

TI Designs: TIDA-01456

适用于 200V 至 480V 工业交流驱动器的紧凑型非隔离式三相逆变器参考设计



说明

该参考设计可实现可变频率交流逆变器驱动器和伺服驱动器的三相逆变器子系统。该设计特别适合用于微控制器接地和逆变器接地为非隔离式的驱动架构。基本隔离式栅极驱动器 UCC5320S 用于驱动高侧逆变器开关，而小巧紧凑型六引脚 UCC27531 低侧栅极驱动器则用于驱动底部开关。增强型隔离移至 UART 通信通道。借助分流电阻和双路运算放大器 TLV9062，可在两个相位实现对逆变器半桥桥臂中电流的检测。该驱动架构可减少增强型隔离通道的数量，并实现成本优化的紧凑型解决方案。该设计由 C2000™ 微控制器进行控制。

资源

TIDA-01456	设计文件夹
UCC5320	产品文件夹
UCC27531	产品文件夹
TLV9062	产品文件夹
TLV431	产品文件夹
ISO7741	产品文件夹
SN6501	产品文件夹
TLV702	产品文件夹
TLV6001	产品文件夹
TL331	产品文件夹
TMDSCNCD28379D	工具文件夹



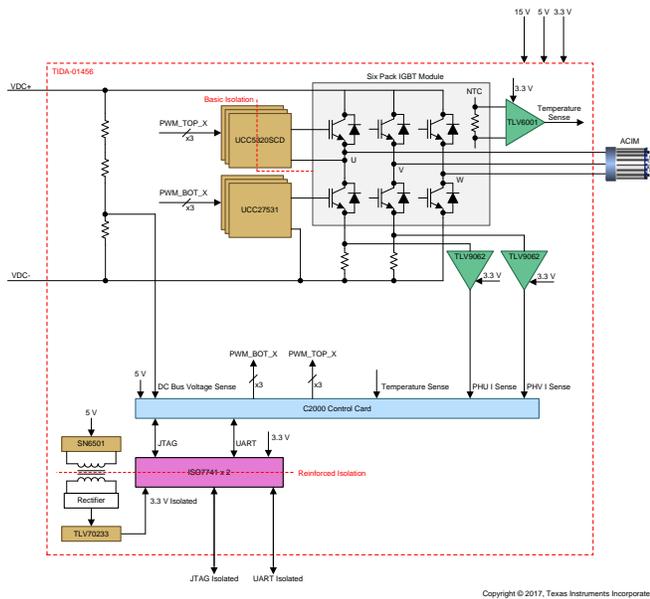
[咨询我们的 E2E 专家](#)

特性

- 适用于 200V 至 480V 交流驱动器的三相逆变器功率级，连续额定电流高达 $10A_{RMS}$
- 紧凑的成本优化型解决方案，原因如下：
 - 由于将增强型隔离从功率级移至处理器间通信通道，因此增强型隔离器件的数量从 9 个降为 1 个
 - 采用小型低侧栅极驱动器（SOT23: 2.9mm x 1.6mm）和基本隔离式高侧栅极驱动器（SOIC8: 4mm x 5mm）
 - 借助自举技术，15V 单一电源轨即可为所有栅极驱动器供电
 - 功率级中设有带基本隔离的高侧栅极驱动器，可最大限度缩短爬电距离
- 栅极驱动器的低传播延迟（小于 75ns）特性可减少死区时间，从而提高逆变器效率并减少失真
- 由于栅极驱动器具有极高的米勒 dV/dt 导通效应抗扰度、负输入电压处理以及 UVLO 功能，因此是一套强大的解决方案
- 借助双路运算放大器，可对两个逆变器桥臂进行基于分流器的低侧电流检测
- 用于控制器调试的增强隔离型 JTAG 和用于通信的 UART
- 借助 NTC 集成的内部模块，可以进行 IGBT 模块温度测量

应用

- [交流逆变器和变频驱动器](#)
- [伺服 CNC 和机器人](#)

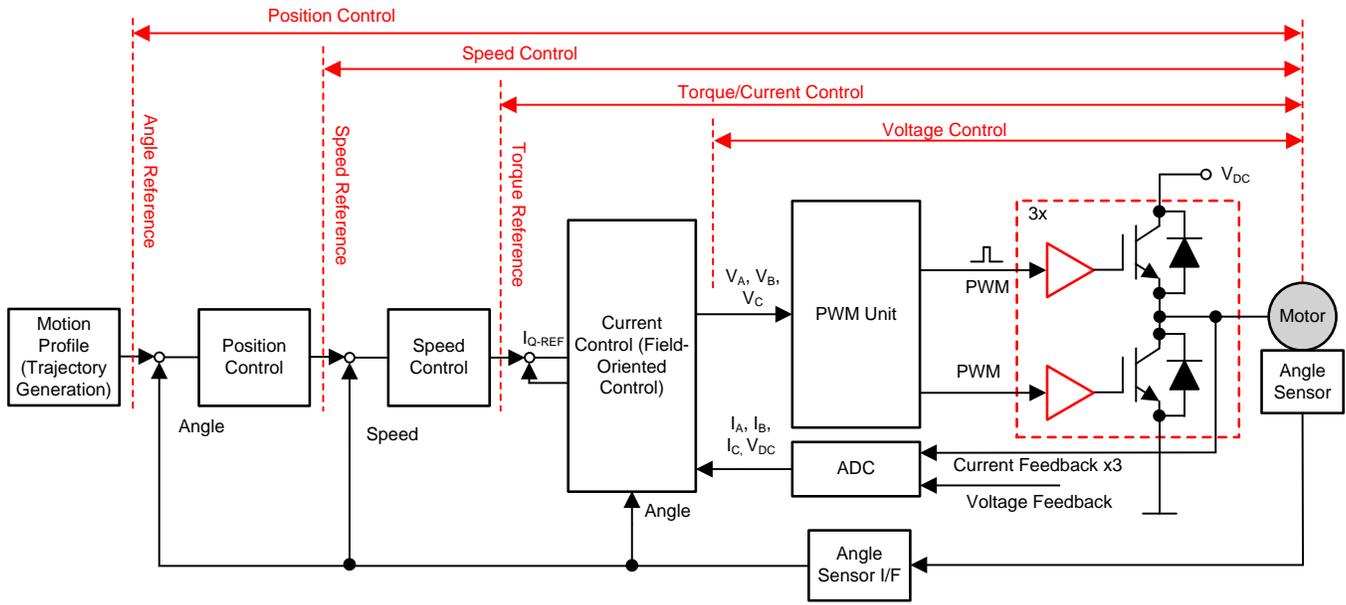


该 TI 参考设计末尾的重要声明表述了授权使用、知识产权问题和其他重要的免责声明和信息。

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。

通用电机控制块如图 1 中所示。最内部的控制环路控制电机施加的扭矩。电机施加的扭矩与电机电流成正比。可以在电机相位、逆变器半桥支路或直流链路中感测电流。上述所有感测方法都有优缺点，具体选择何种感测技术取决于所需的驱动架构和控制性能。然后，通过改变施加给电机的逆变器占空比将感测到的电流控制到环路电流的设定值。电流环路位于速度环路内。电机的速度可以通过安装在电机轴上的旋转变压器和编码器之类的传感器来检测，也可以通过计算得出而不使用传感器。速度检测方式的选择也取决于驱动性能和架构。速度环路向电流控制环路提供电流设定值。设定值是实际速度与所需速度之间误差的函数。速度环路位于位置控制环路内。位置控制环路提供速度设定值，它是实际位置与所需位置之间误差的函数。所需的位置设定值也可以来自外部控制环路、人机界面或运动控制分析器。

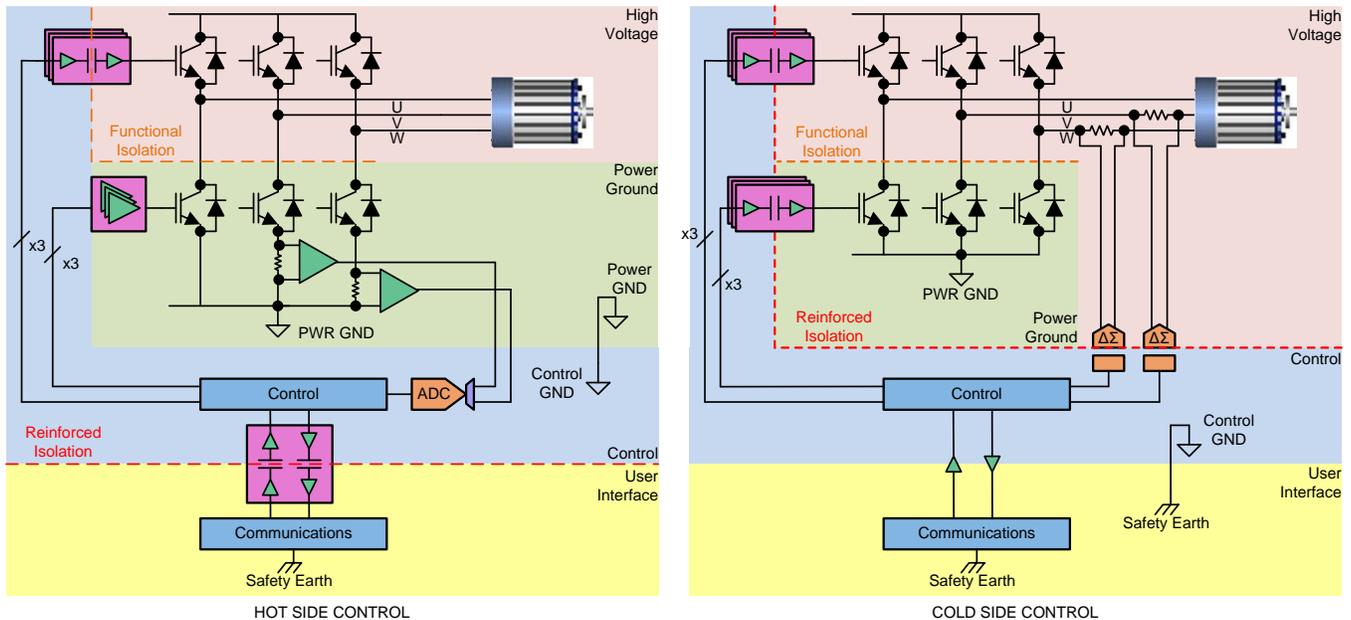


Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 1. 通用电机控制块

控制块可以在单个控制器内部实现，也可以在多个控制器之间共享。为了安全起见，功率级和用户界面之间需要增强型隔离。增强型隔离可以设置在控制器和功率级之间，这种控制架构被称为冷侧控制，也可以在一个电机控制器内部实现扭矩和电流控制，在另一个应用控制器内部实现位置与速度控制、通信及人机界面功能。增强型隔离可以设置在两个控制器之间的通信通道中。电机电流控制器使用的 IC 与逆变器共用接地，这种架构被称为热侧控制。

图 2 显示驱动器内部实现的热侧和冷侧控制架构。对于冷侧控制，六个栅极驱动器、电流传感器和直流链路电压感测需要增强型隔离。对于热侧控制，由于安全隔离被移至通信通道，因此只有高侧栅极驱动器需要隔离。这使得基本隔离式高侧栅极驱动器的外形非常紧凑。小型低成本非隔离式栅极驱动器用于低侧开关；电流感测使用分流电阻器和运算放大器在逆变器相位支路中完成；直流链路电压使用分压器感测；温度使用运算放大器感测减少增强型隔离通道的数量可以节省成本并获得小型功率级。热侧控制架构通常适用于 5kW 范围内的低功耗驱动器。对于更高功率的驱动器，接地弹跳开始变得明显，导致控制器和功率级之间共用接地变得更难。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 2. 热侧和冷侧电机控制架构

该参考设计展示了采用 TI 非隔离式低侧栅极驱动器、基本隔离式高侧栅极驱动器和电流感测运算放大器实现的热侧控制架构的三相逆变器的功能。该设计用于展示该架构在实际系统中的稳健性。显示以下测试结果：

- 栅极驱动器的 UVLO 功能
- PWM 传播延迟
- 硬开关和软开关条件下的栅极拉电流和灌电流、栅极电压以及开关节点电压波形
- 自举电源纹波

1.1 主要系统规格

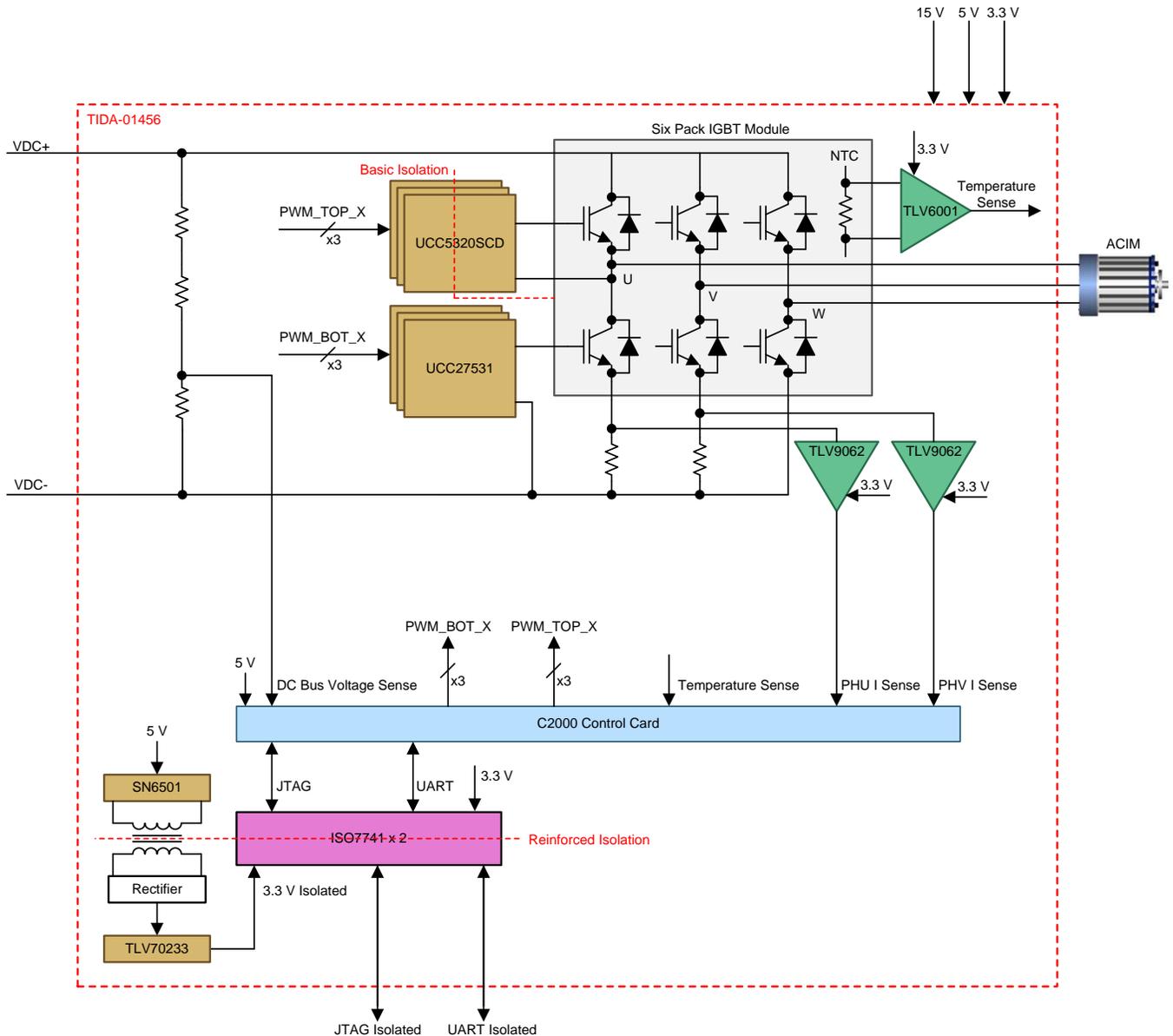
表 1. 主要系统规格

小节	参数	规范	备注
逆变器	直流总线输入电压	200V 至 900V 直流	—
	持续输出额定电流	10A _{RMS}	—
	输出频率	0Hz 至 100Hz	—
	PWM 开关频率	4kHz 至 16kHz	逆变器在指定范围内进行测试
	PWM 死区	800ns	逆变器使用 800ns 死区进行测试；可以变化，只要顶部和底部的 IGBT 开关的 V _{GE} 信号之间没有重叠
	使用电源开关	1200V, 35A, 低侧开关采用六组逆变器 IGBT 模块并带有集成式 NTC 和开放发射极	器件型号: SK35GD126ET
电流感测	测量范围	20A _{PK}	使用的分流电阻器为 4mΩ, 差分放大器增益为 20.1
反馈	测量的变量	U 相和 V 项支路电流、模块温度、直流链路电压	电机控制和保护所需的反馈
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	过热关断	用户软件实现
	隔离	增强型隔离	增强型数字隔离器用于 JTAG 和 UART 信号；热侧和冷侧之间有 8mm 爬电距离
运行条件	温度范围	0°C 至 85°C	选择的元件支持 85°C 的工业温度范围
接口连接器	微控制器 (MCU) 接口	用于 C2000 控制卡的 180 引脚双列直插式连接器插座	有关连接器上的引脚分配, 请参考原理图
		电源	15V、100mA
		5V、500mA	用于为 C2000 控制卡和基于 SN6501 的推挽式隔离电源供电。
		3.3V、100mA	用于为电流感测放大器、高侧栅极驱动器的初级侧、NTC 缓冲器、高压 LED 指示灯比较器电路、数字隔离器的热侧以及电流感测放大器电平转换的参考信号发生器供电
	通信	隔离式 JTAG	14 引脚接头, 带用于连接调试探针的 key 引脚
		隔离式 UART	3 引脚接头
PCB 信息	PCB 层堆栈	4 层, 2oz 铜	35μm 铜
	层压	FR4, 高温	—
	PCB 厚度	1.6mm	—
	PCB 尺寸	95mm x 110mm	—

2 系统概述

2.1 方框图

图 3 显示此参考设计的系统级框图。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 3. TIDA-01456 框图

逆变器部分使用六组 IGBT 电源模块实现。电源模块由三个半桥组成。每个低侧 IGBT 的发射极在模块内部打开并引出至引脚。这样便可在相位支路上增加一个分流电阻器来感测低侧电流。低侧 IGBT 由低侧栅极驱动器 UCC27531 控制。该器件采用 6 引脚 SOT-23 封装，外形小巧紧凑。采用 SOIC8 封装的基本隔离式 UCC5320S 用于高侧栅极驱动器。六个 PWM 信号从控制器路由到栅极驱动器。直流链路电压通过终端块施加给电路板。可施加的最大直流链路电压为 900V。电机通过终端块连接到逆变器。

由于控制器与逆变器共用接地，低侧电流感测在相位支路和非隔离式运算放大器中使用分流电阻器完成。在此设计中，成本优化的双运算放大器 TLV9062 用于差分放大器配置。该运算放大器使用一个 3.3V 的电源。对于双向电流感测，需要一个参考电压来对分流电压进行电平转换。TLV431 用于从 3.3V 中生成 1.65V 的参考电压，以提供给差分放大器。

逆变器功率级设计用于防止直流总线欠压/过压、IGBT 模块过热。直流链路电压使用高阻抗分压器感测。调节电压直接连接到控制器内部的 ADC。模块温度使用模块内部集成的负温度系数电阻器来监测。分压器使用 NTC 和外部电阻器来实现。NTC 上的压降由一个经济高效的运算放大器 TLV6001 缓冲，后者驱动控制器内部的 ADC。实际温度来源于控制器中实现的软件压降。

