

设计指南: TIDA-010025

适用于 200-480VAC 驱动器且具有光模拟输入栅极驱动器的三相逆变器参考设计



说明

该参考设计采用隔离式 IGBT 栅极驱动器以及隔离式电流/电压传感器实现了增强型隔离式三相逆变器子系统。所用的 UCC23513 栅极驱动器采用 6 引脚宽体封装和 LED 光模拟输入, 可用作现有光隔离式栅极驱动器的引脚对引脚替代品。此设计表明, 可使用用于驱动光隔离式栅极驱动器的所有现有配置来驱动 UCC23513 输入级。使用 AMC1300B 隔离式放大器和直流链路电压实现基于同相分流电阻器的电机电流感应, 使用 AMC1311 隔离式放大器实现 IGBT 模块温度感应。该设计利用 C2000™ LaunchPad™ 实现逆变器控制。

资源

TIDA-010025	设计文件夹
UCC23513	产品文件夹
AMC1300、AMC1311	产品文件夹
TLV9002、TLV9064	产品文件夹
LMV339	产品文件夹
SN74ACT244、SN74LVC1G10、SN74LVC1G32	产品文件夹
CSD17571Q2	产品文件夹
TPS54140A	产品文件夹
TLV1117、TLV1117LV	产品文件夹
TLV431A	产品文件夹
LP2951	产品文件夹
LAUNCHXL-F28379D	工具文件夹

特性

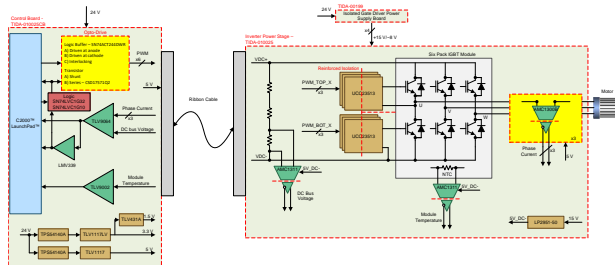
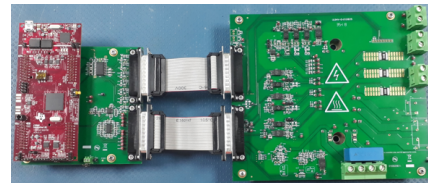
- 适用于 200-480VAC 供电驱动器的三相逆变器电源级, 输出电流额定值高达 14Arms
- 增强型隔离式栅极驱动器采用光模拟输入和 6 引脚宽体封装, 可用作光隔离式栅极驱动器的引脚对引脚替代品
- 栅极驱动器具有高达 125°C 的宽工作环境温度范围, 参数变化小, 共模瞬态抗扰度高, 工作隔离电压额定值为 1500Vdc, 因此可提高系统稳健性
- 高达 25Apk、适用于整个三相的基于增强型隔离式同相分流电阻器的电机电流感应, 过流保护响应时间 < 5 μs
- 可检测到 800V 的增强型绝缘直流母线电压, 并且利用 IGBT 模块里面的 NTC 和隔离运放可以检测高达 120 度的温度
- 使用 C2000 LaunchPad 实现逆变器控制

应用

- 交流逆变器和变频驱动器
- 伺服 CNC 和机器人
- 三相 UPS



咨询我们的 E2E™ 专家



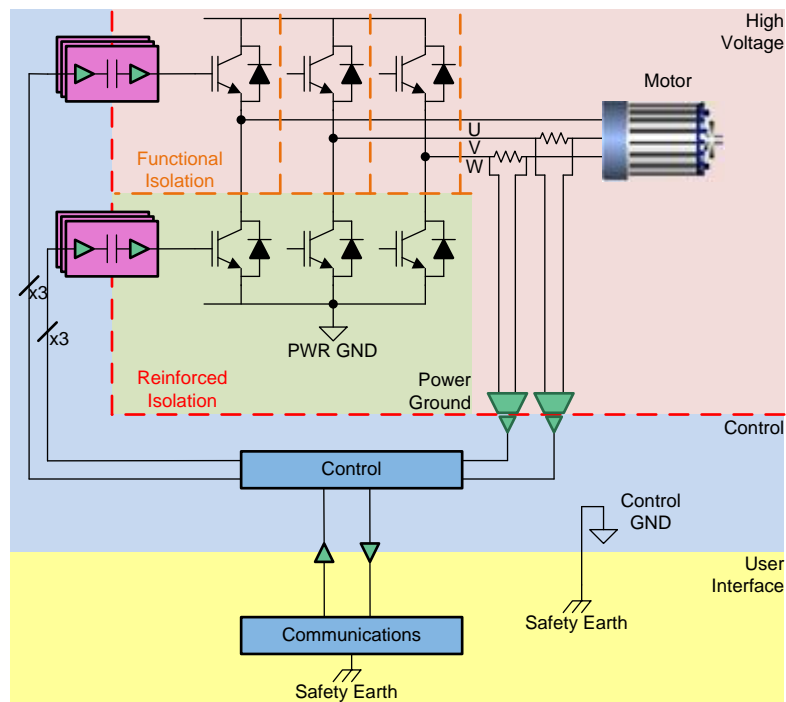
该 TI 参考设计末尾的重要声明表述了授权使用、知识产权问题和其他重要的免责声明和信息。

1 系统说明

变频驱动器 (VFD) 是一种电机控制器，通过改变提供给电机的电流的频率和振幅来驱动交流感应电机 (ACIM) 或永磁同步电动机 (PMSM)。VFD 的基本组件为：

- 输入部分，用于从公共设施获取交流电，并将交流电转换为直流电
- 逆变器部分，用于将直流电重新转换为可控制的交流电波形

图 1. 带隔离式栅极驱动器的三相逆变器



三相逆变器使用绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 开关，这些开关具有诸多优势，例如通过栅极绝缘实现的高输入阻抗、快速响应能力、良好的热稳定性、简单的驱动电路、良好的耐高压能力、无需 snubber 电路以及开关行为可控能力（能够提供可靠的短路保护）。IGBT 为电压控制型器件，能够实现快速开/关。

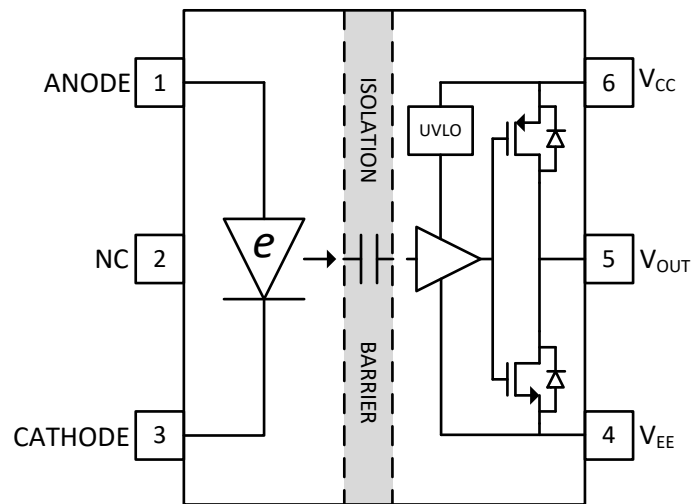
图 1 显示了一个典型的使用 6 个隔离式栅极驱动器的三相逆变器。该设计采用 TI 的 UCC23513 增强型隔离式栅极驱动器器件。需要使用 PWM 控制信号来开关 IGBT 器件，最终可在系统级别确定电机转速、位置和扭矩或者逆变器的输出电压、频率和相位。这些控制信号通常是 MCU 的输出，处于 3.3V 或 5V 等低电压级别。IGBT 所需的栅极控制电压范围为 15 至 20V，并且需要高电流能力，以便能够驱动 IGBT 栅极提供的大容性负载。此外，栅极驱动器需要以 IGBT 的发射极为基准并采用逆变器结构，高边的 IGBT 的发射极节点的电压摆幅为 0 至直流总线电压，其幅度为几百伏特。由于 IGBT 能够相对功率级接地端悬空，因此电源和栅极电路都应与逆变器接地端相隔离。使用隔离式电流传感器来测量电机相电流。控制器对电流波形进行采样并调制逆变器输出波形，以确保电机相电流遵循控制器内的电流参考设定值。

UCC23513 是一款电容隔离式栅极驱动器，其输入是模拟光耦隔离的 LED 输入级。该器件受电流控制，无需任何初级侧电源。因此，栅极驱动器可用作光隔离式栅极驱动器的引脚对引脚替代产品。与光隔离相比，使用电容隔离可提供额外的优势，例如：

- 高达 125°C 的宽工作环境温度范围
- 随着温度和使用时间的变化，参数变化更小
- 1500Vdc 的更高工作隔离电压
- 更高的共模瞬态抗扰度 (CMTI) 以及超过 40 年的隔离额定值

这些优势可在系统级别实现更高的稳健性。

图 2. UCC23513



该参考设计展示了以下特性：

- UCC23513 的工作原理与三相电机驱动逆变器系统中的光栅极驱动器完全相同，可以通过光隔离式栅极驱动器目前使用的所有可能方法进行驱动
- 硬开关和软开关条件下的栅极驱动器开关性能、栅极拉电流/灌电流波形、栅极电压和开关节点电压波形

1.1 主要系统规格

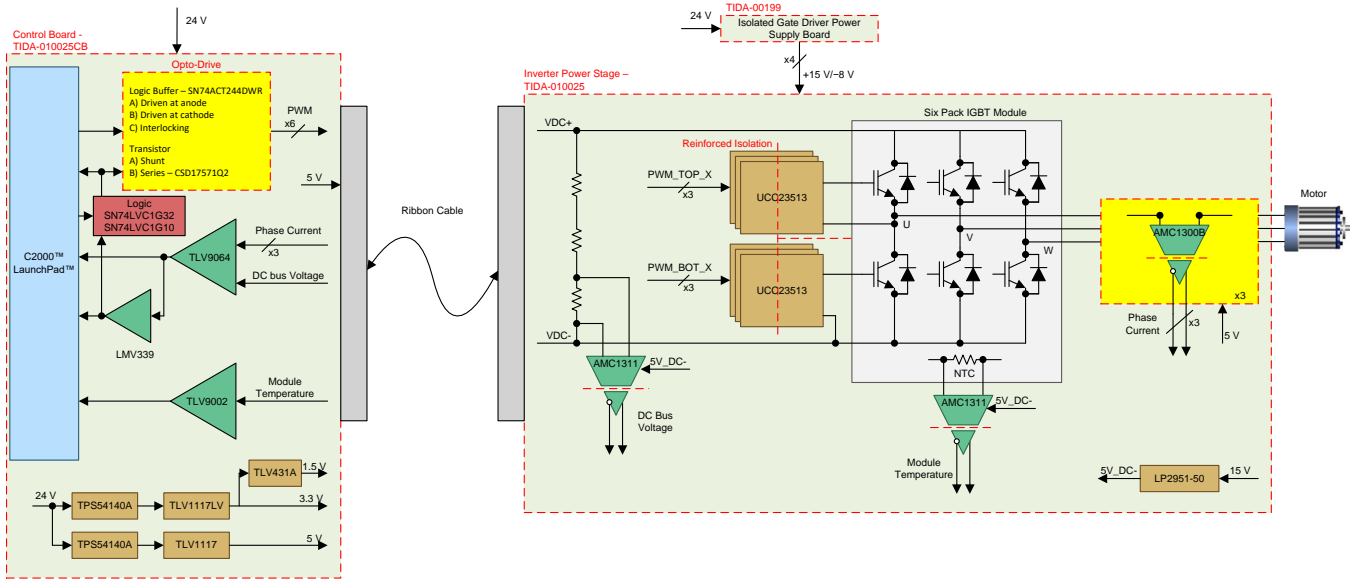
表 1. TIDA-010025 主要系统规格

小节	参数	规范	备注
逆变器	直流总线电压输入	200 至 800 VDC	
	持续标称输出电流额定值	14Arms	
	PWM 开关频率	高达 20kHz	在指定范围内测试逆变器
	使用的电源开关	带集成 NTC 的 1200V、25A 转换器逆变器制动 (CIB) 模块	器件型号: 7MBR25VA120-50
电机电流检测	测量范围	25A _{pk}	使用 10mΩ 的分流电阻器
直流总线电压检测	测量范围	800VDC	电阻分压器分压比为 2.5mV/V
IGBT 模块温度检测	测量范围	0°C 至 120°C	
保护	直流总线电压	过压和欠压检测	用户软件实现
	IGBT 模块温度	过热关断和温度降额	用户软件实现
	隔离	增强型隔离	增强型隔离式栅极驱动器、电流和电压传感器。控制侧与高压侧之间具有 8mm 的爬电距离
连接器接口	MCU 接口	使用 berg 棒连接器的 LaunchPad 接口	有关连接器上的引脚分配, 请参考原理图
	电源	24V、200mA	用于为控制侧供电
		4 个 +15V、-8V 电源, 彼此隔离	用于为 6 个栅极驱动器供电。用于 3 个高侧开关的独立隔离式电源和用于 3 个低侧开关和制动 IGBT 的单个电源
PCB 信息	PCB 层堆叠	电源板: 4 层 - 2 盎司外部、1 盎司内部铜层 控制板: 4 层 - 1 盎司铜	
	层压	FR4, 高 Tg	
	PCB 厚度	1.6mm	
	PCB 尺寸	电源板 - 190.5mm x 165.1mm, 控制板 - 113.03mm x 114.3mm	

2 系统概述

2.1 方框图

图 3. TIDA-010025 方框图



该参考设计是一款用于控制交流和伺服电机的三相逆变器驱动器。它由两块板组成：功率级模块和控制模块。

功率级模块：该板执行直流/交流转换的功能。CIB IGBT 模块 7MBR25VA120-50 用于电源转换。该模块具有基于二极管的三相整流器输入级、基于 IGBT 的三相逆变器输出级、基于 IGBT 的制动斩波器和 NTC 热敏电阻（集成在该模块中）。在该设计中，未使用整流器级，提供了相应的设置，以直接通过直流电源为三相逆变器级供电。

6 个 UCC23513 隔离式栅极驱动器器件用于控制逆变器的六个 IGBT 开关，1 个栅极驱动器用于控制制动斩波器 IGBT。IGBT 的栅极由 +15V、-8V 电源驱动。3 个独立隔离式 +15V、-8V 电源轨用于控制高侧 IGBT 栅极，单个电源轨用于控制 3 个低侧 IGBT 栅极和 1 个制动斩波器 IGBT 栅极。使用 TIDA-00199 隔离式 flyback 转换器或 TIDA-010026 隔离反激式转换器生成栅极驱动器电源。这两个 TID 均可通过单个 24V 输入轨生成 4 个隔离式 +15V、-8V 电源。UCC23513 的输入模拟光隔离式栅极驱动器的输入。它们受电流控制，控制信号由控制模块驱动。UCC23513 提供 UVLO 功能，并且在栅极驱动器电源轨低于 UVLO 阈值时 IGBT 栅极驱动器信号截止。

使用分流电阻器和隔离放大器 AMC1300B 在全部三个相位中完成电机同相电流检测。输出差分信号被发送到控制模块以进行进一步处理。AMC1300B 次级侧由 5V 电源供电。此 5V 电源是使用齐纳二极管通过相应的高侧 15V IGBT 栅极控制轨产生的。在直流链路和隔离放大器 AMC1311 上使用分压器来测量直流链路电压。使用集成在 IGBT 模块内部的 NTC 测量 IGBT 模块温度。使用外部电阻器和 NTC 来构建分压器。使用隔离放大器 AMC1311 来检测 NTC 上的压降。使用一个 5V 电源为 AMC1311 放大器的两个次级侧供电。该电源通过 LDO LP2951 将给低侧 IGBT 供电的 15V 转换而成。使用 5V 电源轨为隔离放大器的初级侧供电。

控制模块：该板执行控制电源模块的功能。它捕获来自电源模块的电流和电压反馈信号，处理它们并生成 PWM 信号以控制 IGBT 栅极驱动器。该板包含 MCU、模拟信号调节、PWM 信号缓冲和控制侧直流/直流电源生成电路。

