化硅 (SiO₂) 绝缘栅分开的逻辑输入和逻辑输出缓冲器。本参考设计中使用的 DW 封装的隔离额定值为 5000V_{RMS}，符合 UL 1577。在浮动 PWM 输入到隔离器的情况下，具有 F 后缀的器件确保较低的 PWM 输出。凭借创新型芯片设计和布局技术，ISO776x 系列器件的电磁兼容性得到了显著增强，可缓解系统级 ESD、EFT 和浪涌问题并符合辐射标准。

对于三相逆变器，隔离器的低传播延时 (11ns) 和通道至通道的延时匹配功能能够减少死区时间。较低的死区时间有助于减少失真，使电机运行更平稳、效率更高。低功耗减少了器件自身的发热。±100kV/μs 的高 CMTI 可在开关节点出现高 dv/dt 的情况下稳健运行。在噪声很大的逆变器开关环境中，隔离器的高 EMC 抗扰性至关重要。电容式隔离技术的使用寿命超过 40 年。



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

图 4. ISO7760 单通道功能框图

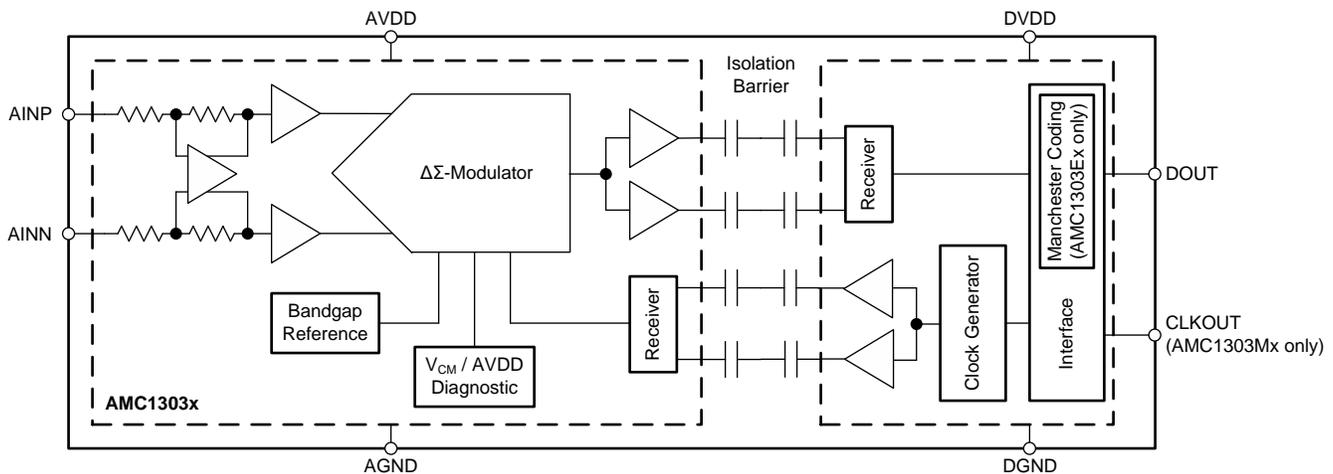
2.2.2 AMC1303M2520, AMC1303M0520

AMC1303 是高精度 Δ - Σ 调制器系列，此调制器的输出与输入电路由抗电磁干扰性能极强的电容式双隔离栅隔开。该隔离栅经过认证，可以按照 DIN V VDE V 0884-11 和 UL1577 标准提供高达 $7000V_{pk}$ 的增强型隔离。

AMC1303 的输入针对直接连接分流电阻器或其他低电压电平信号源进行了优化。本参考设计中，输入电压范围为 $\pm 50mV$ 的器件用于基于分流同相电机电流检测。分流电阻器上的较低压降，可显著降低电阻器中的功率耗散。这减少了电阻器的自发热，有助于更大限度地减少由于其热系数引起的测量漂移。

对于电压检测，使用输入电压范围为 $\pm 250mV$ 的器件。当使用高阻抗电阻分压网络将测量的电压信号向下转换到 AMC1303 的输入电压范围时，可以通过降低输入信号上的噪声影响来提高测量精度。

由于在快速开关瞬变环境下完成分流电压检测， $\pm 100kV/\mu s$ （典型值）的高瞬变抗扰性可实现精确测量。器件的系统级诊断特性有助于增强逆变器的安全性。AMC1303 与内部生成的时钟同步，有助于简化调制器和控制器之间的布线，并消除采样保持时间问题。



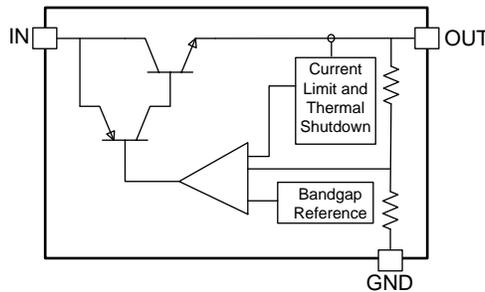
Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 5. AMC1303x 功能框图

2.2.3 TLV760

TLV760 是一款集成式线性电压稳压器，能够以高达 30V 的输入电压运行。在运行温度范围内，TLV760 可在 100mA 满载下具有 1.2V 的最大压降。TLV760 提供 3.3V、5V、12V 和 15V 版本。TLV760 系列的 SOT-23 封装允许器件用于空间受限的应用。TLV760 用于对遭受高达 30V 的电源瞬态和尖峰的应用中的数字和模拟电路施加偏压。该器件具有可靠的内部热保护功能，可以保护其自身免受由接地短路、环境温度升高、高负载或高压降事件等情况导致的潜在损害。

本参考设计使用 5V 版 TLV760 为电流检测 $\Delta\Sigma$ 调制器的高压侧供电。5V 由高侧栅极驱动器的 15V 自举电源产生。小尺寸外形规格使紧凑型解决方案成为可能，因为 LDO 在开关节点上作为基准工作，所以对电压瞬态的抗扰度非常重要。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 6. TLV760 的功能框图

2.2.4 TPS7A4201

TPS7A4201 器件是耐高压的线性稳压器，具有热增强型封装 (MSOP-8) 的优点，能够承受高达 28V 的连续直流或瞬态输入电压。该器件具有内部热关断和电流限制功能，以便在出现故障时保护系统。MSOP-8 封装的运行温度范围为 $T_J = -40^{\circ}\text{C}$ 至 $+125^{\circ}\text{C}$ 。该器件非常适合在工业应用中从中间电压轨产生低压电源，因为它可以在快速电压瞬变期间提供稳定的电压轨。这意味着更简单、更具成本效益的电涌保护电路。

此参考设计使用 TPS7A4201 从 15V 电源轨生成 5V 电源轨，为直流基准隔离器的次级侧供电。

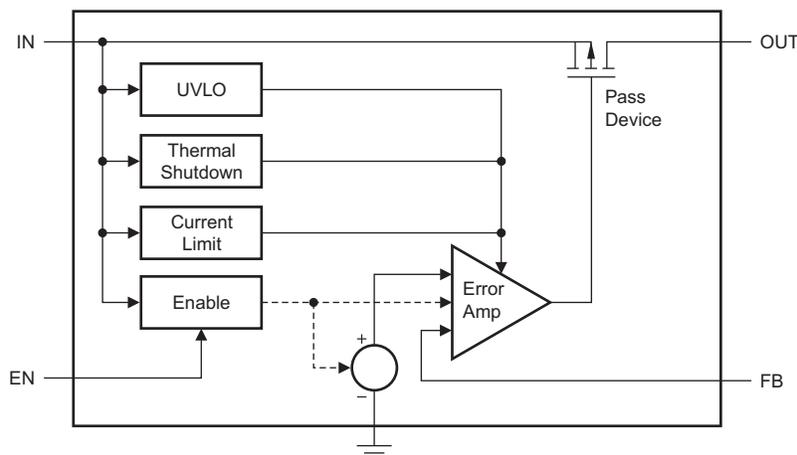


图 7. TPS7A4201 的功能框图

2.2.5 TPS706

TPS706 系列线性稳压器可提供 1.2V 至 5V 的固定输出电压。这些器件具有热关断、电流限制和反向电流保护功能，以增加安全性。这些器件采用 WSON-6 和 SOT-23-5 封装。此参考设计使用 TPS706 从 5V 电源轨生成 3.3V 电源轨，为隔离器件的初级侧供电。

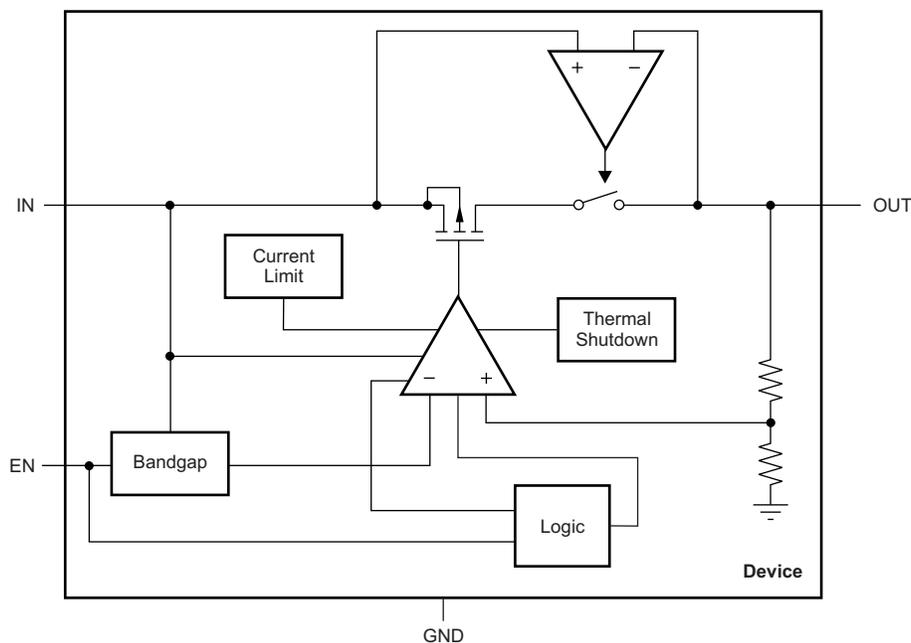
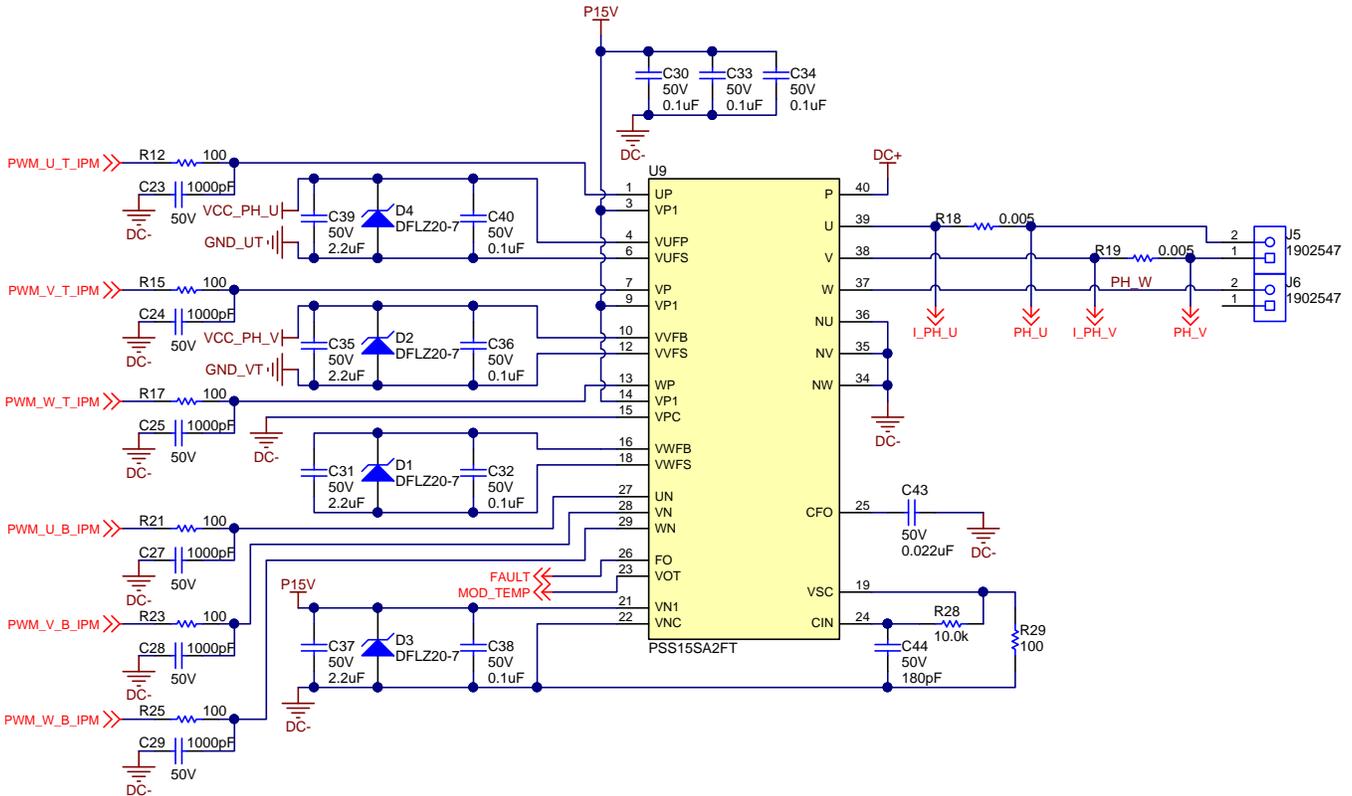


图 8. TPS706 的功能框图

2.3 系统设计原理

2.3.1 三相逆变器

此参考设计使用 IPM 实现三相逆变器（请参见图 9）。逆变器的标称输出电流额定值为 $5A_{RMS}$ ，峰值电流额定值为 $10A_{PK}$ 。此参考设计使用 1200V、15A IPM、PSS15SA2FT。



Copyright © 2018, Texas Instruments Incorporated

图 9. 使用 IPM 的三相逆变器的原理图

为了偏置 IPM 的内部控制电路和驱动低侧 IGBT 栅极，需要一个 15V IPM 控制电源。此电源通过连接器 J8 提供，通过 IPM 的引脚 VN1 和 VNC 连接。C37 是提供峰值电流的大容量电容器，用于驱动 IPM 内部的低侧 IGBT，而不会在 15V 电源轨上引起太多纹波。C38 是噪声去耦电容器，D3 用于浪涌保护。VP1 是 HVIC 的控制电源，三相中每一相都有一个 VP1 引脚。C30、C33 和 C34 是 VP1 引脚上的噪声去耦电容器。高侧栅极驱动器的电源通过引导 15V 控制电源产生。自举电容器的高压自举二极管和浪涌限制电阻器集成在 IPM 内。C31、C35 和 C39 为自举电容器。D1、D2 和 D4 用于浪涌保护。C40、C36 和 C32 是噪声去耦电容器。