PCB 板上的增强型隔离位于通信通道中。PCB 板上的通信接口为 JTAG 和 UART。JTAG 信号用于调试控制器，UART 信号可用于与外部串行接口通信。JTAG 和 UART 信号通过两个 ISO7741 数字隔离器增强隔离，然后再接出 PCB 板。

除直流链路电压外，TIDA-01456 PCB 还需要三个额外的外部电源。低侧和高侧栅极驱动器需要 15V 电源。高侧栅极驱动器的次级侧由低侧电源的自举电源供电。C2000 控制卡需要 5V，高侧栅极驱动器的初级侧、电流和温度感测运算放大器以及数字隔离器的热侧需要 3.3V。隔离器的次级侧需要增强型隔离式电源，由 SN6501 推挽式变压器驱动器、增强型隔离式中间抽头变压器和隔离侧上的整流二极管生成。SN6501 将 5V 转换为隔离式中压轨。TLV70233 LDO 将中压轨转换为 3.3V，供隔离器冷侧使用。

2.2 主要产品

2.2.1 UCC5320S

UCC5320S 是一款紧凑型单通道基本隔离式栅极驱动器，采用 8 引脚 SOIC 封装。该封装具有 4mm 的爬电和余隙，可以支持高达 $3kV_{RMS}$ 的隔离电压。该驱动器具有分流输出，其最小拉电流额定值为 2.4A，最小灌电流额定值为 2.2A，分别用于控制 IGBT 开关的上升和下降时间。当栅极驱动电源出现故障时，11V UVLO 功能可防止 IGBT 在线性区域内工作。

与光耦合器相比，UCC5320S 的部件间偏移更小，传播延迟更低，工作温度更高，并且 CMTI 更高。低传播延迟可缩短死区时间，高温范围和 CMTI 使栅极驱动解决方案更加稳健。

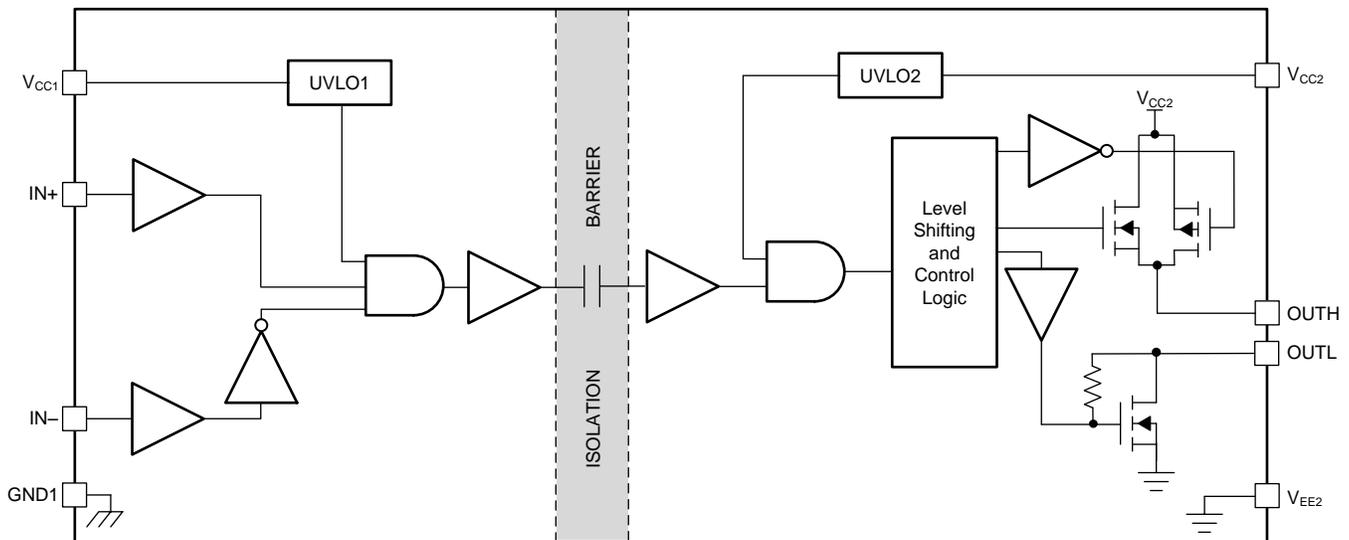


图 4. UCC5320S 的功能框图

2.2.2 UCC27531

UCC27531 是一款单通道高速栅极驱动器，通过分流输出拉电流额定值高达 2.5A，灌电流额定值高达 5A。分流输出与强大的不对称驱动提高了器件对寄生米勒接通效应的抗扰性，并有助于减少地弹抑制。极低的传播延迟（通常为 17ns）有助于减少死区时间，而小型 6 引脚 SOT-23 封装可实现低成本紧凑型解决方案。

与分立式晶体管对解决方案相比，UCC27531 提供了简单的控制器接口，减少了 BOM 组件，并在栅极驱动器的电源上集成了 UVLO 检测等功能。

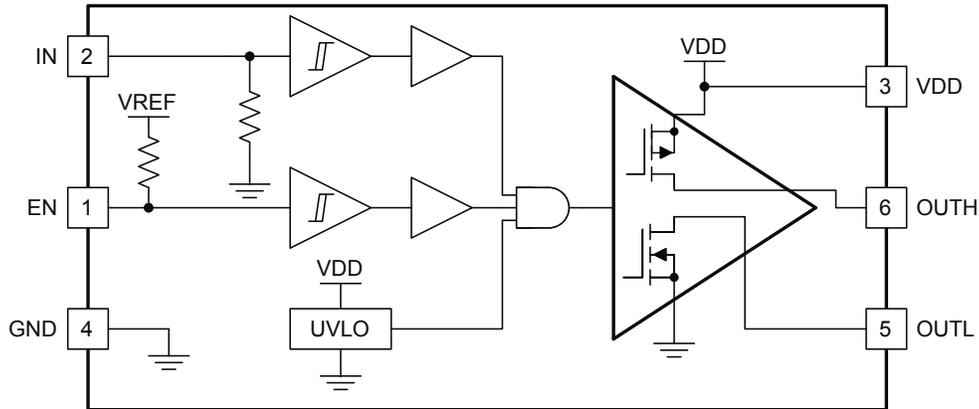
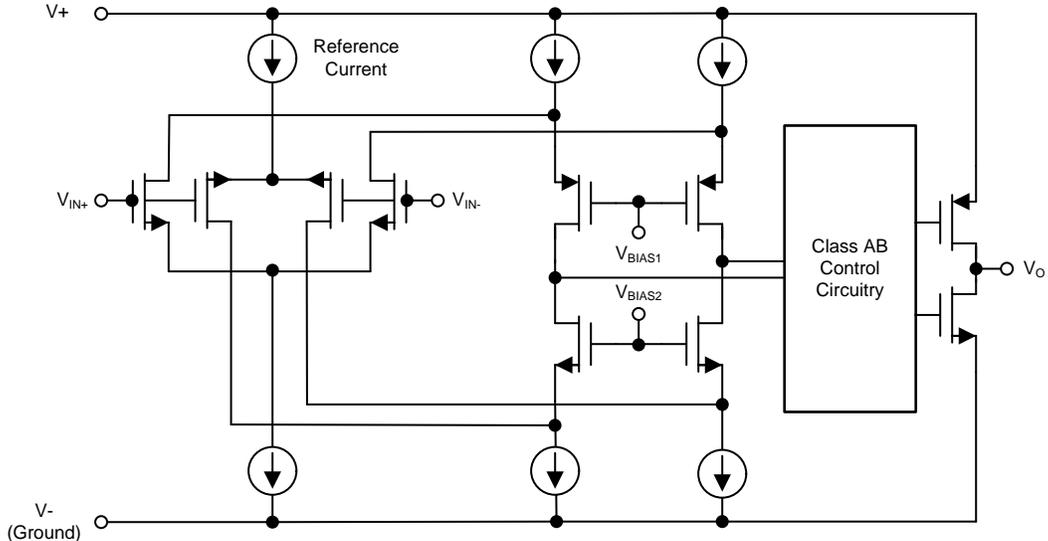


图 5. UCC27531 的功能框图

2.2.3 TLV9062

TLV9062 是一款经济高效的双低压运算放大器，具有轨至轨输入和输出摆幅功能。该器件具有 10MHz 的单位增益带宽积和 6.5V/μs 的输出转换率。该器件内部集成了 RFI 和 EMI 抑制滤波器。这些特性使 TLV9062 成为逆变器半桥相位支路中低侧电流感测的出色器件。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 6. TLV9062 的功能框图

2.2.4 TLV431

TLV431 是一款低压三端可调参考电压器件，在工业温度范围内具有指定的热稳定性。借助于两个外部电阻器，输出电压可在 V_{REF} (1.24V) 和 6V 之间任意调节。具有有源输出电路和精确输出电压调节的 80μA (典型值) 低阴极工作电流使得 TLV431 成为齐纳二极管的出色替代品。在此设计中，该器件用于提供 1.65V 参考电压为电流感测放大器的输出进行电平转换。

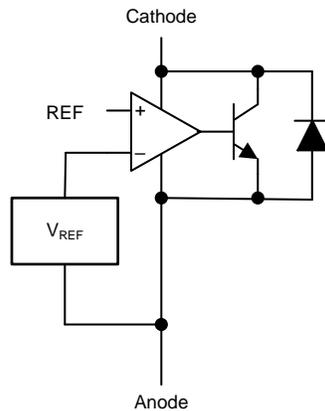
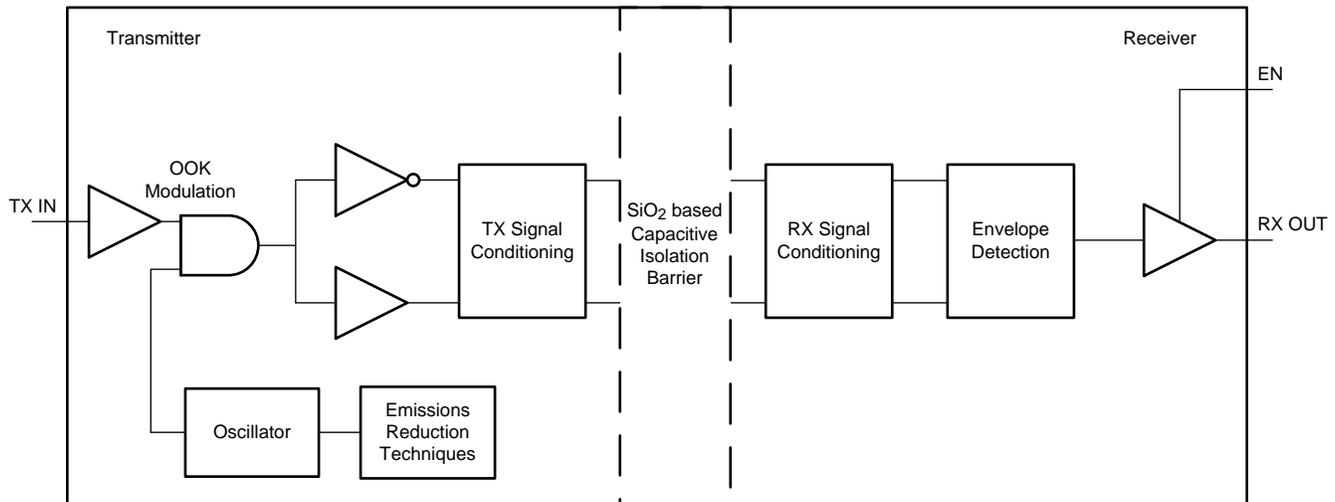


图 7. TLV431 的功能框图

2.2.5 ISO7741

ISO7741 是一款高性能四通道数字隔离器，隔离等级达到 $5000V_{RMS}$ (DW 封装) 且符合 UL 1577 标准。该器件根据 VDE、CSA、TUV 和 CQC 增强了隔离。凭借创新型芯片设计和布线技术，ISO7741 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。从而获得稳健的数字隔离解决方案。在此设计中，该器件用于将 JTAG 和 UART 信号与热侧的 MCU 进行隔离。

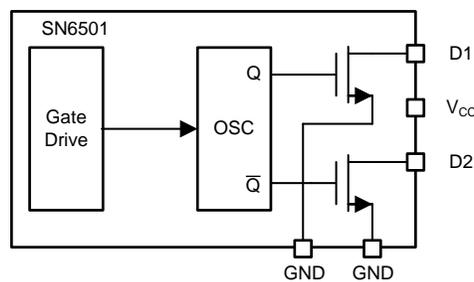


Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

图 8. ISO7741 通道的功能框图

2.2.6 SN6501

SN6501 是一款采用小型 5 引脚 SOT-23 封装的推挽式变压器驱动器。单片振荡器和电源驱动器专为隔离接口应用中的小外形尺寸隔离电源的需求。在此设计中，该器件与增强型隔离式中间抽头变压器一起为隔离式 UART 和 JTAG 信号生成 3.3V 隔离电源。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 9. SN6501 的功能框图

2.2.7 TLV702

TLV702 系列低压降线性稳压器是具有出色线路和瞬态性能的低静态电流器件。所有器件版本具有热关断和电流限值以保证安全。这些器件在采用仅 $0.1\mu\text{F}$ 的有效输出电容时保持稳定。这一特性允许使用具有较高偏置电压和温度降额的经济高效电容。该器件的 3.3V 输出版本用于为隔离 JTAG 和 UART 信号的数字隔离器的冷侧供电。

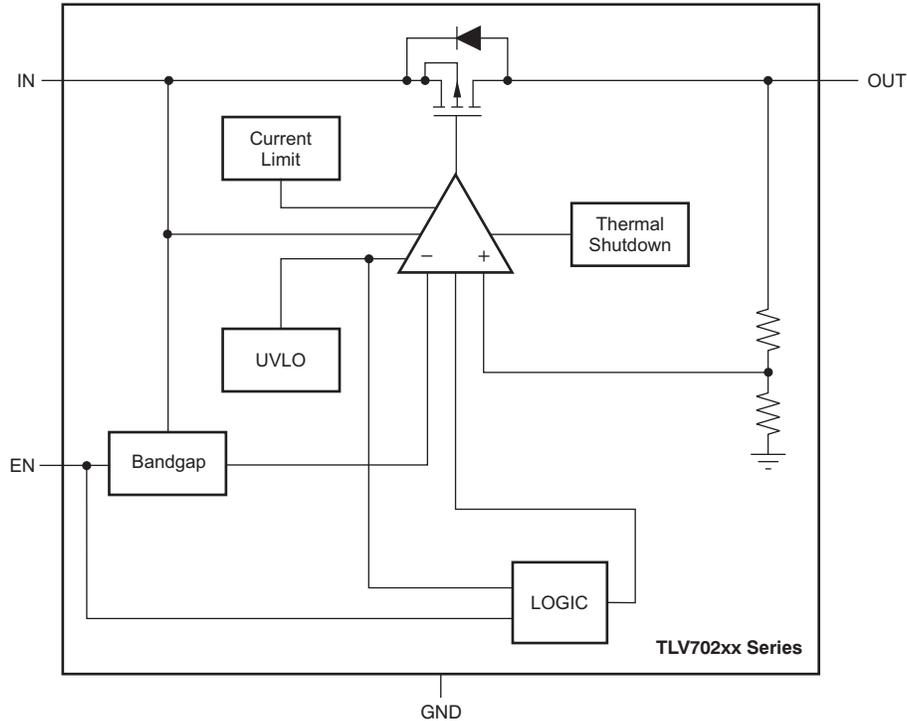
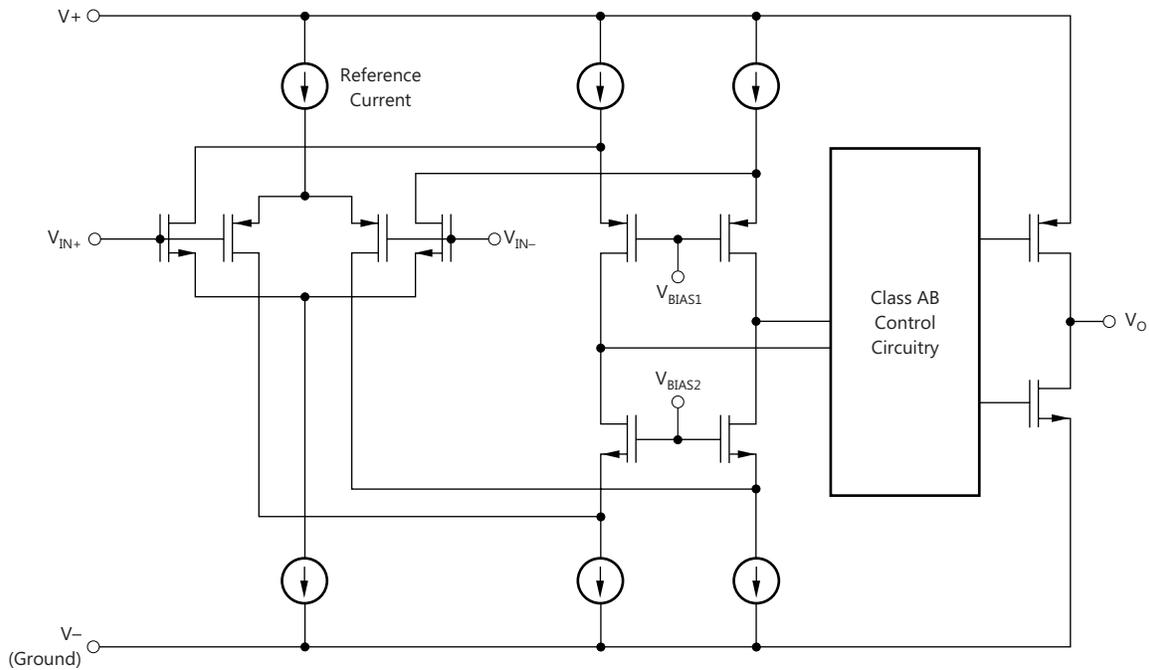


图 10. TLV702 的功能框图

2.2.8 TLV6001

该器件是一款单通道运算放大器，具有轨至轨输入和输出摆幅、低静态电流（典型值为 $75\mu\text{A}$ ）、宽带宽 (1MHz) 和低噪声。该器件具有内部 RF 和 EMI 滤波器，电容性负载高达 150pF ，单位增益稳定。该器件的成本较低。在此设计中，该器件用于电压跟随器配置，以将 IGBT 模块内部集成的 NTC 输出缓冲到 MCU。

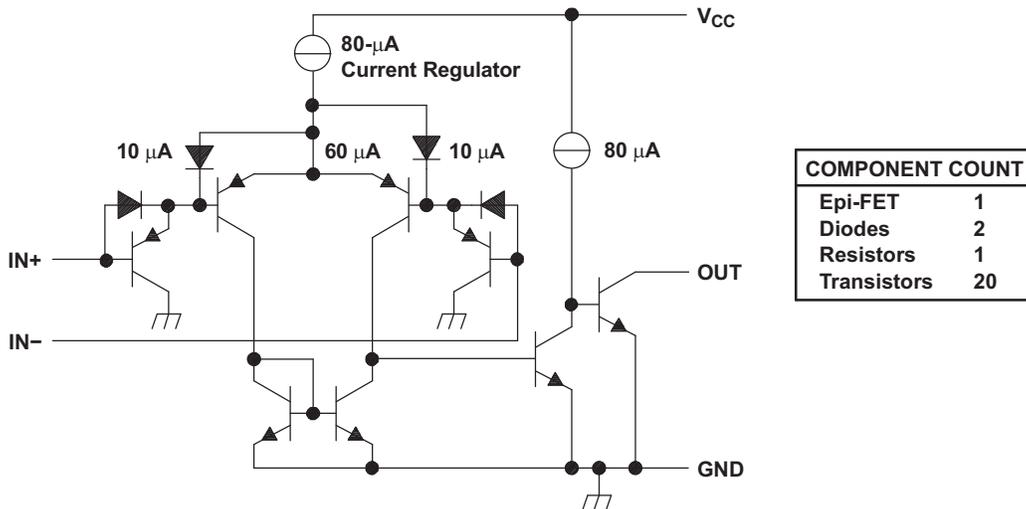


Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 11. TLV6001 的功能框图

2.2.9 TL331

TL331 是一款可在宽电压范围内由单电源供电运行的单电源比较器。电流消耗与电源电压无关，比较器的输出为开路集电极。在此设计中，比较器用于驱动指示直流总线电压是否超过 50V 的 LED。