基于 TMS320F28379D 的 C2000 LaunchPad LAUNCHXL-F28379D 用于逆变器控制。控制模块上提供了 berg 棒接头，用于安装 LaunchPad。控制器生成 3.3V PWM 脉冲，用于控制 IGBT 栅极驱动器。IGBT 栅极驱动器 UCC23513 受电流控制，3.3V PWM 脉冲需要转换成大约 10mA 的电流信号。为该转换提供了多种电路配置，用户可以评估以下任何配置（节 2.3.3.1 中提供了更多详细信息）：

- SN74ACT244D 缓冲器驱动 UCC23513 的阳极
- SN74ACT244D 缓冲器驱动 UCC23513 的阴极（如果需要 PWM 反转，则 SN74ACT240 可以替代 SN74ACT244）
- SN74ACT244D 用于互锁高侧和低侧栅极驱动器
- MCU 直接驱动与 UCC23513 输入串联的 CSD17571Q2 NMOS
- MCU 直接驱动与 UCC23513 输入并联的 NPN BJT

注： SN74ACT244D 的输入与 3.3V 输入逻辑兼容，同时由 5V 电源供电。

TLV9064 在差分放大器配置用于来自隔离放大器的差分电流和电压检测信号转换为单端信号。单端输出信号驱动 LaunchPad 上的单端 ADC 输入。请注意，用于检测电机相电流的 TLV9064 的输出会进行电平转换，以便能够检测双极电流。较慢的放大器 TLV9002 用于将模块温度检测信号从差分信号转换为单端信号。TLV431A 用于生成用于电平转换的 1.5V 基准信号，该基准信号先使用 TLV9002 进行缓冲，然后再分配到不同的放大器。LMV339 在窗口比较器配置中进行设置，以检测过流。如果三个电机相位中的任何一个发生过电流，比较器输出将变为低电平并触发 PWM 缓冲器的使能引脚。缓冲器的输出为三态，这会关闭栅极驱动器输出，从而导致逆变器关闭。

控制板需要单个 24V 电源轨输入。两个 TPS54140A 直流/直流降压转换器为下游 LDO 生成中间电源轨，以生成 3.3V 和 5V 电压。LDO TLV1117LV 生成 3.3V 电源轨，LDO TLV1117 生成 5V 电源轨。3.3V 电源轨用于为 LaunchPad 和控制板上的模拟信号调节电路供电。5V 电源轨用于为 PWM 缓冲器供电，并且还发送到功率级模块，用于为隔离放大器的初级侧供电。可以通过互连 TPS54140A 器件上的电源正常和使能引脚来完成电源定序。首先是 3.3V 电源轨，然后是 5V 电源轨。

2.2 主要产品

2.2.1 UCC23513

UCC23513 是一款光兼容单通道隔离式 IGBT、SiC 和 MOSFET 栅极驱动器，具有 3A 峰值输出电流和 5kV_{RMS} 增强型隔离额定值。UCC23513 可以驱动高侧和低侧电源开关。这些关键的特性与特征可以带来重要的性能和可靠性的提升，并超越于传统的光耦型驱动器，同时在原理图和 layout 的设计上保持 pin 脚兼容。性能亮点包括高 CMTI、低传播延迟和小脉冲宽度失真。严格的制成控制保证了较小的部件间偏移。输入级是仿真二极管，这与传统 LED 相比，具有长期可靠性和出色的老化特性。其导致的大于 600 伏相对漏电起痕指数 (CTI) 意味着更可靠的绝缘材料。UCC23513 的高性能和可靠性以及扩展型 SO-6 封装、大于 8.5mm 的间隙和爬电距离使其适用于电机驱动器、太阳能、工业电源和电器中的逆变器应用。较高的操作温度为之前光耦所不能应用的场合提供了机会。

在该设计中，UCC23513 用于驱动 6 个逆变器 IGBT 栅极和制动斩波器 IGBT 栅极。

2.2.2 AMC1300

AMC1300 是一款隔离式精密放大器，此放大器的输出与输入电路由抗电磁干扰性能极强的隔离栅隔开。根据 VDE V 0884-11 和 UL1577 标准，该隔离栅经认证可提供高达 5kV_{RMS} 的增强型电隔离。与隔离式电源组合使用时，该隔离放大器可将以不同共模电压电平运行的系统的各器件隔开，并防止较低电压器件损坏。

AMC1300 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。该器件性能优异，支持精确电流控制，从而降低系统级功耗，尤其在电机控制应用中降低扭矩纹波。AMC1300 的集成共模过压和高侧电源电压缺失检测功能可简化系统级设计和诊断。

在该设计中，AMC1300B 版本的器件具有较低的偏移、增益误差和温度漂移，用于检测 3 个电机相位中的电流。B 版本的更高精度使得能够在工作环境温度下更精确和更平稳地控制电机。

2.2.3 AMC1311

AMC1311 是一款隔离式精密放大器，此放大器的输出与输入电路由抗电磁干扰性能极强的隔离层隔开。根据 VDE V 0884-11 和 UL1577 标准，该隔离栅经认证可提供高达 $5kV_{RMS}$ 的增强型电隔离。与隔离式电源结合使用时，该隔离放大器可将以不同共模电压电平运行的系统的各器件隔开，并防止较低电压器件损坏。

AMC1311 的高阻抗输入针对连接高压电阻分压器或具有高输出电阻的其他电压信号源的情况进行了优化。该器件性能出色，支持在闭环系统中进行精确的低温漂电压或温度检测和控制。集成的高侧电源电压缺失检测功能可简化系统级设计和诊断。

在该设计中，AMC1311 用于使用高阻抗电阻分压器网络检测逆变器直流链路电压。该器件具有 2V 的输入范围，从而对逆变器开关噪声的敏感度更低，高阻抗输入会改变电阻分压器分压比。该器件还用于测量集成在 IGBT 模块内部的 NTC 电阻器上的电压。

2.2.4 TLV9064

TLV9064 是一款四路低压运算放大器，具有轨至轨输入和输出摆幅功能。该器件是一个具有高成本效益的解决方案，适用于需要低电压运行、小型封装尺寸和高容性负载驱动的应用。虽然 TLV9064 的容性负载驱动能力为 100pF，但电阻式开环输出阻抗便于在更高的容性负载下更轻松地实现稳定。

在该设计中，该器件用于将来自隔离放大器的差分信号转换为单端信号，这些信号随后驱动 MCU ADC。凭借 10MHz 的单位 GBW 和 $6.5V/\mu s$ 的压摆率，可实现电机控制环路的快速瞬态响应。凭借内部 RFI 和 EMI 滤波器，可在驱动器内的嘈杂电气环境中进行精确测量。

2.2.5 TLV9002

TLV9002 是一款双路低压运算放大器，具有轨至轨输入和输出摆幅功能。该器件为需要低电压运行和高容性负载驱动的应用提供了一个具有成本效益的解决方案。TLV9002 的容性负载驱动器具有 500pF 的电容，而电阻式开环输出阻抗使其能够在更高的容性负载下更轻松地实现稳定。TLV9002 稳健耐用的设计可简化电路设计。这些运算放大器具有单位增益稳定性，集成了 RFI 和 EMI 抑制滤波器，并且在过驱情况下不会出现相位反转。

在该设计中，该器件用于将来自 NTC 电压测量隔离放大器的差分信号转换为单端信号，该信号随后驱动 MCU ADC。TLV9002 具有 1MHz 的较低单位增益带宽和 $2V/\mu s$ 的压摆率，因此非常适合测量缓慢移动的温度信号。凭借内部 RFI 和 EMI 滤波器，可在驱动器内的嘈杂电气环境中进行精确测量。

2.2.6 LMV339

LMV339 是一款低电压四路比较器。该器件为需要低电压运行、低功耗、空间节省和快速响应的应用提供了一个具有成本效益的解决方案。

在该设计中，LMV339 在窗口比较器配置中用于检测电机相位中的过流。凭借快速响应时间（传播延迟小于 500ns），可以在发生短路故障时快速关闭逆变器。

2.2.7 TLV431A

TLV431 器件是低电压 3 端子可调节电压基准，在适用的工业和商业级温度范围内具有额定热稳定性。可以通过两个外部电阻器将输出电压设置为介于 V_{ref} (1.24V) 和 6V 之间的任何值。其输出阻抗典型值均为 0.25Ω 。有源输出电路可提供非常急剧的导通特性，从而使它们在许多不利。

电机相电流是双极信号，而 MCU ADC 是单极的。需要使用基准信号将测量的电流信号电平转换到 ADC 中。在该设计中，使用 TLV431A 生成基准信号。

2.2.8 SN74ACT244A

SN74ACT244 是一款八通道缓冲器，使用 5V 电源供电并具有 TTL 兼容输入。这些器件被组织为两个 4 位缓冲器和具有独立输出使能输入的驱动器。当 OE 为低电平时，该器件将来自 A 输入的非反相数据传递到 Y 输出。当 OE 为高电平时，输出处于高阻抗状态。

UCC23513 具有一个电流驱动的仿真二极管输入级。MCU 的 PWM 输出为 3.3V 信号，这些信号通过缓冲器器件转换为大约 10mA 的电流信号。该缓冲器还可以在出现故障时禁用栅极驱动器。该缓冲器的低电平有效使能引脚被拉高并且缓冲器输出变为高阻抗。

2.2.9 SN74LVC1G32

该单路 2 输入正或门适用于 1.65V 至 $5.5V_{CC}$ 运行环境。该器件执行布尔函数 $Y = A + B$ 。CMOS 器件具有高输出驱动，同时在宽 V_{CC} 工作范围内保持低静态功率损耗。

2.2.10 SN74LVC1G10

SN74LVC1G10 执行布尔函数 $Y = \overline{A \times B \times C}$ 。该器件利用 I_{off} 为了部分断电的应用。 I_{off} 电路会禁用输出，从而在器件掉电时防止电流回流损坏器件。

2.2.11 CSD17571Q2

该器件是一款 30V、 $20m\Omega R_{DS(on)}$ SON2 × 2 NexFET™ 功率 MOSFET，旨在最大程度地降低负载管理应用中的损耗，同时为该封装尺寸提供出色的热性能。在该设计中，FET 用于控制流经 UCC23513 的输入仿真二极管的电流。

2.2.12 TPS54140A

TPS54140A 器件是一款集成有高侧 MOSFET 的 42V、1.5A、降压稳压器。它采用电流模式控制，可实现简单的外部补偿和灵活的组件选择。低纹波脉冲跳跃模式可将无负载的稳压输出电源电流减小至 $116\mu A$ 。使用使能引脚可将关断电源电流减小至 $1.3\mu A$ 。

其欠压锁定电压在内部设定为 2.5V，但可用使能引脚将其提高。输出电压启动斜坡受控于慢启动引脚，还可以配置该引脚来控制排序/跟踪。一个开漏电源正常信号表示输出处于其标称电压的 94% 至 107% 之内。宽开关频率范围允许对效率及外部组件尺寸进行优化。频率折返和热关断功能在过载情况下保护部件。

在此设计中，该器件用于为 3.3V 和 5V LDO 后置稳压器生成中间电压轨。输入电压为 24V。

2.2.13 TLV1117LV

TLV1117LV 系列低压降 (LDO) 线性稳压器是常用的 TLV1117 稳压器的低输入电压版本。TLV1117LV 系列 LDO 在 0mA 负载电流下也很稳定；没有最低负载要求。该器件可提供出色的线路与负载瞬态性能，从而可在负载电流要求发生变化时实现幅度极小的输出电压下冲与过冲。

精密带隙与误差放大器可提供 1.5% 的精度。PSRR 非常高，从而可以在开关稳压器之后使用该器件进行后置稳压。其他实用功能包括低输出噪声和低压降电压。

使用 IGBT 模块设计的 TIDA-010025 变频器具有 14Arms 的标称输出电流额定值。请注意，在该设计中已经为三相电源电压整流提供了配置，但未进行测试。为连接器 J1 和 J3 提供了 200 至 480VAC 电源输入。C3、C4、C5 是 Y 电容器，C1、C2、C6 是 X 电容器，用于交流线路滤波。整流器级的输出（DC+_RECTIFIED 和 DC-_RECTIFIED）连接至连接器 J2 和 J5。用户应使用带有适当设计的大容量电容器的外部 PCB，以便使整流交流波形平滑。该 PCB 还应包含泄放电阻器和浪涌电流控制电路。平滑的直流波形应重新路由至 J2 和 J5，如原理图所示。

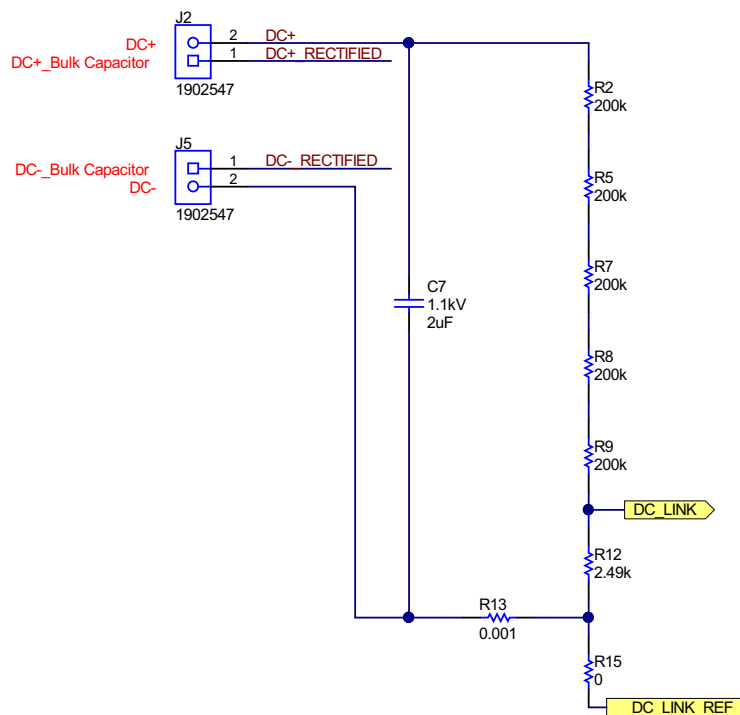
对于 TIDA-010025 设计，测试直流链路电压使用外部限流直流电源通过 J2 和 J5 直接提供给逆变器，不使用整流器前端。C7 是高频去耦电容器。包含 R2、R5、R7、R8、R9 和 R12 的电阻器链用于测量直流链路电压。逆变器的输出通过分流电阻器 R3、R4 和 R6 到达电动机相位端子所连接的连接器 J6 和 J7。分流电阻器用于测量电机相电流。使用隔离式栅极驱动器 UCC23513 来控制 IGBT 开关的栅极。

使用集成在 IGBT 模块内部的 NTC 来测量模块温度。使用 R10 和 NTC 构建电阻分压器。在 NTC 上测量的电压降与 IGBT 模块温度成正比。

2.3.2 直流总线电压检测

TIDA-010025 设计由最高 800Vdc 的直流总线电压供电，这涵盖了大多数电网电压输入高达 480VAC 的低压驱动器。靠近 IGBT 模块直流总线输入端放置了一个 2μF、1.1kV 薄膜电容器。该电容器能够最大程度地减小高频开关电流的环路面积。这有助于最大限度地降低开关节点过冲和 高频振铃，从而有助于降低 EMI。

图 5. 直流链路电压检测



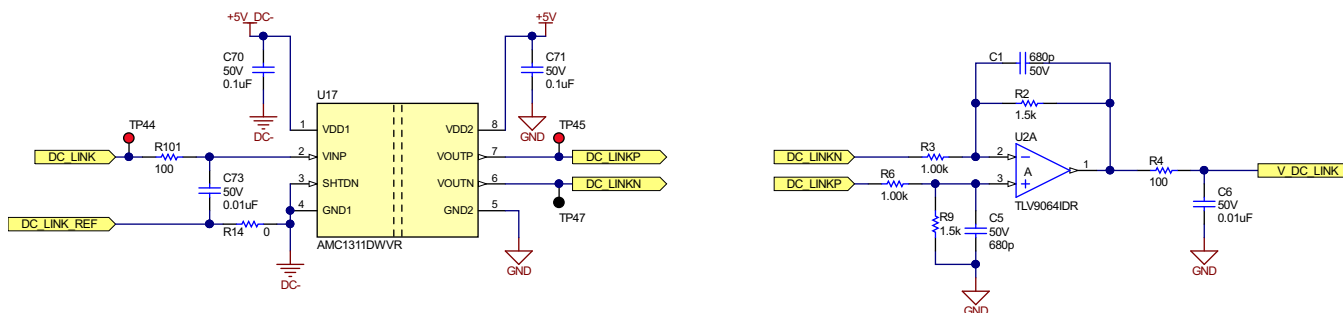
对于过压和欠压保护以及调节 PWM 占空比以保持电机的恒定 RMS 电压，直流总线电压反馈是必需的。包含电阻器 R2、R5、R7、R8、R9 和 R12 的分压器用于将直流总线电压向下转换至隔离放大器的输入电压范围。此参考设计使用线性输入电压范围为 -0.1 至 2V 的 AMC1311DWV。可以通过公式 1 来计算分压器的比例因数：

$$\text{Scaling factor} = \frac{R12}{(R12 + R2 + R5 + R7 + R8 + R9)} = 0.002484 \text{ V / V} \quad (1)$$