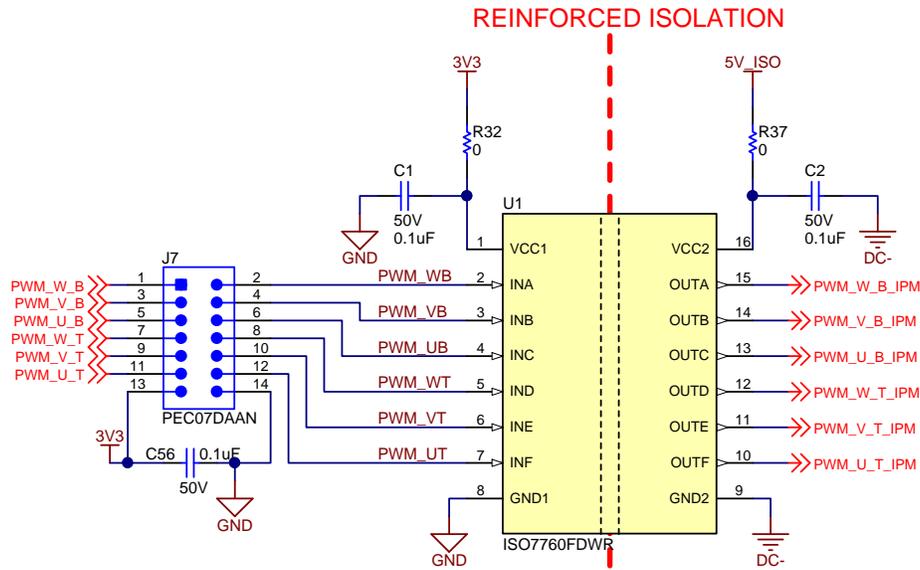
IPM 具有低侧 IGBT 短路保护功能。此功能通过检测小型感应电流发挥作用，该感应电流在相电流的低侧 IGBT 处分流。此电流通过感应电阻器 R29。然后，感应电阻器两端的压降通过由 R28 和 C44 组成的 RC 滤波器输入到 IPM 的 CIN 引脚。当检测到短路时，IPM 关断低侧 IGBT 并输出故障信号。在此参考设计中，R29 为 100Ω，短路跳闸限值设置为 25.5A（最小值）。RC 滤波器的时间常数为 $1.8\mu s$ ，可以滤掉噪声尖峰。故障是低电平有效信号。CFO 引脚上的电容器 C43 决定故障信号变为低电平的时间。故障脉冲宽度 t_{FO} 与电容器 C43 之间的关系由公式 1 限定。在本设计中，选择的是 $0.022\mu F$ 电容器，时间设为 2.4ms。

$$C43 = t_{FO} \times 9.1 \times 10^{-6} \quad (1)$$

当在 IPM 的 15V 控制电源上检测到 UVLO 时，也会触发故障信号。IPM 还具有模拟温度输出信号 (MOD_TEMP)，可用于防止模块过热。

2.3.2 PWM 信号隔离

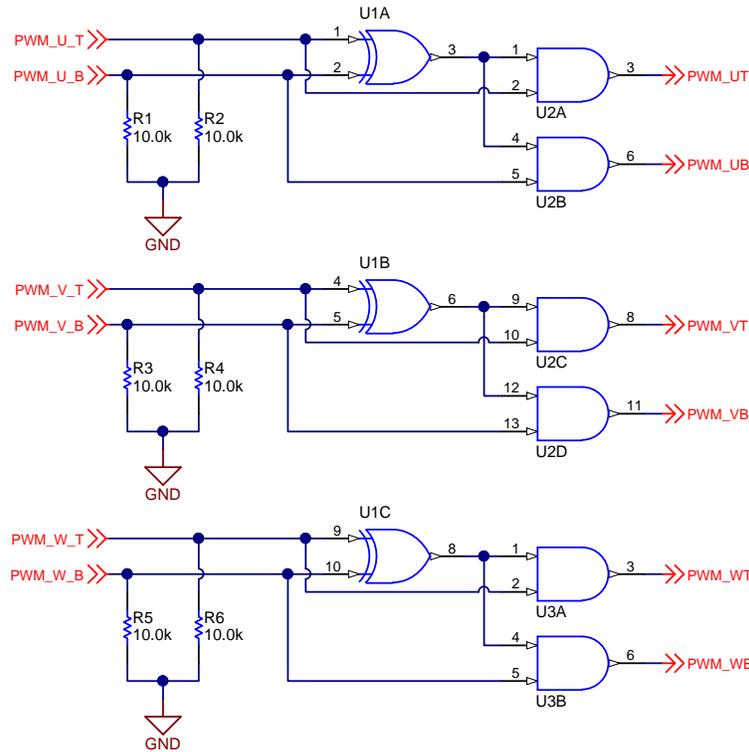
对于本参考设计中使用的 IPM，其所有 PWM 输入信号都以直流电负极为基准。高侧 PWM 信号在 IPM 内部进行电平位移，允许该设计使用单个六通道 PWM 隔离器 ISO7760F。F 版在输入端集成了下拉电阻器，可确保在输入悬空时输出为低电平。初级侧由 3.3V 电源轨供电，使其与 3.3V I/O 控制器兼容。C1 是噪声去耦电容器。次级侧由 5V 电源轨供电。本参考设计中选择的 IPM 需要 5V I/O。C2 是 5V 电源轨上的噪声去耦电容器。初级侧和次级侧彼此强化隔离，最小爬电距离为 8mm。根据 UL 1577 标准，该器件可承受 $5000V_{RMS}$ 的额定隔离电压，最大隔离工作电压为 1414V 直流电压，符合 DIN V VDE V 0884-11:2017-01。



Copyright © 2018, Texas Instruments Incorporated

图 10. 采用 ISO7760F 的 PWM 信号隔离原理图

为可选附加卡提供 7x2 接头 J7。此附加卡提供 PWM 输入互锁功能。如果不使用附加卡，则必须跳接插头引脚以将 PWM 信号直接从 MCU 连接到 ISO7760F。图 11 显示了附加互锁卡上的电路。异或门 (XOR) 的每个输入都需要一个下拉电阻器。当 MCU PWM 输出处于高阻抗状态时，这些电阻器可确保互锁卡的输出稳定且不振荡。公式 2 中显示的逻辑用于 PWM 互锁，这可确保高侧和低侧 PWM 输入为高电平时，高侧和低侧 PWM 输出信号为低电平。当出现软件错误时，可能会发生这种情况。



Copyright © 2018, Texas Instruments Incorporated

图 11. PWM 输入互锁电路原理图

$$Y_T = (X_T \oplus X_B) X_T Y_B = (X_T \oplus X_B) X_B$$

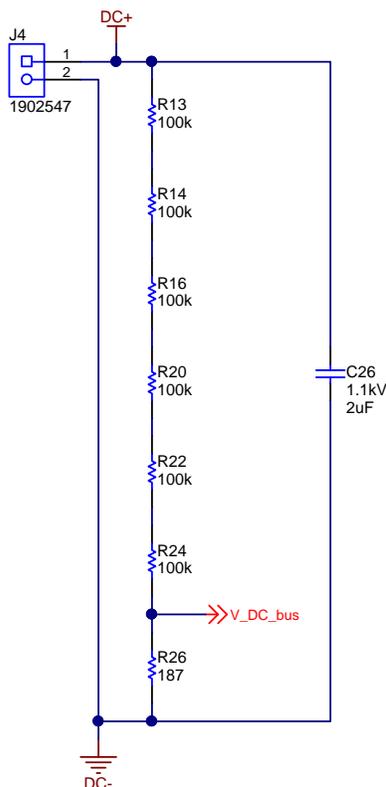
其中：

- Y_T = 顶部开关互锁卡的 PWM 输出
- Y_B = 底部开关互锁卡的 PWM 输出
- X_T = 顶部开关互锁卡的 PWM 输入
- X_B = 底部开关互锁卡的 PWM 输入

(2)

2.3.3 直流总线电压检测

此参考设计在 IPM 限制的最高 800V 直流总线电压条件下运行。这涵盖了大部分电网电压输入高达 480V 交流电压的低压驱动器。直流总线电压应用到连接器 J4。用于从交流电网和大容量电容器生成直流总线电压的整流器级不放置在 PCB 上，必须从外部连接，或者可以使用限流的高压直流电源。2μF、1.1kV 薄膜电容器靠近 IPM 直流总线输入端放置。该电容器尽可能减小高频开关电流的环路区域。这有助于更大限度地减少开关节点过冲和 高频振铃，从而有助于减少 EMI。



Copyright © 2018, Texas Instruments Incorporated

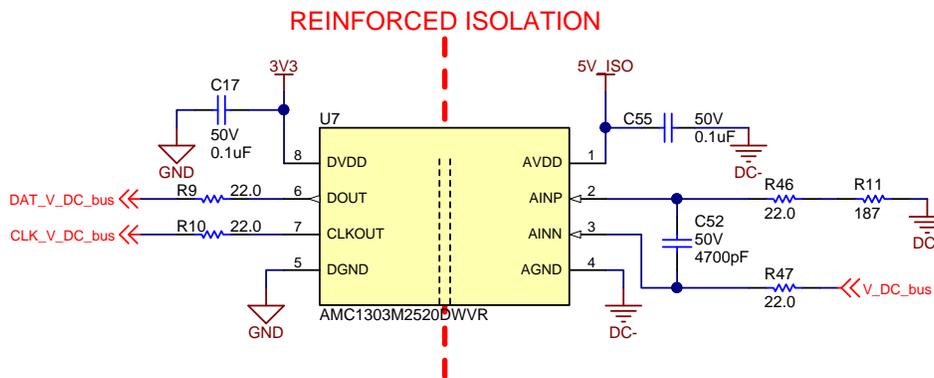
图 12. 用于缩放直流总线电压的电阻分压器网络示意图

对于过压和欠压保护以及调节 PWM 占空比以保持电机的恒定 RMS 电压，直流总线电压反馈是必需的。分压器用于将直流总线电压下变频至 Δ-Σ 调制器的输入电压范围。此参考设计使用 AMC1303M2520 版本，其线性输入电压测量范围为 ±250mV。分频器的比例因数在公式 3 中计算。

$$\text{比例因数} = \frac{R_{26}}{R_{26} + R_{13} + R_{14} + R_{16} + R_{20} + R_{22} + R_{24}} = \frac{187}{187 + 600} \text{ k} = 0.000312 \text{ V DC}_{\text{bus}} = (\text{DC}+) \times \text{比例因数} \quad (3)$$

输入范围为 ±250mV 的 Δ-Σ 调制器的 0mV 至 250mV 部分能够测量 0 至 800V，比例因数为 0.000312。电阻器 R13、R14、R16、R20、R22 和 R24 的额定电压均为 200V，最大直流总线电压为 800V 时，电阻器将降低 33%。当直流总线电压为 800V 时，每个电阻器内的最大耗散功率为 0.18W。每个电阻器的额定功率为 0.25W。

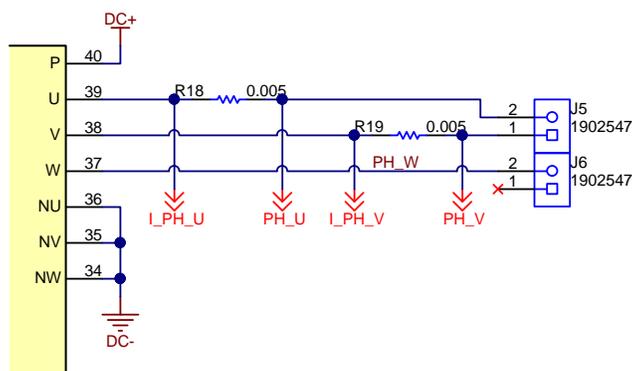
图 13 显示了用于感应调节电压的 AMC1303 电路。R46、R47 和 C52 构成差动输入滤波器。R11 用于校正流经 R26 的输入偏置电流引起的失调电压。C55 是次级侧电源噪声去耦电容器。在初级侧，C17 是噪声去耦电容器。R9 和 R10 是数据和时钟线上的终端电阻器。数据和时钟线被馈送到 C2000 MCU 的 SDFM 外设。SDFM 根据所需的精度配置了 OSR 和 SINC 滤波器顺序。



Copyright © 2018, Texas Instruments Incorporated

图 13. 使用 AMC1303M2520 的直流总线电压检测原理图

2.3.4 电机相电流检测



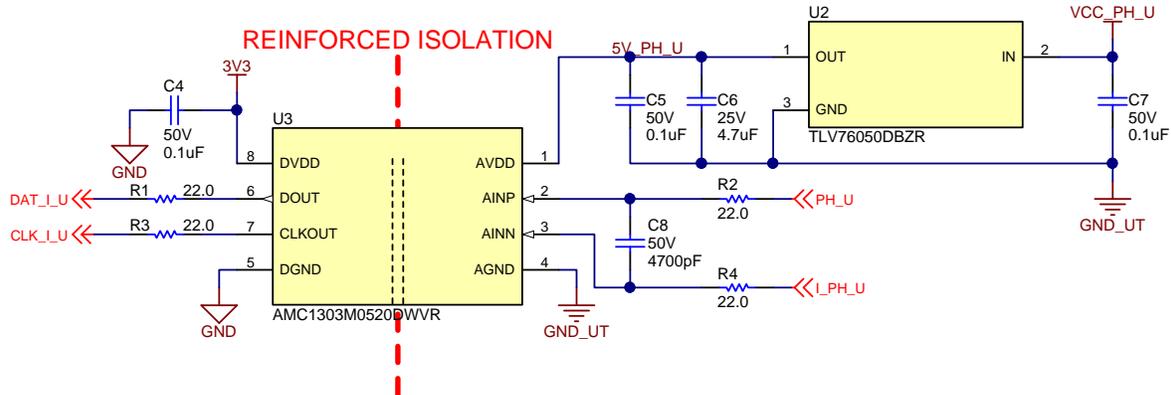
Copyright © 2018, Texas Instruments Incorporated

图 14. 用于同相电机电流测量的分流电阻器原理图

电机电流在其两相（相位 U 和 V）中感测。在平衡负载条件下，第三相电流（W 相）可以从其他两相电流导出。电流检测基于同相分流电阻器。使用 $\Delta-\Sigma$ 调制器测量电阻器压降。此参考设计使用输入电压范围为 $\pm 50\text{mV}$ 的 AMC1303M0520 器件。较小的输入电压范围支持使用较小的分流电阻器，从而降低电阻器的功耗。此参考设计的逆变器峰值输出电流额定值为 $\pm 10\text{A}_{\text{PK}}$ 。分流电阻器值可以使用公式 4 计算。选择 $5\text{m}\Omega$ 的 R18 和 1% 、 1W 的额定电阻器。 $\pm 50\text{mV}$ 输入电压是 $\Delta-\Sigma$ 调制器的指定线性差动满量程测量范围。削波输出前的峰值差动输入电压范围为 $\pm 64\text{mV}$ 。此范围可以将测量范围扩展到 $\pm 12.8\text{A}_{\text{PK}}$ ，尽管其精度低于规定值。

$$\text{分流电阻器 R18 的值} = \frac{\text{U3 输入电压范围}}{\text{要测量的电流峰值}} = \frac{50 \text{ mV}}{10 \text{ A}} = 5\text{m}\Omega \quad \text{R18 的峰值功率损耗} = 10 \times 10 \times 5\text{m}\Omega = 0.5\text{W} \quad (4)$$

图 15 显示了使用 AMC1303M0520 测量电流的电路配置。R2、R4 和 C8 构成了输入差动滤波器。此滤波器可防止输入端的高频噪声在测量的频率范围上产生混叠。R1 和 R3 是数据和时钟输出线上的终端电阻器。对于 AMC1303x 产品系列，时钟在器件内部生成。此设计使用 20MHz 时钟版。数据和时钟线连接到 C2000 MCU 的 SDFM 外设。SDFM 根据所需的精度配置了 OSR 和 SINC 滤波器顺序。



Copyright © 2018, Texas Instruments Incorporated

 图 15. 用于电流测量的 Δ - Σ 调制器电路原理图

在初级侧，DVDD 由 3.3V 电源供电。C4 是该电源噪声去耦电容器。次级侧 AVDD 由 5V 电源供电，以电流测量所在的相位开关节点为基准。对于 U 相，基准为 GND_UT，它是自举电容器 C39 的基准引脚（参见图 9）。LDO U2 将自举电容器上的 15V 电源转换为 5V。C7 是 LDO 输入电源噪声去耦电容器，C6 是 LDO 的输出电容器。C5 是 Δ - Σ 调制器电源噪声去耦电容器。

2.3.5 IPM 温度检测

本参考设计中使用的 IPM 具有模拟温度反馈信号。该信号与 IPM 内部集成的 LVIC 的温度成比例。IGBT 和续流二极管产生的热量通过模压封装以及内外部散热器传递给 LVIC。温度反应用于防止模块过热并降低逆变器的输出电流。图 16 绘制温度与反馈信号幅度的关系曲线。

