参考文献

Design Guide: TIDA-010938

具有电池储能系统且基于 GaN 的 7.2kW 单相串式逆变器参考设计

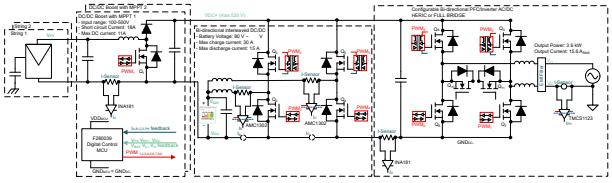
说明

此参考设计概述了如何为电池储能系统 (BESS) 实现具有双向功率转换系统的基于 GaN 的单相串式逆变器。该设计由两个串式输入组成，每个输入能处理多达 10 个串联的光伏 (PV) 电池板，还具有一个储能系统端口，用于处理 80V 至 500V 范围内的电池组。从串式输入到电池储能系统的功率等级高达 7.2kW。可配置的直流/交流转换器可在 230V 电压下支持高达 3.6kW 的单相电网连接。三个功率级的数字控制在单个 C2000™ MCU 上执行。

资源

TIDA-010938	设计文件夹
LMG3522R030、TMCS1123	产品文件夹
AMC1302、ISOW1044	产品文件夹
ISO1412、UCC14131-Q1	产品文件夹
ISO7741、ISO7762	产品文件夹
OPA4388、INA181	产品文件夹
TMDSCNCD280039C	产品文件夹

请咨询我司 TI E2E™ 支持专家



特性

- 可针对宽电池电压范围进行配置的双向直流/直流级
- 可配置的直流/交流级（HERIC、H 桥单极和双极调制方案）
- 功率密度提高 2 倍，使光伏逆变器更轻、更易于安装
- 总损耗低 (< 2%)，可充分利用阳光，并提高电池储能的效率
- 由于降低了成本，并且 MCU GND 以 V_{DC-} 为基准，因此可在所有连接到 V_{DC-} 的 GaN 器件上使用非隔离式驱动

应用

- 串式逆变器
- 电源转换系统 (PCS)

English Document: TIDUF64
Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

1 系统说明

随着光伏系统需求的增加，在推动向可再生能源进一步转变和在住宅普及太阳能利用两方面，逆变器发挥着重要作用。串式逆变器呈模块化、每瓦成本低以及易于放大以提升功率等级等特性，使串式逆变器成为单相应用市场的理想选择。混合串式逆变器还可以通过电池储存能量，因此可提供良好的出口，以更大限度地提高串式输入的电力利用率，还可在夜间或低辐照度场景中提供为电网供电的替代途径。

此类混合串式逆变器将 PV 电池板功率点跟踪与一个逆变器级以及包含一个电池级的双向功能组合在一起，从而增加了对更高功率密度和效率的需求。这正是氮化镓 (GaN) FET 可以为这一应用带来诸多优势的地方。由于 GaN FET 支持高开关频率，因此 GaN FET 可以使 EMI 滤波器和散热器变得更小，使系统更紧凑、更轻，进而增加设计的外形尺寸。

此参考设计旨在展示具有完全双向功率流的双通道单相串式逆变器的实现方案，该方案将 PV 输入功能与支持各种电池电压的 BESS 相结合。

此设计包含三个主要级：

- 具有直流/直流升压转换器的 2 × PV 输入
- 具有双向直流/直流转换器的电池输入
- 直流/交流转换器

该系统由两个按不同功能分开的电路板组成。

第一个电路板称为直流/直流板，由两个用于各个串式输入的输入直流/直流转换器和一个与电池级关联的直流/直流转换器组成。第二个电路板称为直流/交流板，由直流链路电容器、直流/交流转换器和滤波电路组成。该设计中的所有高频开关器件均基于 TI 的顶部冷却 GaN FET。

这两个电路板均安装在铝散热器上方，该散热器通过热界面材料与 GaN FET 连接。该设计中的散热器应在静态冷却条件下工作，尺寸为 324mm × 305mm× 57mm。系统整体尺寸为 290mm × 275mm × 47mm，因此体积为 3.7 升。

Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

1.1 主要系统规格

由于该参考设计分为三个主要级，因此单独定义了每级的主要规格。表 1-1 显示了直流/交流转换器的主要规格，表 1-2 显示了直流/直流升压转换器的主要规格，而表 1-3 显示了双向直流/直流转换器的主要规格。