在使用 0.002484V/V 比例因数的情况下，AMC1311 的 0 至 2V 输入对应 0 至 800V。分压器网络中的每个电阻器额定电压为 200V，如果最大直流总线电压为 800V，则降低 20%。当直流总线电压为 800V 时，每个电阻器上耗散的最大功率为 0.128W。每个电阻器的额定功率为 0.25W。

图 6 显示了用于检测电阻分压器网络上的调节电压的 AMC1311 电路。R101 和 C73 构成了输入滤波器。使用以 DC- 为基准的 5V 电源为次级侧供电。C70 是次级侧电源噪声去耦电容器。C71 用于以 GND 为基准的初级侧 5V 电源的电源噪声去耦。AMC 1311 具有值为 1 的增益和差分输出级。0 至 2V 输入在输出端转换为 1.44V 共模的 ±1V 信号。

图 6. 使用 AMC1311 进行直流总线电压检测



2.3.3 隔离式 IGBT 栅极驱动器

TIDA-010025 逆变器需要 7 个隔离式栅极驱动器来实现 IGBT 开关控制。6 个驱动器用于控制 IGBT 逆变器开关，第 7 个驱动器用于控制制动斩波器 IGBT。该设计中使用的隔离式栅极驱动器是 UCC23513。该驱动器具有光电 LED 仿真的仿真二极管输入级，受电流控制。该栅极驱动器与现有的光隔离式栅极驱动器引脚对引脚兼容，并采用宽体扩展型 SO6 封装。

2.3.3.1 栅极驱动器输入级

栅极驱动器输入低至高阈值为 4mA（最大值），高至低阈值为 0.8V（最小值）。建议输入二极管导通正向电流为 7 至 16mA。在该设计中，将导通正向电流设计为大约 10mA。

逆变器控制 MCU 的输出为 3.3V PWM 信号。这必须转换为 10mA 电流信号。可以为该转换实现多种电路配置。TIDA-010025 具有用于评估每种输入驱动方法的板载配置。在每种配置下对该设计进行了测试，表明 UCC23513 可用作光隔离式栅极驱动器的引脚对引脚替代产品。

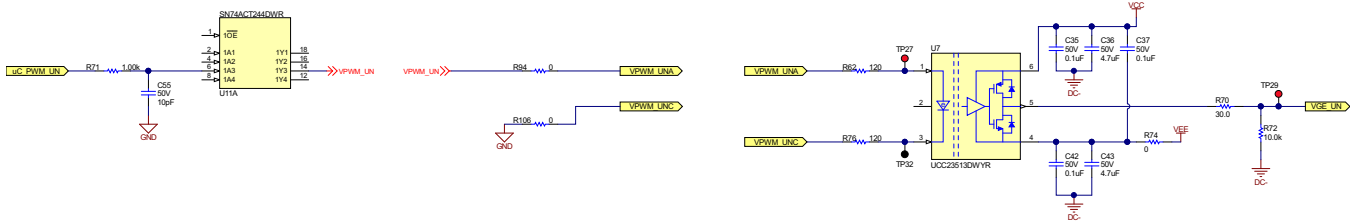
TIDA-010025 上实现的不同输入驱动电路配置为：

- 缓冲器驱动 UCC23513 的阳极
- 缓冲器驱动 UCC23513 的阴极
- 缓冲器用于互锁高侧和低侧栅极驱动器
- MCU 驱动与 UCC23513 输入串联的 NMOS FET
- MCU 驱动与 UCC23513 输入并联的 NPN BJT

2.3.3.1.1 UCC23513 缓冲器驱动阳极

在该配置中，SN74ACT244 缓冲器用于驱动仿真二极管的阳极，而阴极接地。使用的缓冲器具有 ±24mA 的建议输出驱动能力。ACT 逻辑系列缓冲器具有与 3.3V TTL 信号兼容的输入，同时由 5V 电源供电。这可以确保缓冲器能够驱动 5V 输出信号，同时由 3.3V MCU 逻辑控制。

图 7. 缓冲器驱动阳极



缓冲器的输入由包含 R71 和 C55 的 RC 滤波器进行滤波。缓冲器的输出通过电阻器 R62 连接到仿真二极管阳极。阴极通过电阻器 R76 连接至 GND。可以使用公式 2 来计算电阻器值：

$$R62 + R76 = \frac{(V_{buff} - V_f)}{I_{fon}} = \frac{(4.6 - 2.2)}{10mA} = 240\Omega$$

其中

- V_{buff} 是源自数据表的 10mA 下的缓冲器输出高电压
- V_f 是仿真二极管的最大输入正向电压
- I_{fon} 是仿真二极管正向电流

(2)

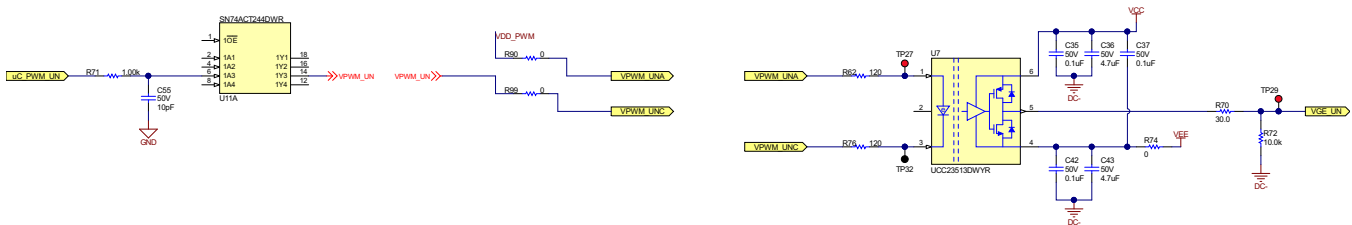
R62 和 R76 的大小都选为 120Ω。

如果没有 5V 缓冲器电源或缓冲器低电平有效使能引脚被拉高，则缓冲器的输出将变为三态。在该状态下，没有驱动电流流过仿真二极管，栅极驱动器输出保持低电平。

2.3.3.1.2 UCC23513 缓冲器驱动阴极

在该配置中，SN74ACT244 缓冲器用于通过电阻器 R76 驱动仿真二极管的阴极，阳极通过 R62 被拉至 5V。如果 PWM 信号为高电平，则缓冲器将阴极驱动至 5V，这会将仿真二极管上的电压降低至低于 0.8V，从而将栅极驱动器的输出驱动为低电平。如果 PWM 信号为低电平，则缓冲器将阴极拉至接地，这会驱动电流通过仿真二极管，从而打开栅极驱动器的输出。因此，在该配置中，PWM 信号被反相。如果反相是不可接受的，则可以使用与 SN74ACT244 引脚对引脚兼容的 SN74ACT240 等反相缓冲器。

图 8. 缓冲器驱动阴极



可以使用公式 3 来计算电阻器 R62 和 R76：

$$R62 + R76 = \frac{(V_{suppl} - V_f - V_{buff})}{I_{fon}} = \frac{(5 - 2.2 - 0.25)}{10mA} = 255\Omega$$

其中

- V_{buff} 是源自数据表的 10mA 下的缓冲器低输出电压
- V_f 是仿真二极管的最大输入正向电压
- I_{fon} 是仿真二极管正向电流

(3)

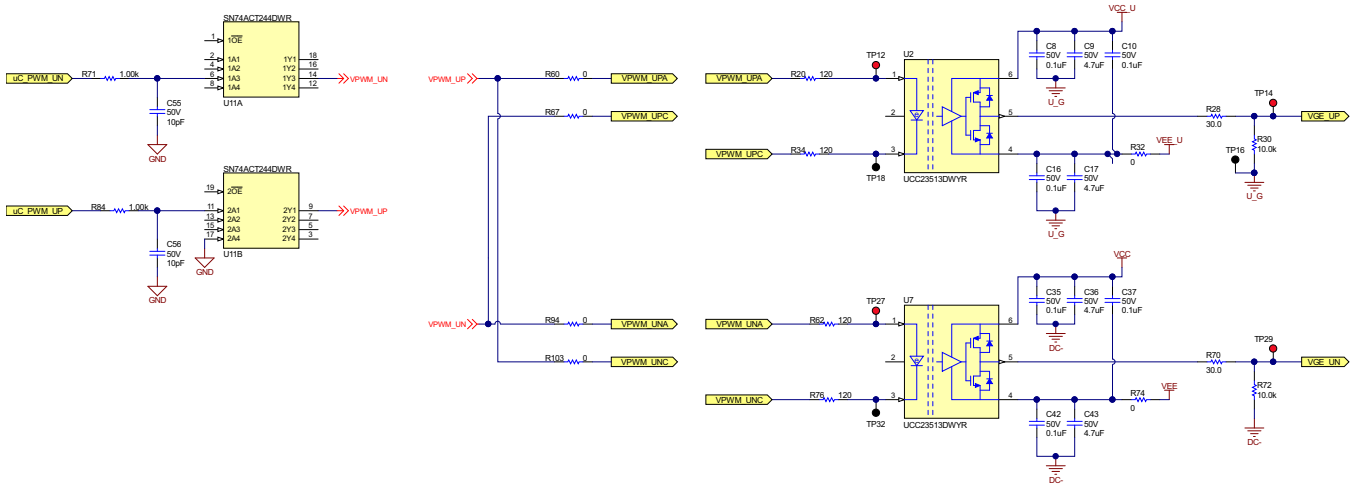
R62 和 R76 的大小都选为 120Ω。

如果没有 5V 缓冲器电源或缓冲器低电平有效使能引脚被拉高，则缓冲器的输出将变为三态。在该状态下，没有驱动电流流过仿真二极管，栅极驱动器输出保持低电平。

2.3.3.1.3 缓冲器用于互锁高侧和低侧栅极驱动器

在该配置中，SN74ACT244 缓冲器高侧 PWM 信号用于通过电阻器 R20 驱动高侧栅极驱动器仿真二极管的阳极，并通过 R76 驱动低侧栅极驱动器仿真二极管的阴极。缓冲器低侧 PWM 信号用于通过电阻器 R34 驱动高侧栅极驱动器仿真二极管的阴极，并通过 R62 驱动低侧栅极驱动器仿真二极管的阳极。

图 9. 缓冲器用于互锁高侧和低侧栅极驱动器



栅极驱动器的输出如表 2 所示：

表 2. 互锁的 PWM 逻辑表

情形	高侧 PWM 输入	低侧 PWM 输入	高侧 PWM 输出	低侧 PWM 输出
1	高	高	低	低
2	高	低	高	低
3	低	高	低	高
4	低	低	低	低
5	三态	三态	低	低

在正常运行期间，高侧和低侧 PWM 信号是互补的，因此出现表 2 中的情形 2 和 3。在死区时间期间（情形 4），两个 PWM 信号都为低电平。没有电流流过任何一个仿真二极管，栅极驱动器输出为低电平。如果没有 5V 缓冲器电源或缓冲器低电平有效使能引脚被拉高，则缓冲器的输出将变为三态（情形 5）。在该状态下，没有电流流过仿真二极管，栅极驱动器输出很低。有时由于 MCU 故障、电机控制软件故障或噪声，可能两个 PWM 信号都开启（情形 1）。在该状态下，栅极驱动器的阳极和阴极都被驱动为高电平，没有电流流过二极管。两个栅极驱动器都关闭。

可以使用公式 4 来计算电阻器 R62 和 R76：

$$R62 + R76 = \frac{(V_{buff_{on}} - V_f - V_{buff_{off}})}{I_{fon}} = \frac{(4.6 - 2.2 - 0.25)}{10mA} = 215\Omega$$

其中

- $V_{buff_{on}}$ 是源自数据表的 10mA 下的缓冲器高输出电压
- $V_{buff_{off}}$ 是源自数据表的 10mA 下的缓冲器低输出电压
- V_f 是仿真二极管的最大输入正向电压
- I_{fon} 是仿真二极管正向电流

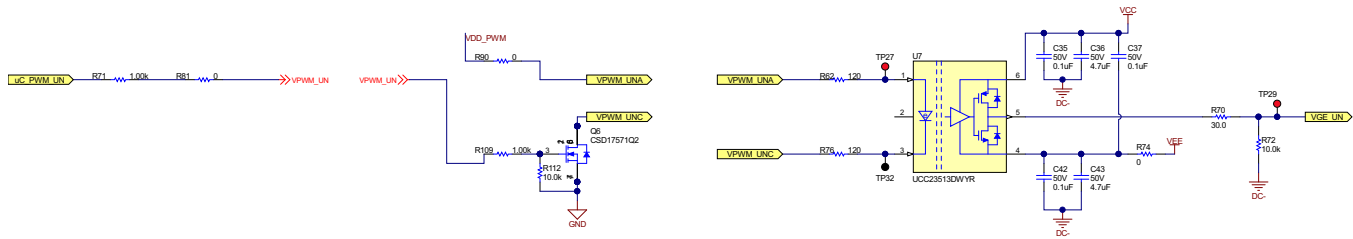
(4)

在该设计中，R62 和 R76 的大小都选为 120Ω。栅极电流仍将高于 7mA。

2.3.3.1.4 MCU 驱动与栅极驱动器输入串联的 NMOS FET

成本较低的选择是使用与仿真二极管串联的 NMOS FET，而不是使用缓冲器 IC。优点是可以使用更高的输入驱动电压 ($V_{dd} > 5V$)，但无法进行互锁。仿真二极管的阳极通过电阻器 R62 连接到 Vdd 电源，阴极通过电阻器 R76 和 FET Q6 连接到接地。如果来自 MCU 的 PWM 信号为高电平，则 FET 导通，电流流过仿真二极管，从而开启栅极驱动器输出。如果 PWM 信号为低电平，则 FET 阻止电流流过仿真二极管，栅极驱动器关闭。

图 10. MCU 驱动与栅极驱动器输入串联的 NMOS FET



可以使用公式 5 来计算电阻器 R62 和 R76:

$$R62 + R76 = \frac{(V_{suppl} - V_f - VFETDS)}{I_{fon}} = \frac{(5 - 2.2)}{10mA} = 280\Omega$$

其中

- VFETDS 是 10mA 下 FET 上的压降，其值小到可以忽略不计
- V_f 是仿真二极管的最大输入正向电压
- I_{fon} 是仿真二极管正向电流

(5)

在该设计中，R62 和 R76 的大小都选为 120Ω。栅极电流仍将低于 16mA。

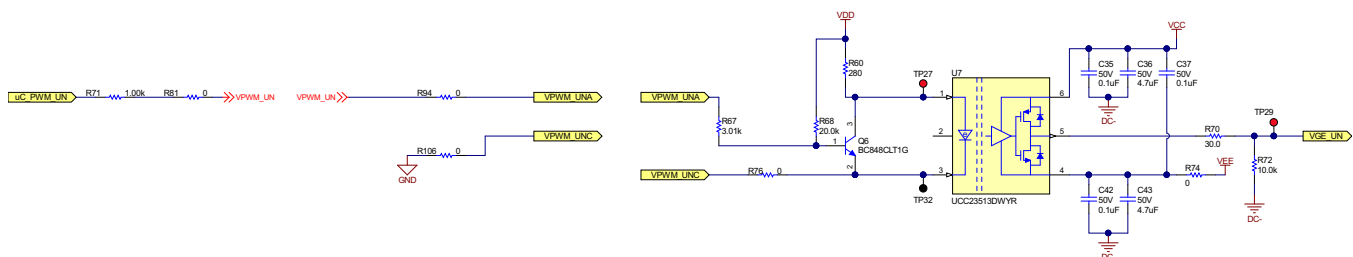
如果由于故障情况而导致 FET 的 PWM 输入悬空，则电阻器 R112 会将 Q6 的栅极拉低，从而关断 FET。