显示的电流值是额定值。

图 12. TL331 的功能框图

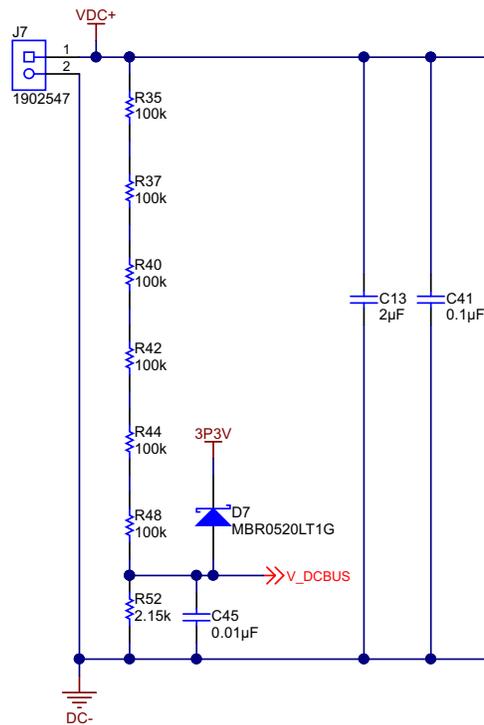
2.3 系统设计原理

2.3.1 直流总线电压输入

此参考设计用于由最高 900V 直流电压的直流总线电压供电运行，涵盖大部分电网电压输入高达 480V 交流电压的低压驱动器，如表 2 中所示。

表 2. 不同电网电压的最大直流总线电压

三相电网电压	最大直流链路电压	IGBT 阻断电压
208V、220V、230V、240V AC	400V DC	600 或 650V _{PK}
380V、400V、415V、480V AC	900V DC	1200V _{PK}
690V AC	1200V DC	1700V _{PK}



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 13. 直流总线输入

直流总线电压应用到连接器 J7。大容量电容不放置在 PCB 上，必须从外部连接，或者必须使用限流的高压直流电源。2µF、1100V 薄膜电容靠近 IGBT 直流总线输入端放置，0.1µF、1000V 陶瓷电容并联。这些电容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。

2.3.1.1 直流总线电压感测

由 R35、R37、R40、R42、R44、R48 和 R52 组成的电阻器网络构成高阻抗分压器。衰减电压路由至控制器内部集成的 ADC。此电压用于提供直流总线欠压和过压保护。它还用于评估施加给电机的输出电压。

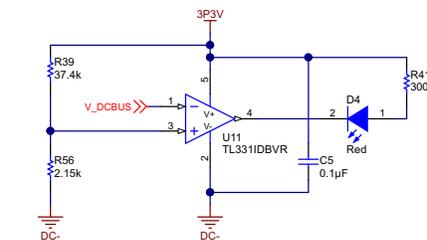
$$V_{\text{DCBUS}} = (V_{\text{DC}+}) \times \left(\frac{R52}{R52 + R35 + R37 + R40 + R42 + R44 + R48} \right) = 0.00357 (V_{\text{DC}+}) \quad (1)$$

0-900V 直流范围转换为 0-3.213V。各电阻器的最大电压为 150V（在 900V 直流电压下）。分压器可消耗的最大功率为 1.345W（在 900V 直流电压下）。每个电阻器的最大功率为 0.224W。因此，为电阻分压器网络选择额定 200V、0.25W 的 1206 封装电阻器。

如果电阻器 R52 发生故障并断开，可能会有高电压连接到控制器。在这种情况下，D7 用于将电压钳位到 3.3V。0.01μF 陶瓷电容用于低通滤波。

2.3.1.2 直流总线通电 LED 指示

当直流总线的输入断开时，薄膜电容仍然保持储存的电荷，由漏电机构随时间缓慢放电。这可能会导致触摸电路板的人员发生触电危险，即使输入断开也不例外。此参考设计使用带开路集电极输出的比较器 TL331 来指示直流总线通电。一旦直流总线电压升高到 50V 以上，比较器就会驱动 LED 点亮。对于 50V 直流，阈值为 $50 \times 0.00357 = 0.1785\text{V}$ ，由分压器网络 R56 和 R39 设置。



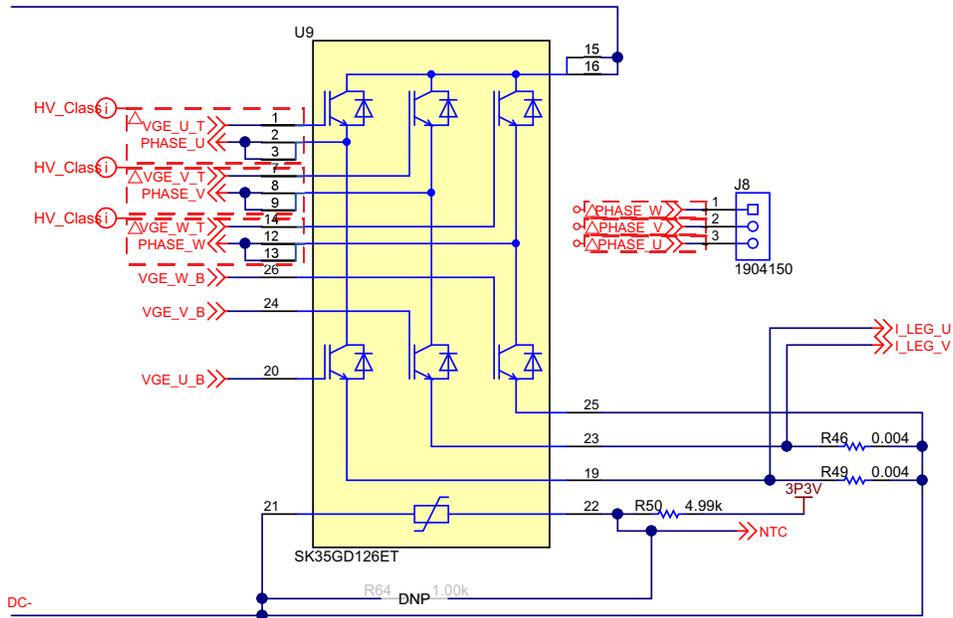
Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 14. 直流总线通电 LED 指示

2.3.2 逆变器 IGBT 模块选择

逆变器级将直流总线输入电压转换为变频交流电压以驱动电机。它由六组逆变器 IGBT 模块和栅极驱动器组成。此参考设计的标称输入电流额定值为 10A_{RMS} ，可由高达 480V 的交流电网电压供电。表 2 显示，如果使用高达 480V 的交流电网电压对驱动器供电，则需要一个阻断电压范围为 1200V_{PK} 的 IGBT 模块。

逆变器选用 1200V Semikron IGBT 模块 SK35GD126ET。该模块的最大集电极电流额定值为 32A，在 80°C 的管壳温度下，反向二极管的电流额定值为 23A。该模块的内部还集成了 NTC，用于测量模块温度。低侧 IGBT 的所有发射极引脚均处于打开状态并可引出。这允许在发射极和直流之间插入分流电阻器，从而允许在相位半桥中进行低侧电流检测。

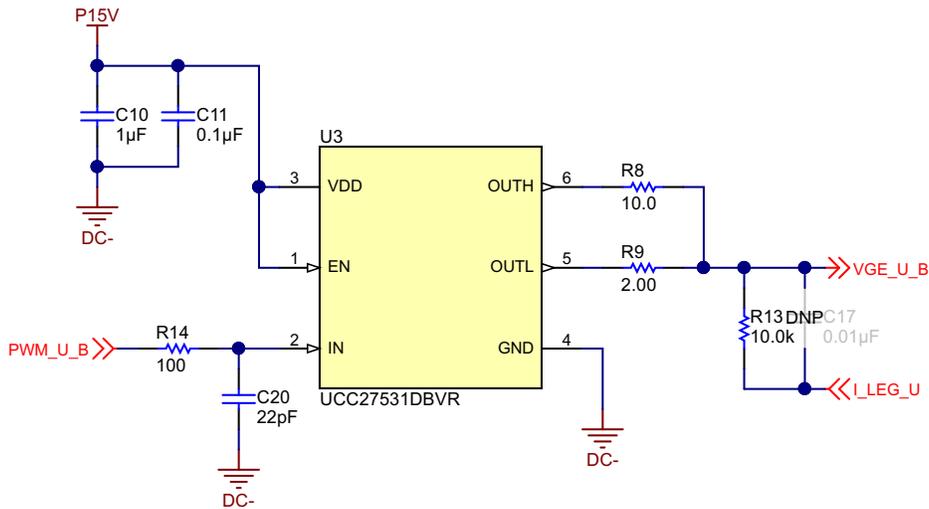


Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 15. 三相逆变器级

2.3.3 低侧 IGBT 栅极驱动器

注: 此部分介绍一个相位的 IGBT 栅极驱动器。其他两个相位的栅极驱动器相似。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 16. U 相低侧栅极驱动器

在此参考设计中，控制器放置在热侧，因此与逆变器共用接地。这样可以在不隔离的情况下驱动低侧 IGBT 栅极，从而使用低成本、紧凑型、非隔离式、低侧栅极驱动器。本设计使用采用 SOT23 6 引脚封装的 UC27531。UCC27531 的 VDD 电压范围为 10-35V，因此可用于需要 15V 栅极电压来导通的 IGBT。

2.3.4.2 次级侧电源

15V 次级侧电源用于驱动 IGBT 栅极。它通过使用 D1、R7 和 C16 引导低侧栅极驱动器电源产生。C15 (0.1 μ F) 是高频噪声去耦电容器。C16 (1 μ F) 是提供 IGBT 栅极驱动拉电流的大容量电容器。使用自举电源是为高侧栅极驱动器生成浮动电源的简单而经济高效的方法。电源正向 UVLO 阈值为 12V，负向阈值为 11V。

2.3.4.3 PWM 输入

栅极驱动器的 PWM 输入由控制器 PWM 输出外设提供。必须在低侧和高侧 PWM 信号之间插入死区时间，以防止两个开关同时导通。该信号是单端信号，并在连接到栅极驱动器输入之前使用由 R10 和 C18 组成的 RC 低通滤波器进行滤波。滤波器可减弱高频噪声，并防止由于控制器到栅极驱动器的距离较长而导致 PWM 输入过冲和下冲。该设计中未使用反相 PWM 输入 IN $^-$ ，它连接到初级侧接地。

2.3.4.4 栅极驱动器输出级

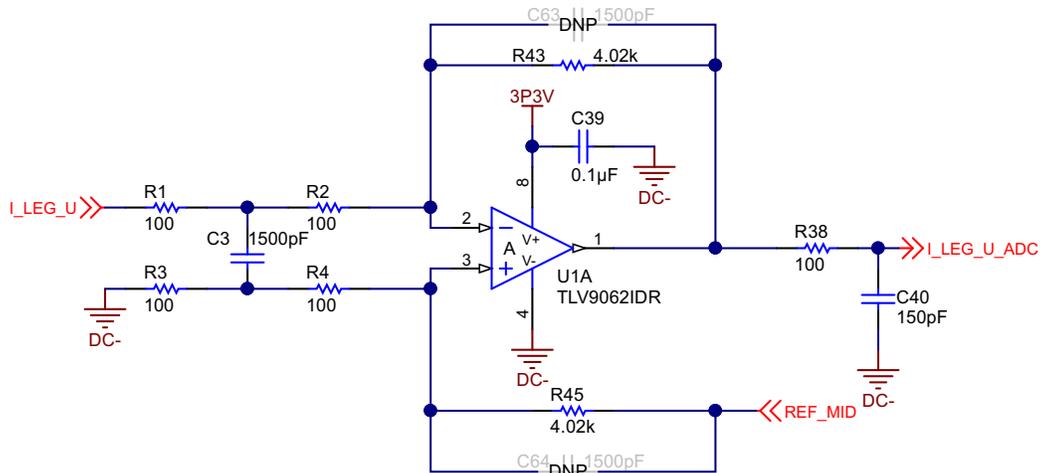
UCC5320S 具有分离输出，可单独控制 IGBT 的导通上升时间和关断下降时间。10 Ω 栅极电阻器 R11 用于导通 IGBT。2 Ω IGBT 关断电阻器 R12 允许强关断，有助于减少关断损耗。低阻值关断电阻器还可提高栅极驱动电路抗寄生米勒导通效应的能力。10k Ω 电阻器 R15 连接在 IGBT 栅极与靠近 IGBT 模块的发射极引脚之间。其作用是确保在由于故障导致栅极驱动器与 IGBT 断开连接的情况下 IGBT 保持关断状态。

2.3.5 低侧电流感测

电机精确的速度和扭矩控制需要精确控制逆变器输出电流。电流随后用于计算输出 PWM 模式。此设计使用价格低廉的分流电阻器来感测电流。电流感测既可以在半桥支路中完成，也可以与电机终端同相。此设计使用低侧支路电流感测，具有以下优点：

- 由于 MCU 位于热侧，因此测量电流时不需要隔离
- 使用经济高效的非隔离式运算放大器来放大测得的电流信号

如图 15 中所示，分流电阻器 R49 插入电机相位半桥支路中。此分流电阻器的值取决于要测量的最大电流值和 ADC 的最大输入电压范围。在此设计中，差分放大器配置使用 TLV9062 双运算放大器，用于监控两个相位支路中的电流。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 18. U 项低侧电路感测差分放大器

MCU 内部集成的 ADC 的典型输入电压范围为 3.3V。

差分放大器的增益是 $= R43 / (R1 + R2) = 20.1$

运算放大器 U1 由 3.3V 单极电源供电，但要测量的电流是双向的。1.65V 参考信号 REF_MID 用于将差分放大器的双向输入电压电平转换为 0-3.3V 范围。运算放大器的电源和 GND 电源轨在运算放大器输出端提供 50mV 裕度。从而提供 3.2V 的有用测量范围。

运算放大器的输入电压范围 $= 3.2 / 20.1 = 0.1592V$

4mΩ 分流电阻器用于测量电流。

电流测量范围 $= 0.1592 / 4m = 39.8A_{PP} = 14.07A_{RMS}$

此范围可测量 10A_{RMS} 的标称逆变器输入电流额定值（逆变器的短期过载裕度约为 40%）。

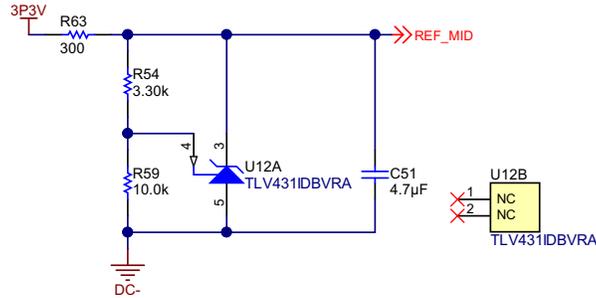
分流电阻器中的最大功耗 $= (14.07)^2 \times 0.004 = 0.79W$

差分放大器输入使用 R1、C3 和 R3 进行低通滤波。由 R38 和 C40 组成的单端低通 RC 滤波器放置在控制卡的输入附近，用于滤除运算放大器输出 PCB 轨道上的任何噪声拾取。

电平转换器的 1.65V 参考电压使用 TLV431 并联稳压器生成（如图 19 中所示）。300Ω 电阻器 R63 用于限制流入并联稳压器的电流。用于设置参考电压的分压器使用公式 2 进行计算。

$$REF_MID = \left(1 + \frac{R54}{R59} \right) V_{REF} \tag{2}$$

R59 选择为 10kΩ。V_{REF} 为 1.24V。R54 计算为 3.3kΩ。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 19. 差分放大器的电平转换参考电压生成

根据图 20，输出端使用 4.7μF 大容量电容器来保证稳定性。

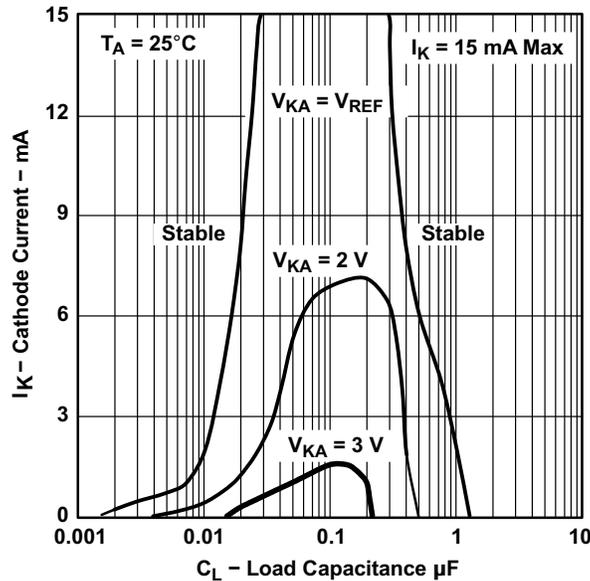


图 20. TLV431 稳定性边界条件

2.3.6 IGBT 模块温度感测

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。NTC 是标准的“KG3B”温度传感器，25°C 时的标称电阻值为 $5k\Omega \pm 5\%$ 。

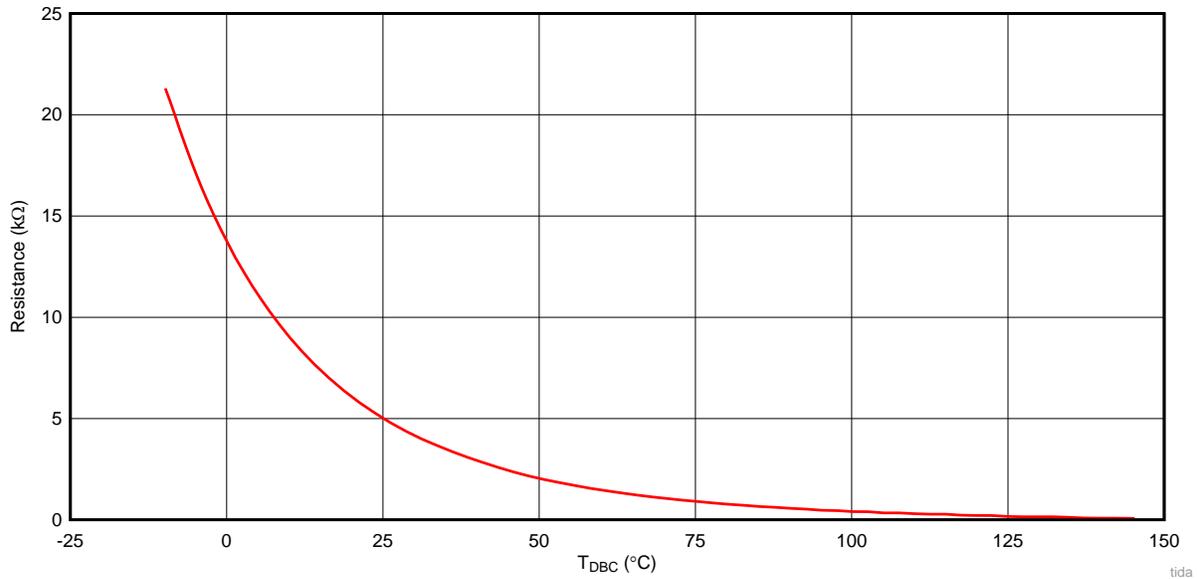
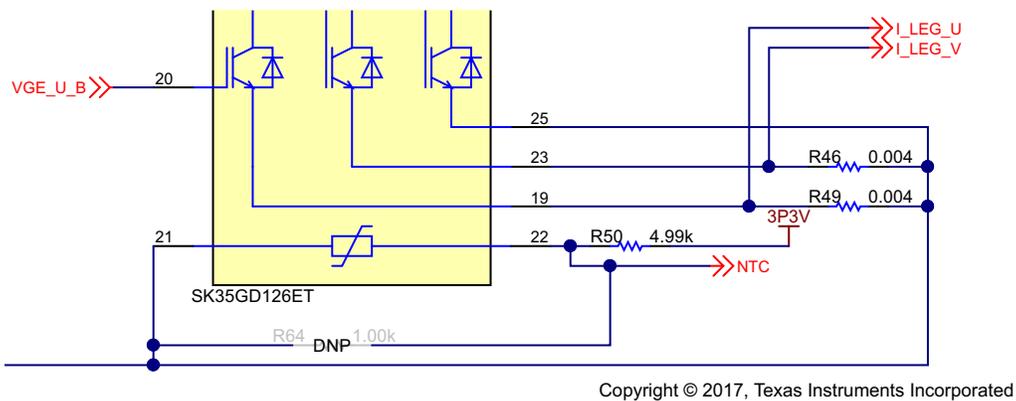