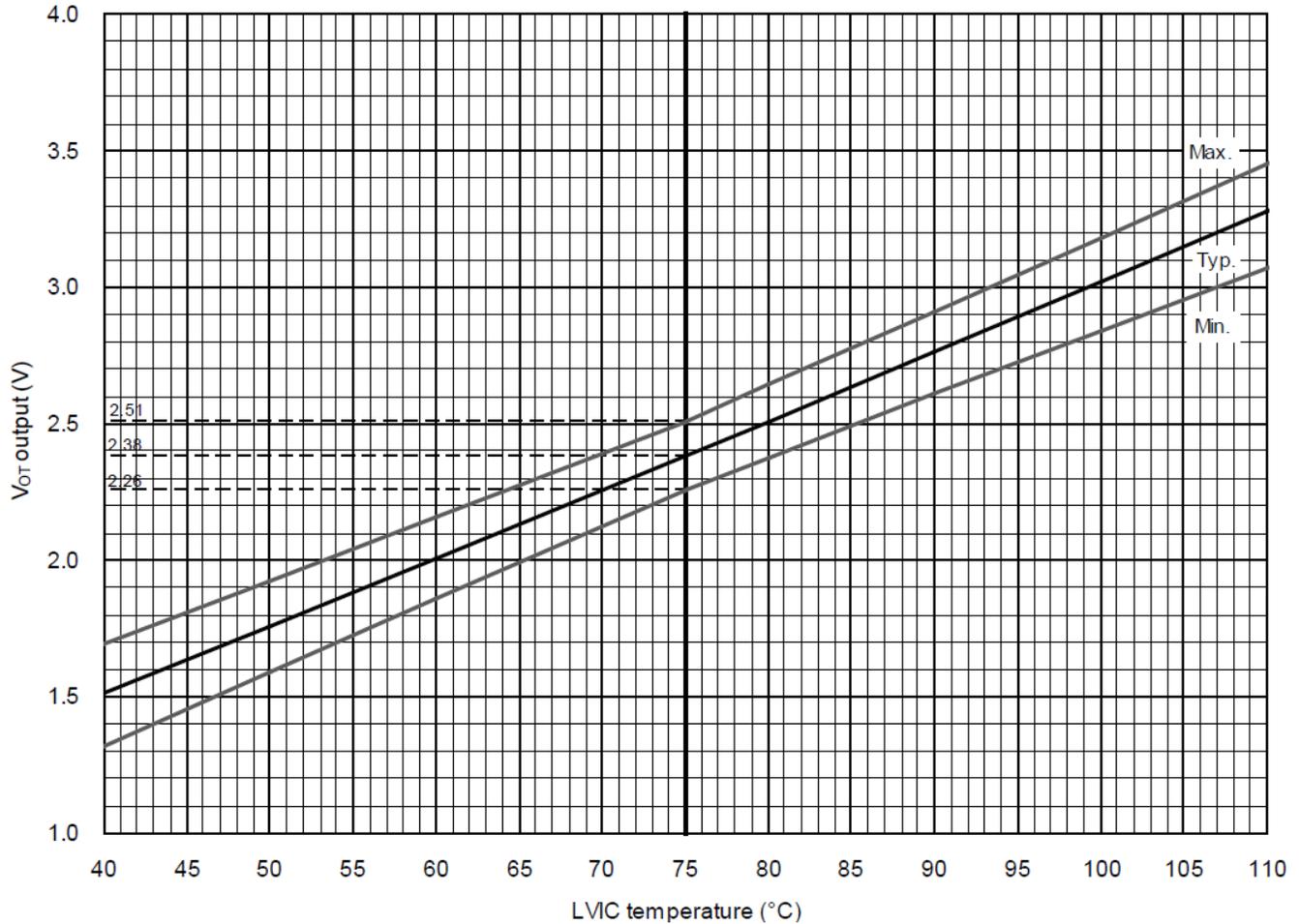
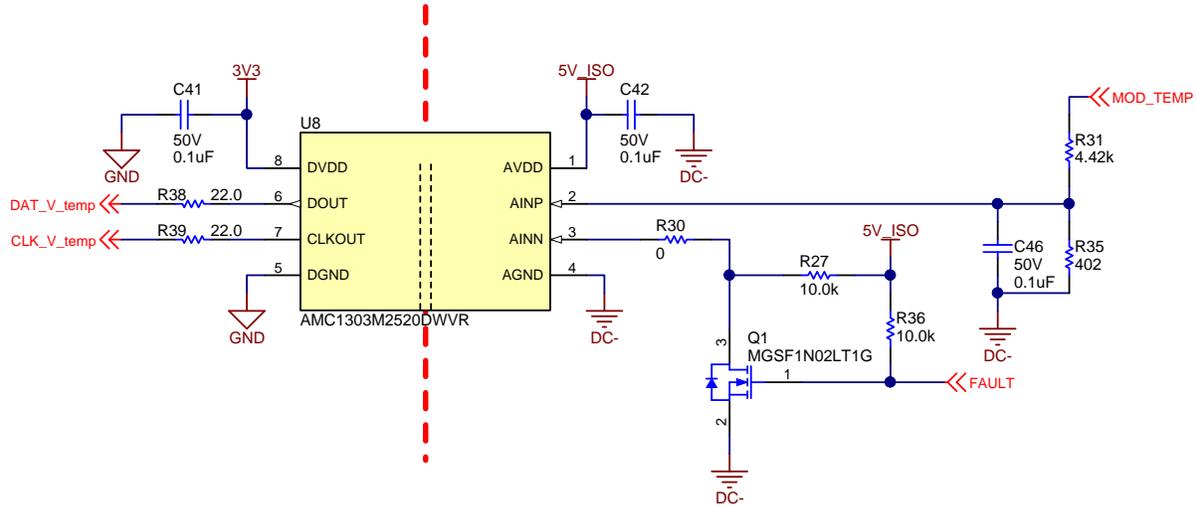


图 16. LVIC 的温度与 V_{OT} 输出特征

AMC1303M2520 用于温度检测。IPM 的 V_{OT}（温度检测）输出可以调节到 250mV，这是使用分压器网络（包括 R35 和 R31）调制器的特定线性正满量程。比例因数被设置为 0.0834，这意味着调制器的 250mV 输入电压对应于 3V 的 V_{OT} 输出电压。从图 16 来看，这对应 100°C 这一温度读数。

调制器的次级侧由 5V 电源供电。C42 是该电源噪声去耦电容器。初级侧由 3.3V 电源轨供电，C41 是去耦电容器。R38 和 R39 是调制器数据和时钟输出使用的终端电阻器。调制器生成频率为 20MHz 的时钟信号。



Copyright © 2018, Texas Instruments Incorporated

图 17. 温度测量电路的原理图

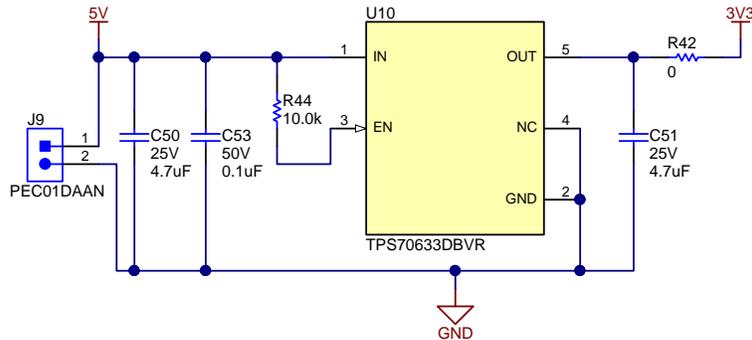
2.3.6 IPM 故障信号反馈

本参考设计中使用的 IPM 具有集成的诊断特性，可以检测低侧 IGBT 的短路和控制电源是否欠压。IPM 的 Fo（故障）引脚采用开漏结构。如果发生短路，Fo 引脚将在公式 1 指定的时间段内拉低。在发生 UVLO 事件的情况下，Fo 引脚将保持持续低电平。需要一个单独的单通道隔离器将此信号传输到 MCU。在此参考设计中，故障信号与温度检测信号复用以节省数字隔离器通道。

如图 17 所示，MOSFET Q1 将温度传感调制器的 AINN 引脚连接到直流电负极。故障信号采用开漏结构，是低电平有效信号。在默认状态下，Q1 的栅极通过 R36 上拉至 5V，从而导通 Q1，将 AINN 连接至直流电负极。调制器可以正常测量温度信号。当故障信号被触发时，Q1 的栅极被拉低，这会关断 Q1，AINN 引脚将通过 R27 连接到 5V。这会导致差动输入电压 (Ainp - AinN) 超过调制器负满量程测量范围，强制输出持续为零，并且每 128 位切换一次位（请参见 AMC1303x 产品说明书满量程输入部分的输出行为）。控制器可以从发生故障的比特流解码。

2.3.7 电源轨

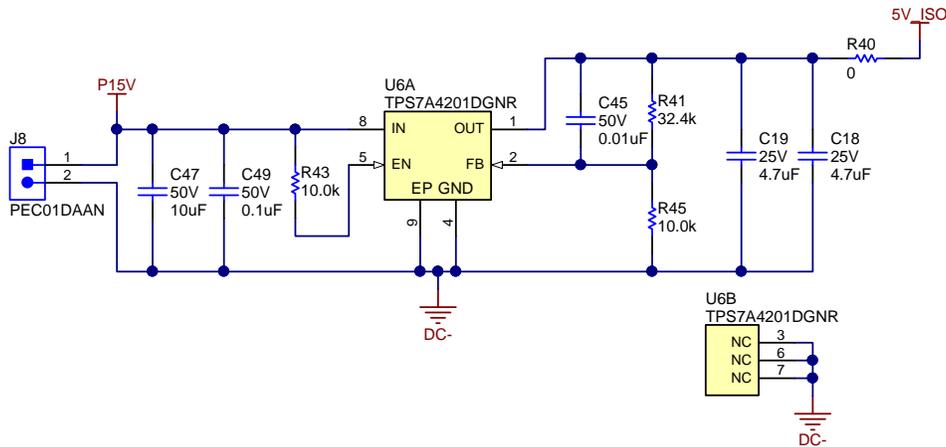
此参考设计使用四个主电源轨。5V 电源轨通过 J9 输入到初级低压控制侧。此电源轨为 C2000 MCU 控制卡供电。TPS70633 LDO 从 5V 电源轨生成 3.3V 电源轨。3.3V 电源轨为数字隔离器的初级侧电源、 Δ - Σ 调制器和附加互锁卡供电。C50 是输入大容量电容器，C53 是 LDO U10 的噪声去耦电容器。使能引脚通过 R44 上拉至 5V。在此设计中，LDO 始终保持导通。C51 是 LDO 的输出电容器。



Copyright © 2018, Texas Instruments Incorporated

图 18. 使用 TPS70633 进行 5V 至 3.3V 的转换

次级高压侧上的 15V 电源轨通过连接器 J8 供电。此电源轨为 IPM 控制电路供电。该电源轨必须加强与初级侧电源的隔离。TPS7A4201 LDO 从 15V 生成 5V。C47 是输入大容量电容器，C49 是电源噪声去耦电容器。使能引脚通过 R43 拉至 15V。在此设计中，LDO 始终保持导通。C19 和 C18 是输出电容器。R41 和 R45 构成反馈网络，将输出电压设置为 5V。器件封装的焊盘连接到直流电负极平面，这进一步提高了封装的散热性能。



Copyright © 2018, Texas Instruments Incorporated

图 19. 使用 TPS7A4201 进行 15V 至 5V 的转换

3 硬件和软件测试要求和测试结果

3.1 需要的硬件和软件

3.1.1 硬件

图 20 显示了 PCB 的俯视图。J4 连接直流总线电压，J5 和 J6 连接三个电机相位端子。5V 电源连接到 J9。此电源为控制卡和控制端电路供电。增强型隔离式 15V 电源连接到 J8。此电源为 IPM 控制电路供电。在需要电机轴位反馈的情况下，J3 可以连接外部数字编码器。J7 连接一个可选的 PWM 互锁附加卡。如果不使用此卡，则插头引脚将通过短接跳线连接到一起，如图 20 所示。双列直插式连接器插座用于 180 引脚 C2000 MCU 控制卡。双核 Delfino™F28379D 控制卡用于测试此参考设计。

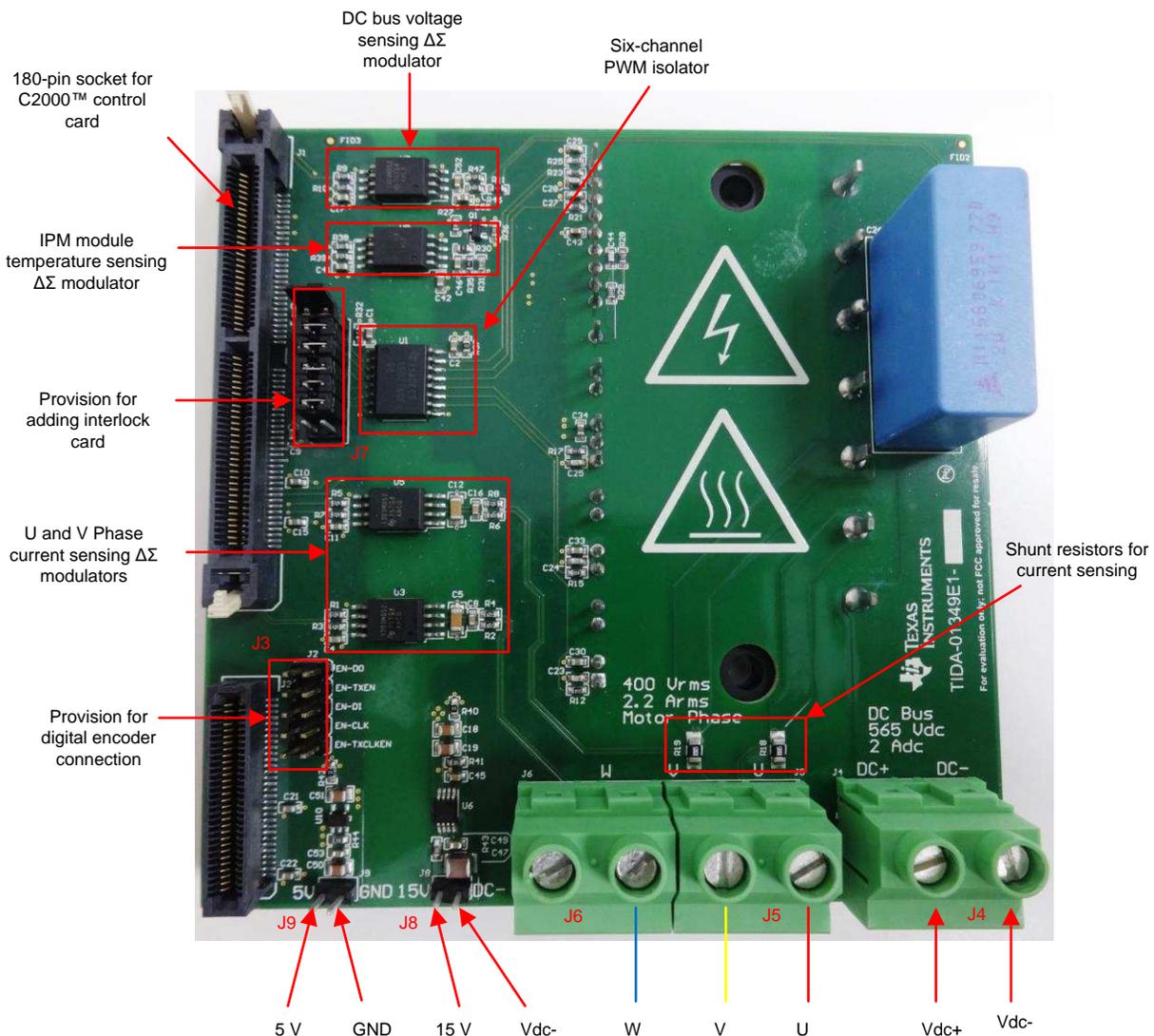


图 20. TIDA-01349 PCB 俯视图

图 21 显示了中间带有增强型隔离栅的高压逆变器侧和低压控制器侧。隔离栅的爬电距离和间隙距离至少为 8 毫米。用于 PWM 信号的宽体数字隔离器以及用于电流、电压和温度反馈信号的隔离式 $\Delta\Sigma$ 调制器放置在隔离栅上。

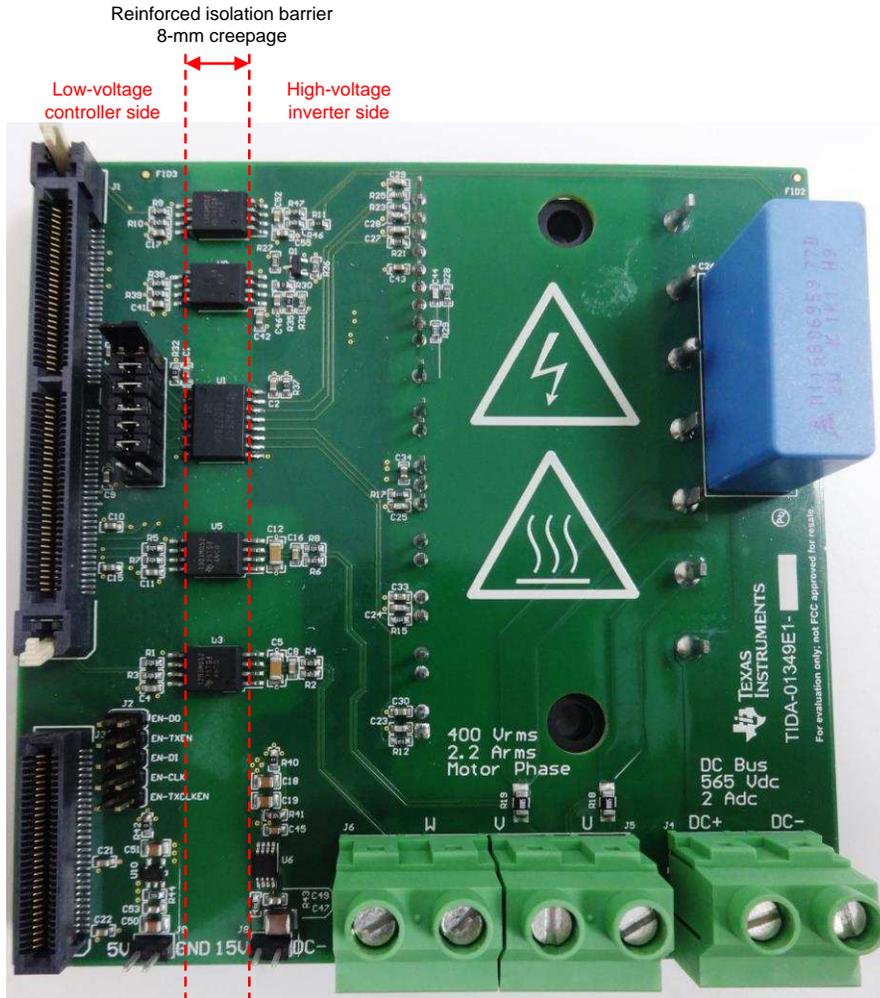


图 21. 高压逆变器侧、控制侧和增强型隔离栅

图 22 显示了 PCB 的底部视图。IPM 的金属焊盘必须连接到散热器。在 IPM 金属焊盘与散热器表面之间使用导热散热器混合物以减少接触表面处的气隙。然后将模块拧紧在散热器上，如图 23 所示。根据消耗的最大持续功率选择合适的散热器。