2.3.3.1.5 MCU 驱动与栅极驱动器输入并联的 NPN FET

另一种选择是使用与仿真二极管并联的 NPN 晶体管，并直接通过 MCU 驱动 NPN BJT 的基极。当 PWM 信号为高电平时，R60 导通，电流流过 R60 和 Q6。仿真二极管上的电压等于 NPN 晶体管的 V_{sat} 。栅极驱动器输出被拉低。如果 PWM 信号为高电平，则 Q6 关断，电流从 VDD 流过 R60 和仿真二极管，栅极驱动器输出为高电平。

该配置的优点在于，由于 NPN 与仿真二极管并联，并且可以放置在靠近 PCB 上栅极驱动器输入级的位置，因此当 BJT 饱和时它将仿真二极管强力驱动至低于 0.8V，是具有高抗噪性的电路配置。还可以使用更高的输入驱动电压 (V_{dd})。缺点是电流始终流过仿真二极管或 NPN BJT。

图 11. MCU 驱动与栅极驱动器输入并联的 NPN FET



可以使用公式 6 来计算电阻器 R60:

$$R60 = \frac{(V_{dd} - V_f)}{I_{fon}} = \frac{(5 - 2.2)}{10mA} = 280\Omega$$

其中

- Vdd 是电源电压
- Vf 是仿真二极管的最大输入正向电压
- Ifon 是仿真二极管正向电流

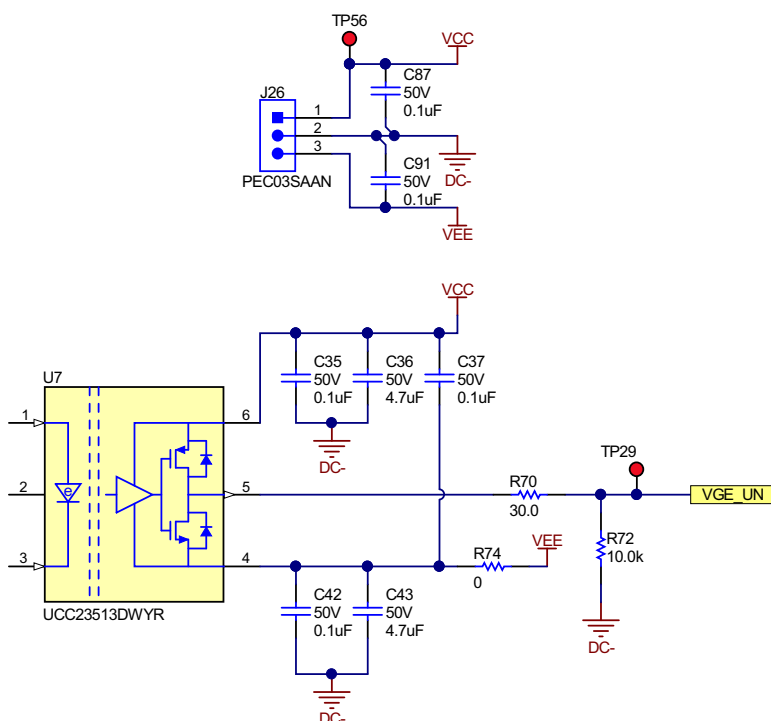
(6)

将 R60 的大小选为 280Ω。

2.3.3.2 栅极驱动器电源

UCC23513 输入受电流控制，不需要任何初级侧电源轨。在该设计中，次级侧由以 IGBT 发射极为基准的 +15V 和 -8V 电源轨供电。如图 12 所示，15V 电源轨 (VCC) 连接至 VCC 引脚，-8V 电源轨 (VEE) 连接至栅极驱动器的 VEE 引脚。总次级电压为 23V，用于偏置栅极驱动器内部电路以及驱动 IGBT 栅极。4.7μF 大容量电容器 C36 和 C43 提供了 IGBT 栅极电流，并有助于最大程度地减小由于栅极电流环路而导致的寄生电感，从而能够实现更快速的开关。使用 0.1μF 噪声去耦电容器 C35 和 C42 对电源输入进行滤波。

图 12. 栅极驱动器电源轨



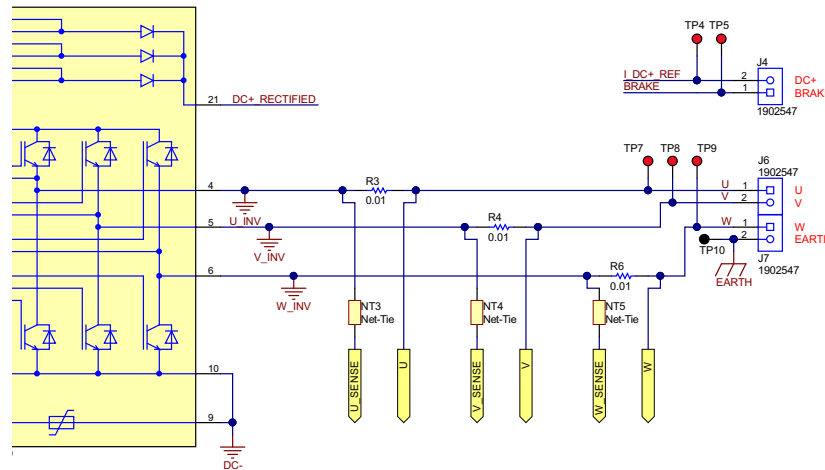
2.3.3.3 栅极驱动器输出级

UCC23513 具有单路栅极驱动器输出，用于控制 IGBT 开关时间。根据 IGBT 模块数据表中的建议选择了大小为 30Ω 的栅极电阻器 R70。这会在 +15V、-8V 电源轨上导致 0.766A 的最大峰值拉电流和灌电流。如果需要独立控制 IGBT 导通和关断，则可以安装组件 D9 和 R64，使其与 R70 并联。10kΩ 电阻器 R72 连接在 IGBT 栅极与靠近 IGBT 模块的发射极引脚之间。其作用是确保在由于故障导致栅极驱动器与 IGBT 断开连接的情况下 IGBT 保持关断状态。

2.3.4 电机相电流检测

使用分流电阻器 R3、R4 和 R6 在全部三个相位中检测电机相电流。使用隔离放大器来测量电阻器上的压降。该参考设计使用输入电压范围为 ±250mV 的 AMC1300B 器件。该设计可以测量高达 25Apk 的电流。将分流电阻器大小选为 10mΩ，并且选择了一个额定值为 1%、4W 的电阻器。

图 13. 用于同相电机电流测量的分流电阻器



分流电阻器值 = U_3 的输入电压范围/待测峰值电流值 = $250\text{mV}/25\text{A} = 10\text{m}\Omega$

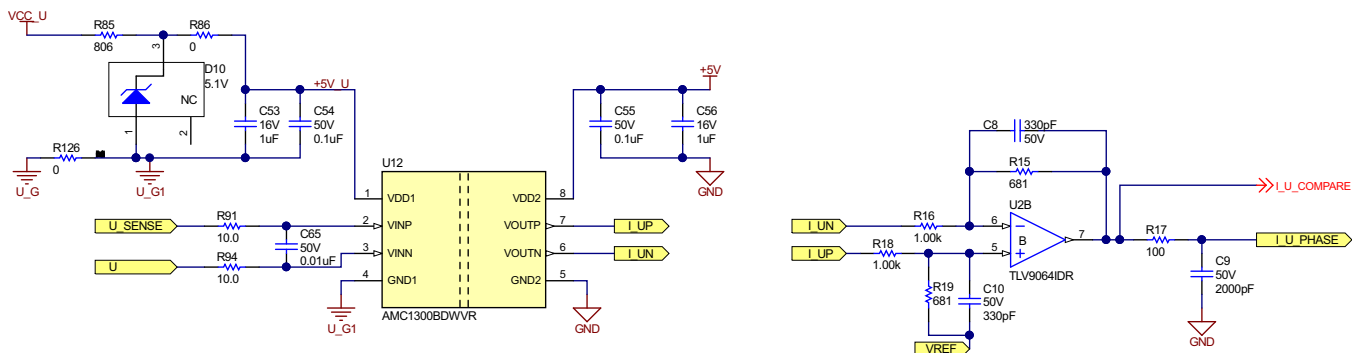
逆变器标称电流额定值 = 14Arms

标称功率耗散 = $14 \times 14 \times 10\text{m} = 1.96\text{W}$

图 14 显示了使用 AMC1300B 测量电流的电路配置。R91、R94 和 C65 构成了输入差分滤波器。这可以防止输入端的高频噪声在测量的频率范围上产生混叠。放大器的次级侧由以逆变器相位节点 U_G1 为基准的 $+5\text{V}_U$ 供电。该电源由 15V VCC_U 隔离式栅极驱动器电源生成（使用齐纳二极管）。C54 是电源噪声去耦电容器。

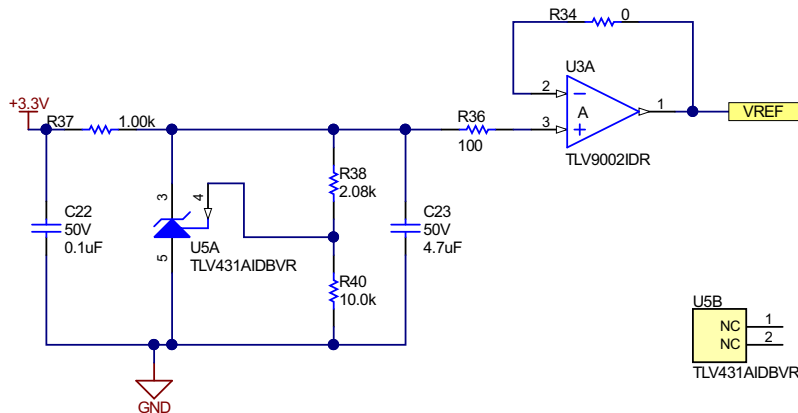
隔离放大器的增益为 8.2，输出为 1.44V 共模电压上的差分信号。 $\pm 250\text{mV}$ 可放大至 ± 2.05 。MCU ADC 的输入为单端信号，FS 输入范围为 3V 。为了测量双极电流信号，将隔离放大器的 FS 输出映射至 ADC 的 FS 输入。使用 TLV9064 实现差分放大器，增益为 $(3-0.2)/(2 \times 2.05) = 0.6829$ 。请注意，通过接地和 3V 提供了 0.1V 的余量，以确保输出处于运算放大器的输出电压摆幅范围内。放大器的输出电平转换为 1.5V ，以用于双向电流测量。R17 和 C9 构成了 ADC 输入 RC 滤波器。

图 14. 电机相电流测量



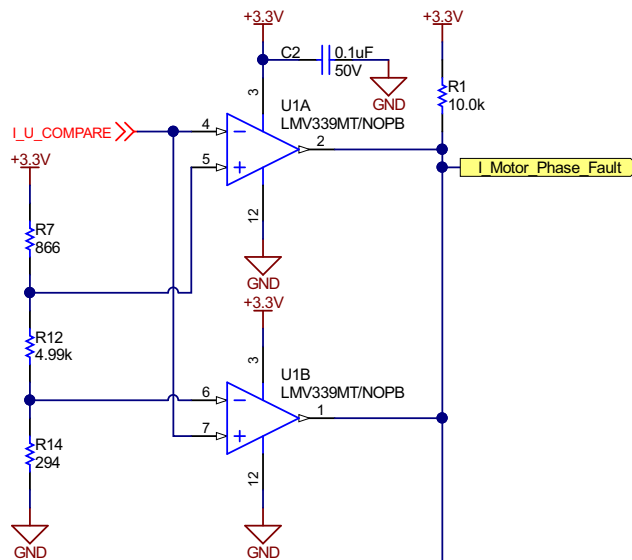
使用 TLV431A 生成用于对运算放大器输出进行电平转换的 1.5V 基准，并使用 TLV9002 进行缓冲。

图 15. 1.5V 基准生成



过流检测：使用 LMV339 实现用于过电流检测的窗口比较器。过流阈值设置为 $\pm 24\text{Apk}$ ，这对应于差分放大器输出 2.84V 和 0.1597V。这些阈值使用电阻器 R7、R12 和 R14 进行设置。请注意，窗口比较器的输入是在 ADC 抗混叠滤波器之前进行的，以减少过流故障的响应时间。比较器的输出为漏极开路输出，每当发生故障时，它都被拉低。比较器的输出通过逻辑块连接至 PWM 驱动缓冲器的低电平有效使能引脚，以确保在发生过流故障时 PWM 缓冲器处于三态。如果使 PWM 缓冲器处于三态，则会关闭栅极驱动器输出。

图 16. 过载检测比较器

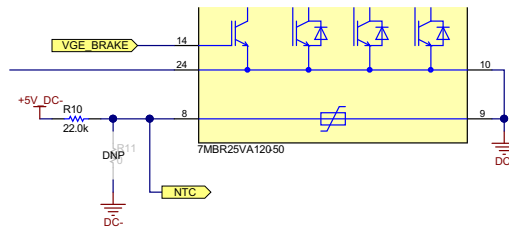


2.3.5 IGBT 模块温度检测

IGBT 电源模块的温度反馈对于过热关断以及在较高温度下降低逆变器的输出而言是必需的。使用集成在模块内部的 NTC 测得模块温度。

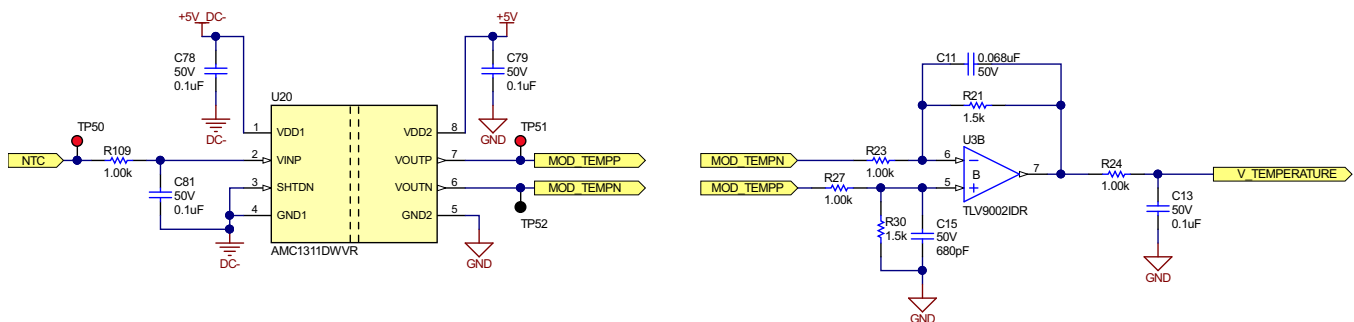
使用 R10 和 NTC 电阻器构成电阻分压器，如图 17 所示。

图 17. 使用 IGBT 模块集成 NTC 进行温度检测



使用隔离放大器 AMC1311 来测量 NTC 电阻器上的压降。在馈送到放大器之前，使用 R109 和 C81 对 NTC 电压进行滤波。输出是 1.44V 共模上的差分信号，然后使用差分放大器 TLV9002 将其转换为单端信号。增益 1.5 用于将 AMC1311 的 2V FS 范围映射到 ADC MCU 的 3V FS 范围。