图 21. NTC 特征

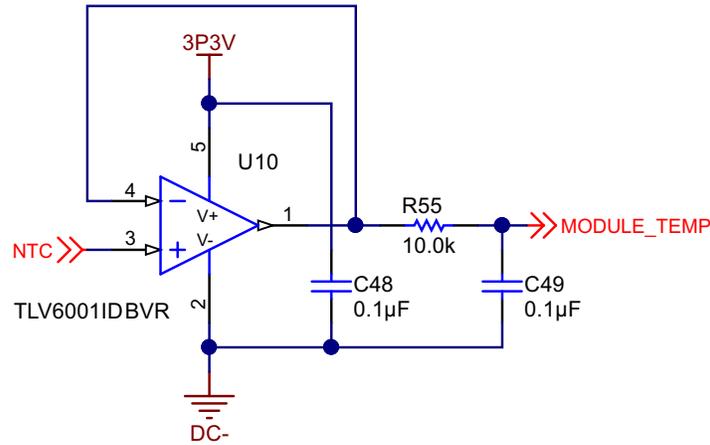
使用 R50 和 NTC 电阻器形成的电阻分压器如图 22 所示。R64 无需安装，可直接并联到 NTC 上，以改善 NTC 测量的线性度。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 22. 使用 IGBT 模块集成的 NTC 感测温度

NTC 电阻器两端的电压使用电压跟随器配置中的 U10 (TLV6001) 进行缓冲 (见图 23)，然后使用由 R55 和 C49 组成的低通 RC 滤波器进行滤波，再连接到控制器。可以使用公式 3 和公式 4 在软件中计算温度。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 23. NTC 电压感测缓冲器

$$R_{NTC}(T) = R50 \left(\frac{\text{Module_temp}}{3.3 - \text{Module_temp}} \right) \quad (3)$$

$$T = \frac{1}{\left[\frac{\ln\left(\frac{R_{NTC}(T)}{R_{25}}\right)}{B_{(25/85)}} + \frac{1}{25} \right]}$$

其中:

- T 是 IGBT 模块直接粘合铜基板的温度
- $R_{NTC}(T)$ 是温度 T 下的 NTC 电阻, 由 NTC 上的压降计算得出
- R_{25} 是 IGBT 模块数据表提供的 25°C 时的 NTC 电阻
- $B_{(25/85)}$ 是 NTC 电阻器的 B 常数

(4)

2.3.7 增强型隔离通信

在此参考设计中，安全隔离已移至热侧 MCU 与外部通信接口之间的通信链路。JTAG 接口用于控制器的实时调试，UART 接口用于串行通信。增强型隔离宽体（8mm 爬电距离和间隙）数字隔离器 ISO7741 用于隔离 JTAG 和 UART 信号（如图 24 所示）。初级和次级侧使能信号连接到其各自的电源轨。隔离器通道始终处于使能状态。

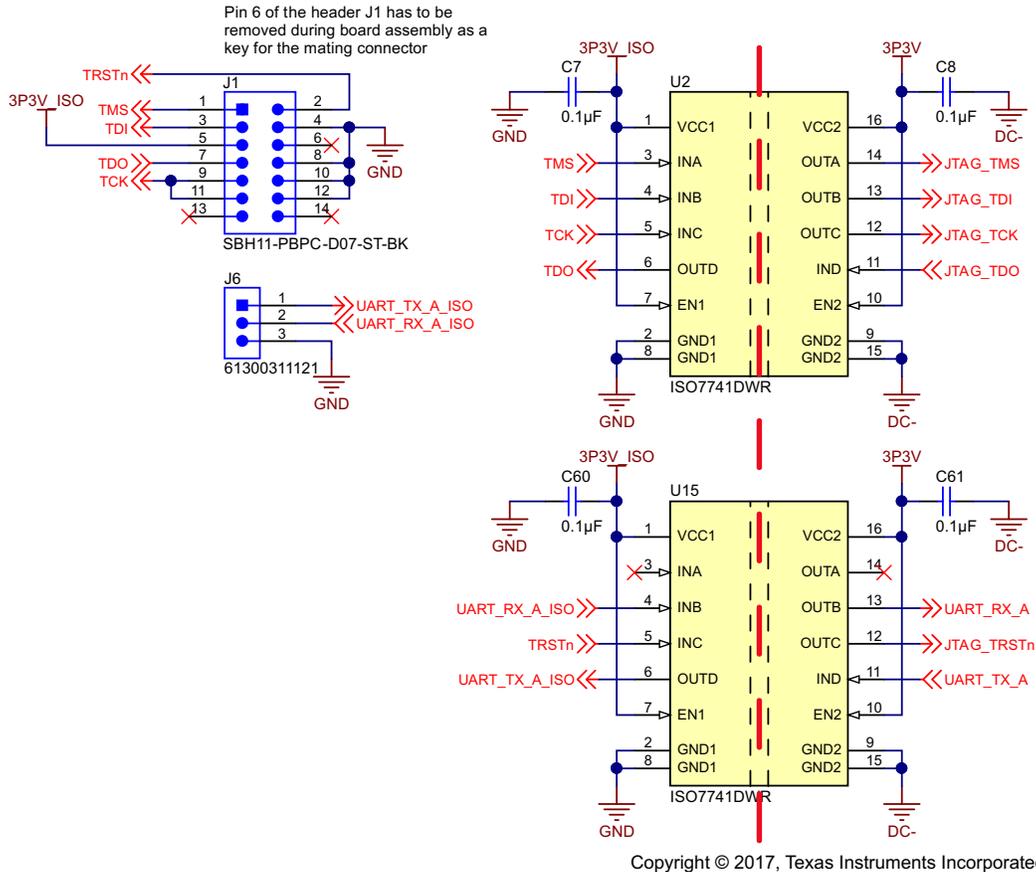


图 24. 增强型隔离式 JTAG 和 UART 接口

每个数字隔离器都有四个通道，三个正向通道，一个反向通道。来自外部调试探针的 JTAG 信号连接到标准的 14 引脚 JTAG 接口插头 J1。JTAG 信号 TMS、TDI、TCK、TDO 和 TRSTn 相互隔离。UART 发送和接收信号 UART_TX 和 UART_RX 相互隔离并连接到插头 J6。

2.3.8 增强型隔离式电源生成

数字隔离器的冷侧和 JTAG 接口需要 3.3V 增强型隔离式电源。SN6501 是一款推挽式变压器驱动器，在此设计中用于帮助从 5V 输入电压中生成隔离式电源轨。1μF 大容量电容器 C58 放置在变压器热侧中间抽头附近，以减少开关环路。所用变压器的匝数比为 1.3:1，1 分钟的电介质隔离额定值为 5000V_{RMS}。变压器初级侧和次级侧的爬电距离和间隙距离为 8mm。在变压器的冷侧，二极管 D5 和 D6 将变压器输出整流到 1μF 大容量电容器 C57 上。LDO TLV70233 用于为隔离侧生成 3.3V 电源轨。

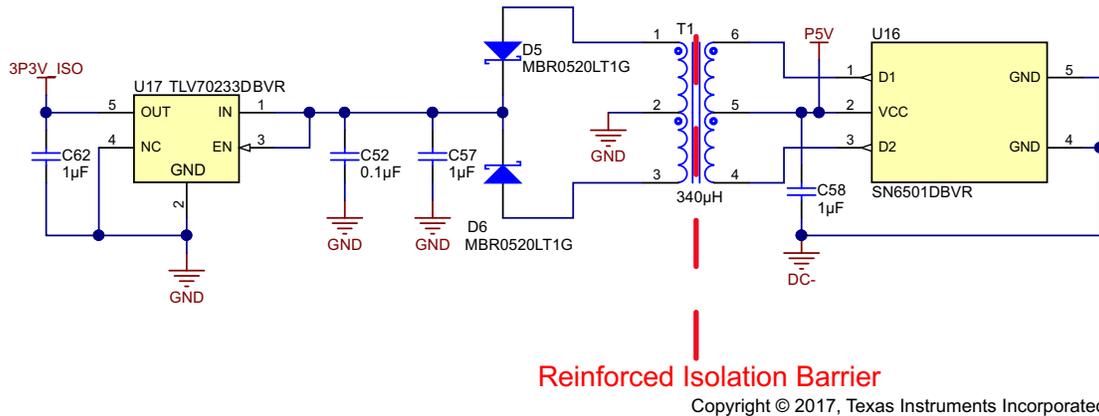


图 25. 3.3V 隔离式电源生成

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 26 显示了 PCB 的俯视图。显示了直流总线输入连接器 J7 和三相电机输出连接器 J8。15V 栅极驱动器电源、5V 控制卡电源和 3.3V 低压感测电路电源应按照图 26 所示的顺序连接到 J5。双列直插式连接器插座用于 180 引脚 C2000 控制卡。双核 Delfino™F28379D 控制卡用于测试此设计。J6 是用于连接增强型隔离式 UART 信号的 3 引脚插头。J1 是用于连接 JTAG 调试探针的 14 引脚插头增强型隔离接口。注意，插头 J1 的引脚 6 必须作为 JTAG 调试探头连接器的 key 引脚移除。直流链路电压高于 50V 时，所示红色 LED 指示灯立即点亮。LED 用于警告电路板已通电，不得触摸。

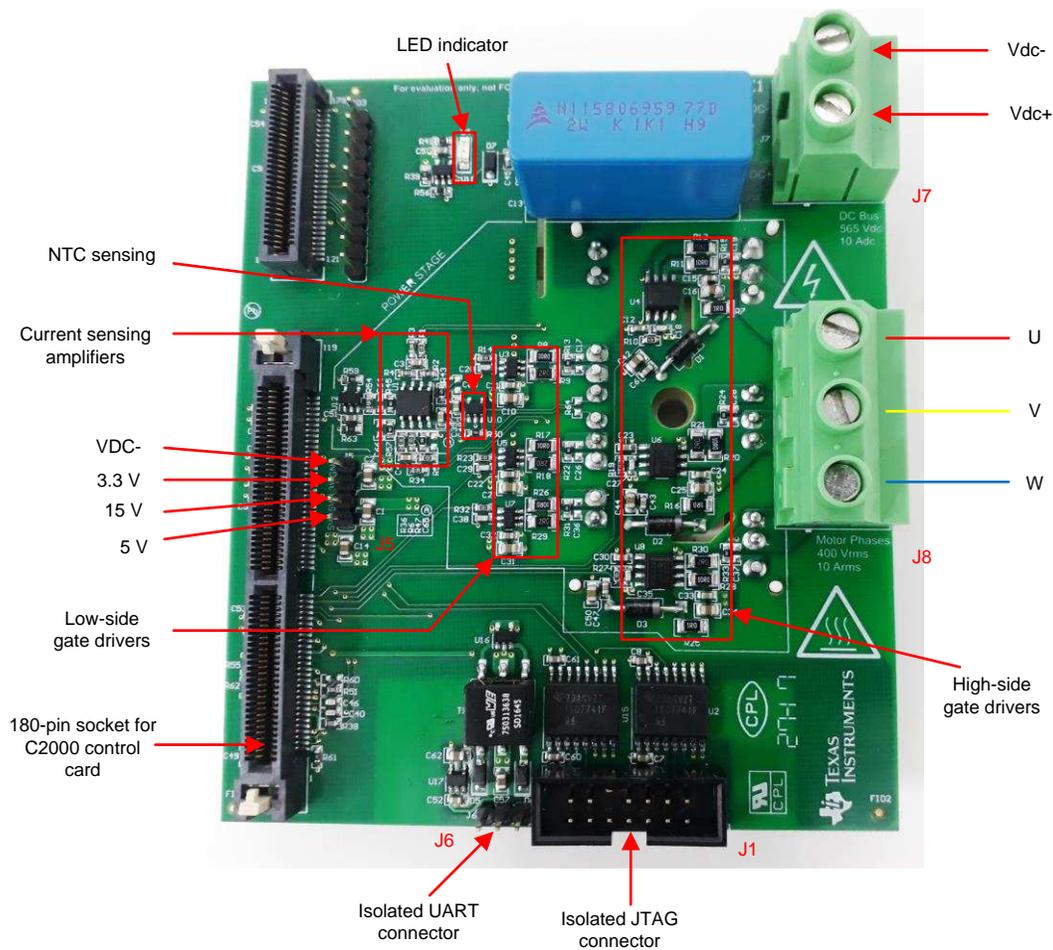


图 26. TIDA-01456 PCB 俯视图

图 27 显示了中间带有增强型隔离栅的高压热侧（以红色突出显示）和低压冷侧（以黄色突出显示）。隔离栅的爬电距离和间隙距离为 8mm。数字隔离器放置在隔离栅上。

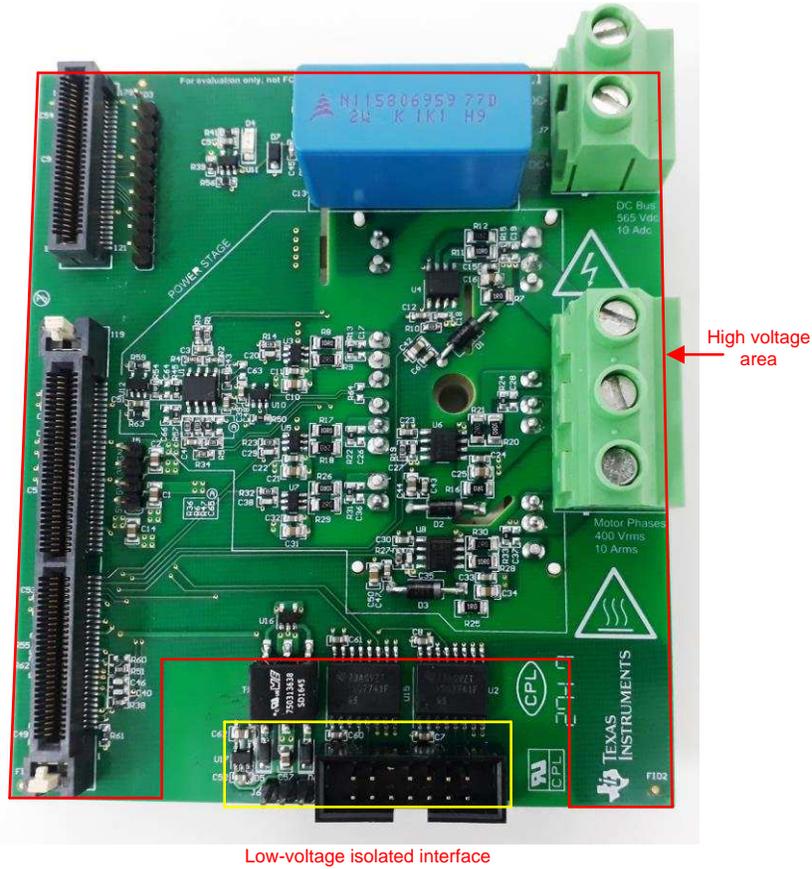


图 27. 高压热侧、隔离低压冷侧和隔离栅

图 28 显示了 PCB 的仰视图。电流检测分流电阻器位于底部。IGBT 模块焊盘必须连接到散热器。热混合物必须用于焊盘和散热器之间，模块必须用一颗螺钉牢牢耦合至散热器上，如图 29 所示。根据消耗的最大持续功率选择合适的散热器。