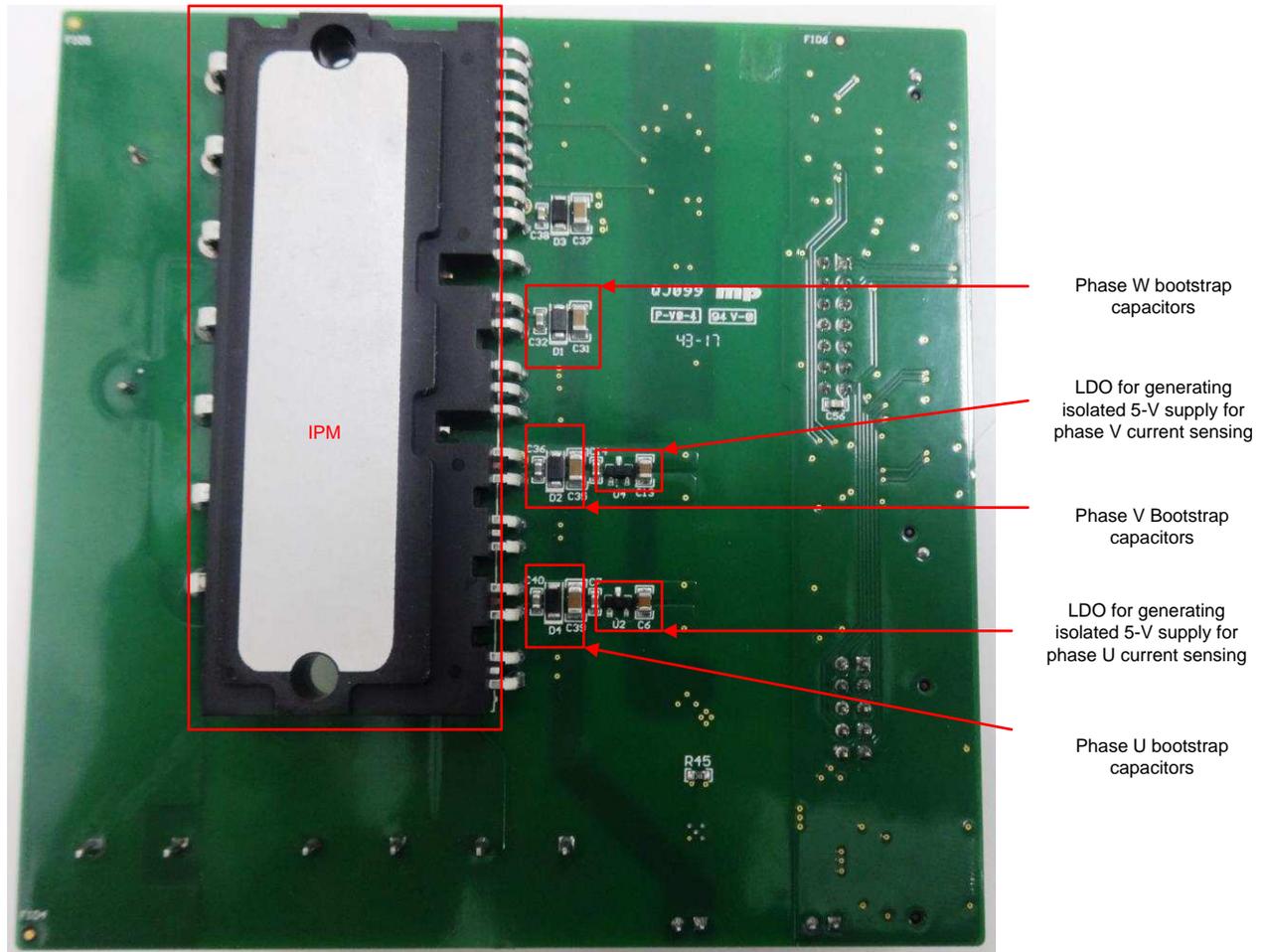


图 22. TIDA-01349 的底部视图

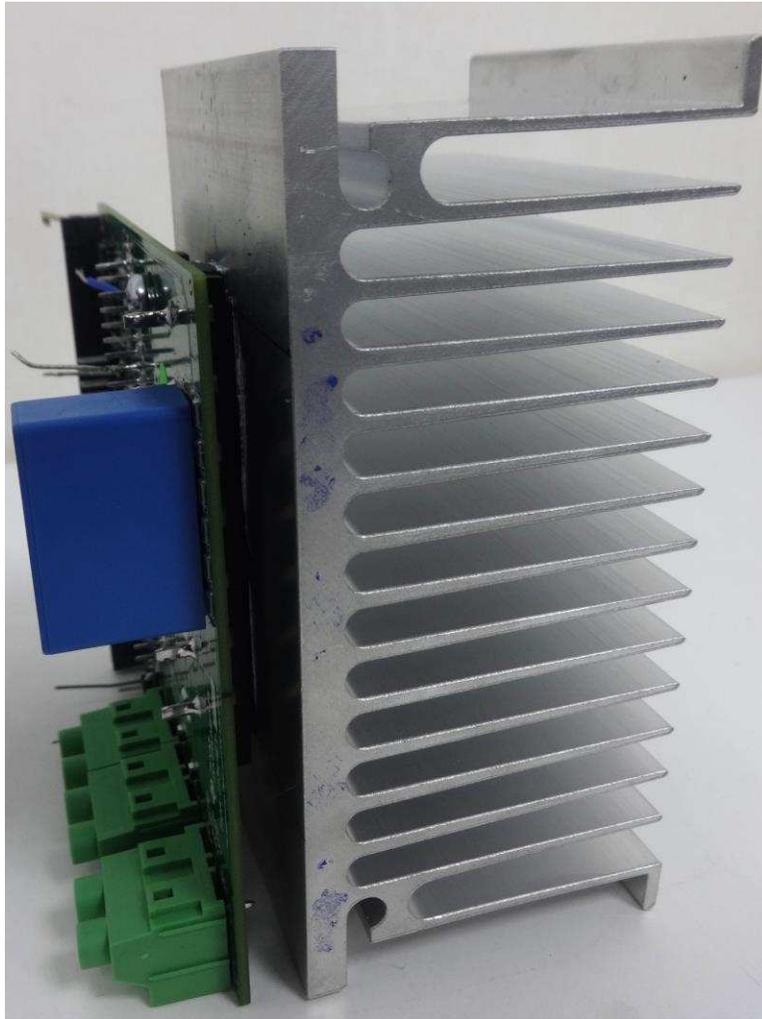


图 23. 散热器 IPM 接口

3.1.2 控制器接口插座

180 引脚控制卡安装在双列直插式插座 J1 和 J3 中，如图 24 所示。表 2 描述了此 PCB 上使用的引脚功能。

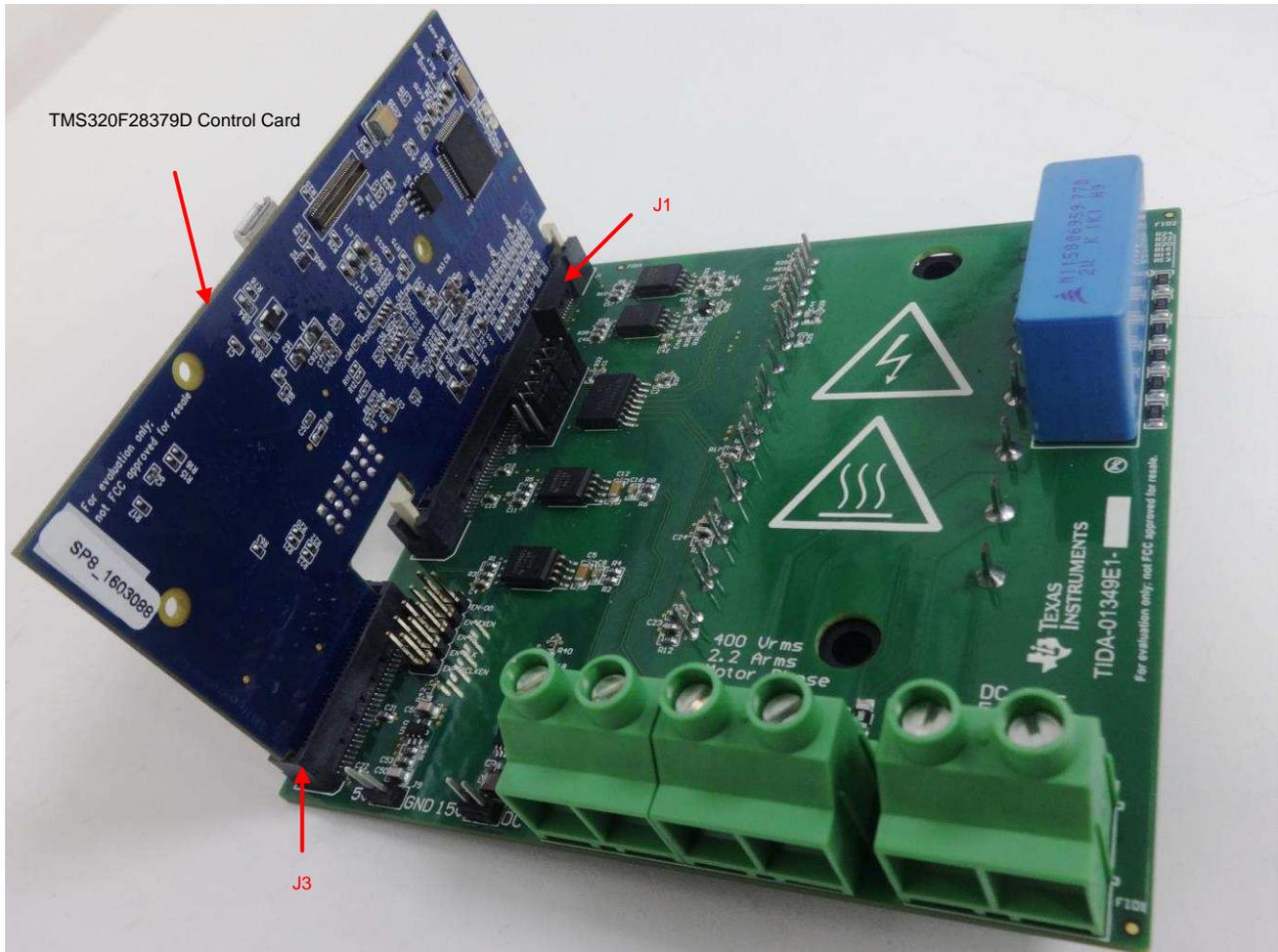


图 24. 控制卡连接到 TIDA-01349

表 2. TIDA-01349 控制卡接口

TIDA-01349 引脚排列	C2000 控制卡引脚排列	引脚编号	C2000 控制卡引脚排列	TIDA-01349 引脚排列
	JTAG-EMU1	1	2	JTAG-EMU0
	JTAG_TMS	3	4	JTAG-TRSTN
	JTAG_TCK	5	6	JTAG-TDO
GND	GND	7	8	JTAG-TDI
	ADC1 (和/或 DACA)	9	10	GND
	ADC1 (和/或 DACB)	11	12	ADC2
GND	GND	13	14	ADC2
	ADC1 (和/或 CMPIN+)	15	16	GND
	ADC1	17	18	ADC2
GND	GND	19	20	ADC2
	ADC1 (和/或 CMPIN+)	21	22	GND
	ADC1	23	24	ADC2

表 2. TIDA-01349 控制卡接口 (continued)

TIDA-01349 引脚排列	C2000 控制卡引脚排列	引脚编号		C2000 控制卡引脚排列	TIDA-01349 引脚排列
	ADC (和/或 CMPIN+)	25	26	ADC2	
	ADC	27	28	ADC	
GND	GND	29	30	ADC	
	ADC	31	32	Rsv	
	ADC	33	34	ADC	
GND	GND	35	36	ADC	
	ADC	37	38	GND	GND
	ADC	39	40	ADC	
	Rsv	41	42	ADC	
	特定 MCU 上的 VREFLO	43	44	Rsv	
	特定 MCU 上的 VREFHI	45	46	GND	GND
	GND	47	48	5V0	5V
PWM_W_T	PWM1A	49	50	PWM3A	PWM_U_T
PWM_W_B	PWM1B	51	52	PWM3B	PWM_U_B
PWM_V_T	PWM2A	53	54	PWM4A	EN-CLK
PWM_V_B	PWM2B	55	56	PWM4B	
	PWM5A	57	58	PWM7A 或 TZ1	
	PWM5B	59	60	PWM7B 或 TZ2	
	PWM6A	61	62	PWM8A 或 TZ3	
	PWM6B	63	64	PWM8B 或 TZ4	
GND	GND	65	66	Rsv	
	SPISIMOA	67	68	QEP1A (McBSP-MDXA)	
	SPISOMIA	69	70	QEP1B (McBSP-MDRA)	
	SPICLKA	71	72	QEP1S (McBSP-MFSXA)	
	SPISTEA	73	74	QEP1I (McBSP-MCLKXA)	
EN-DO	CAP1 或 SPISIMOB	75	76	SCIRXA/UARTRXA	
EN-DI	CAP2 或 SPISOMIB	77	78	SCITXA/UARTTXA	
	CAP3 或 SPICLKB	79	80	CANRXA	
	CAP4 或 SPISTEB	81	82	CANTXA	
GND	GND	83	84	5V0	5V
	I2CSDAA	85	86	GPIO	EN-TXEN
	I2CSCLA	87	88	GPIO	
	GPIO	89	90	GPIO	EN-TXCLKEN
	GPIO	91	92	GPIO	
	GPIO	93	94	GPIO	
	GPIO	95	96	GPIO	
GND	GND	97	98	5V0	5V
DAT_I_V	SD-D1	99	100	QEP2A 或 GPIO	DAT_V_TEMP
CLK_I_V	SD-C1	101	102	QEP2B 或 GPIO	CLK_V_TEMP
DAT_I_U	SD-D2	103	104	QEP2S 或 GPIO	
CLK_I_U	SD-C2	105	106	QEP2I 或 GPIO	
DAT_V_DC_bus	SD-D3	107	108	GPIO (McBSP-MCLKRA)	
CLK_V_DC_bus	SD-C3	109	110	GPIO (McBSP-MFSRA)	
GND	GND	111	112	5V0	5V
	Rsv	113	114	Rsv	
	Rsv	115	116	Rsv	
	Rsv	117	118	Rsv	

表 2. TIDA-01349 控制卡接口 (continued)

TIDA-01349 引脚排列	C2000 控制卡引脚排列	引脚编号		C2000 控制卡引脚排列	TIDA-01349 引脚排列
	Rsv	119	120	器件复位 (低电平有效)	
	GPIO	121	122	GPIO	
	GPIO	123	124	GPIO	
	GPIO	125	126	GPIO	
	GPIO	127	128	GPIO	
	GPIO	129	130	GPIO	
	GPIO	131	132	GPIO	
	GPIO	133	134	GPIO	
GND	GND	135	136	Rsv	
	GPIO	137	138	Rsv	
	GPIO	139	140	Rsv	
	GPIO	141	142	Rsv	
	GPIO	143	144	Rsv	
	GPIO	145	146	Rsv	
	GPIO	147	148	Rsv	
	GPIO	149	150	Rsv	
	GPIO	151	152	Rsv	
	GPIO	153	154	Rsv	
	GPIO	155	156	Rsv	
GND	GND	157	158	5V0	5V
	GPIO	159	160	GPIO	
	GPIO	161	162	GPIO	
	GPIO	163	164	GPIO	
	GPIO	165	166	GPIO	
	GPIO	167	168	GPIO	
	GPIO	169	170	GPIO	
	Rsv	171	172	Rsv	
	Rsv	173	174	Rsv	
	Rsv	175	176	Rsv	
	Rsv	177	178	Rsv	
GND	GND	179	180	5V0	5V