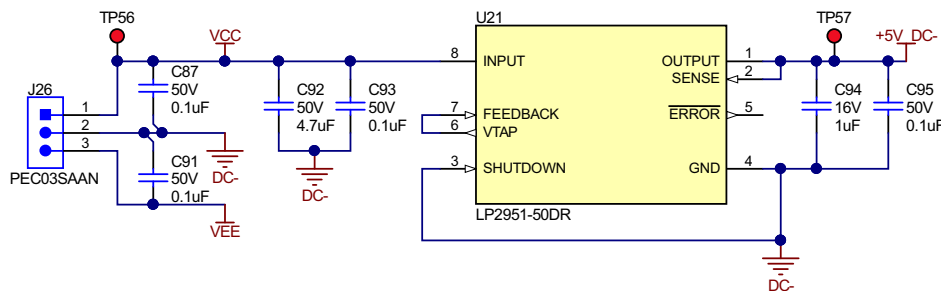
图 18. 用于温度测量的隔离放大器



2.3.6 电源

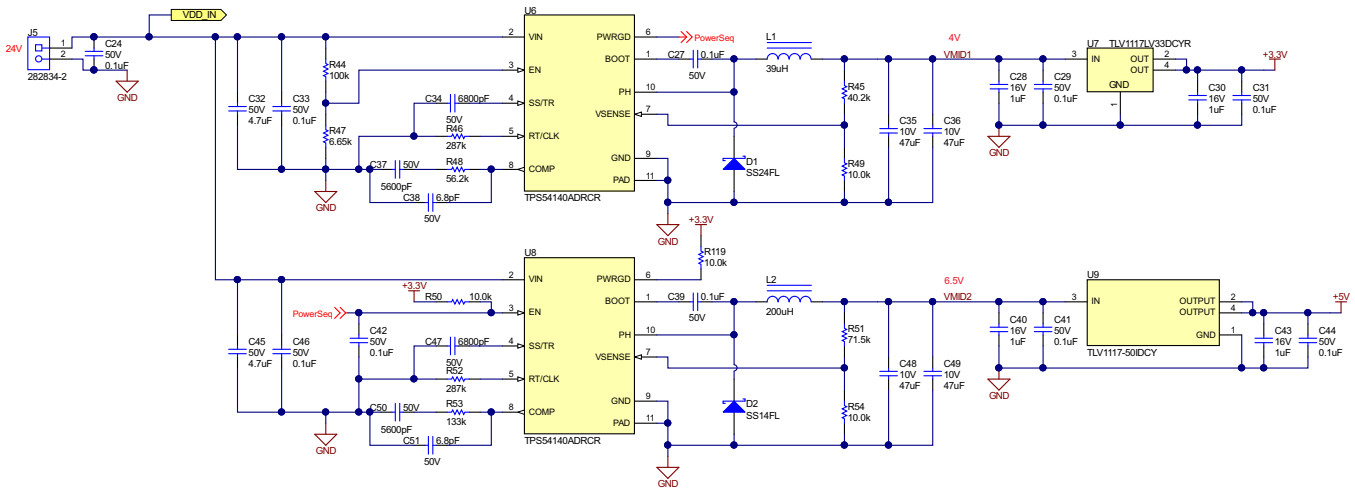
用于直流链路电压和温度检测的 AMC1311 隔离放大器需要使用以 DC- 为基准的次级侧 5V 电源。这是通过低侧 IGBT 栅极驱动器 15V 电源生成的。AMC1311 需要最大值为 9.7mA 的次级侧电源电流。LP2951 LDO 用于生成 5V 电源，如图 19 所示。C92 是输入大容量电容器，C93 是噪声去耦电容器。输出电压检测引脚直接连接到输出电压，内部电阻分压器 Vtap 连接到反馈引脚。关断引脚接地，从而使 LDO 始终开启。

图 19. 生成以 DC- 为基准的 5V 电源



控制卡需要以初级侧接地为基准的 3.3V 电源轨和 5V 电源轨。3.3V 电源轨用于为 LaunchPad、模拟信号调节电路以及控制卡上的比较器电路供电。5V 电源轨用于为 PWM 驱动器缓冲器供电，并从控制卡发送至逆变器电源板，它在此处用于为隔离放大器的初级侧供电。

图 20. 低压侧直流电源轨生成



使用降压转换器 TPS54140A 来生成这两个电源轨。这些器件的输入为 24V (VDD_IN) (通过连接器 J5)。U6 的使能引脚通过电阻分压器网络 R44 和 R47 连接到 VDD_IN。使能引脚阈值为 1.25V，这可确保 U6 仅在 VDD_IN 大于约 20V 时才开始起作用。转换器 R45 和 R49 的反馈网络进行了设置，从而使输出 VMID1 为 4V。该 4V 输出馈送到下游 LDO TLV1117LV 以生成 3.3V 电源轨。U6 的电源正常引脚是漏极开路输出，如果输出电压由于热关断、压降、过压或 EN 关断而处于低电平，它会置为低电平。在此设计中，该引脚连接至 U8 的使能引脚，以进行电源定序。最初，电源正常引脚将处于低电平，直到 VSENSE 引脚低于内部基准电压的 94%。一旦超过该值，PWRGD 引脚会将其自身取消置位，上拉电阻器 R50 将启用器件 U8。U8 可生成 6.5V 的 VMID2。这可以为下游 5V LDO TLV1117-50 提供输入。加电顺序为：3.3V 电源轨，然后是 5V 电源轨。这可确保控制器在任何反馈电路和 PWM 驱动缓冲器之前加电。可以使用 SS 引脚上的 C34 和 C47 设置软启动时间。该设计使用 6800pF，这会导致软启动时间约为 2ms。TI 的 WEBENCH™ 软件用于设计降压转换器和选择组件。

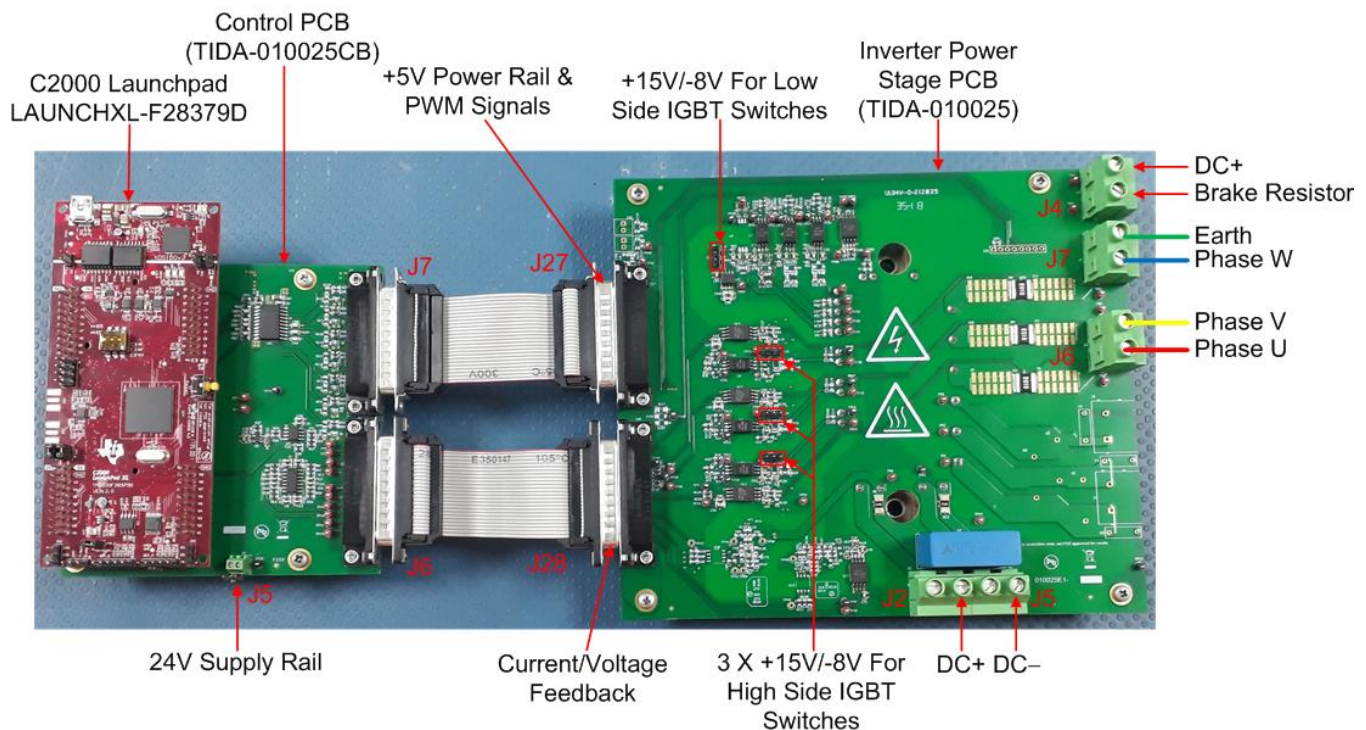
3 硬件、软件、测试要求和测试结果

3.1 所需硬件

3.1.1 TIDA-010025 PCB 概览

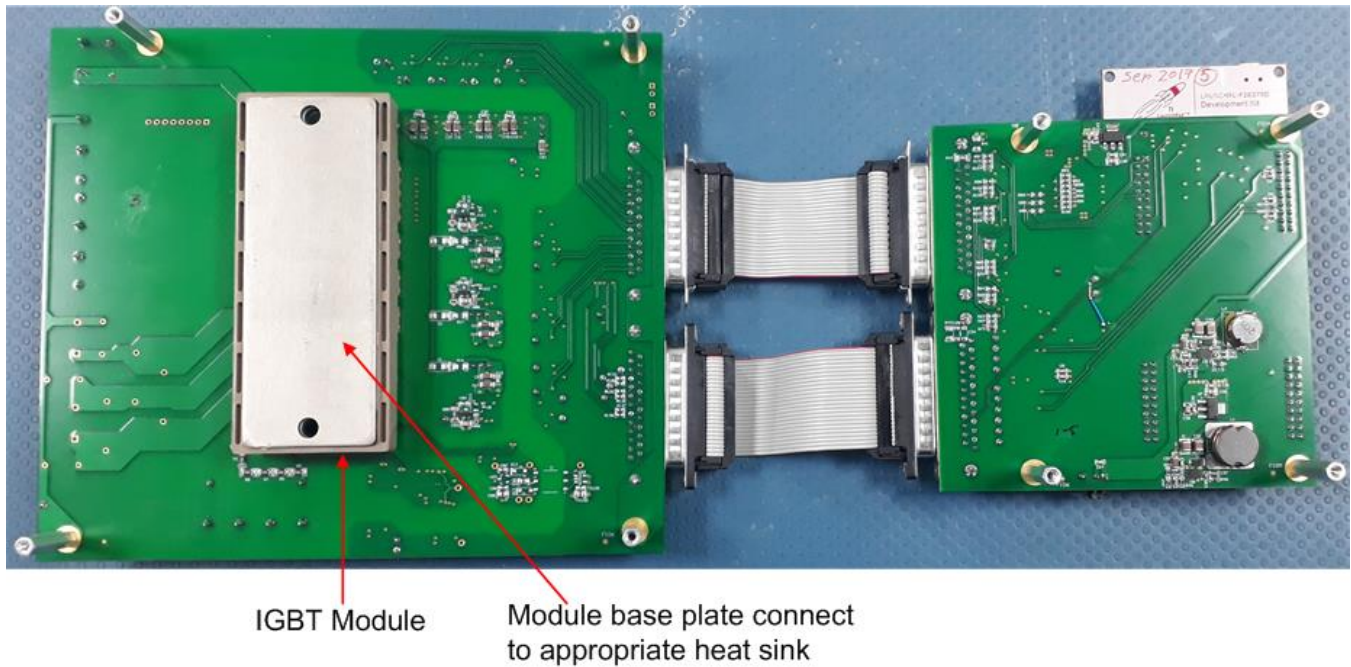
TIDA-010025 设计包括两个 PCB。控制模块 (TIDA-010025CB) 和逆变器功率级 (TIDA-010025)。两个 PCB 都使用带状电缆通过 25 引脚 D 超小型连接器进行连接。在控制板上的 J7 和逆变器板上的 J27 之间使用一根电缆，以发送 5V 电源轨和 PWM 信号，在逆变器板上的 J28 和控制板上的 J6 之间使用另一根电缆，以反馈电机相电流、直流链路电压和 IGBT 模块温度测量值。使用安装在控制模块上的 C2000 LaunchPad 来控制电机。外部 24V 电源连接至控制板上的 J5。3 个电机相位连接至 J6 和 J7。为将外部制动电阻器连接至 J4 提供了配置。通过连接器 J2 和 J5 为逆变器提供直流链路输入。

图 21. TIDA-010025 顶视图



具有集成整流器、制动斩波器和逆变器的 IGBT 模块安装在 PCB 的底部。IGBT 模块的基板需要使用导热化合物连接到散热器。需要根据应用中的功率耗散和可用的冷却机制来选择合适的散热器。

图 22. TIDA-010025 后视图



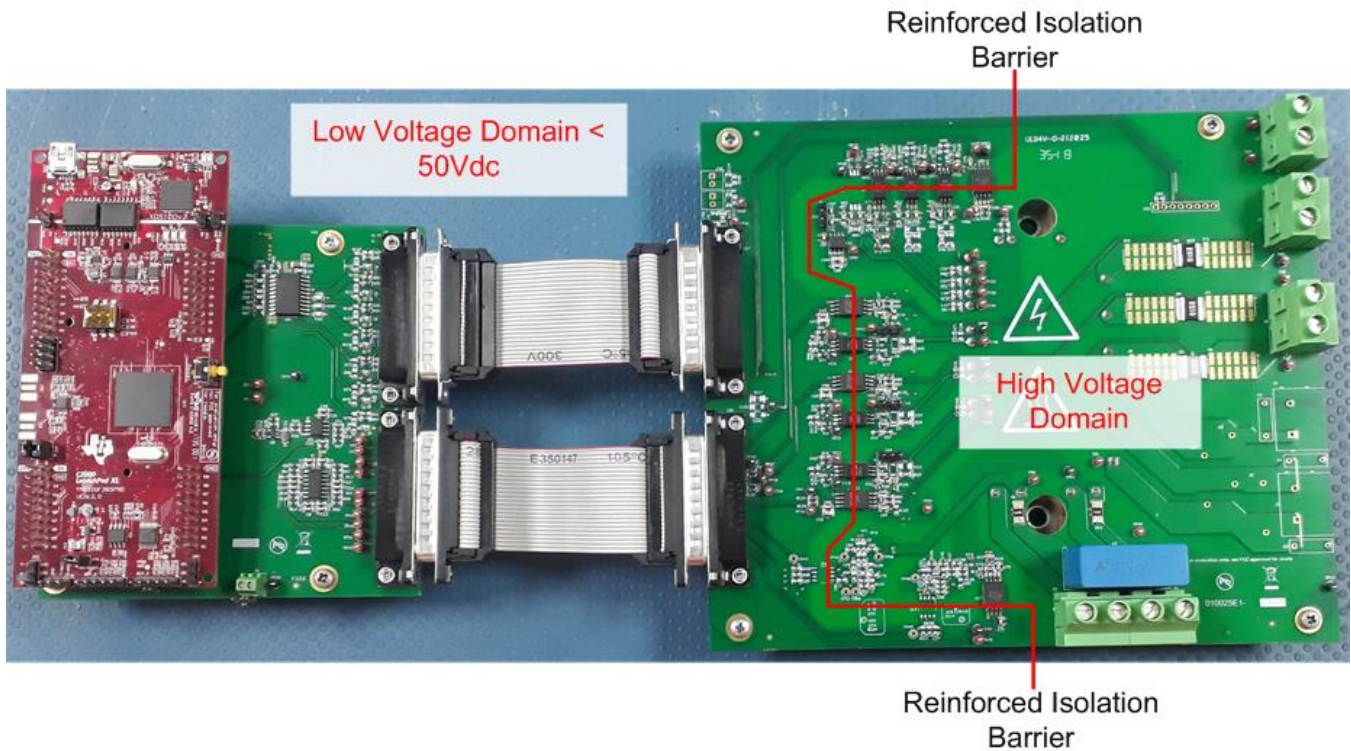
3.1.2 测试期间的安全预防措施

高压警告： TIDA-010025 可能会使用高达 800VDC 的高压直流链路输入。这些高压部分可能会与人体接触，在测试时需要极其小心，并且应该仅由专业人员处理。将电路板连接到火线时可能会发生电击。因此，在打开电源时不应直接处理任何暴露的端子（高压或其他）- 所有连接只能在断电状态下完成。为安全起见，建议使用具有过压/过流保护的隔离式测试设备。图 24 显示了 PCB 上的高压区域，并使用图 23 中的符号在 PCB 上进行了标记。