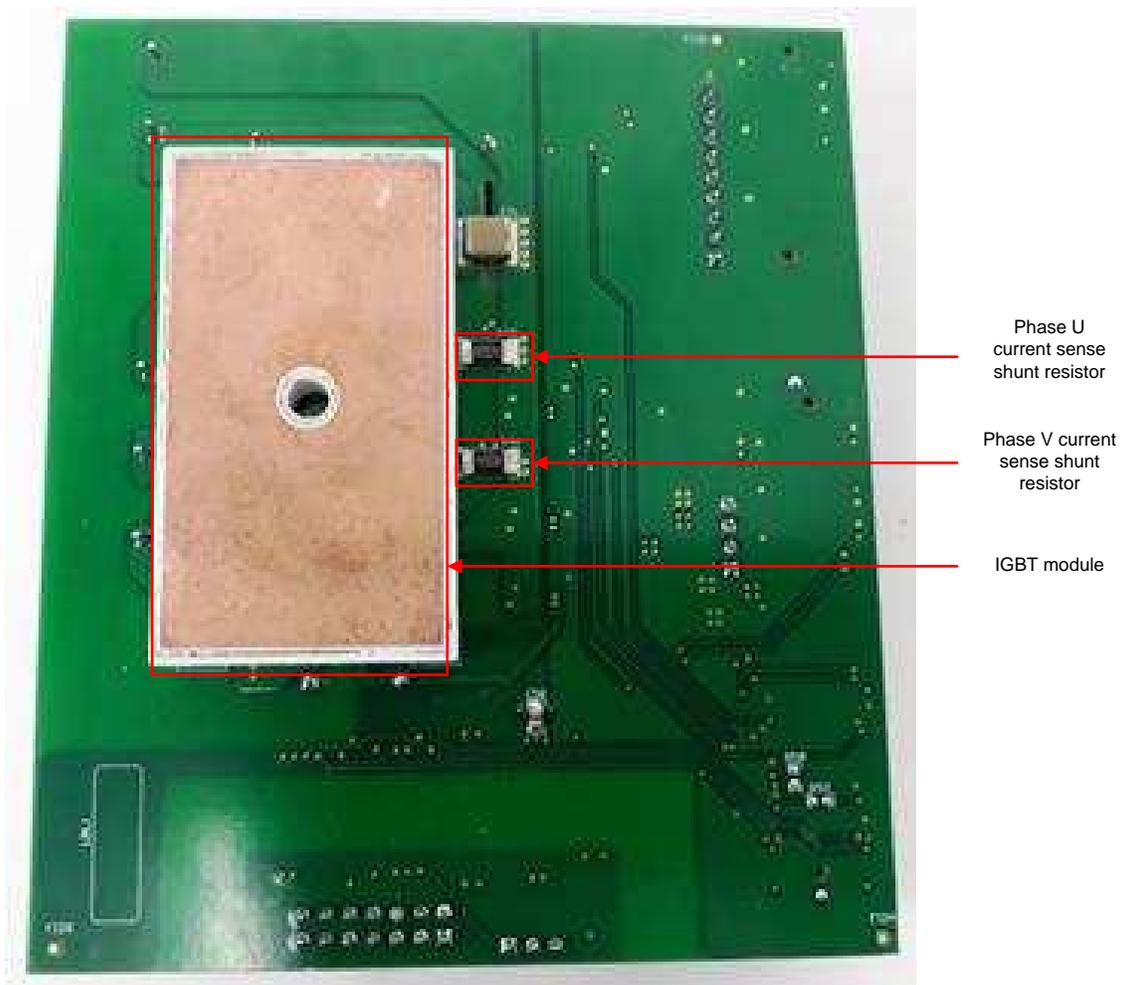


图 28. TIDA-01456 仰视图

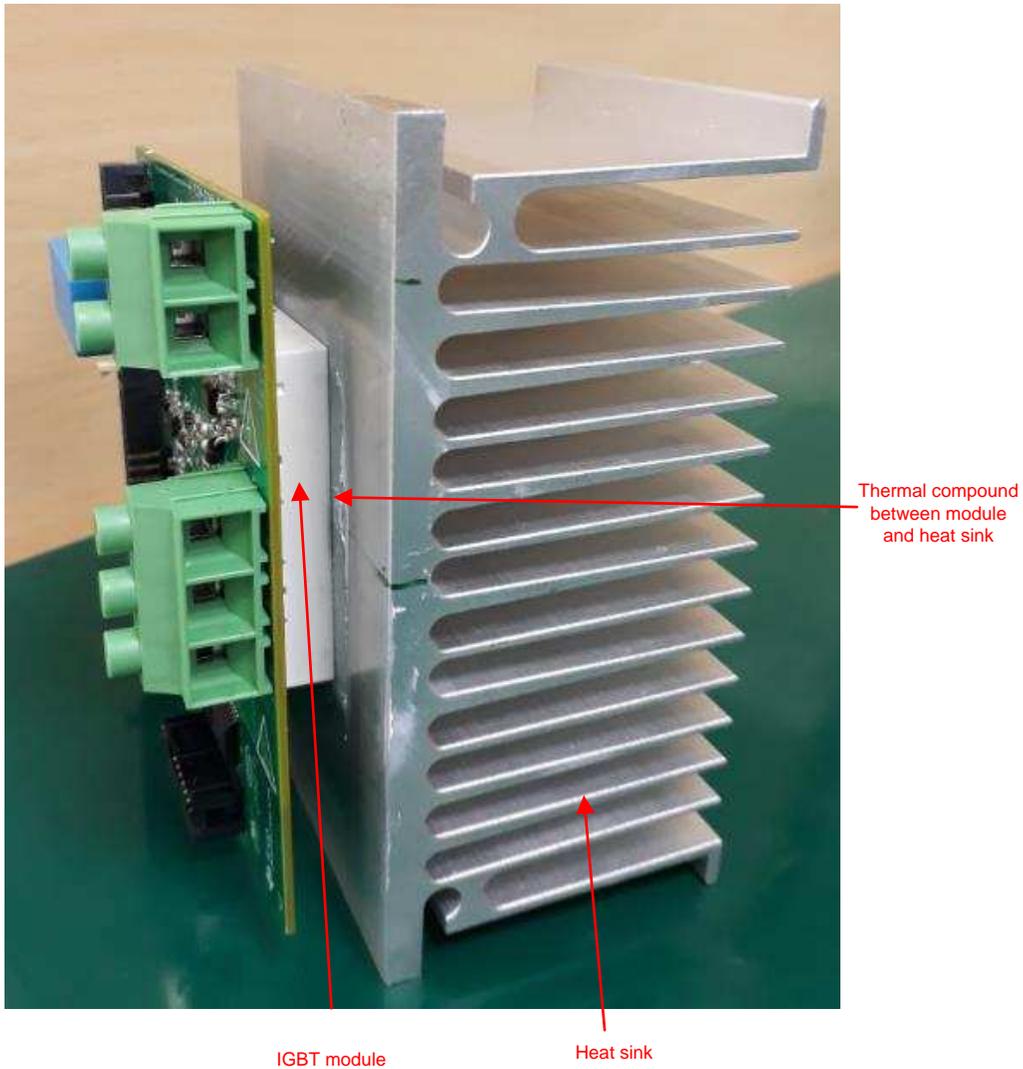


图 29. 连接到散热器的 TIDA-01456

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 J3 和 J2 中，如图 30 所示。表 3 描述了此 PCB 上使用的引脚功能。

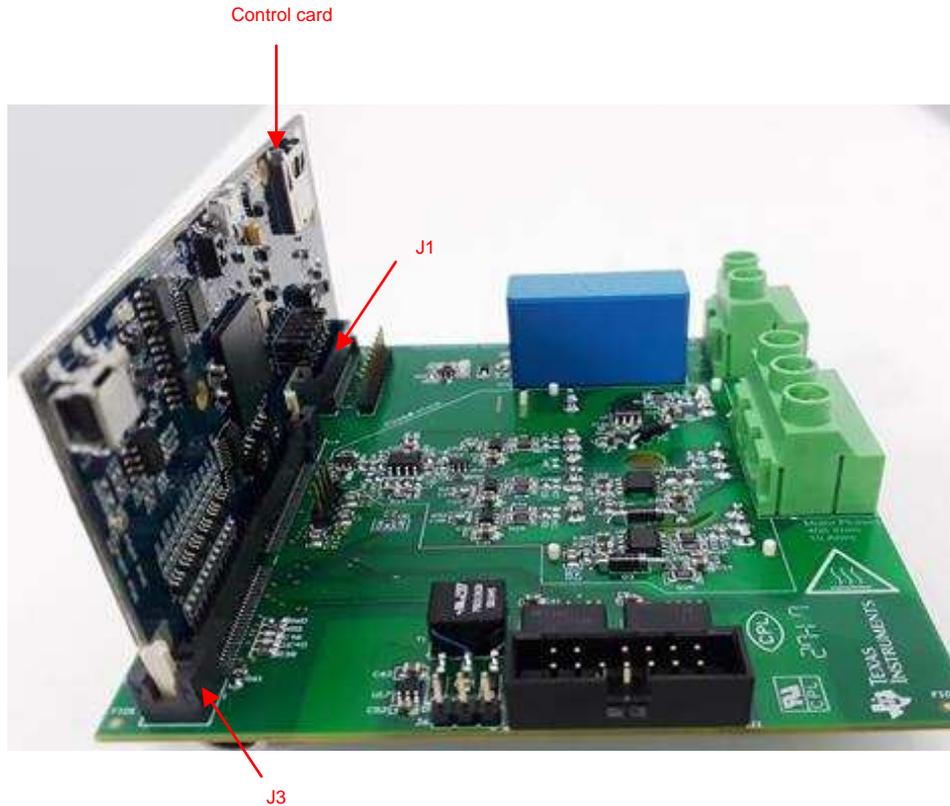


图 30. 控制卡连接到 TIDA-01456

表 3. TIDA-01456 控制卡接口

TIDA-01456 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-01456 引脚排列
3P3V	JTAG-EMU1	1	2	JTAG-EMU0	3P3V
JTAG_TMS	JTAG_TMS	3	4	JTAG-TRSTN	JTAG_TRStn
JTAG_TCK	JTAG_TCK	5	6	JTAG-TDO	JTAG_TDO
DC-	GND	7	8	JTAG-TDI	JTAG_TDI
—	ADC1 (和/或 DACA)	9	10	GND	DC-
—	ADC1 (和/或 DACB)	11	12	ADC2	—
DC-	GND	13	14	ADC2	—
I_LEG_U_ADC	ADC1 (和/或 CMPIN+)	15	16	GND	DC-
I_LEG_V_ADC	ADC1	17	18	ADC2	I_LEG_U_ADC
DC-	GND	19	20	ADC2	—
I_LEG_V_ADC	ADC1 (和/或 CMPIN+)	21	22	GND	DC-
—	ADC1	23	24	ADC2	MODULE_TEMP
I_LEG_V_ADC	ADC (和/或 CMPIN+)	25	26	ADC2	—
—	ADC	27	28	ADC	—
DC-	GND	29	30	ADC	—
—	ADC	31	32	Rsv	—
—	ADC	33	34	ADC	—

表 3. TIDA-01456 控制卡接口 (continued)

TIDA-01456 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-01456 引脚排列
DC-	GND	35	36	ADC	—
—	ADC	37	38	GND	DC-
V_DCBUS	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	DC-
DC-	GND	47	48	5V0	P5V
PWM_U_T	PWM1A	49	50	PWM3A	PWM_W_T
PWM_U_B	PWM1B	51	52	PWM3B	PWM_W_B
PWM_V_T	PWM2A	53	54	PWM4A	—
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	—
DC-	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)	—
—	CAP1 或 SPISIMOB	75	76	SCIRXA/UARTRXA	UART_RX_A
—	CAP2 或 SPISOMIB	77	78	SCITXA/UARTTXA	UART_TX_A
—	CAP3 或 SPICLKB	79	80	CANRXA	—
—	CAP4 或 SPISTEB	81	82	CANTXA	—
DC-	GND	83	84	5V0	P5V
—	I2CSDAA	85	86	GPIO	—
—	I2CSCLA	87	88	GPIO	—
—	GPIO	89	90	GPIO	—
—	GPIO	91	92	GPIO	—
—	GPIO	93	94	GPIO	—
—	GPIO	95	96	GPIO	—
DC-	GND	97	98	5V0	P5V
—	SD-D1	99	100	QEP2A 或 GPIO	—
—	SD-C1	101	102	QEP2B 或 GPIO	—
—	SD-D2	103	104	QEP2S 或 GPIO	—
—	SD-C2	105	106	QEP2I 或 GPIO	—
—	SD-D3	107	108	GPIO (McBSP-MCLKRA)	—
—	SD-C3	109	110	GPIO (McBSP-MFSRA)	—
DC-	GND	111	112	5V0	P5V
—	Rsv	113	114	Rsv	—
—	Rsv	115	116	Rsv	—
—	Rsv	117	118	Rsv	—
—	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	—

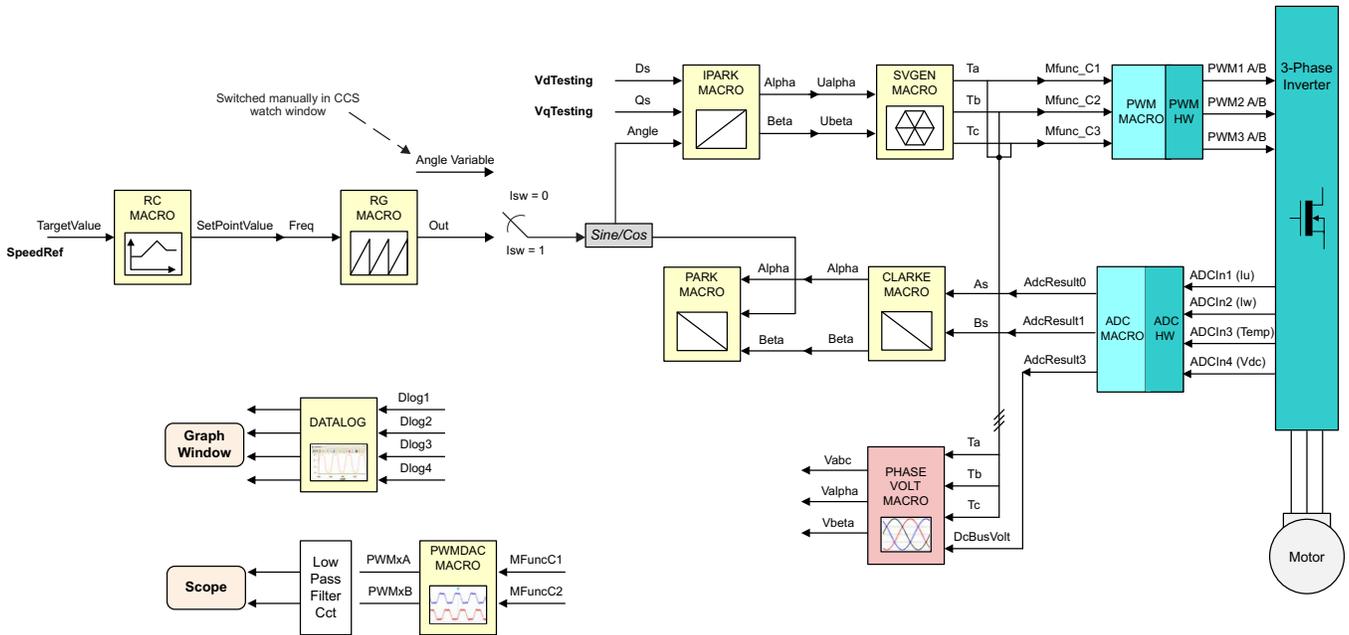
表 3. TIDA-01456 控制卡接口 (continued)

TIDA-01456 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-01456 引脚排列
—	GPIO	129	130	GPIO	—
—	GPIO	131	132	GPIO	—
—	GPIO	133	134	GPIO	—
DC-	GND	135	136	Rsv	—
—	GPIO	137	138	Rsv	—
—	GPIO	139	140	Rsv	—
GPIO-74	GPIO	141	142	Rsv	—
GPIO-76	GPIO	143	144	Rsv	—
GPIO-78	GPIO	145	146	Rsv	—
GPIO-80	GPIO	147	148	Rsv	—
GPIO-82	GPIO	149	150	Rsv	—
GPIO-84	GPIO	151	152	Rsv	—
GPIO-86	GPIO	153	154	Rsv	—
GPIO-88	GPIO	155	156	Rsv	—
DC-	GND	157	158	5V0	P5V
—	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	—
DC-	GND	179	180	5V0	P5V

3.1.3 软件

此参考设计使用根据应用报告《使用 TMS320F2833x 的三相永磁同步电机的无传感器磁场定向控制》修改的软件进行测试。应用报告中的增量生成级别 2 按图 31 所示进行修改。添加一个开关，将来自 RG 宏或角度变量的输出信号连接到正弦 cos 块。连接输出使设计能够将正弦电流送入电机。连接变为零的角度变量可以将直流电流驱动到电机中。流入相位切换节点的最大直流电流为 $\pm 8A$ ，用于显示逆变器的开关行为和栅极驱动波形。

注：直流电流用于轻松触发示波器，并不加载电机轴的情况下将大电流泵入电机。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

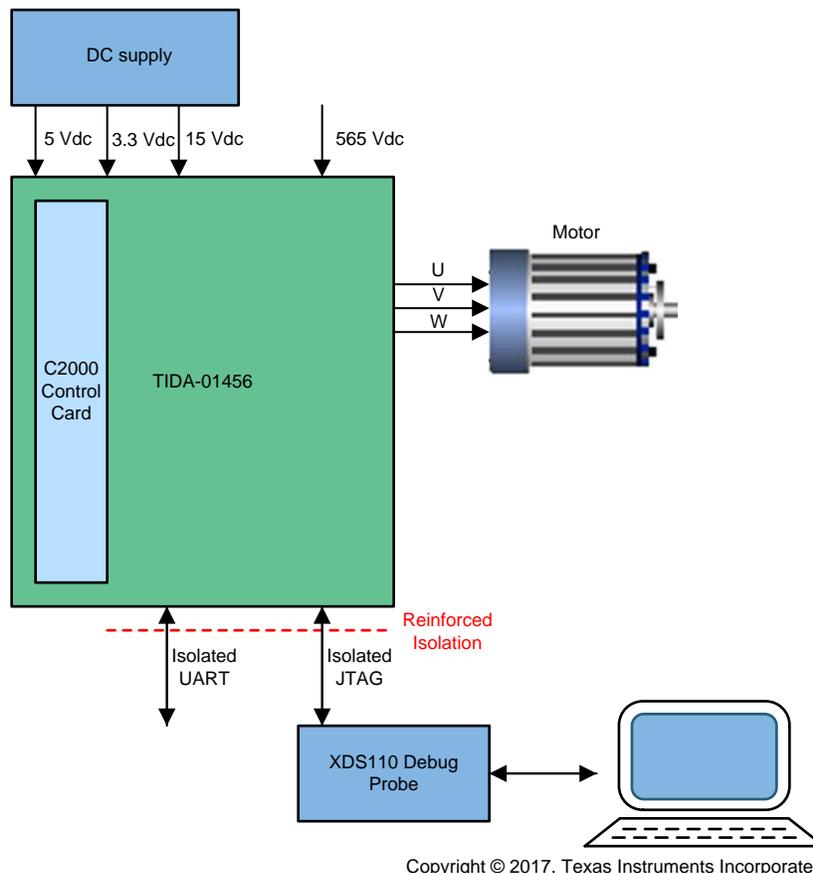
图 31. PWM 控制软件

3.2 测试和结果

测试的重点是在低侧开关使用 UCC27531，在高侧开关使用 UCC5320SD 评估三相逆变器栅极驱动子系统的功能和性能。

3.2.1 测试设置

图 32 显示了测试设置，表 4 列出了使用的主要测试设备。F28379D 180 引脚控制卡安装在 TIDA-01456 板的插座上。外部直流电源用于为 3.3V、5V 和 15V 直流电源轨供电。高压直流电源连接到设计直流总线。电机终端通过螺钉终端块连接到 PCB。控制器通过增强型隔离式 JTAG 通道进行调试，该通道通过外部 XDS110 调试探针连接到笔记本电脑。隔离式示波器和高压差分探针用于获取大部分示波器图。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 32. 测试设置

表 4. 所用测试设备

说明	器件型号
隔离式示波器	Tektronix TPS2014B
单端探针	Tektronix TPP0200
差分探针	Tektronix P5200A
电流探针	Keysight N2783B
电流探针放大器	Agilent N2779A
高压电源	Ametek SGI 1000/5
电源	Keithley 2230G-30-1
电源	Agilent E3631A
交流感应电机	3.7kW, 1460rpm (0.5Hz 至 100Hz), 415V _{RMS} ± 10%, η = 83 %, cosΦ = 0.74, 8.4A _{MAX}

3.2.2 测试结果

3.2.2.1 栅极驱动器的 UVLO 功能

IGBT 需要足够的导通栅极电压，以确保它在饱和区域工作。如果由于故障条件导致栅极电源电压降低，则存在 IGBT 在线性区域工作的风险。在线性区域中工作会增加 IGBT 的功率损耗，导致开关过热并可能损坏开关。这可以通过栅极驱动器的 UVLO 功能来避免。一旦栅极电压降至阈值以下，栅极驱动器输出就会关断，并防止 IGBT 在线性区域工作。