3.1.3 软件

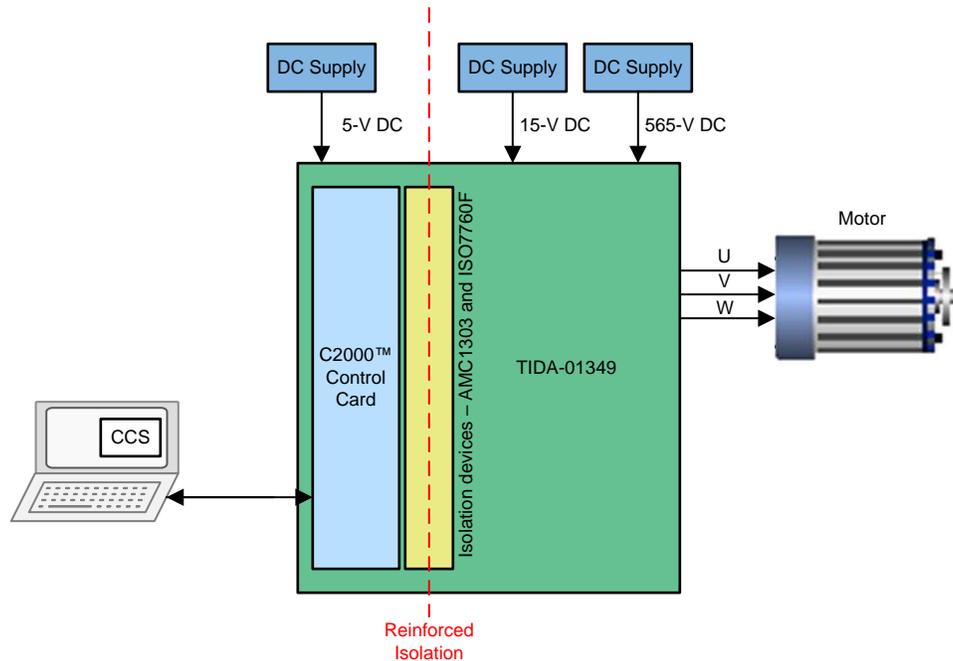
此参考设计使用根据应用报告《使用 TMS320F2837x 实现三相永磁同步电机配有传感器的场定向控制》修改的软件进行测试。增量生成级别 2 用作基准。该软件可以在 ControlSUITE™ 中找到。有关 controlSUITE 问题，请访问 E2E 论坛：<https://e2e.ti.com/support/microcontrollers/c2000/>

3.2 测试和结果

测试的重点是利用 ISO7760 隔离器对基于 IPM 的三相逆变器的 PWM 隔离子系统的功能和性能进行评估。

3.2.1 测试设置

图 25 显示用于描述参考设计特征的测试设置。F28379D 180 引脚控制卡安装在参考设计板的插座上。外部直流电源为初级侧 5V 电源轨和次级侧 15V 电源轨供电。这两个电源彼此之间必须加强隔离。外部高压直流电源连接到逆变器直流总线上。此参考设计的上电顺序为 5V、15V，然后是直流总线电压；关机顺序是相反的。控制器通过 USB 连接到笔记本电脑，可在 Code Composer Studio™(CCS) 中运行电机控制软件。



Copyright © 2018, Texas Instruments Incorporated

图 25. 测试设置

3.2.2 测试结果

3.2.2.1 PWM 传播延时和通道至通道传播延时匹配

ISO7760F 具有 11ns（典型值）传播延时以及小于 4ns 的通道至通道输出偏斜。根据图 26 中所所示的惯例测量传播延时。低 PWM 传播延时可缩短死区时间并减少相电压失真。

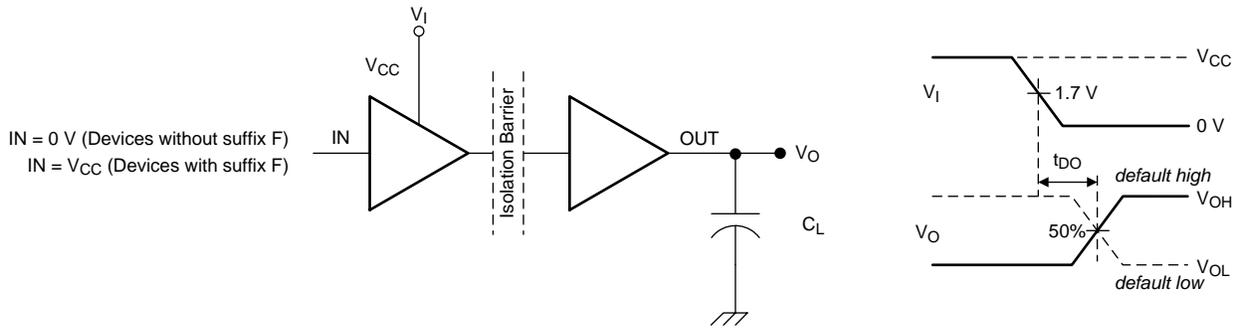


图 26. 传播延时测量惯例

传播延时波形在参考设计上捕获。图 27 至图 31 显示相位 U 顶部通道的输入和输出 PWM 信号。此测试使用 8kHz 的 PWM 开关频率和 50% 占空比。请注意，本节中的所有波形均通过 IPM PWM 输入负载捕获。

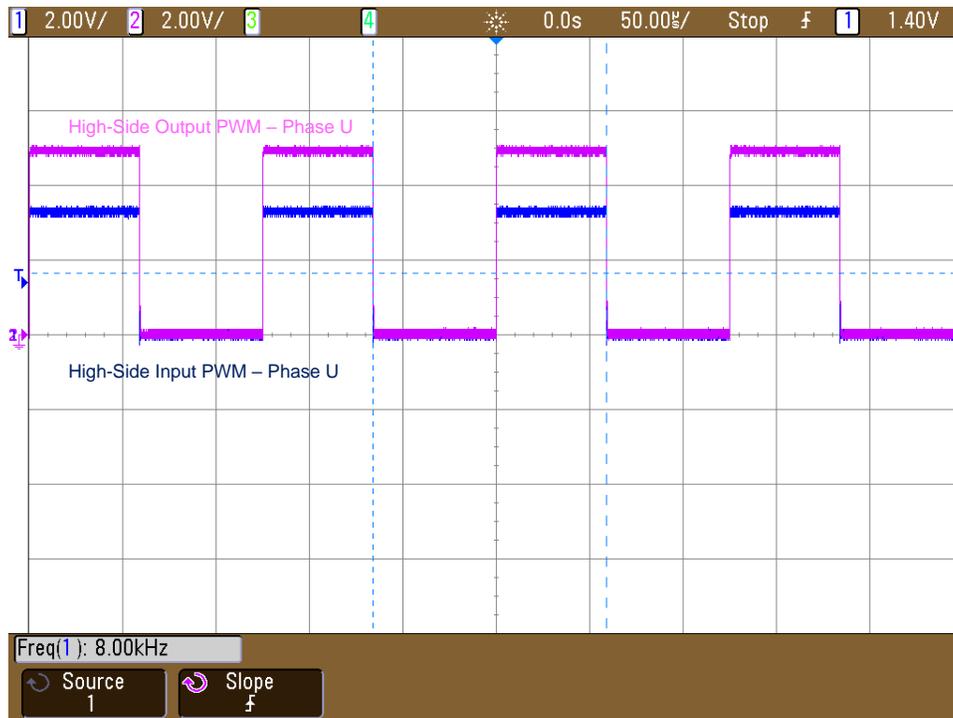


图 27. ISO7760F 输入和输出 PWM 波形

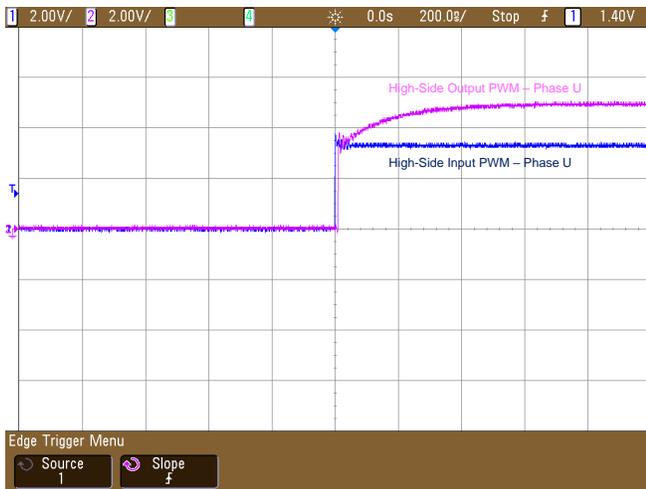


图 28. PWM 信号 - 传播延时上升沿



图 29. PWM 信号缩放上升沿 (测量值为 11ns)

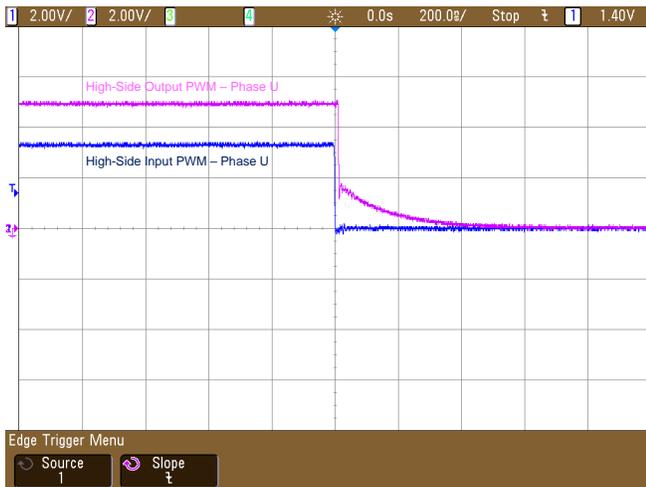


图 30. PWM 信号 - 传播延时下降沿

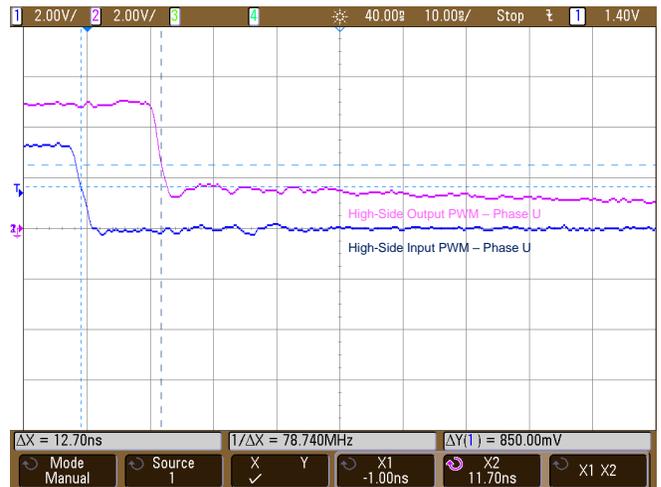


图 31. PWM 信号缩放下落沿 (测量值为 12.7ns)

图 32 至图 35 显示参考设计中 ISO7760F 的通道至通道传播延时差。此测试使用占空比为 50% 的 8kHz PWM 信号。所有高侧和低侧开关均提供相同的 PWM 信号。逆变器的直流总线没有通电。

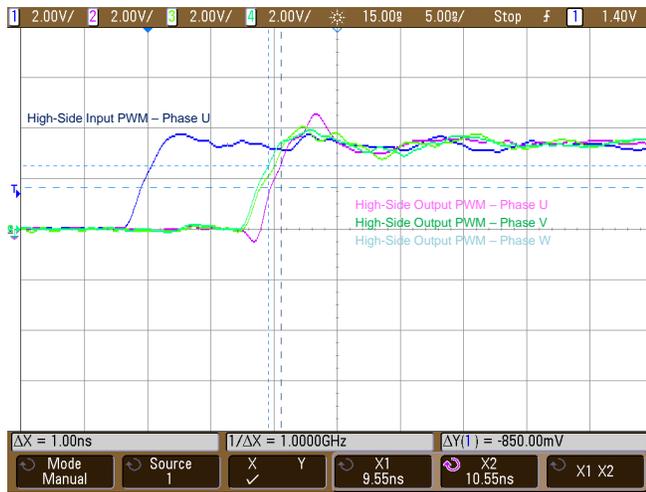


图 32. 高侧 PWM 传播延时差 - 上升沿 (测量值为 1ns)

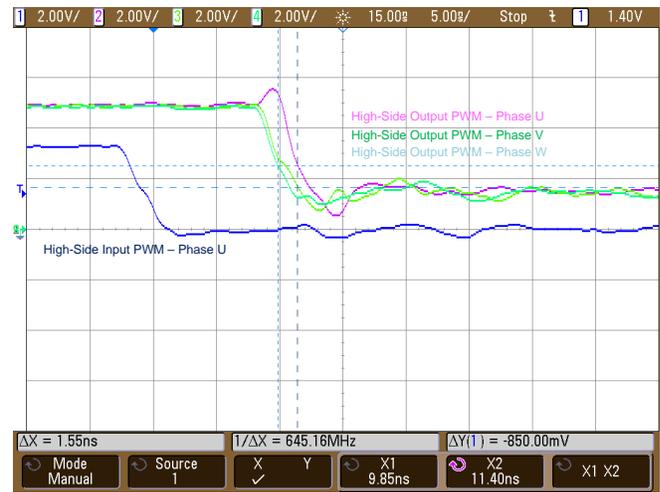


图 33. 高侧 PWM 传播延时差 - 下降沿 (测量值为 1.55ns)

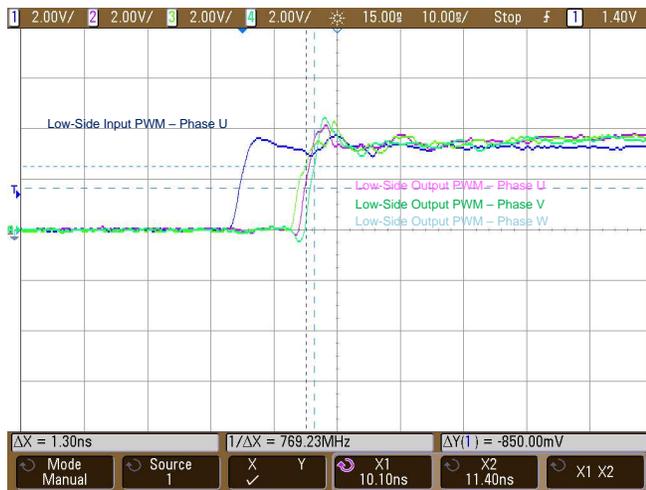


图 34. 低侧 PWM 传播延时差 - 上升沿 (测量值为 1.3ns)

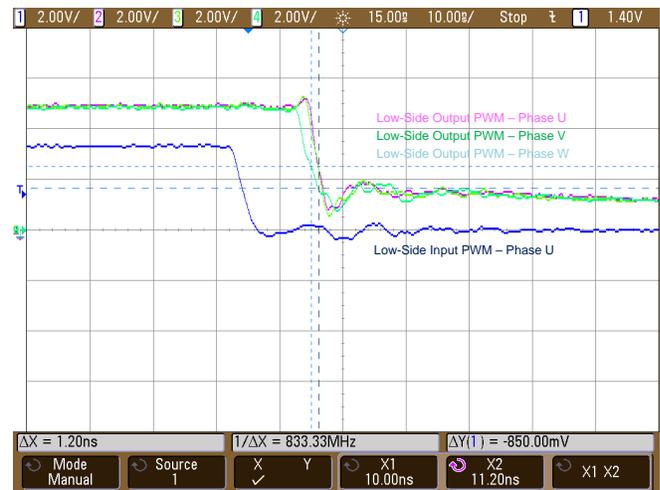


图 35. 低侧 PWM 传播延时差 - 下降沿 (测量值为 1.2ns)

3.2.2.2 PWM 隔离器的热像图

图 36 和图 37 显示了开关频率为 2kHz 和 20kHz PWM 的次级侧隔离器电源的电流波形。关于这次测试，所有高侧和低侧 PWM 信号都在占空比为 50% 的条件下设置。

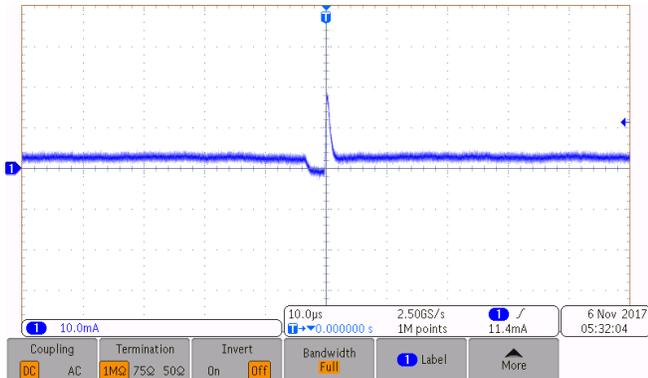


图 36. 2kHz PWM 时的 Icc2

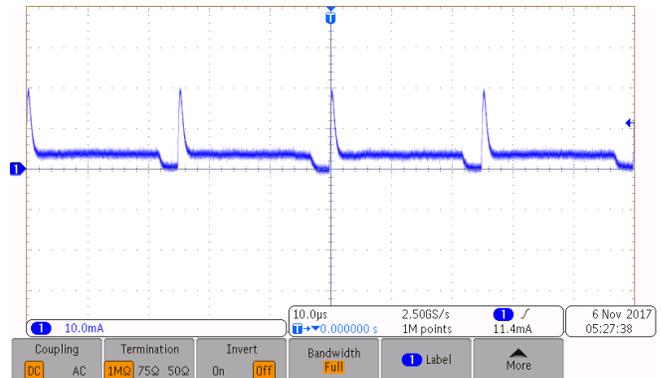


图 37. 20kHz PWM 时的 Icc2

对于热图捕获，因为受到此参考设计中所用 IPM 的限制，在最大 20kHz 开关频率下设置 PWM 信号。此测试使用 50% 占空比。图 38 显示 30 分钟后 ISO7760F 器件的温度。对于此测试，直流总线电压未通电，仅捕获 ISO7760F 由于自身发热而导致的温升。