图 23. 高压警告



图 24. PCB 上的高压位置



切勿在无人照看的情况下使电路板通电。请注意，在逆变器关闭时，直流链路电容器可能会保留一些剩余电量。在再次处理电路板之前，确保直流链路电容器已完全放电。

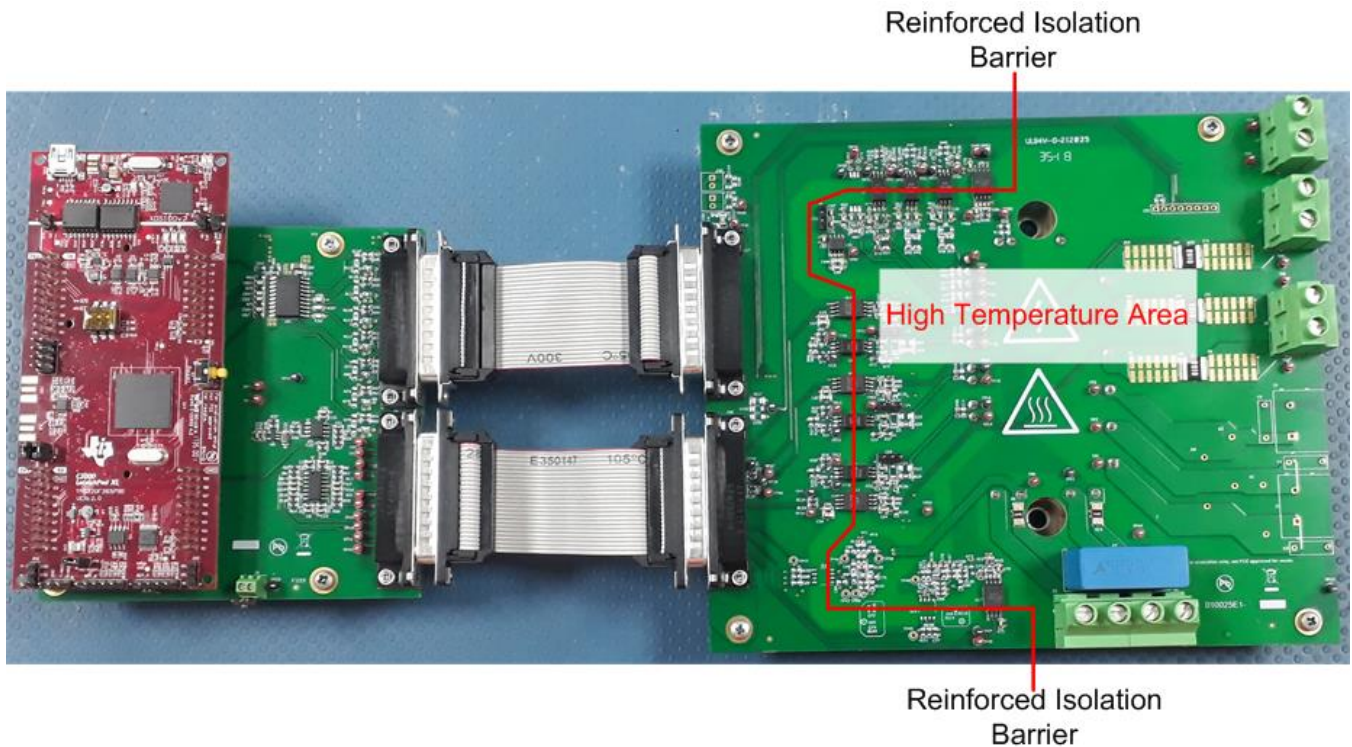
高压和低压区域由增强型隔离层隔开，如图 24 所示。在各个区域之间提供了至少 8mm 的爬电距离和间隙。

高温警告：在运行期间，特别是在高环境温度下以及当逆变器满载时，PCB 的一些组件和部件可能出现高温。请勿触摸 PCB，因为接触可能会导致烫伤。关闭逆变器后，让 PCB 冷却一段时间，然后再重新处理它。图 26 显示了 PCB 上的高温位置，并使用图 25 中的符号在 PCB 上进行了标记。

图 25. 高温警告



图 26. PCB 上的高温位置



3.1.3 控制器接口

TIDA-010025CB 与 LAUNCHXL-F28379D LaunchPad 相连接。表 3 至表 6 显示了使用的引脚功能。

表 3. 用于连接 LaunchPad™J1、J3 的 TIDA-010025CB J1 接口

TIDA-010025 功能	使用的 LaunchPad™功能	J1 引脚	J3 引脚	使用的 LaunchPad™功能	TIDA-010025 功能
+3.3V	3.3V	1	21		
		2	22	GND	GND
		3	23	ADCIN14	V_DC_LINK
		4	24		
		5	25		
		6	26		
		7	27	ADCINC2	I_U_PHASE
		8	28	ADCINB2	I_V_PHASE
		9	29	ADCINA2	I_W_PHASE
		10	30		

表 4. 用于连接 LaunchPad™J4、J2 的 TIDA-010025CB J2 接口

TIDA-010025 功能	使用的 LaunchPad™功能	J4 引脚	J2 引脚	使用的 LaunchPad™功能	TIDA-010025 功能
uC_PWM_UP	EPWM1A	40	20		GND
uC_PWM_UN	EPWM1B	39	19		
uC_PWM_VP	EPWM2A	38	18		
uC_PWM_VN	EPWM2B	37	17		
uC_PWM_WP	EPWM3A	36	16		
uC_PWM_WN	EPWM3B	35	15		
		34	14		
		33	13	GPIO124	OVERLOAD_FAULT
		32	12	GPIO125	Fault_Control
		31	11		

表 5. 用于连接 LaunchPad™J5、J7 的 TIDA-010025CB J3 接口

TIDA-010025 功能	使用的 LaunchPad™功能	J5 引脚	J7 引脚	使用的 LaunchPad™功能	TIDA-010025 功能
+3.3V	3.3V	41	61		
		42	62	GND	GND
		43	63	ADCIN15	V_TEMPERATURE
		44	64		
		45	65		
		46	66		
		47	67		
		48	68		
		49	69		
		50	70		

表 6. 用于连接 LaunchPad™J8、J6 的 TIDA-010025CB J4 接口

TIDA-010025 功能	使用的 LaunchPad™功能	J8 引脚	J6 引脚	使用的 LaunchPad™功能	TIDA-010025 功能
uC_PWM_BRAKE	EPWM4A	80	60	GND	GND
		79	59		
		78	58		
		77	57		
		76	56		
		75	55		
		74	54		
		73	53		
		72	52		
		71	51		

3.2 测试和结果

测试的重点是对三相逆变器的 UCC23513 栅极驱动子系统的功能和性能进行评估。

3.2.1 测试设置

图 27 至图 29 显示了测试设置。请遵循节 3.1.2 中提到的所有安全预防措施。F28379D LaunchPad 安装在 TIDA-010025 控制模块上。然后使用带状电缆将该控制模块连接到 TIDA-010025 逆变器功率级。电机连接到逆变器端子块，并提供直流链路连接。请注意，必须使用限流外部直流电源。TIDA-00199（也可使用 TIDA-010026）用于生成 +15V、-8V 隔离栅极驱动器电源轨。外部 24V 直流电源用于为控制卡和 TIDA-00199 供电。通过 USB 电缆来调试控制器。在 LaunchPad 上提供了基本隔离连接。

使用以下加电序列，断电序列与之相反。

- 24V 控制卡电源
- TIDA-00199 的 24V 电源
- 逆变器的 565Vdc（对应于 400VAC 电网电压）电源

图 27. 测试设置

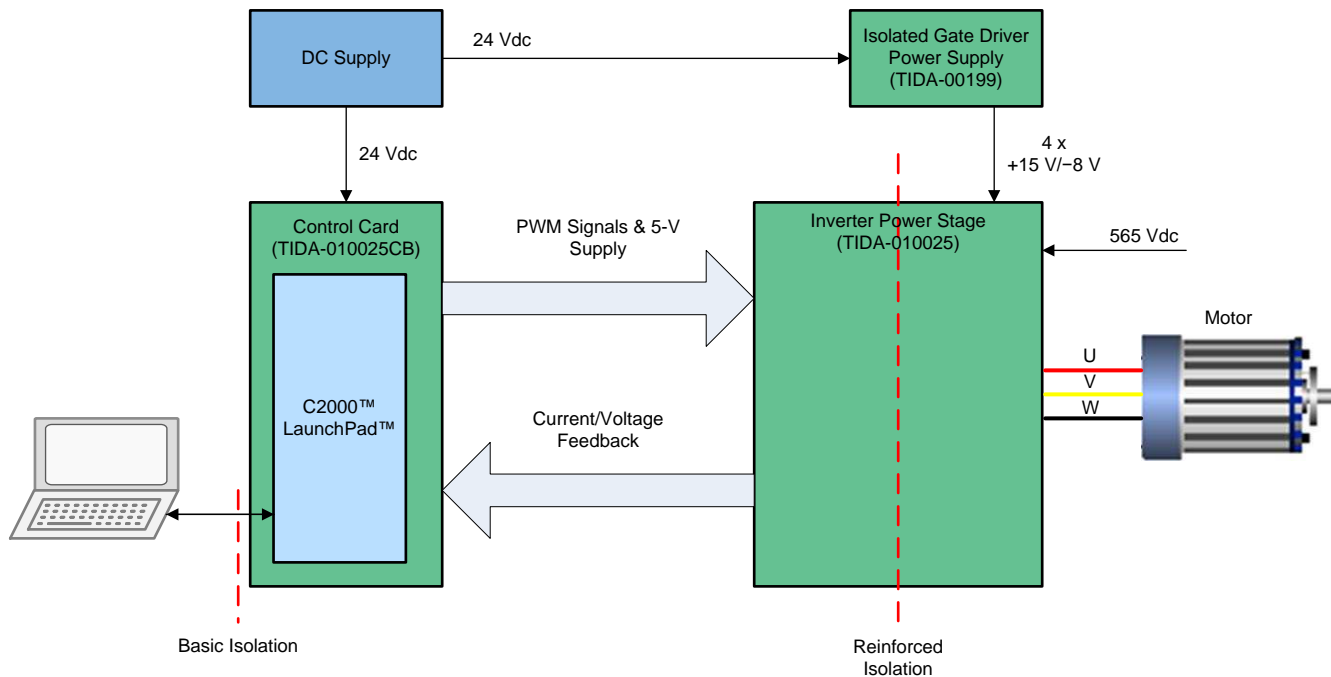


图 28. 实验室测试设置

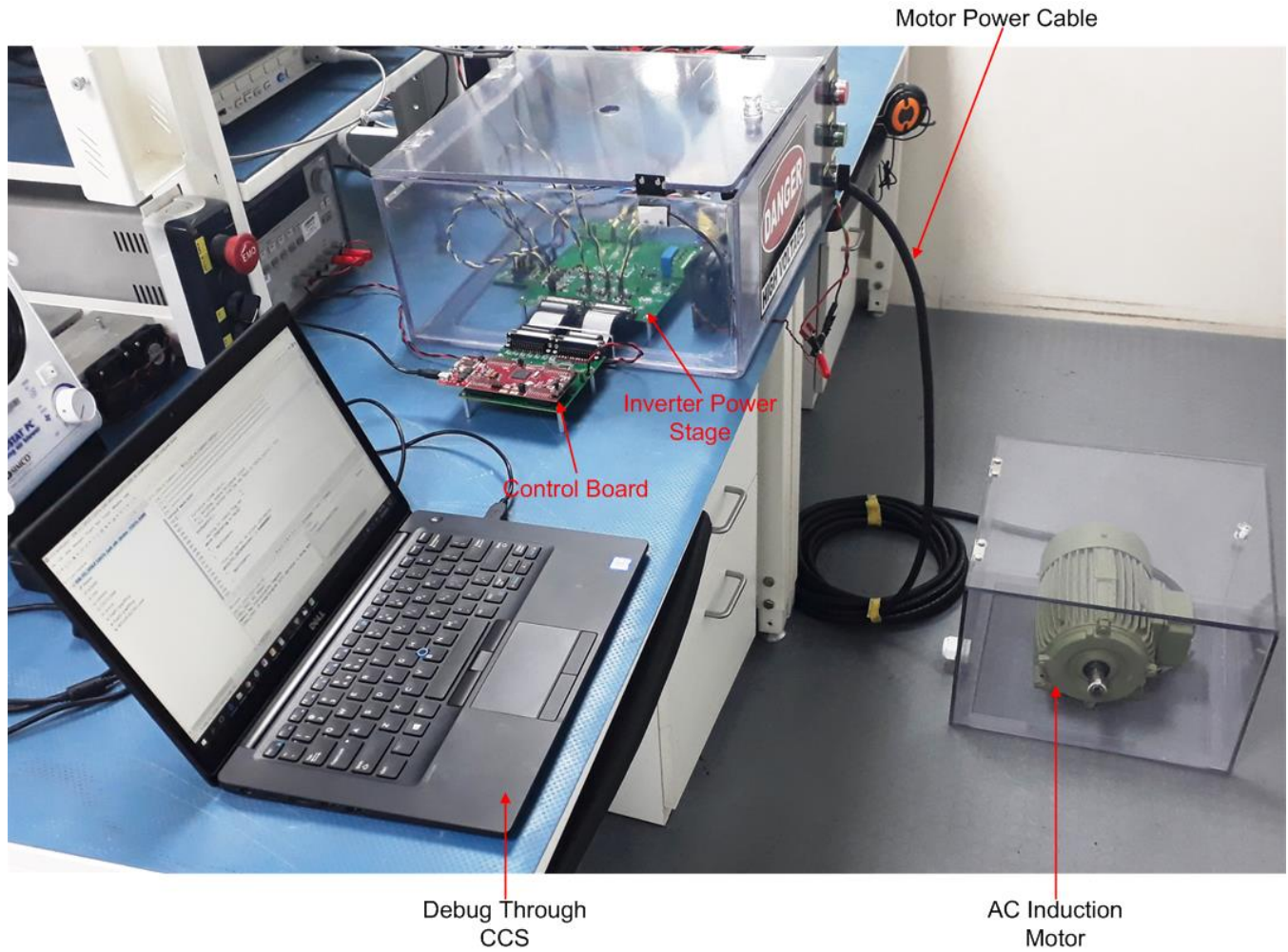
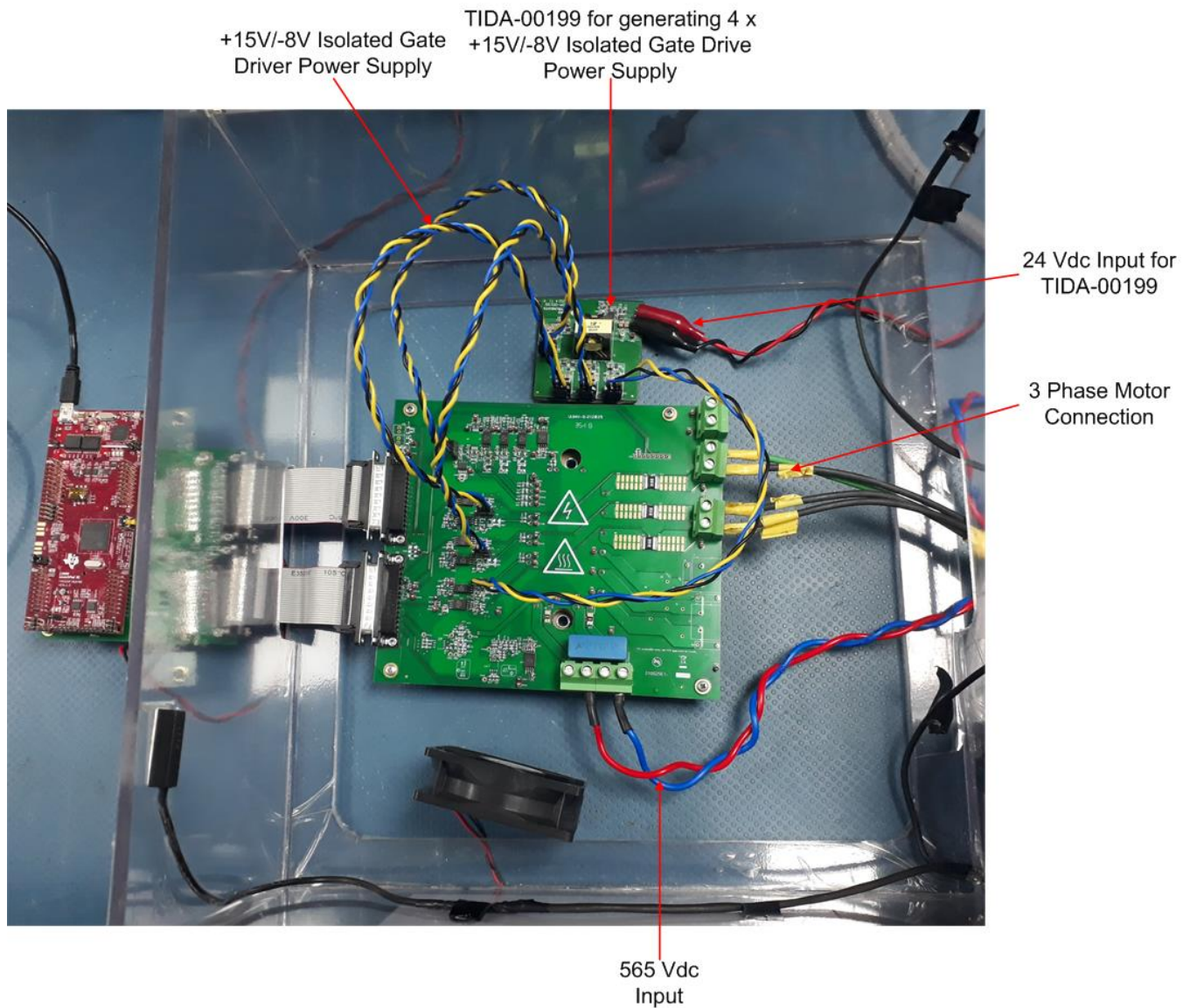