- 通道 1 (蓝色) - PWM 输入信号
- 通道 2 (红色) - 栅极驱动电源
- 通道 3 (绿色) - PWM 输出信号

图 33 显示高侧栅极驱动器的 UVLO 关断阈值为 11.6V，图 34 显示导通阈值为 12.4V。阈值电平中的迟滞为 0.8V。

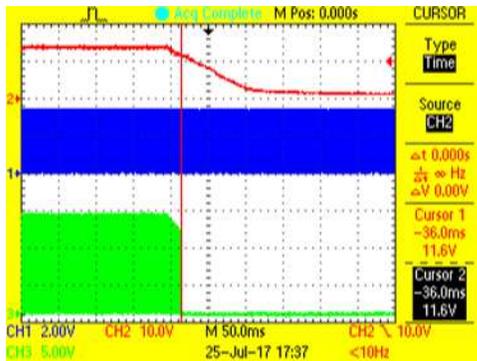


图 33. 高侧栅极驱动器 (UCC5320S) UVLO 关断

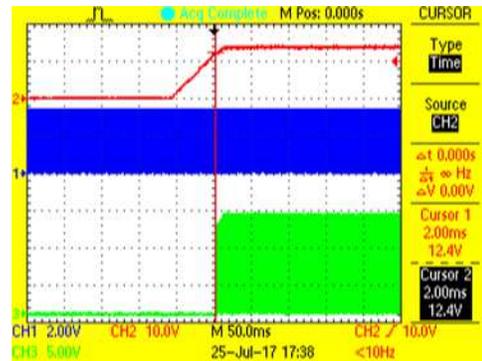


图 34. 高侧栅极驱动器 (UCC5320S) UVLO 导通

3.2.2.2 PWM 传播延迟

如图 35 所示，从栅极驱动器输入到栅极驱动器输出的传播延迟是设置高侧和低侧开关之间死区时间的重要参数。

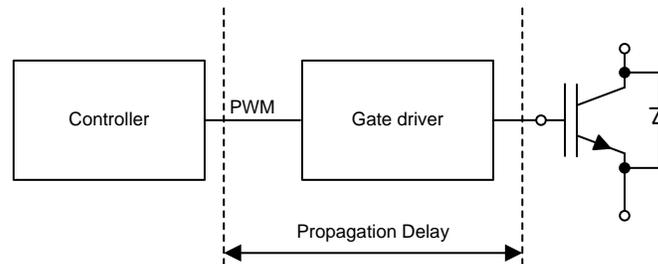


图 35. PWM 传播延迟

高侧和低侧栅极驱动器之间的传播延迟差变化越小，便可设置越短的死区时间。较短的死区时间具有以下优点：

- 减少死区时间畸变
- 更高效工作（减少谐波损失）
- 减少扭矩纹波，使电机运行更平稳、噪音更小

3.2.2.2.1 低侧栅极驱动器传播延迟

此参考设计的低侧栅极驱动器的传播延迟波形如图 37 至图 42 所示。延迟波形根据图 36 所示的数据表规格捕获。导通时，延迟为从 PWM 输入波形的 V_{IH} 阈值到 PWM 输出波形的 10% 上升沿。关断时，延迟为从 PWM 输入波形的 V_{IL} 阈值到 PWM 输出波形的 90% 下降沿。所有三个栅极驱动器之间测得的延迟变化均小于 1ns。

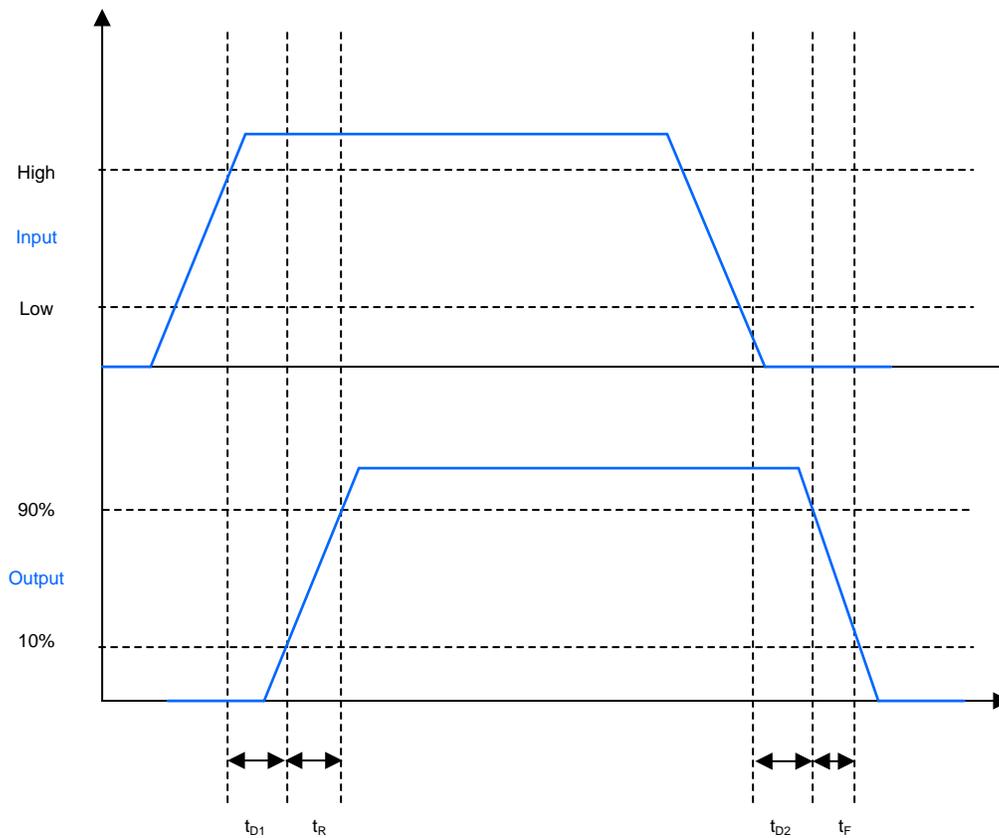


图 36. UCC27531 传播延迟规格

- 通道 1 (蓝色) : PWM 输入信号
- 通道 3 (绿色) : PWM 输出信号

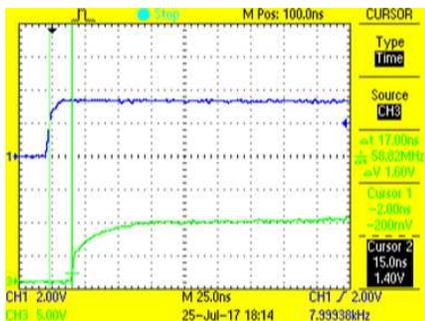


图 37. 低侧 U 相导通传播延迟 (17ns)

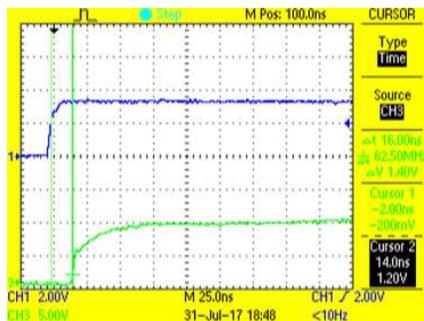


图 38. 低侧 V 相导通传播延迟 (16ns)

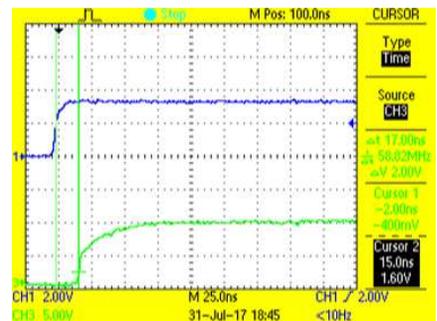


图 39. 低侧 W 相导通传播延迟 (17ns)

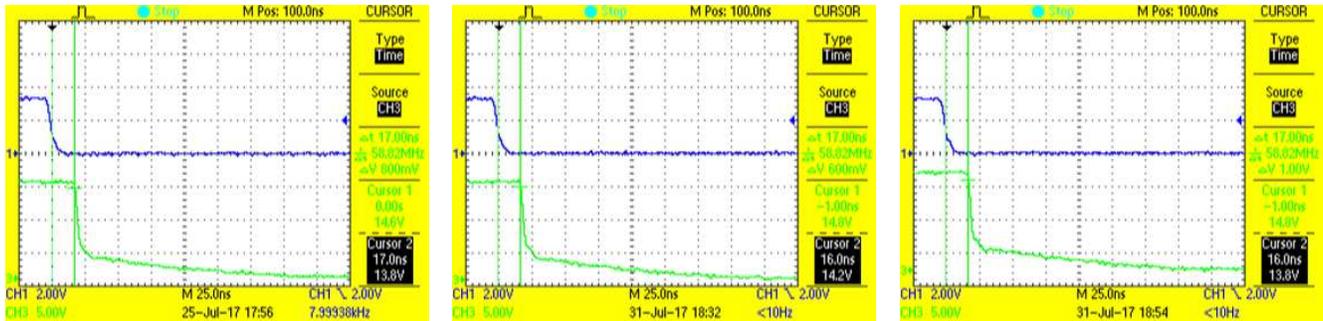


图 40. 低侧 U 相关断传播延迟 (17ns)

图 41. 低侧 V 相关断传播延迟 (17ns)

图 42. 低侧 W 相导通传播延迟 (17ns)

3.2.2.2.2 高侧栅极驱动器传播延迟

高侧栅极驱动器的传播延迟波形如图 44 至图 49 所示。延迟波形根据图 43 所示的数据表规格捕获。导通时，延迟为从 PWM 输入上升沿的 50% 到 PWM 输出上升沿的 10%。关断时，延迟为从 PWM 输入下降沿的 50% 到 PWM 输出下降沿的 90%。所有三个栅极驱动器之间测得的延迟变化均小于 2ns。

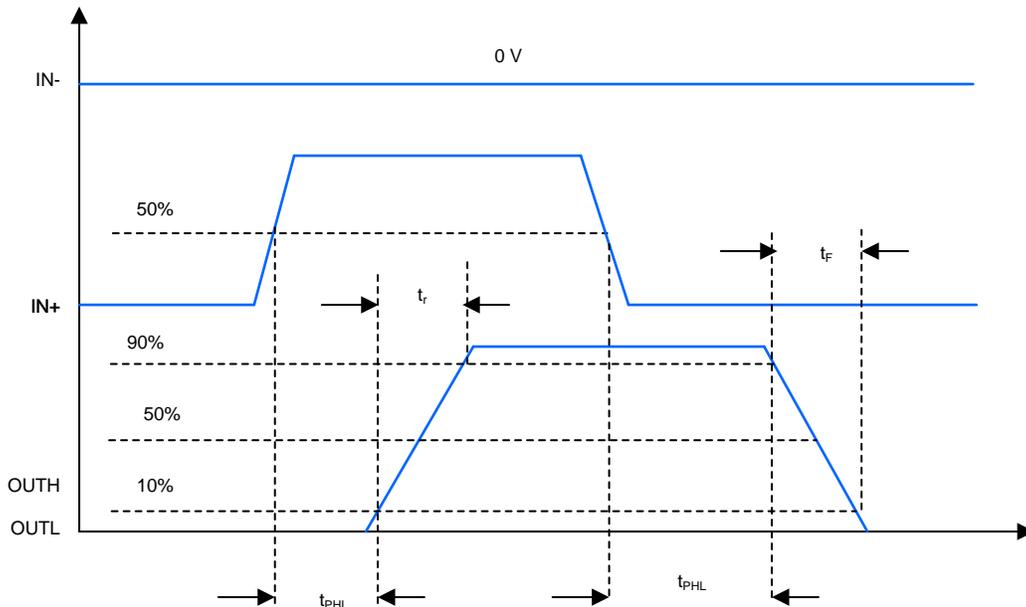


图 43. UCC5320S 传播延迟规格

- 通道 1 (蓝色) : PWM 输入信号
- 通道 2 (绿色) : PWM 输出信号

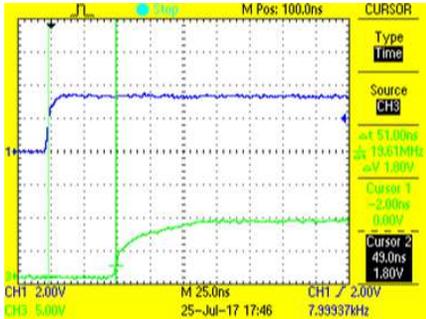


图 44. 高侧 U 相导通传播延迟 (51ns)

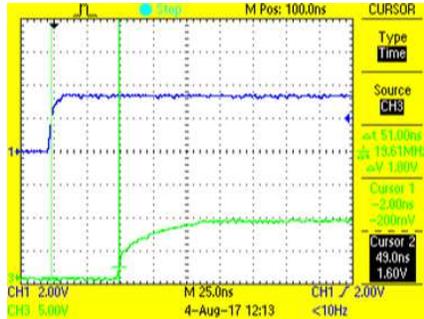


图 45. 高侧 V 相导通传播延迟 (51ns)

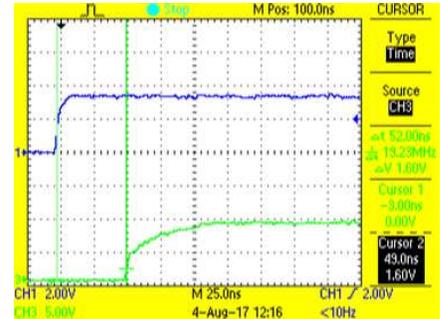


图 46. 高侧 W 相导通传播延迟 (52ns)

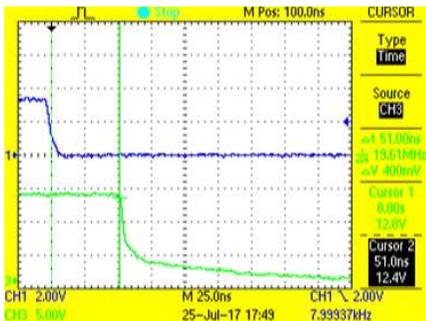


图 47. 高侧 U 相相关断传播延迟 (51ns)

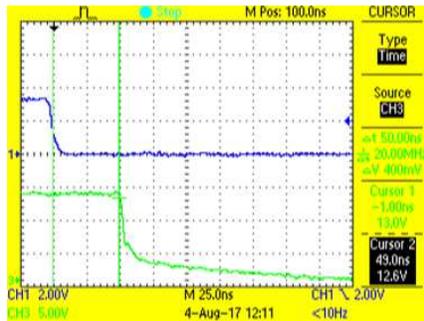


图 48. 高侧 V 相相关断传播延迟 (50ns)

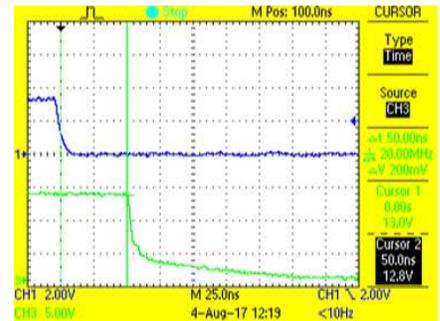


图 49. 高侧 W 相导通传播延迟 (50ns)

3.2.2.3 自举电源纹波

此参考设计使用自举电源技术，从直流参考低侧栅极驱动器电源生成浮动高侧栅极驱动器电源。高侧栅极电压纹波取决于低侧开关占空比以及相电流幅度和方向。必须确保浮动高侧栅极电压不会下降一个数量级，以使其将 IGBT 开关驱动到线性区域或增加饱和电压。

对于此参考设计，纹波电压以 10% 和 90% 占空比、±8A 直流相电流以及正弦相电流捕获，以确保自举电容器两端的电压不会下降太多。为了测量最差的纹波电压波形，使用了 4kHz 的最小逆变器开关频率。

- 通道 1 (蓝色) : U 相自举电源

注: 直流耦合波形位于左侧，交流耦合波形位于右侧。

- 通道 2 (红色) : U 相电流
- 通道 3 (绿色) : U 相低侧 PWM 信号

3.2.2.3.1 空载运行的逆变器

PWM 占空比从 10% 到 90% 不等，以捕获最大和最小纹波电压。

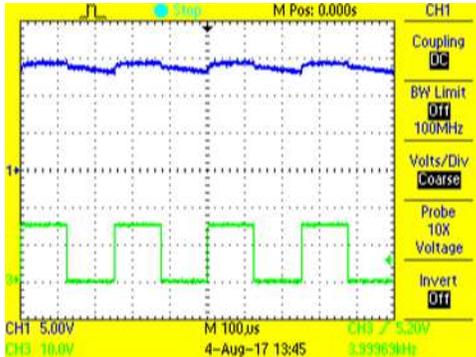


图 50. 50% 占空比耦合直流

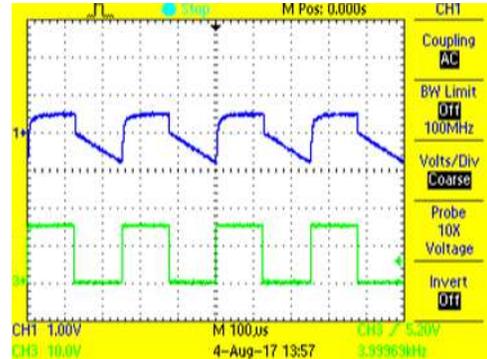


图 51. 50% 占空比耦合交流

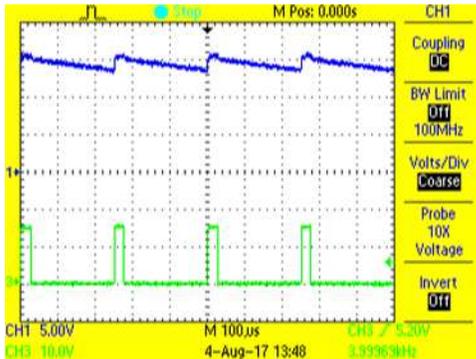


图 52. 10% 占空比耦合直流

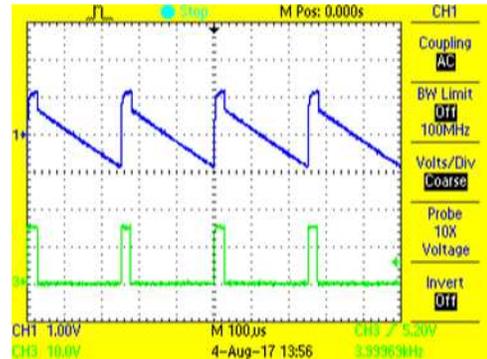


图 53. 10% 占空比耦合交流

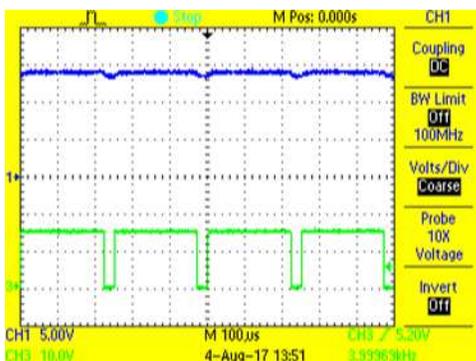


图 54. 90% 占空比耦合直流

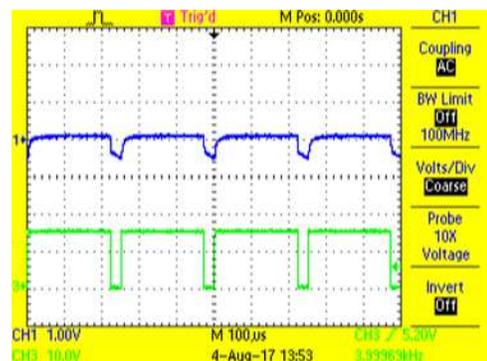


图 55. 90% 占空比耦合交流

3.2.2.3.2 带直流负载运行的逆变器

图 56 至图 59 显示了相电流对纹波电压的影响。

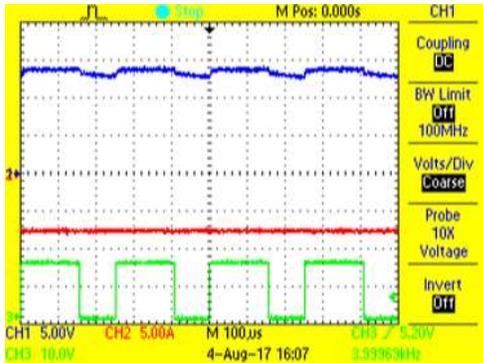


图 56. U 相耦合直流中的 -8A 直流电流

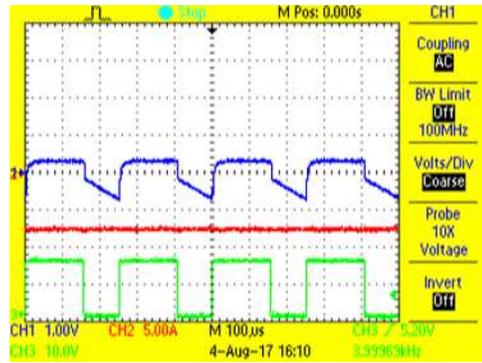


图 57. U 相耦合交流中的 -8A 直流电流

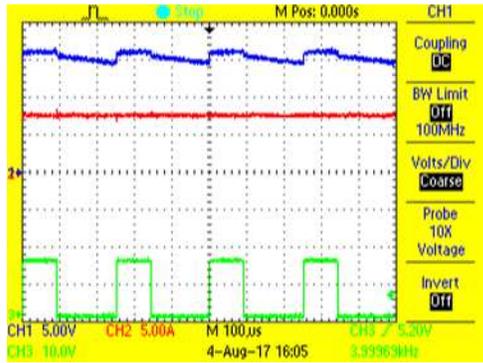


图 58. U 相耦合直流中的 8A 直流电流

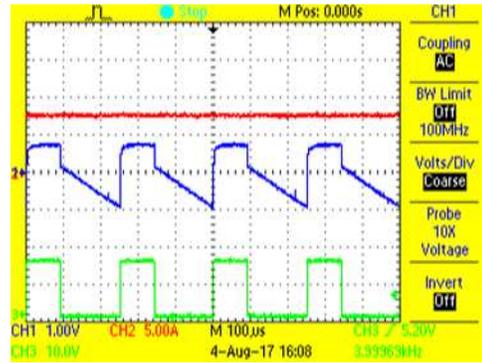


图 59. U 相耦合交流中的 8A 直流电流

3.2.2.3.3 带正弦负载运行的逆变器

图 60 显示了当相电流为负值时，自举电压较低。这是因为从自举电容器充电电压中减去了 IGBT 导通饱和电压。当电流为正值时，自举电压较高。这是因为当电流为正值时，低侧开关的续流二极管导通，二极管正向压降加到自举电容器充电电压上。