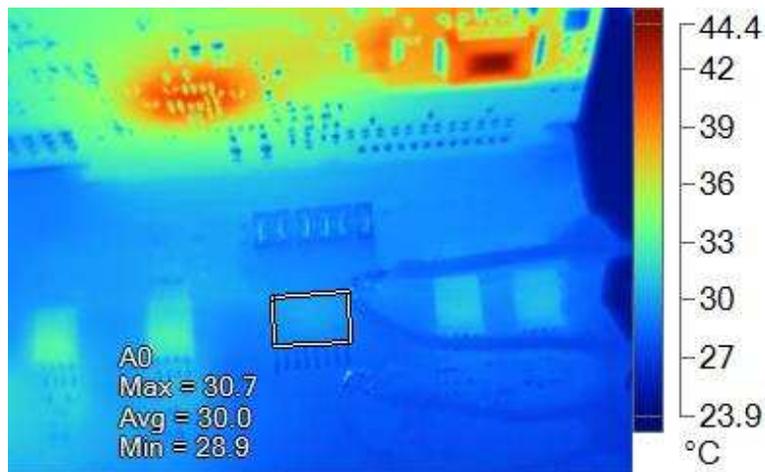


图 38. 30 分钟后 ISO7760F 的温升

3.2.2.3 IPM 输入 PWM 和开关节点波形

本节介绍了逆变器的功能。直流总线电压通过 565V 直流电源供电，相当于 400V 交流电网电压。相 U 的逆变器开关节点的电压和相应的 PWM 信号在不同的开关条件下被捕获。逆变器在 8kHz 开关频率下运行，死区时间设为 3.2μs。如果电机电流离开开关节点，则电机电流为正；如果电机电流进入开关节点，则电流为负。

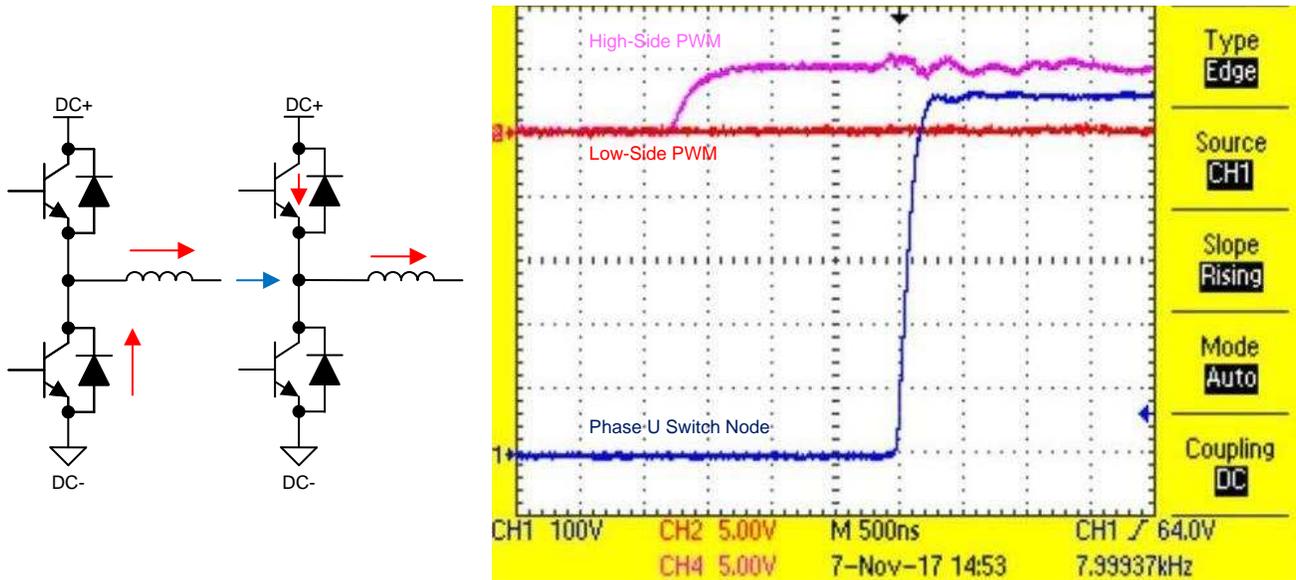


图 39. 硬开关打开 - 以 5A 电机电流捕获高侧 IGBT

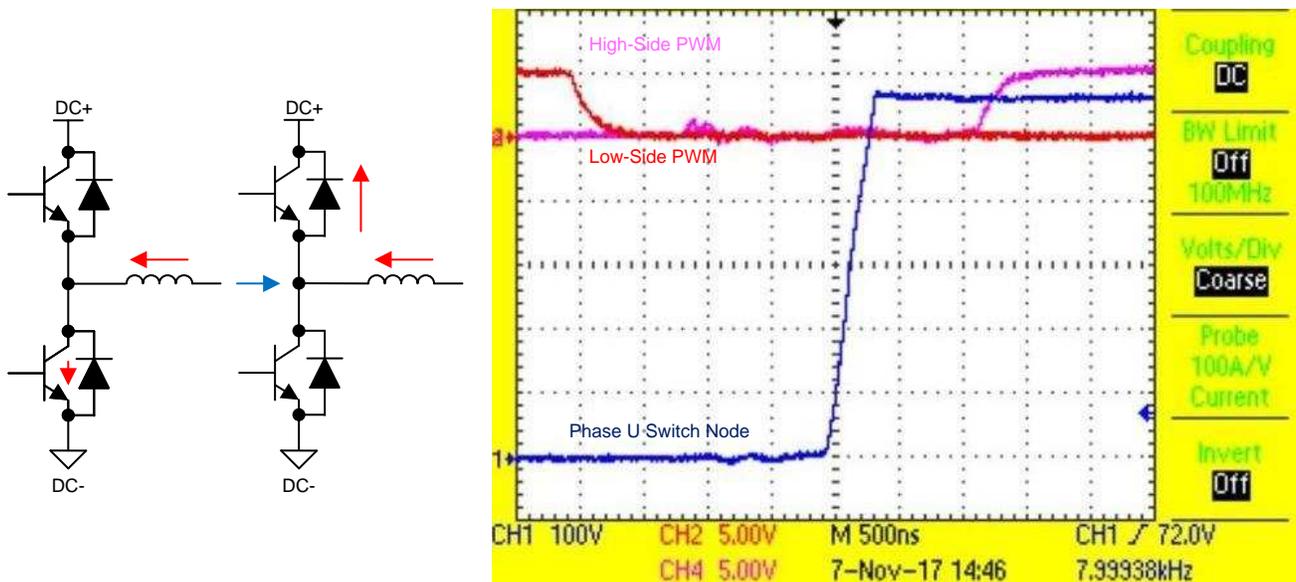


图 40. 软开关打开 - 以 -5A 电机电流捕获高侧 IGBT

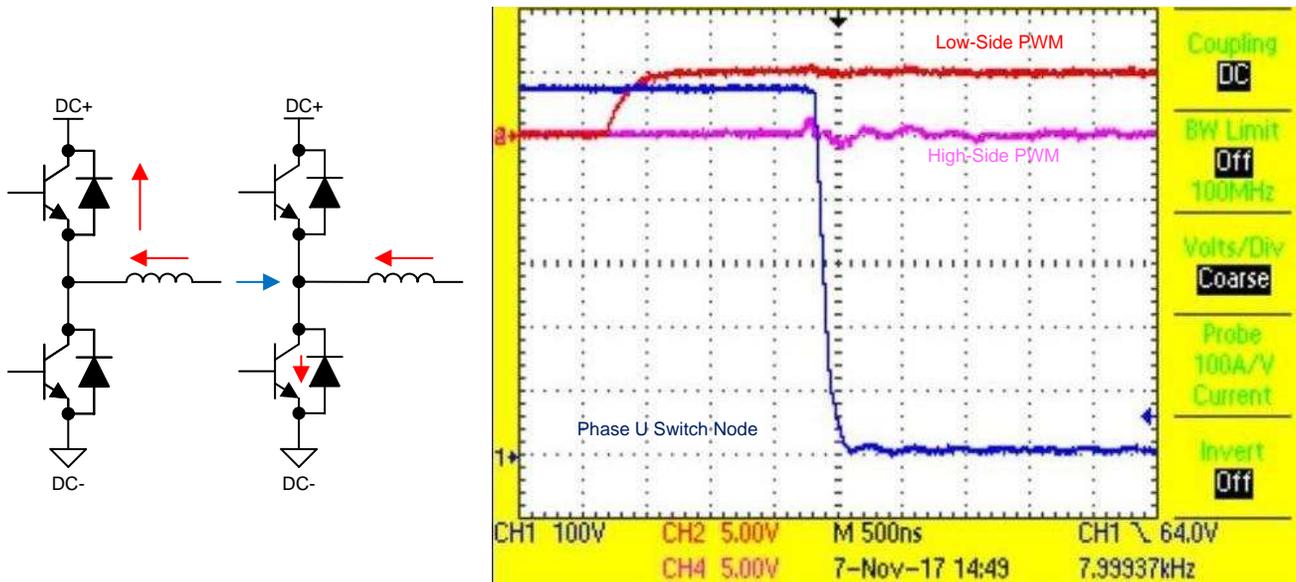


图 41. 硬开关打开 - 以 -5A 电机电流捕获低侧 IGBT

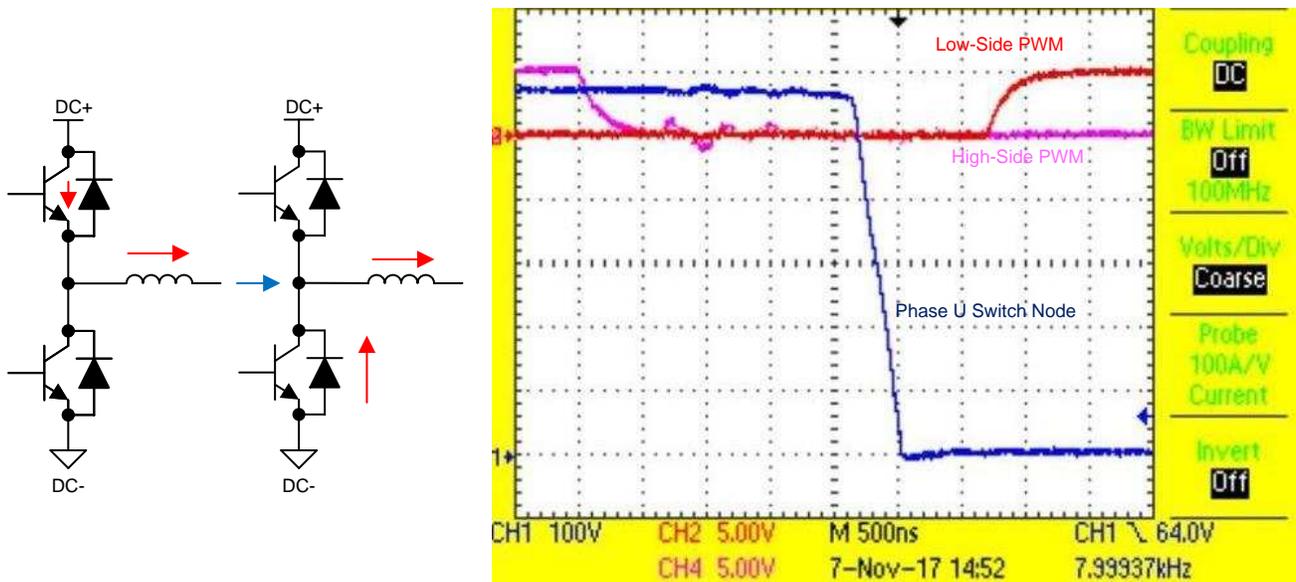


图 42. 软开关打开 - 以 5A 电机电流捕获低侧 IGBT

3.2.2.4 使用可选的附加卡进行 PWM 互锁

本节介绍了附加互锁卡的功能。若要测试该卡，使用 8kHz 的 PWM 信号和 3.2μs 的死区时间。死区时间有意为负，以使高侧和低侧 PWM 信号重叠并显示互锁功能。

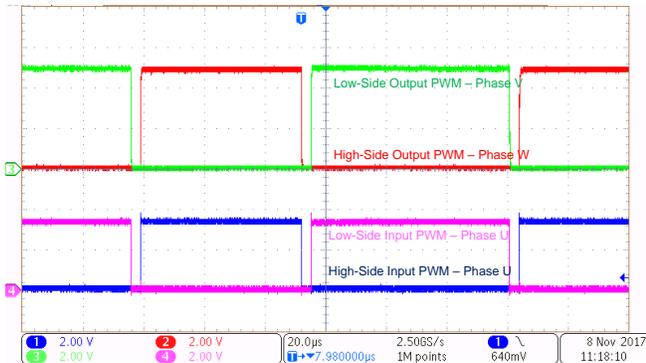


图 43. 高侧和低侧 PWM 信号正常工作 (U 相)

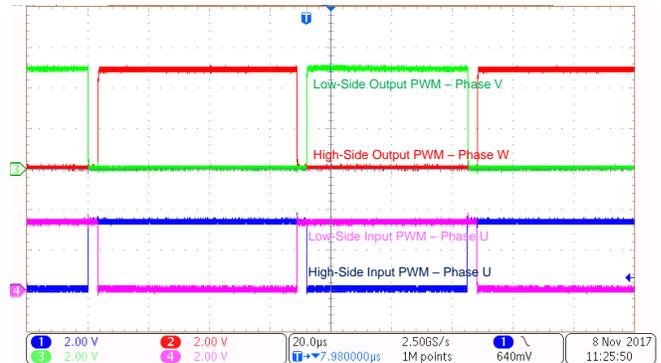


图 44. 有意引入负死区时间故障以检查联锁功能 (U 相)

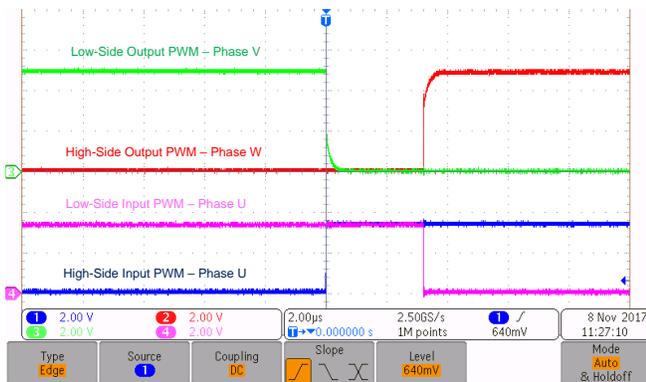


图 45. PWM 信号互锁上升沿 (U 相)

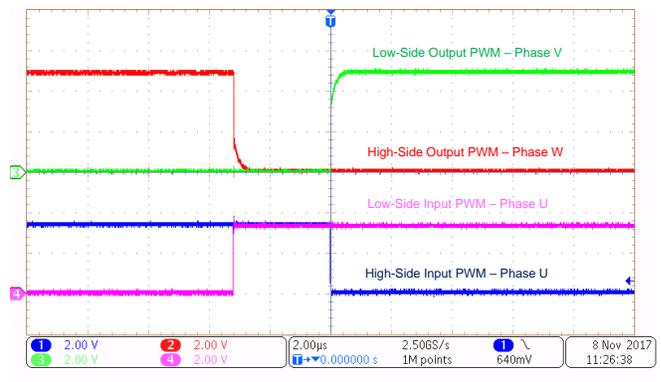


图 46. PWM 信号互锁下降沿 (U 相)

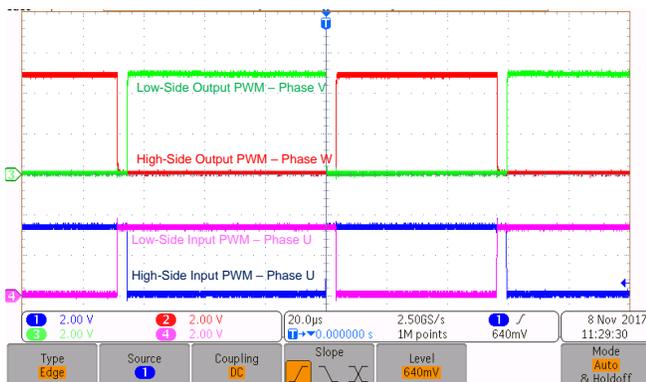


图 47. 互锁 (V 相)