图 29. 实验室测试设置（已经过缩放）



3.2.2 测试结果

3.2.2.1 逆变器开关节点波形

此部分显示了逆变器功能开关波形。在 $-2A$ 的负电流（流入相节点的电流）下捕获逆变器开关节点的硬开关行为。在 $2A$ 的正电流（流出相节点的电流）下捕获软开关。对于所有波形，使用 $565Vdc$ 的直流总线电压。

图 30 至图 35 显示了逆变器开关节点的导通和关断行为

- 通道 1: MCU 的 PWM 输出
- 通道 2: U 相低侧 IGBT 栅极驱动器的仿真二极管上的电压
- 通道 3: U 相低侧 IGBT 的 V_{ge}
- 通道 4: 以 DC^- 为基准的 U 相的逆变器开关节点

图 30. 硬开关导通

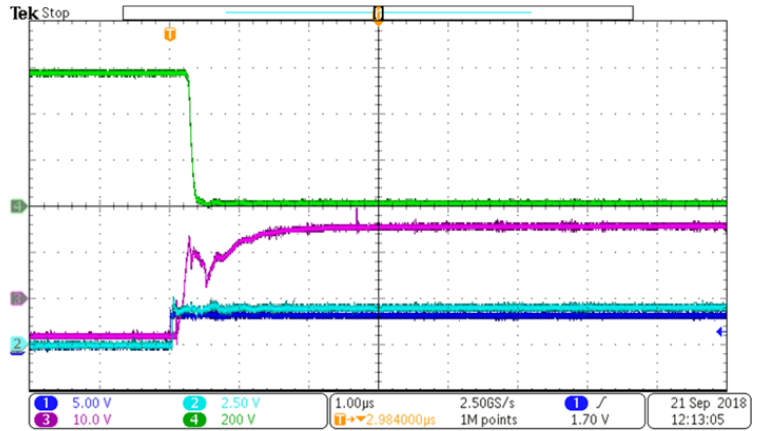
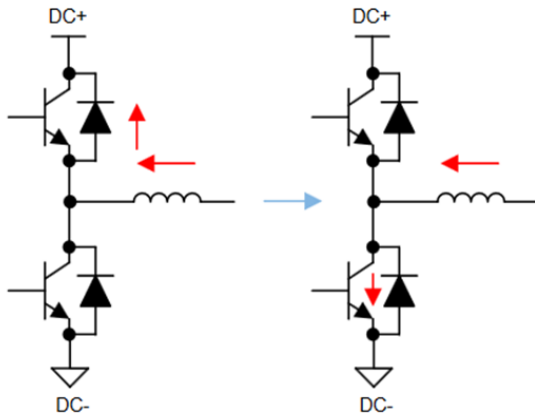


图 31. 硬开关关断

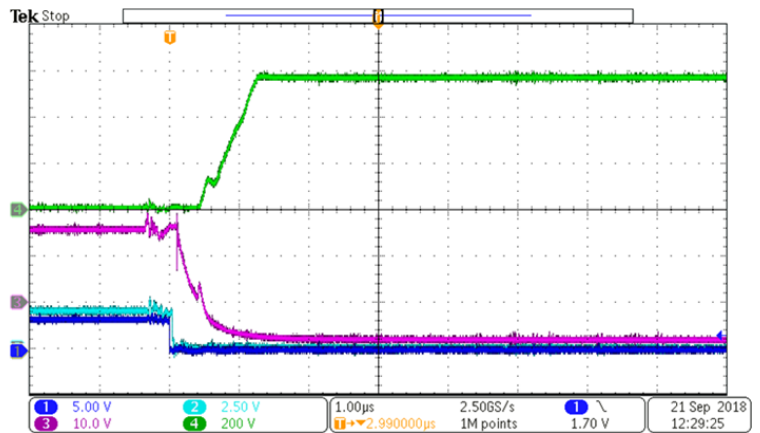
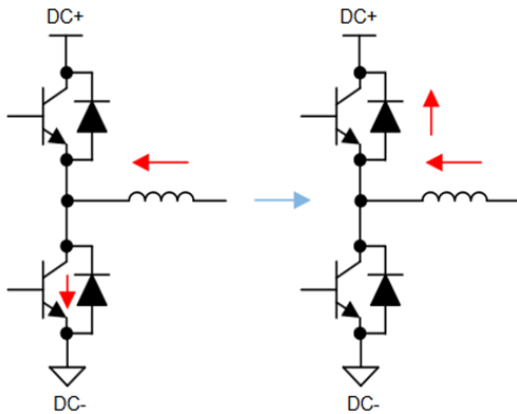


图 32. 软开关导通

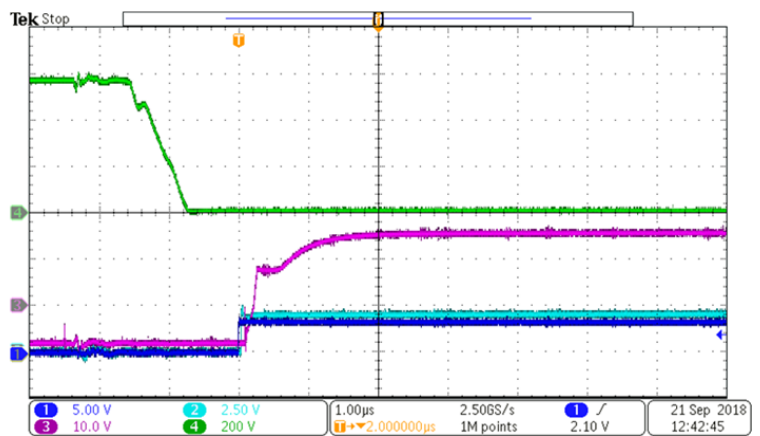
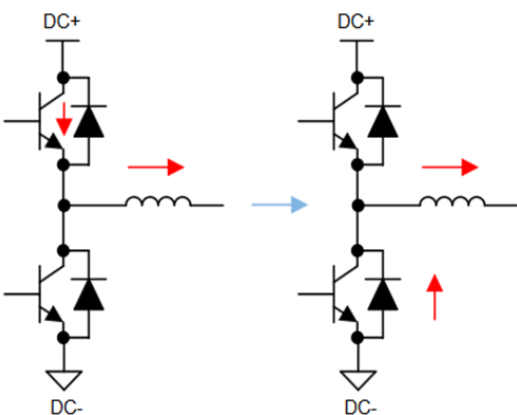


图 33. 软开关关断

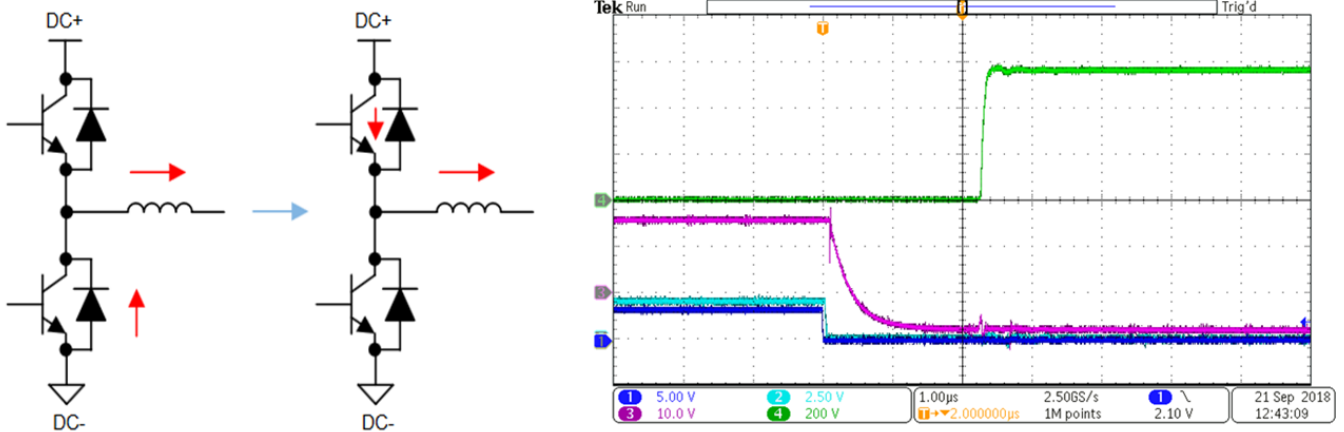


图 34 和图 35 显示了在 565V 直流链路电压下以 2A 相电流捕获的逆变器开关节点的导通和关断 dv/dt 。请注意，关断 dv/dt 取决于相电流和 IGBT 的输出电容 C_{oss} 。相电流越高， C_{oss} 上的电压升高得越快。

图 34. 导通 dv/dt

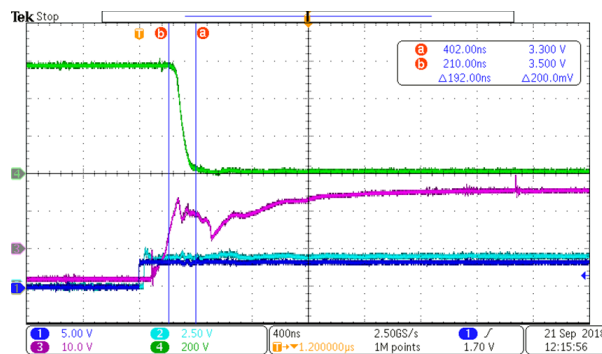
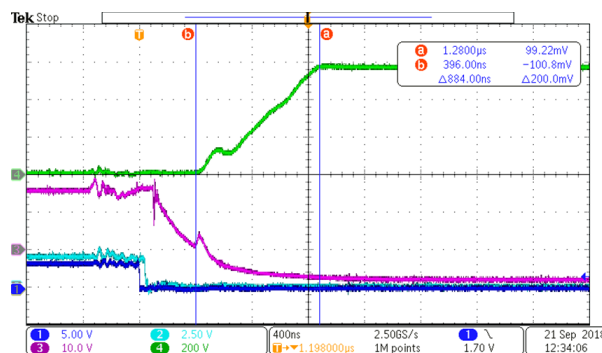


图 35. 关断 dv/dt



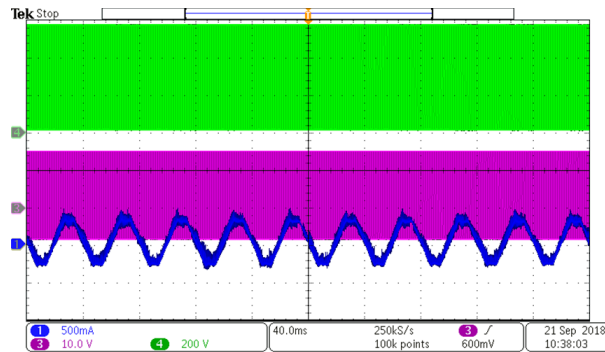
3.2.2.2 运行开环时的电动机电流波形

请注意，执行开环测试可以确定逆变器的特性。电机轴未加载，在没有电流控制环路的情况下驱动逆变器。捕获了 U 相电流。

- 通道 1: U 相电机电流
- 通道 3: U 相低侧 IGBT 的 V_{ge}

- 通道 4: 以 DC- 为基准的 U 相的逆变器开关节点

图 36. 电机电流波形



3.2.2.3 栅极电流波形

该部分捕获栅极拉电流和灌电流波形。测得的拉电流约为 0.66Apk，灌电流约为 0.8Apk。

图 37 至图 40 显示了逆变器开关节点的导通和关断行为

- 通道 1: MCU 的 PWM 输出
- 通道 2: 栅极电流（注意：在栅极电阻器上测量通道 2 波形，因此以伏特为单位进行显示。要将电压转换为电流，请将刻度除以 30）
- 通道 3: U 相低侧 IGBT 的 Vge
- 通道 4: 以 DC- 为基准的 U 相的逆变器开关节点

图 37. 0V 直流链路下的栅极拉电流

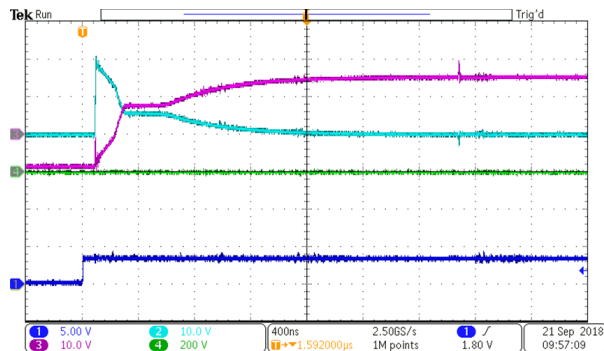


图 38. 0V 直流链路下的栅极灌电流

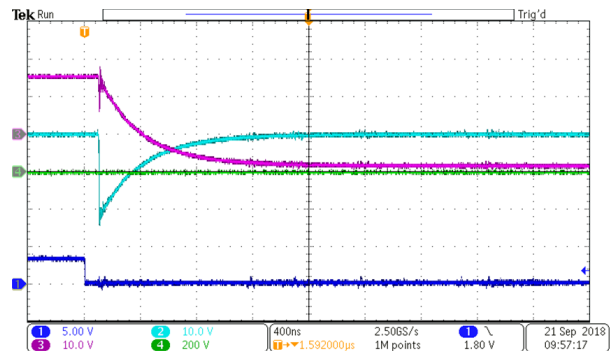


图 39. 使用 565V 为直流链路供电时的栅极拉电流

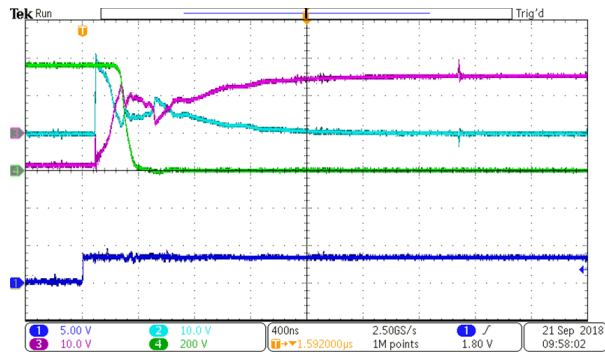
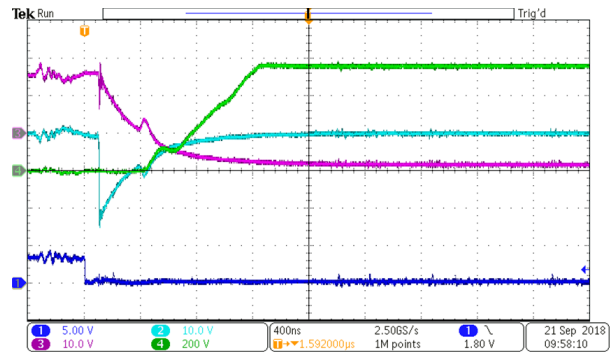