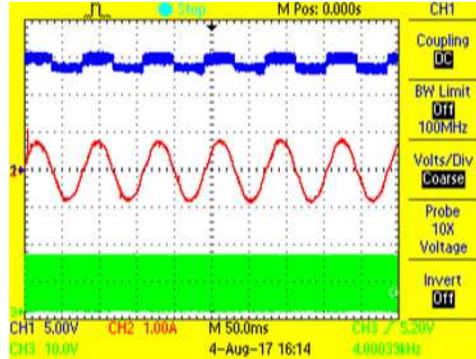


图 60. U 相正弦电流

3.2.2.4 硬开关和软开关条件下的栅极拉电流/灌电流、栅极电压以及开关节点电压波形

此部分显示了逆变器功能开关波形。8A 正电流（流出相位节点的电流）用于显示低侧开关的软开关行为和高侧开关的硬开关行为。-8A 负电流（流入相位节点的电流）用于显示高侧开关的软开关行为和低侧开关的硬开关行为。所有波形都使用 565V 直流总线电压。

3.2.2.4.1 低侧 IGBT 开关波形

图 61 至图 64 显示了低侧开关的导通和关断行为：

- 通道 1（蓝色）：U 相的低侧 IGBT 栅极至发射极电压
- 通道 2（红色）：U 相的低侧 IGBT 的栅极电流

注：通道 2 波形在栅极电阻器两端测量，因此以伏特显示。要从电压转换为电流，将使用一个 10Ω 的导电电阻器对导通电流波形分压，将使用一个 2Ω 的关断电阻器对关断电流波形分压。

- 通道 3（绿色）：使用 DC- 的 U 相开关节点

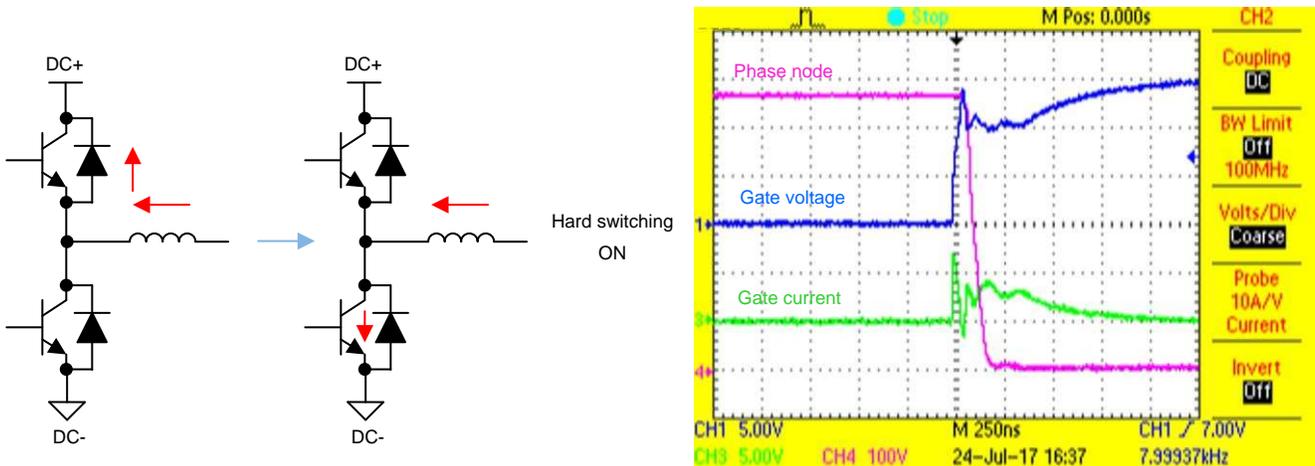


图 61. 硬开关导通（低侧）

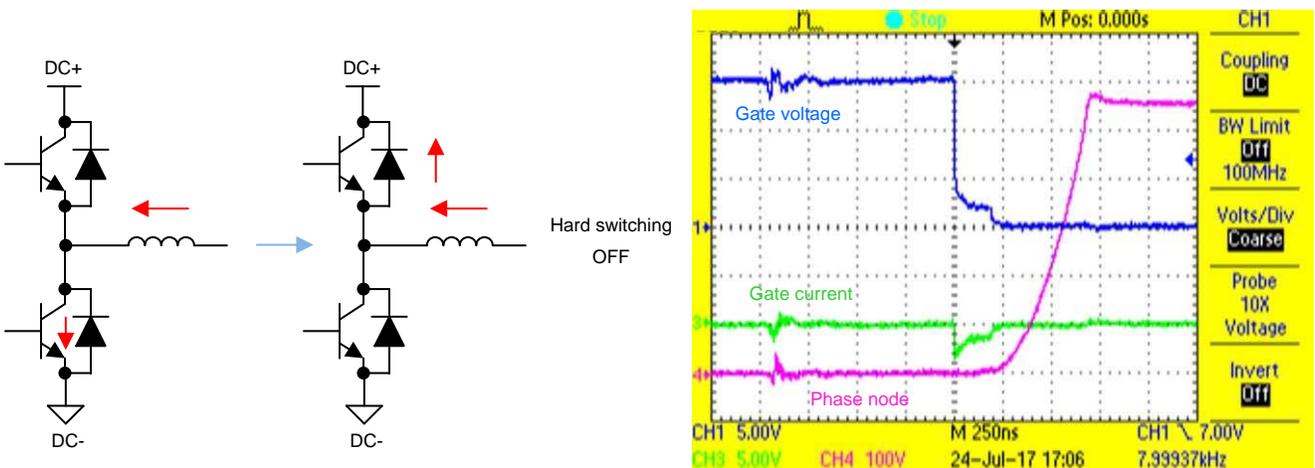


图 62. 硬开关关断（低侧）

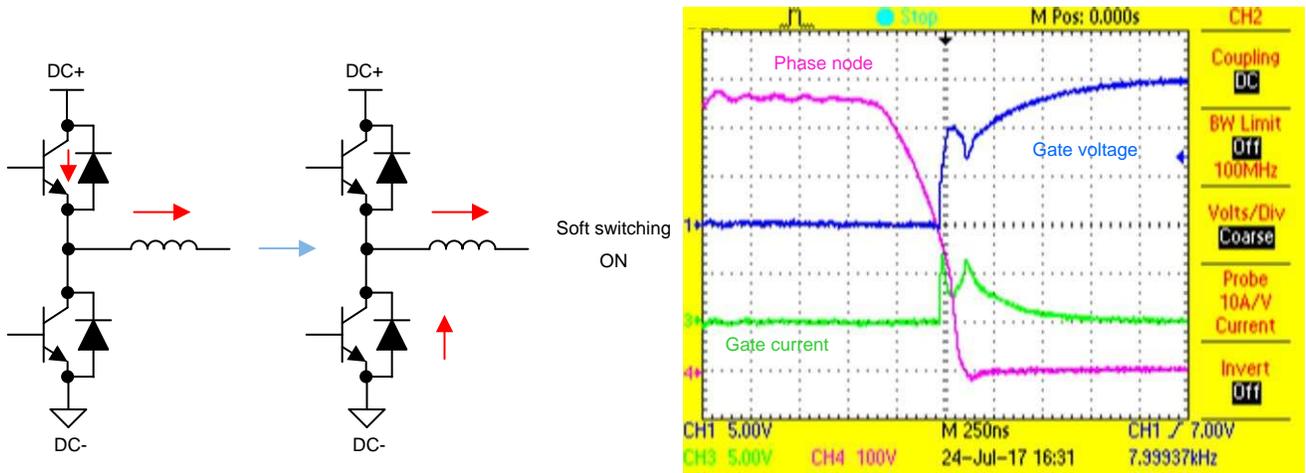


图 63. 软开关导通（低侧）

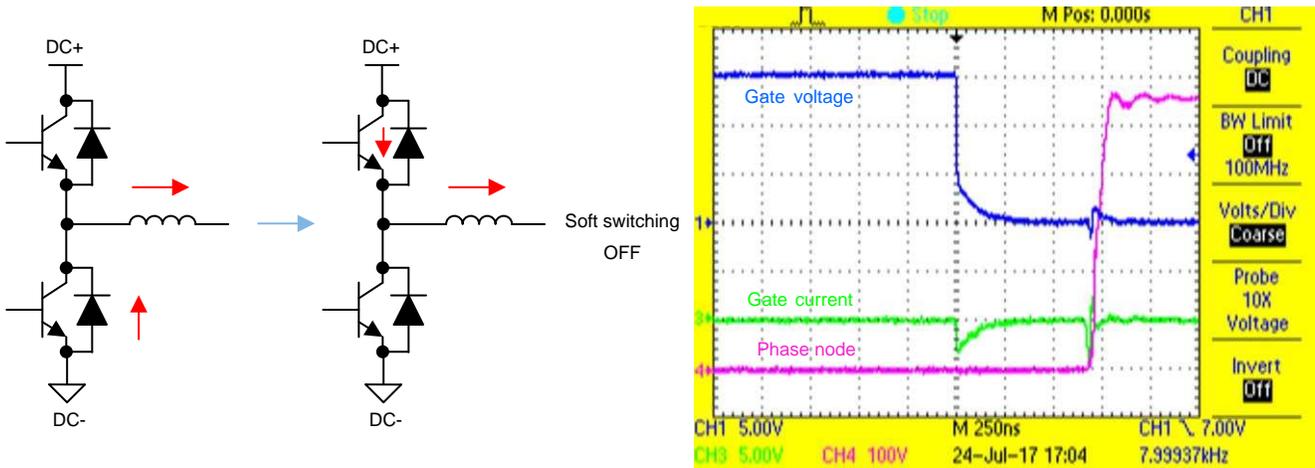


图 64. 软开关关断（低侧）

3.2.2.4.2 高侧 IGBT 开关波形

图 65 至图 68 显示了高侧开关的导通和关断行为：

- 通道 1（蓝色）：U 相的高侧 IGBT 栅极至发射极电压
- 通道 2（红色）：U 相的高侧 IGBT 的栅极电流

注：通道 2 波形在栅极电阻器两端测量，因此以伏特显示。要从电压转换为电流，将使用一个 10Ω 的导电电阻器对导通电流波形分压，将使用一个 2Ω 的关断电阻器对关断电流波形分压。

- 通道 3（绿色）：使用 DC- 的 U 相开关节点

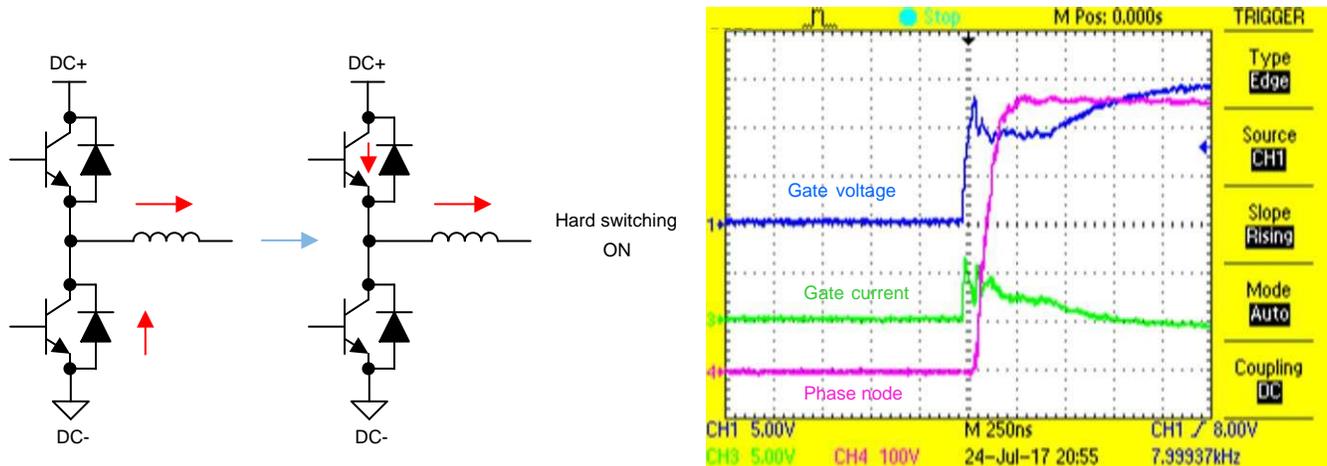


图 65. 硬开关导通（高侧）

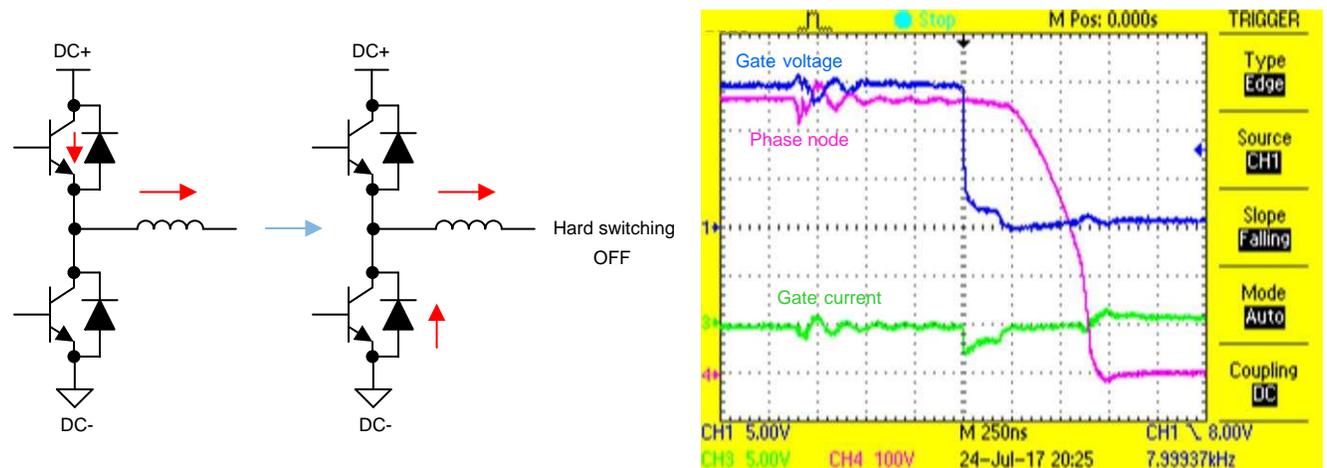


图 66. 硬开关关断（高侧）

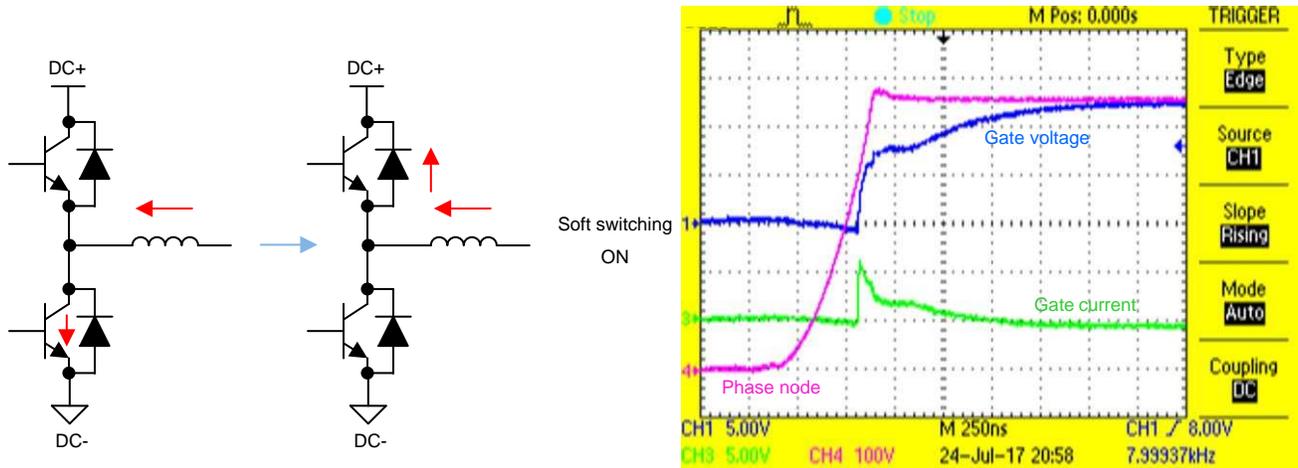


图 67. 软开关导通（高侧）

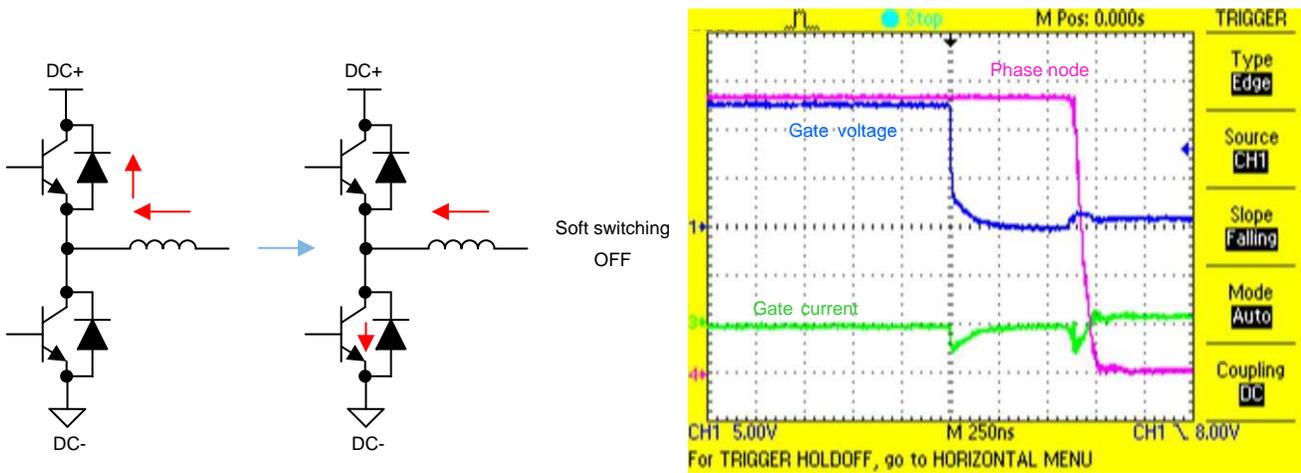


图 68. 软开关关断（高侧）

3.2.2.5 栅极驱动器的温度

电路板的红外线图用于测量栅极驱动器的温升。直流总线电压设置为零，以仅捕获由于栅极驱动器开关引起的温升。驱动器以 16kHz（测试的最大逆变器开关频率）运行 30 分钟，以使栅极驱动器封装温度上升到平衡。图 69 显示栅极驱动器的自加热仅为 4°C 左右（环境室温为 22.7°C）。