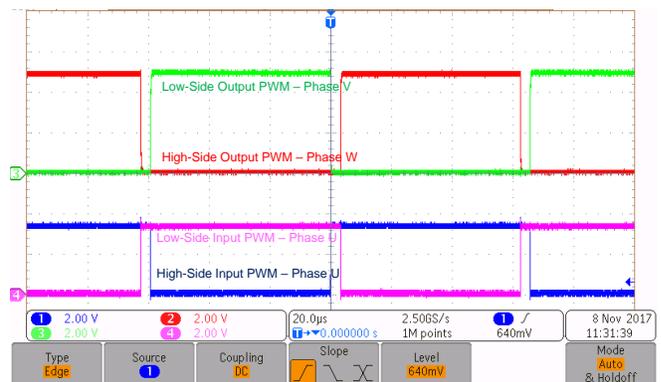


图 48. 互锁 (W 相)

3.2.2.5 电机电源接口上的 EFT

本节介绍了 ISO7760F 相对外部 EFT 事件的稳健性。如图 49 所示，不同振幅和极性的 EFT 脉冲施加在三相逆变器和电机之间的电源接口电缆上。测试根据 IEC 61800-3 进行，该标准参考用于 EFT 测试的 IEC 61000-4-4。

图 49 至图 52 显示 EFT 测试的设置。电源电缆通过一个 1 米的电容耦合钳位，通过该钳位 EFT 注入电缆。从电容钳位到逆变器的电缆长度为 1 米。逆变器和电机放置在距离工作台基准 10 厘米高的木制平台上。电缆屏蔽使用铜带连接到工作台基准。这种连接与驱动系统中的电缆密封套或套环接地效果相同。散热器和初级侧接地装置也连接到工作台基准。

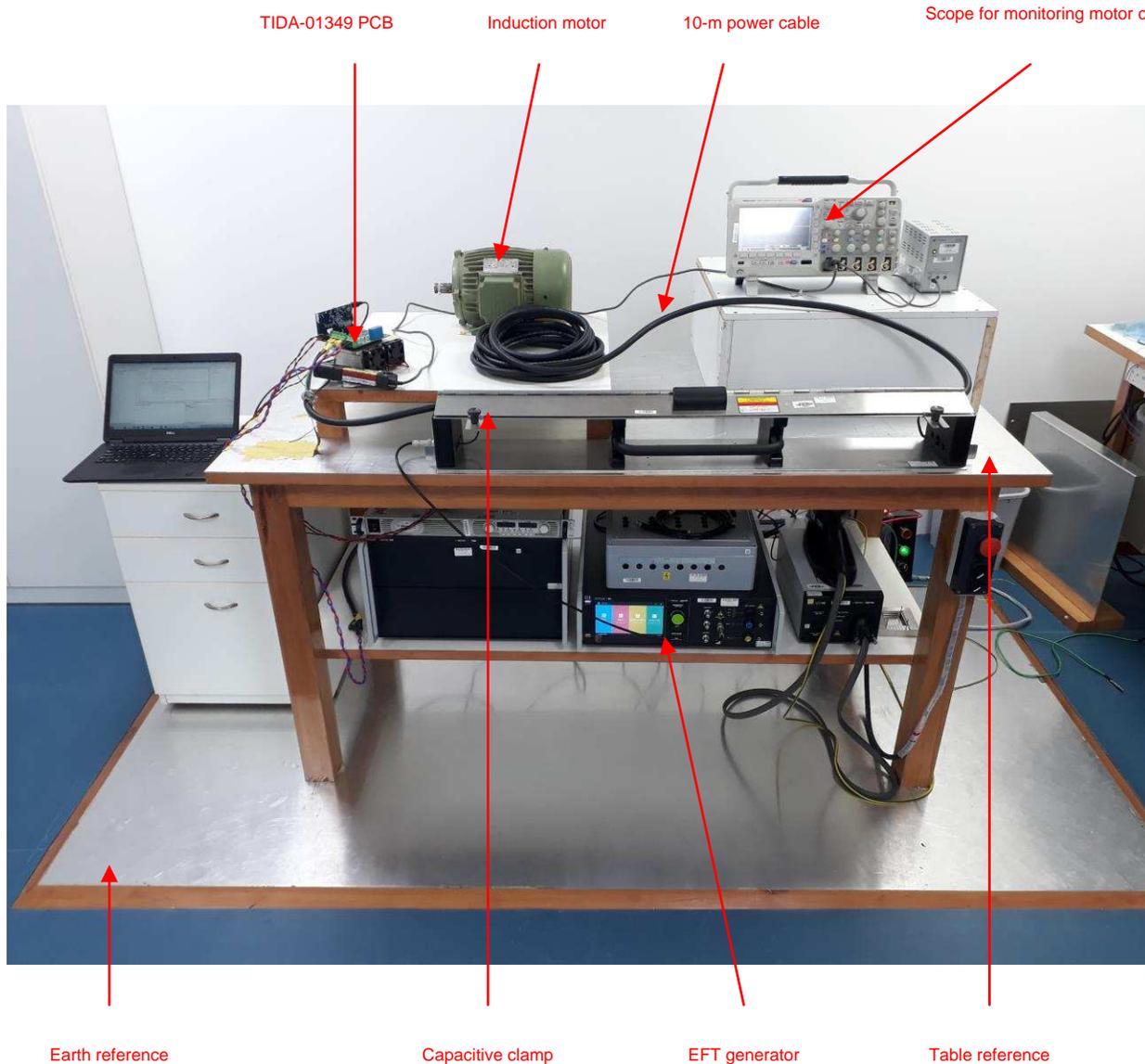


图 49. EFT 测试设置

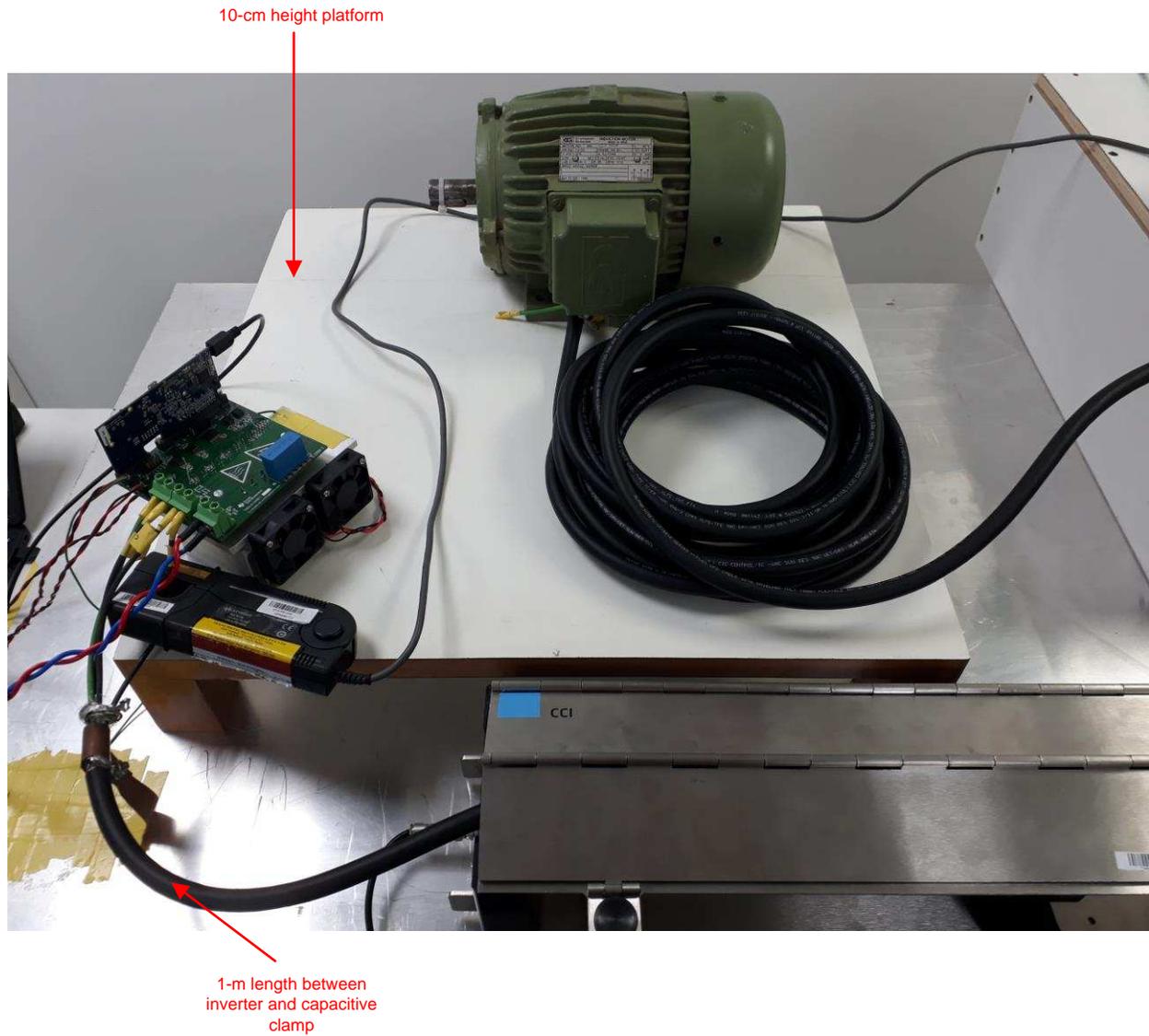


图 50. 逆变器和电机放置在距离工作台基准 10 厘米高的木制板上

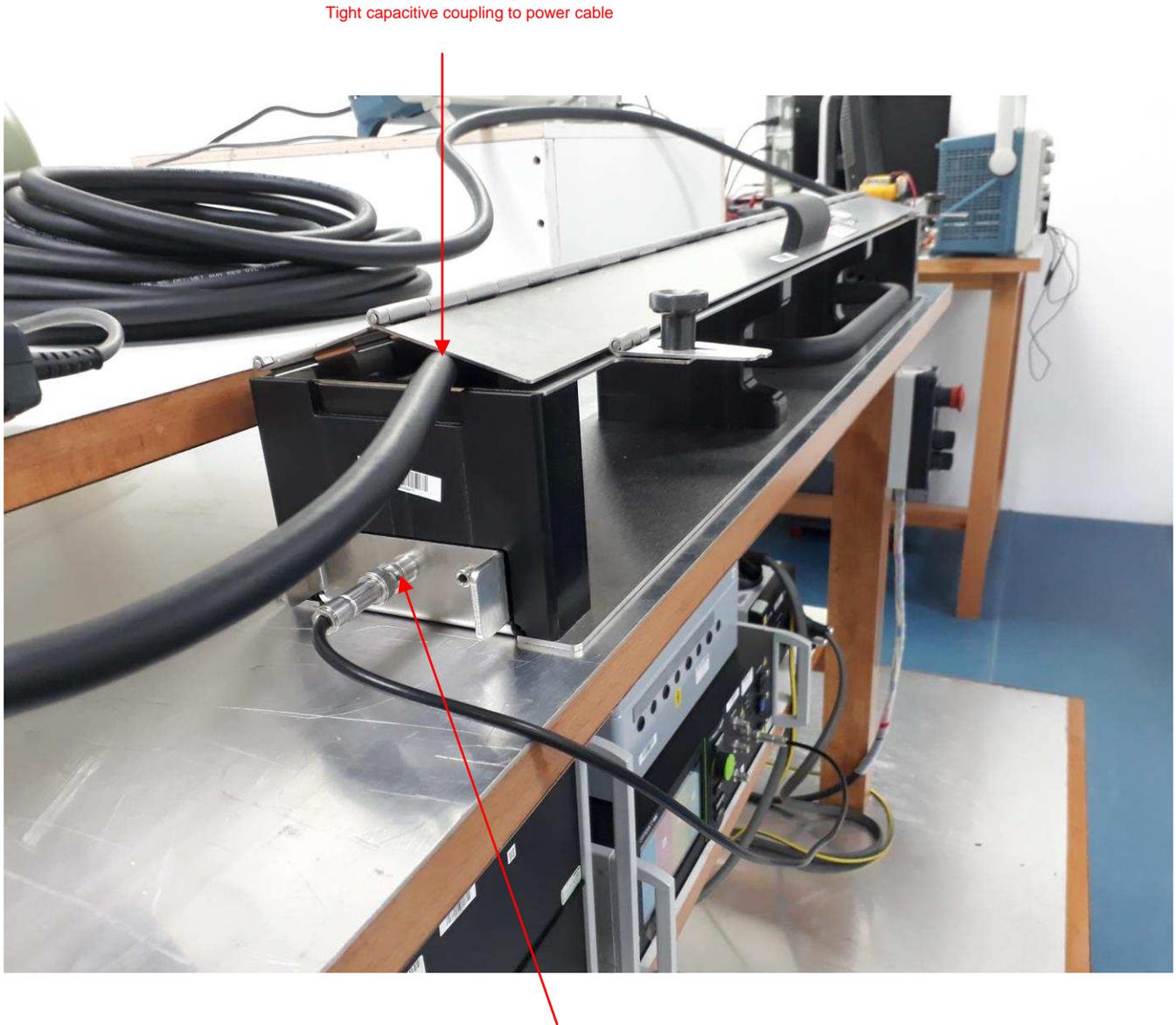
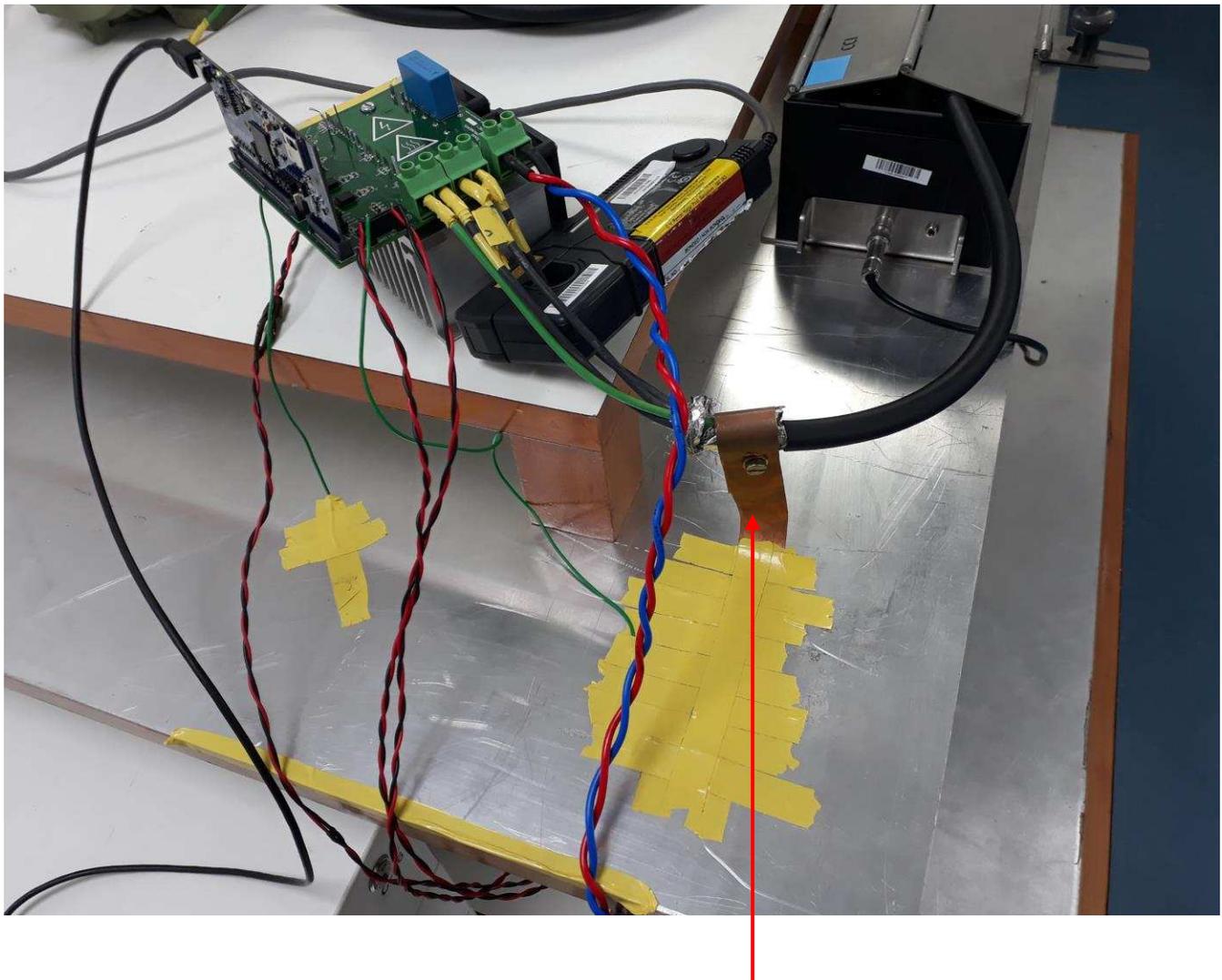