图 40. 使用 565V 为直流链路供电时的栅极灌电流



3.2.2.4 测量的脉宽失真度

脉宽失真度是栅极驱动器的输入到输出 PWM 脉宽的差异。在该设计中，测得其值大约为 20ns。

- 通道 1: MCU 的 PWM 输出
- 通道 2: 栅极驱动器的 PWM 输出
- 通道 3: U 相低侧 IGBT 的 Vge

图 41. 输入 PWM 脉宽

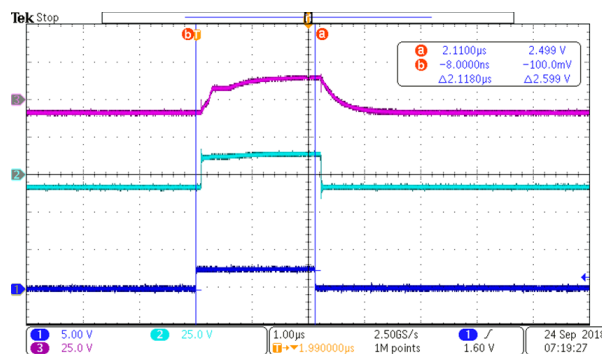
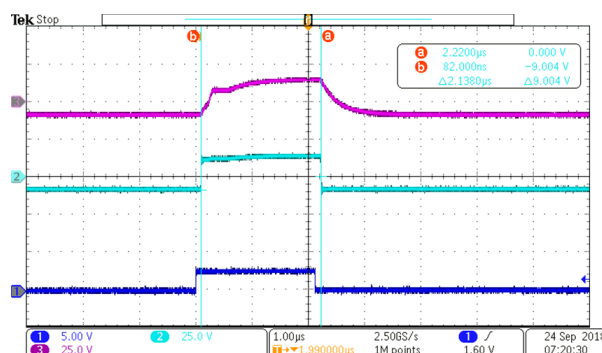


图 42. 输出 PWM 脉宽



3.2.2.5 最小脉冲抑制

最小脉宽抑制参数有助于确定 MCU 可以应用于逆变器的最小 PWM。

- 通道 1: MCU 的 PWM 输出
- 通道 2: 栅极驱动器的 PWM 输出

• 通道 3: U 相低侧 IGBT 的 Vge

图 43 显示了由栅极驱动器传递到输出的 PWM 输入。如果输入 PWM 宽度进一步减小 (如图 44 所示), 则脉冲被栅极驱动器抑制。图 45 显示, 对于该 TI 设计, IGBT 栅极至发射极电压的输入 PWM 应该约为 1.5 μ s, 以达到其最终值。该时间与门电路的 RC 时间常数成正比。

图 43. 栅极驱动器传递的脉宽

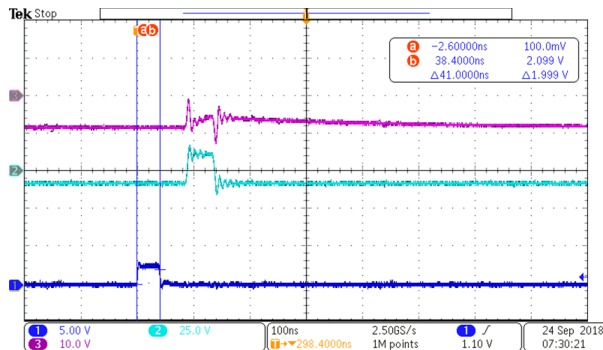


图 44. 被抑制的脉宽

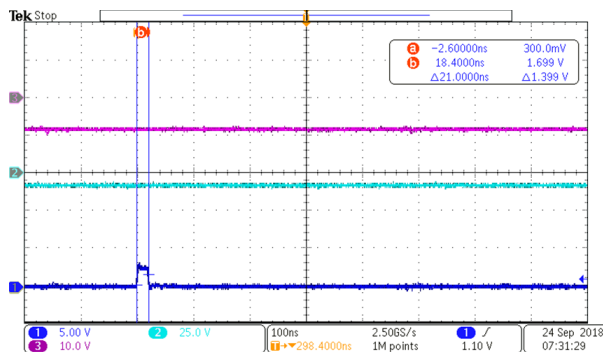
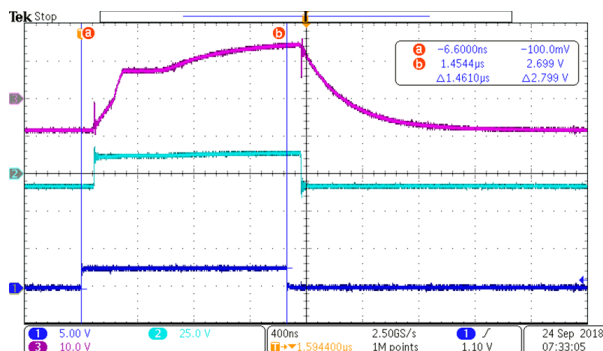


图 45. IGBT 的栅极处的最小脉宽



3.2.2.6 栅极驱动器的 UVLO

在栅极驱动器的 V_{CC} 和 V_{ee} 引脚之间实现了 UVLO 功能, 以防止在 IGBT 上出现欠驱动情况。如果 V_{CC} 在器件启动时低于 UVLO_R 或在启动后低于 UVLO_F, 则无论输入正向电流如何, 电压源 UVLO 功能都会将受影响的输出保持为低电平。

- 通道 1: MCU 的 PWM 输出
- 通道 2: U 相低侧 IGBT 的栅极驱动器电源 (V_{cc}-V_{ee})

- 通道 3: U 相低侧 IGBT 的 V_{ge}

图 46 显示测量的上升沿 UVLO 为 12.25V, 图 48 显示下降沿 UVLO 为 11.25V。

图 46. UVLO 上升沿

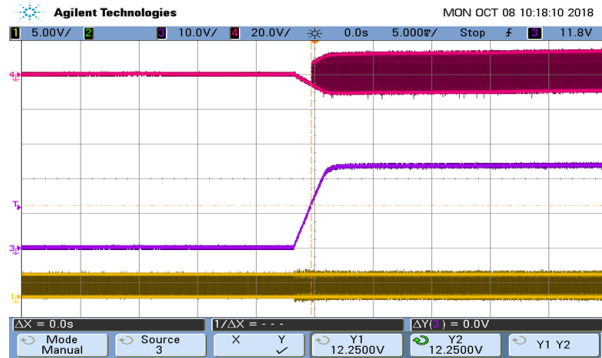


图 47. UVLO 上升沿 (已经过缩放)

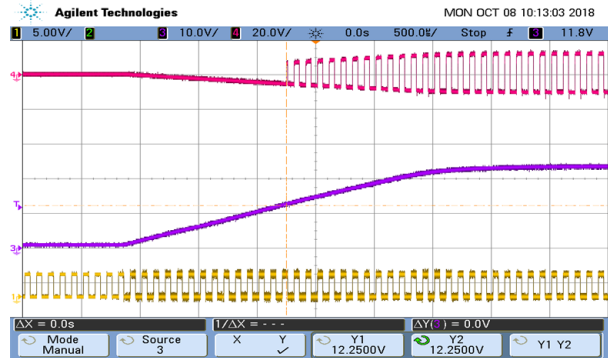


图 48. UVLO 下降沿

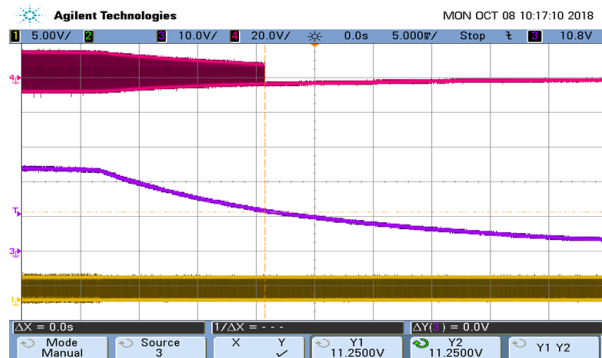
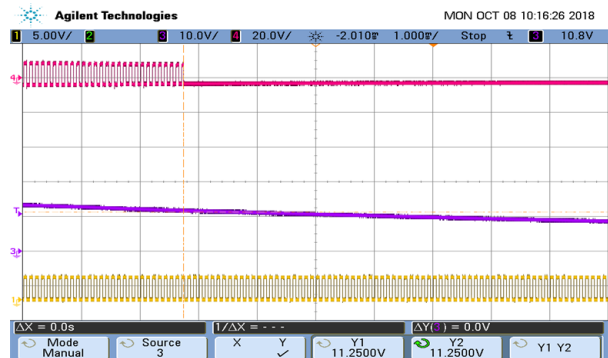


图 49. UVLO 下降沿 (已经过缩放)



3.2.2.7 互锁高侧和低侧栅极驱动器

TIDA-010025 电路板具有互锁高侧和低侧栅极驱动器的配置, 如节 2.3.3.1.3 所示。原理图中显示了需要组装和拆下以测试该配置的组件。

为了测试互锁, 故意将故障插入 PWM 信号中, 以便来自 MCU 的高侧和低侧 PWM 信号之间存在重叠。图 50 和图 51 显示, 只要两个 PWM 信号都为高电平, 栅极驱动器的输出 PWM 信号就为低电平。

- 通道 1: MCU 的低侧 IGBT PWM 信号
- 通道 2: MCU 的高侧 IGBT PWM 信号
- 通道 3: 低侧 IGBT 的 V_{ge}
- 通道 4: 高侧 IGBT 的 V_{ge}

图 50. 高侧和低侧栅极驱动器互锁

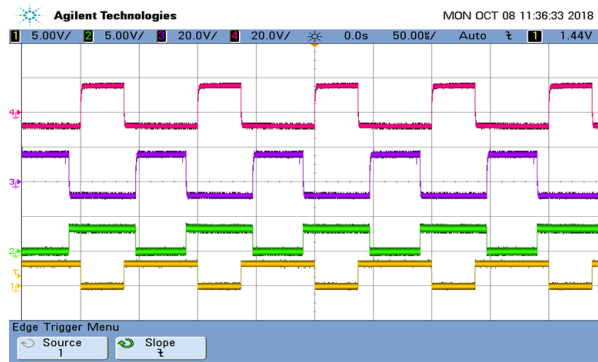
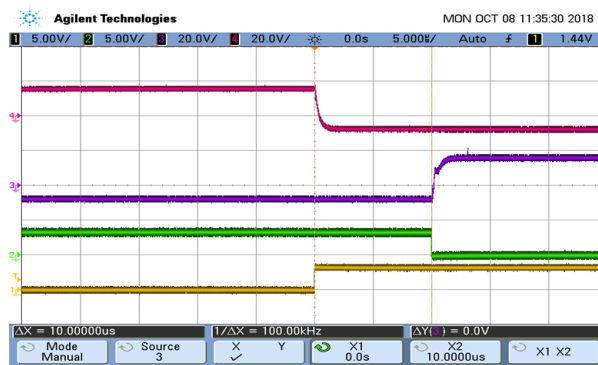


图 51. 高侧和低侧栅极驱动器互锁（已经过缩放）



4 设计文件

4.1 电路原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-010025](#) 中的设计文件。

4.2 物料清单

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010025](#) 中的设计文件。

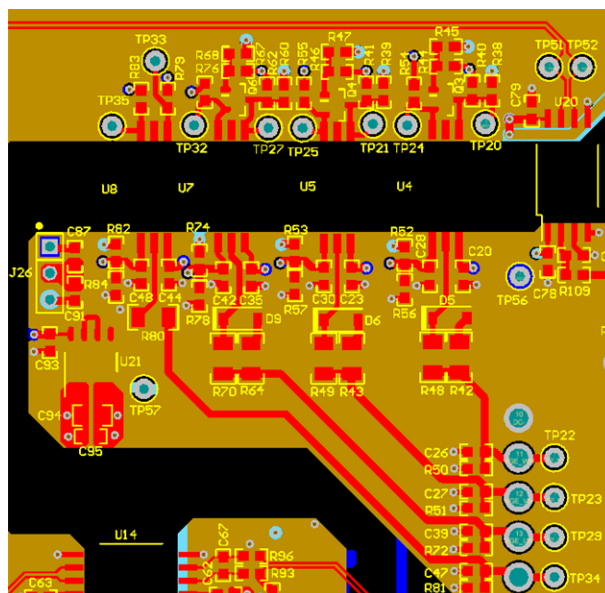
4.3 PCB 布局建议

4.3.1 UCC23513

为器件 U7 提供了布局指南。类似的指南适用于所有其他栅极驱动器。

- 将栅极驱动电源旁路电容器 C42、C35 放置在靠近器件电源引脚的位置
- IGBT 栅极导通和关断环路区域应保持最小。栅极轨道较宽，以减少寄生轨道电感。
- R62 和 R76 是仿真二极管限流电阻器，应保持靠近器件

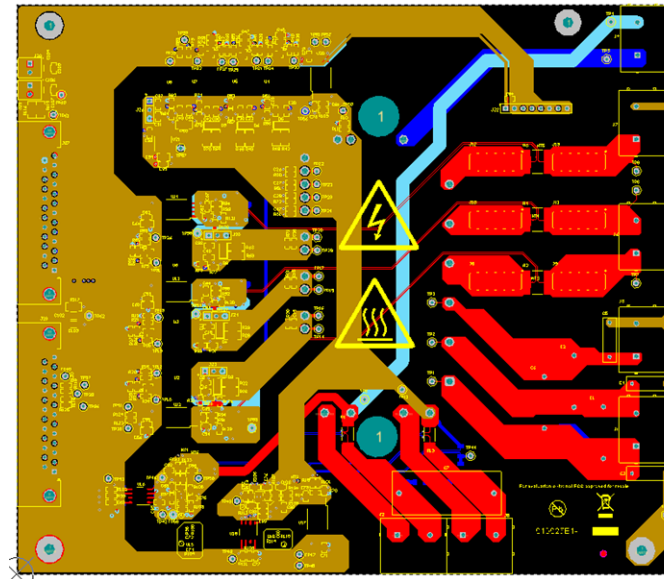
图 52. UCC23513 布局



4.3.2 高压网之间的爬电距离和间隙

请注意，控制器侧和逆变器侧彼此进行了增强型隔离。在隔离层上保持至少 8mm 的平面到平面爬电距离和间隙。增强型隔离器件 UCC23513、AMC1300B、AMC1311 放置在隔离层上，用于连接高压和低压侧的信号。

图 53. 爬电距离和间隙



4.3.3 布局图

要下载层图，请参阅 [TIDA-010025](#) 中的设计文件。

4.4 Altium 项目

要下载 Altium Designer®项目文件，请参阅 [TIDA-010025](#) 中的设计文件。

4.5 光绘文件

要下载光绘文件，请参阅 [TIDA-010025](#) 中的设计文件。

4.6 装配图

要下载装配图，请参阅 [TIDA-010025](#) 中的设计文件。

5 相关文档

1. 德州仪器 (TI)，《适用于三相逆变器的宽输入隔离式 IGBT 栅极驱动 Fly-Buck 电源》，[TIDA-00199](#)
2. 德州仪器 (TI)，《具有集成开关 PSR 反激式控制器的隔离式 IGBT 栅极驱动电源参考设计》，[TIDA-010006](#)

5.1 商标

C2000, LaunchPad, E2E, NexFET, WEBENCH, 使用的 LaunchPad are trademarks of Texas Instruments. Altium Designer is a registered trademark of Altium LLC or its affiliated companies. All other trademarks are the property of their respective owners.

修订历史记录

注：之前版本的页码可能与当前版本有所不同。

Changes from Original (November 2018) to A Revision	Page
• 已更改 将 1414Vpk 更改成了 1500Vdc.....	1
• 已更改 将 1414V 更改成了 1500Vdc	2

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