注： HS_U 表示 U 相的高侧栅极驱动器，LS_U 表示 U 相的低侧栅极驱动器（其余两个相位类似）。

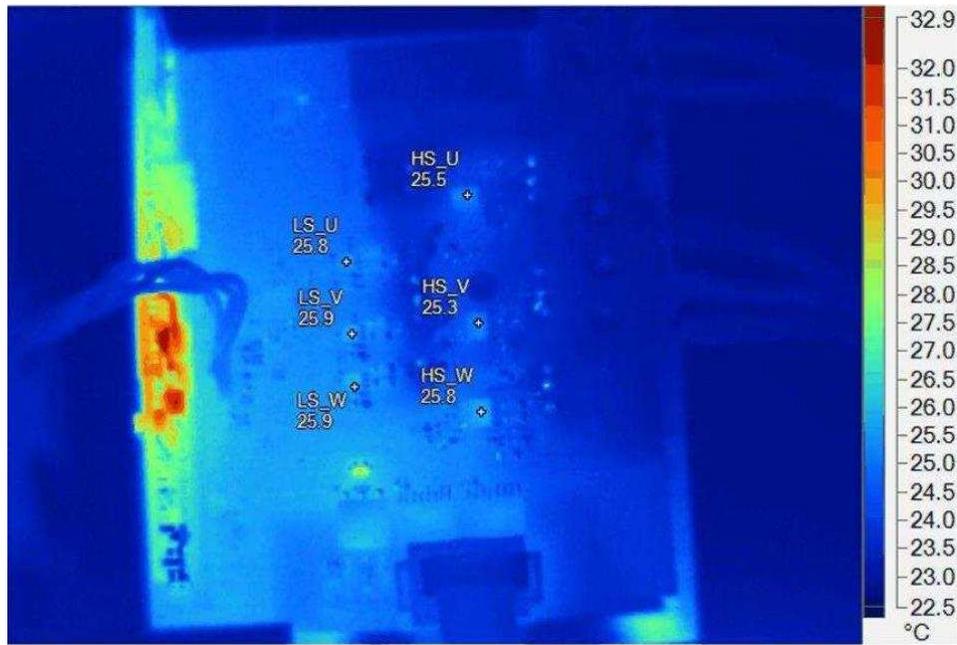


图 69. 栅极驱动器运行温升的测量

4 设计文件

4.1 电路原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-01456](#) 中的设计文件。

4.2 物料清单

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-01456](#) 中的设计文件。

4.3 PCB 布局建议

布局对于电路的正确、可靠运行至关重要。布局指南在以下部分提供。

4.3.1 增强型隔离栅

图 70 显示隔离栅和接地分离装置。热侧（高压电源侧）和冷侧（隔离低压 JTAG 和 UART 通信）的铜轨通过增强型隔离栅相互隔离。数字隔离器的宽体封装放置在隔离栅上。热侧和冷侧铜轨之间的爬电距离至少保持在 8mm。

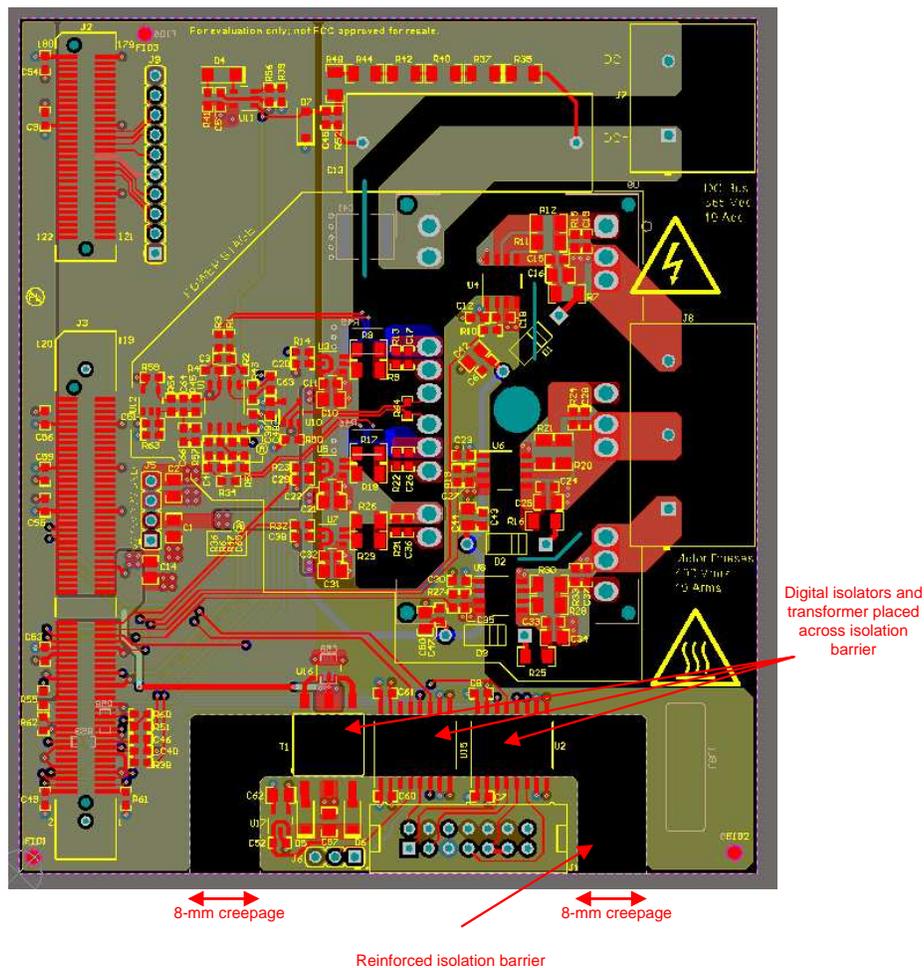


图 70. 增强型隔离栅和爬电距离

4.3.2 低侧栅极驱动器

- 将 0.1 μ F 高频噪声去耦电容器 C11 和 1 μ F 大容量电容器 C10 放置在器件的电源引脚附近。
- 尽量减小 IGBT 栅极导通和关断环路区域。图 71 显示栅极拉电流路径，图 72 显示栅极灌电流路径。加宽栅极电源轨，以减少可能降低 IGBT 开关速度的轨道寄生电感。
- R14 和 C20 是 PWM 输入通道的低通 RC 滤波器，必须靠近 PWM IN+ 引脚。

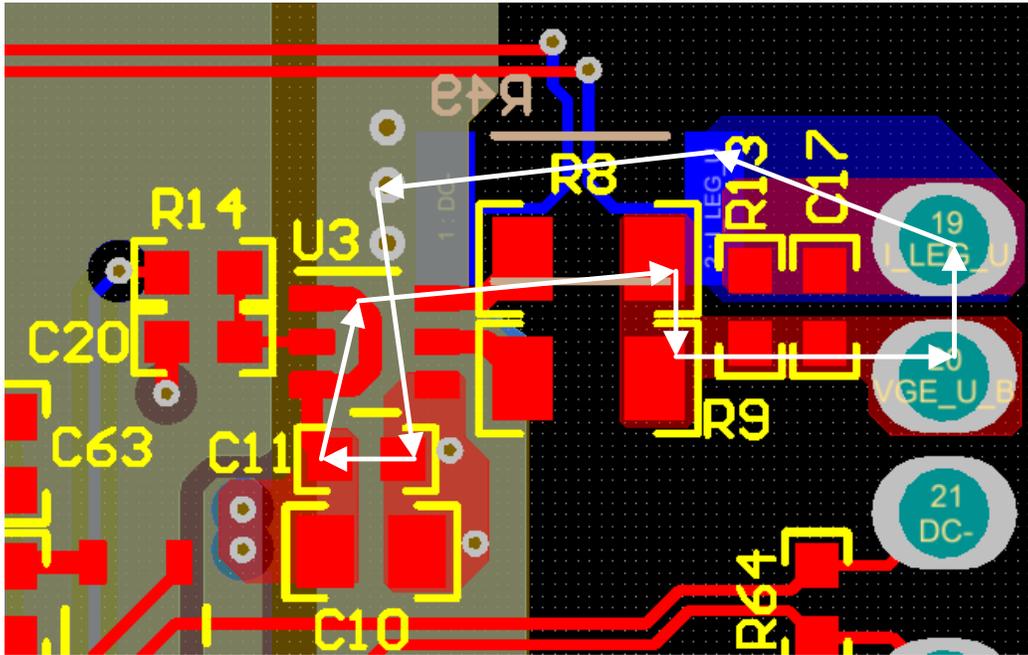


图 71. 低侧栅极驱动器导通环路

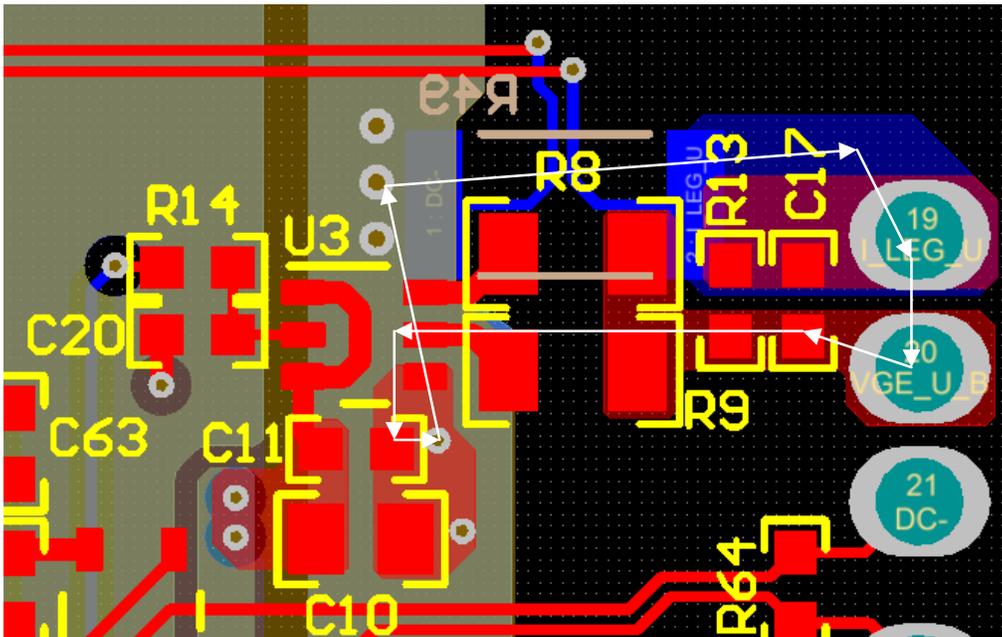


图 72. 低侧栅极驱动器关断环路

4.3.3 高侧栅极驱动器

- 将初级侧 $0.1\mu\text{F}$ 噪声去耦电容器 C23 放置在初级侧电源引脚附近。
- 将 PWM 输入通道上由 R19 和 C27 组成的 RC 滤波器放置在 IC 附近，以实现良好的低通滤波。
- C44 和 C43 构成自举电路的本地 15V 大容量电容器。
- D2 是自举二极管，R16 是浪涌电流限制电阻器。
- $1\mu\text{F}$ 大容量电容器 C25 和 $0.1\mu\text{F}$ 高频噪声去耦电容器 C24 用于次级侧电源，必须放置在 IC 电源引脚附近，以尽量减少开关电流环路。
- 尽量减小 IGBT 栅极拉电流和灌电流环路区域，尽量加宽电源轨，以减少寄生电感。

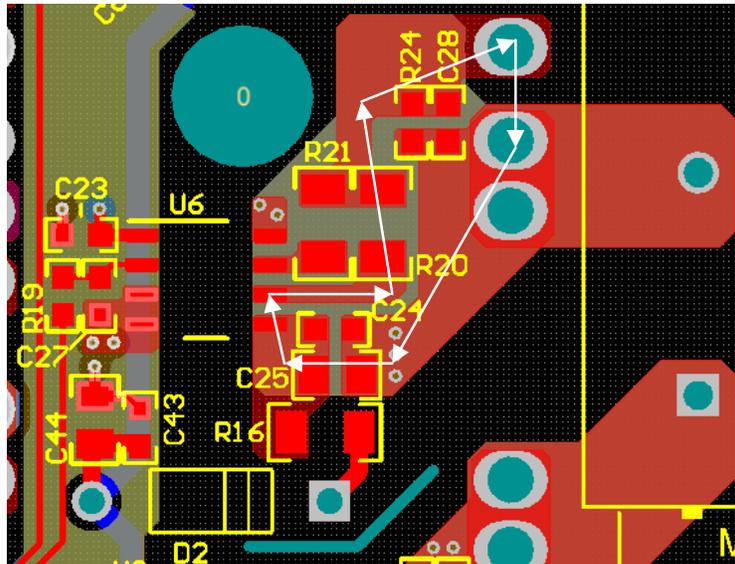


图 73. 高侧栅极导通环路

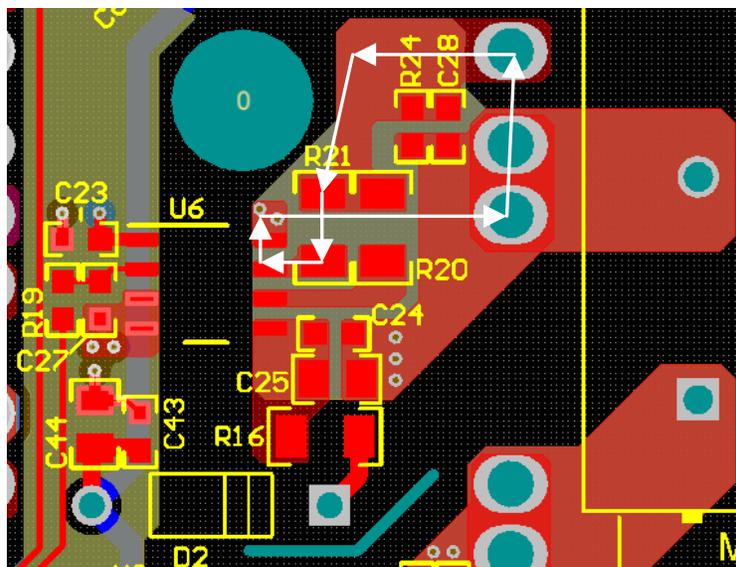


图 74. 高侧栅极关断环路

4.3.4 高压网之间的爬电距离和间隙

对于在 2 级污染环境中运行的 3 类过压设备，根据 IEC 61800-5-1（可调速电力驱动系统：安全要求 – 电气、热量和能源），基本隔离需要至少 3mm 的间隙和 4mm 的爬电距离。增强型隔离则需要 5.5mm 的间隙和基本隔离两倍的爬电距离（即 8mm）。在此参考设计中，增强型隔离移向了通信通道，从而减少了功率级所需的爬电距离和间隙，如图 75 所示。这使得功率级外形紧凑、更具成本效益。如果无法实现 4mm 的爬电距离，请在电路板内放置一个插槽，以增加爬电距离。

此设计中的功率级尺寸（包括电流感应）约为 65mm × 65mm。

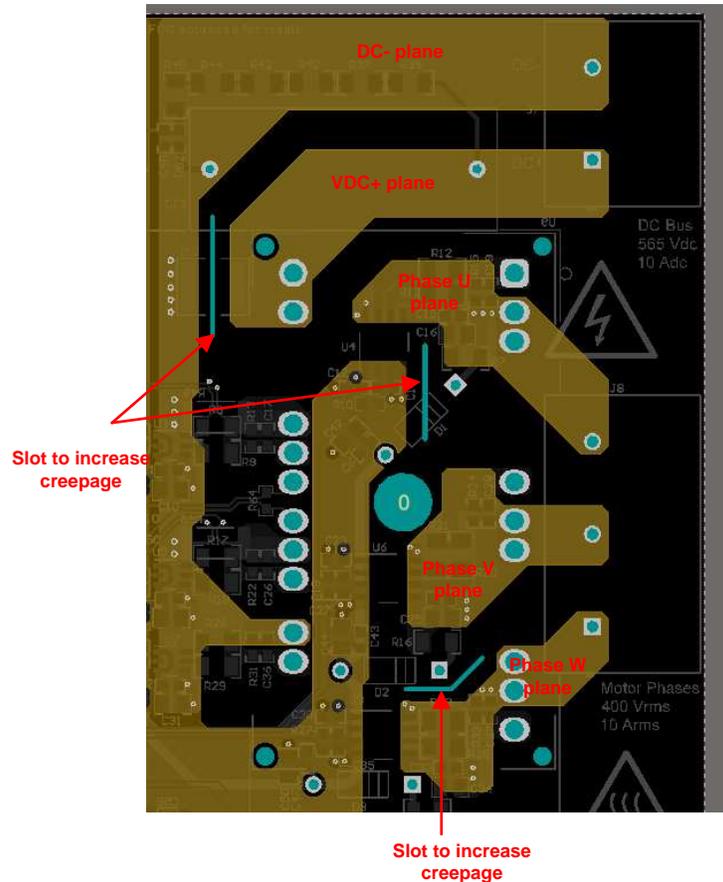


图 75. 功率级内的爬电距离和间隙

4.3.5 布局图

要下载层图，请参阅 [TIDA-01456](#) 中的设计文件。

4.4 Altium 项目

要下载 Altium 项目文件，请参阅 [TIDA-01456](#) 中的设计文件。

4.5 Gerber 文件

要下载 Gerber 文件，请参阅 [TIDA-01456](#) 中的设计文件。

4.6 装配图

要下载装配图，请参阅 [TIDA-01456](#) 中的设计文件。

5 相关文档

1. 德州仪器 (TI) 应用报告 (SPRABQ4) 《使用 [TMS320F2833x](#) 的三相永磁同步电机的无传感器磁场定向控制》
2. 德州仪器 (TI) TIDA-00914 设计指南 (TIDUD07) 《具有小型 Δ - Σ 调制器的增强型隔离式相位电流感应参考设计》
3. 德州仪器 (TI) TIDA-00366 设计指南 (TIDUBX1) 《具有电流、电压和温度保护的增强型隔离三相逆变器的参考设计》
4. 德州仪器 (TI) TIDA-00195 设计指南 (TIDUA15) 《用于三相逆变器系统的隔离式 IGBT 栅极驱动器评估平台的参考设计》
5. Semikron 《[SEMITOP 技术说明](#)》[®]

5.1 商标

C2000, Delfino are trademarks of Texas Instruments.

is a registered trademark of ~SEMIKRON ELEKTRONIK GMBH and CO. KG.

All other trademarks are the property of their respective owners.

6 术语

IGBT— 绝缘栅双极晶体管

ACIM— 交流感应电机

PWM— 脉宽调制

UVLO— 欠压锁定

DNP— 不安装

NTC— 负温度系数

7 关于作者

PAWAN NAYAK 是德州仪器 (TI) 的系统工程师，负责为工业系统内的电机驱动部分开发参考设计解决方案。

7.1 鸣谢

作者希望在此感谢 **MARTIN STAEBLER** 和 **NELSON ALEXANDER** 在此设计的构思、测试和文档编制阶段作出的出色贡献。

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