图 51. 电源电缆通过电容夹



Copper strap connection from cable shield to table reference

图 52. 电源电缆屏蔽连接到工作台基准

3.2.2.5.1 测试条件

60s 的 5kHz EFT 脉冲突发。突发持续时间为 15ms，突发周期为 300ms。使用的是 5ns 的典型 EFT 脉冲上升时间和 50ns 的持续时间。在测试时，使用 10 米长的 4 芯屏蔽电缆（部件号：V16016 BK005，制造商：Alpha Wire）。三芯用于 UVW 相，第四芯悬空。565V 直流电压应用到逆变器直流总线。逆变器以 8kHz 的频率进行开关，电机频率设置为 10Hz，施加到电机的 RMS 相间电压大约为 120V_{RMS}。

3.2.2.5.2 通过和失败条件

电机必须连续运转，没有任何不寻常的声音，并且在功率级方面观察不到故障。表 3 定义了性能标准。

表 3. EFT 测试性能标准

性能 (验收) 标准	说明
A	模块必须按预期持续运行。测试过程中无特性或性能损失。
B	允许测试过程中性能暂时下降。测试完成后，模块必须在无人工干预的情况下按预期继续运行。
C	允许测试期间存在功能损失，但硬件或软件不得损坏。测试完成后，模块必须在手动重新启动或掉电/上电后按预期继续运行。不可自行恢复。
D	硬件损坏。

表 4. EFT 结果

EFT 脉冲 (kV)	性能标准
0.5	A
-0.5	A
1	A)
-1	A
2	A
-2	A
4	A
-4	A

注：在开环控制中运行逆变器时，EFT 测试仅针对 PWM 隔离系统进行。电流和电压检测没有进行表征。

3.2.2.6 与温度测量数据复用故障信号

在此参考设计中，IPM 故障信号与模拟温度信号复用以节省隔离通道。IPM 故障可以通过 IPM 控制电源上的 UVLO 事件或 IPM 的一个低侧 IGBT 开关中的短路检测来触发。在测试中，IPM 故障信号通过将 IPM 控制电源从 15V 降至 8V 来激活。此新电压触发 IPM UVLO 诊断功能

图 53 至图 55 显示与温度测量数据复用的故障信号。故障信号是低电平有效信号。只要该信号是高电平， Δ - Σ 调制器就会将数据输出到控制器。当故障信号变成低电平时， Δ - Σ 调制器的输入级将超出额定界限。 Δ - Σ 调制器的诊断功能强制输出为零，每 128 位切换一次，如图 56 所示。

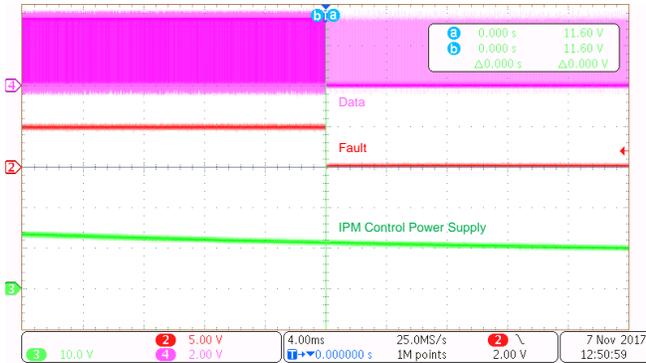


图 53. 故障信号检测

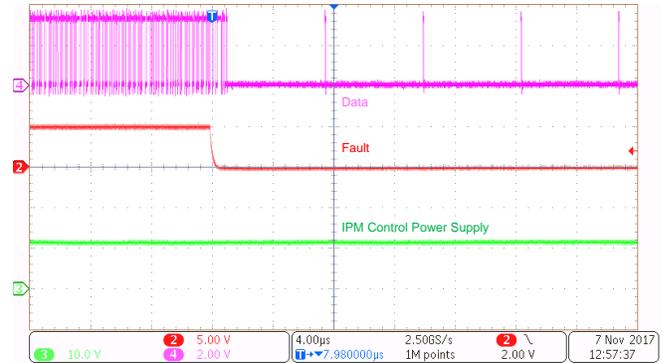


图 54. 故障信号检测已经过缩放

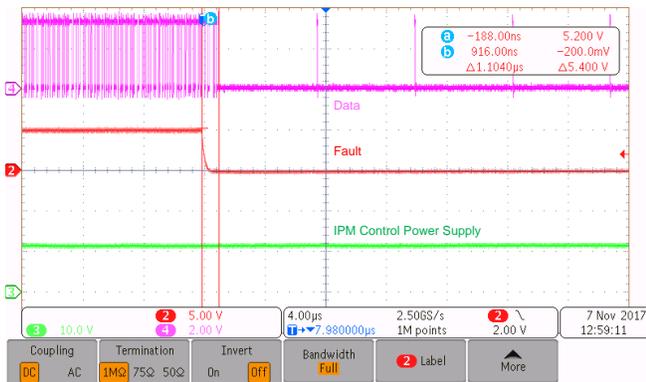


图 55. 隔离器内的故障检测延迟

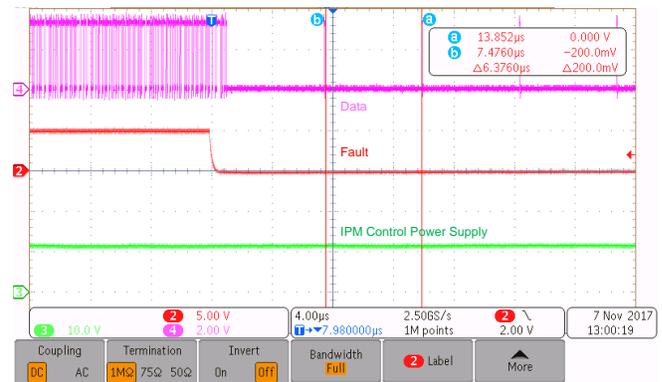


图 56. 每 128 位进行一次位切换

4 设计文件

4.1 电路原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-01349](#) 中的设计文件。

4.2 物料清单

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-01349](#) 中的设计文件。

4.3 PCB 布局建议

4.3.1 增强型隔离栅

图 57 显示隔离栅和接地分离装置。高压逆变器侧和低压控制器侧的铜轨通过增强型隔离栅相互隔离。采用宽体封装的数字隔离器和 Δ - Σ 调制器放置在隔离栅上。隔离栅的爬电距离保持在最小 8mm。

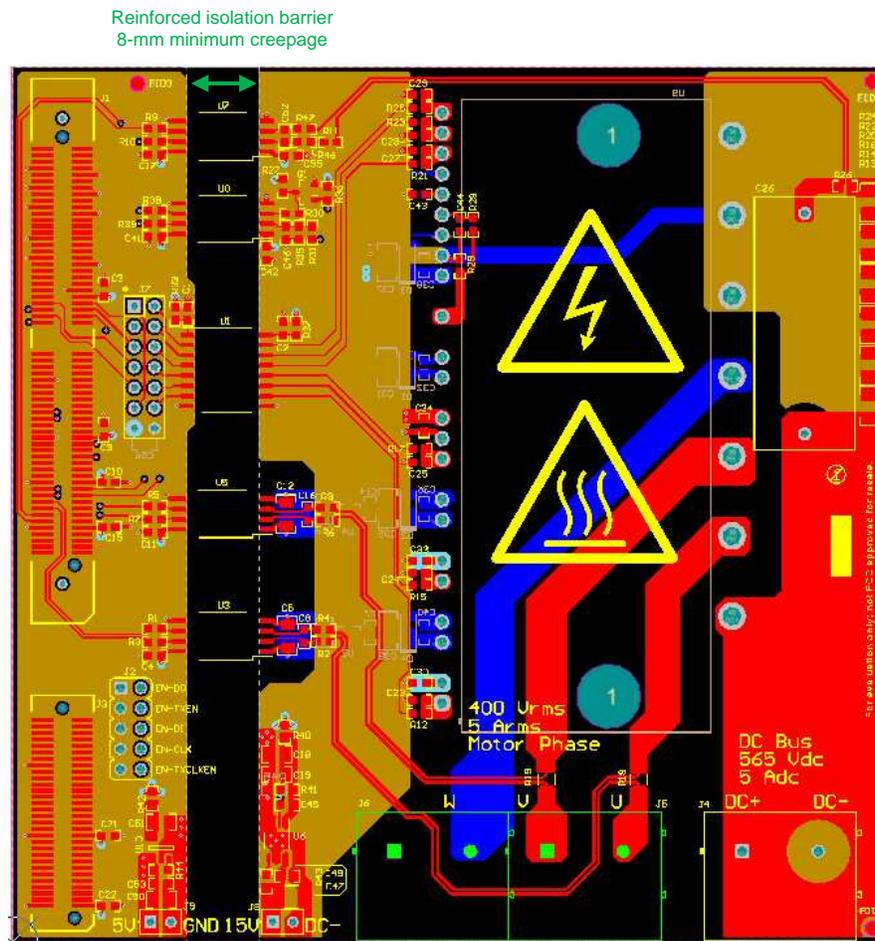


图 57. 增强型隔离栅和爬电距离

4.3.2 电流检测

如图 58 所示，在分流电阻器上使用开尔文连接以实现精确的电流检测。然后，电流检测信号像差分对那样被传输到 Δ - Σ 调制器输入级。差分布线可确保噪声（如果有）同等影响两个电流检测线路，这会受到 Δ - Σ 调制器共模抑制的影响。

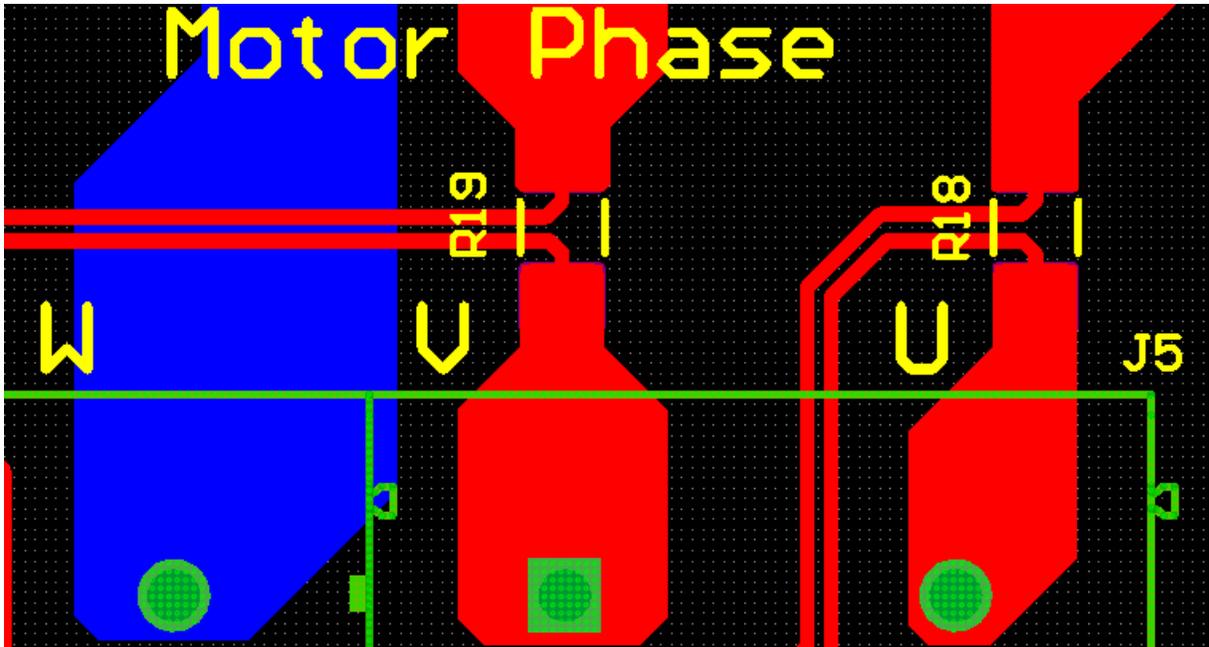


图 58. 分流电阻器的开尔文连接

在 Δ - Σ 调制器中，将包含 R2、R4 和 C8 的差分 RC 滤波器靠近器件 U3 的输入级。将电源的去耦电容器 (C5) 靠近器件的电源引脚并直接连接，而不使用通孔。放置在 PCB 底部 (图 60) 的 TLV76050 LDO (U2) 从 15V 自举电源为 Δ - Σ 调制器生成 5V 电源，并靠近调制器放置。LDO 的小型 SOT-23 封装可实现此目的，同时仍能与邻近高压网保持足够的爬电距离。将输入和输出去耦电容器靠近 LDO 的位置放置。

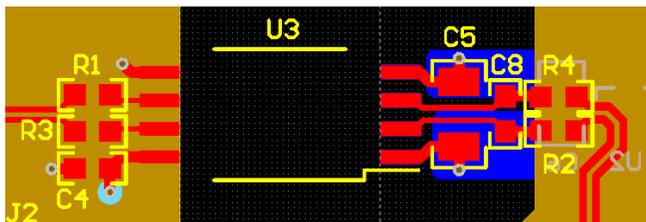


图 59. AMC1303M0520 布局

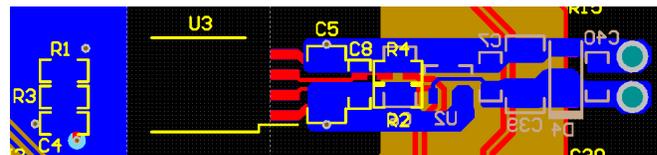


图 60. LDO 放置

4.3.3 LDO 布局

为了改善 PSRR、输出噪声和瞬态响应，将输入去耦电容器 C50 和 C53 靠近 LDO U10 输入端，将输出去耦电容器 C51 靠近输出端。

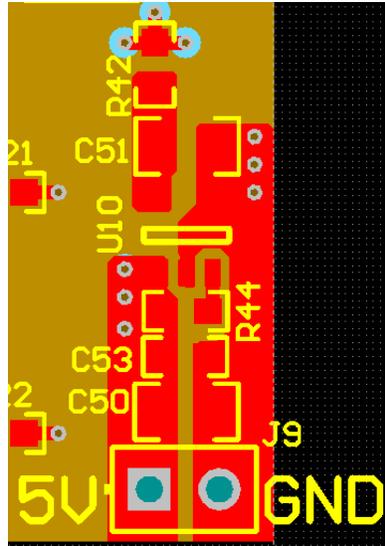


图 61. TPS70633 的布局

为了提高交流电性能（如 PSRR、输出噪声和 LDO U6 的瞬态响应），请将去耦电容器 C47、C49、C19 和 C18 靠近器件放置。将所有去耦电容器与器件放在 PCB 的同一侧。器件下方的金属焊盘通过多个通孔连接到直流电负极接地平面，以进一步改善封装的散热性能。

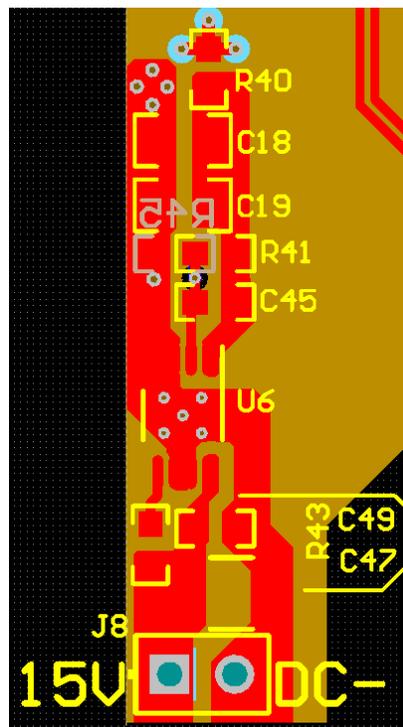


图 62. TPS7A4201 的布局

4.3.4 布局图

要下载层图，请参阅 [TIDA-01349](#) 中的设计文件。

4.4 Altium 项目

要下载 Altium 项目文件，请参阅 [TIDA-01349](#) 中的设计文件。

4.5 Gerber 文件

要下载 Gerber 文件，请参阅 [TIDA-01349](#) 中的设计文件。

4.6 装配图

要下载装配图，请参阅 [TIDA-01349](#) 中的设计文件。

5 相关文档

1. 德州仪器 (TI) 《使用 [TMS320F2837x](#) 实现三相永磁同步电机配有传感器的场定向控制》应用报告
2. 德州仪器 (TI) 《[ISO72x](#) 数字隔离器磁场抗扰度》应用报告
3. 三菱电机, [1200V LARGE DIIPM Ver.6](#) 系列应用手册 [PSS**SA2FT](#)

5.1 商标

C2000, E2E, Delfino, ControlSUITE, Code Composer Studio are trademarks of Texas Instruments.
All other trademarks are the property of their respective owners.

6 术语

IGBT— 绝缘栅双极晶体管

IPM— 智能电源模块

HVIC— 高压 IC

LVIC— 低压 IC

PWM— 脉宽调制

UVLO— 欠压锁定

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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司