表 1-1. 主要系统规格：直流/交流级

参数	规格
最大值 | 标称直流输入电压	520V | 400V
额定输出电压	230V
额定输出功率	3.6kW
开关频率	100kHz
功率因数	±有源、±无源
环境温度范围	-40°C 至 +60°C
冷却	静态冷却或自然对流
散热器热阻	0.3°C/W
总谐波失真 (THD)	< 5%
直流链路电容	640 µF
直流链路纹波电压	±22V

表 1-2. 主要系统规格：直流/直流升压级

参数	规格
串式输入电压	50V 至 500V（每个串多达 10 个电池板）
短路电流	18 A
标称直流电流	11A | 串
最大值 | 标称直流输出电压	520V | 400V
额定输出功率	7.2kW
开关频率	120kHz
环境温度范围	-40°C 至 +60°C

表 1-3. 主要系统规格：双向直流/直流级

参数	规格
最大值 | 标称直流链路电压	520V | 400V
充电 | 放电电流	30A | 30A
电池电压范围	80 V 至 500 V
最大输出功率	7.2kW
开关频率	每个桥臂 60kHz
环境温度范围	-40°C 至 +60°C

小心

请勿在无人照看的情况下使该设计通电。

Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

警告

高电压！ *电路板中存在可接触到的高电压*。可能发生电击。如电路板的电压和电流处理不当，则可能导致电击、火灾或伤害事故。使用该设备时应特别小心，并采取相应的保护措施，以避免伤害自己或损坏财产。为安全起见，强烈建议使用具有过压和过流保护功能的隔离式测试设备。

TI 认为在对电路板通电或进行仿真之前，用户有责任确认其已明确并理解电压和隔离要求。*通电后，请勿触摸该设计或与该设计相连的元件*。

警告

表面高温！接触会导致烫伤。请勿触摸！

电路板上电后，某些元件可能会达到 55°C 以上的高温。在运行过程中或运行刚结束时，不得触摸电路板，因为可能存在高温。

警告

TI 建议，该参考设计***仅可在实验室环境中运行，不应将该设计作为成品*** 供一般消费者使用。该设计旨在环境室温下运行，未在其他环境温度下进行运行测试。

TI 建议，该参考设计仅可由熟悉处理高压电子和机械组件、系统及子系统所存在相关风险的***合格工程师和技术人员*** 使用。

电路板中存在可接触到的高电压。如电路板的电压和电流处理不当或施加不正确，则可能导致电击、火灾或伤害事故。使用该设备时应特别小心，并采取相应的保护措施，以避免伤害自己或损坏财产。

Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

2 系统概述

2.1 方框图

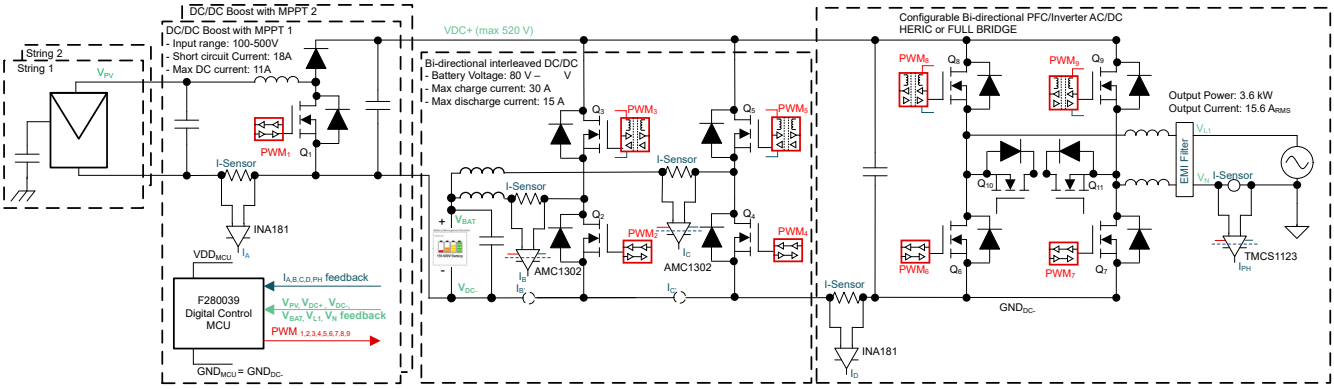


图 2-1. TIDA-010938 方框图

2.2 设计注意事项

2.2.1 直流/直流升压转换器

图 2-2 显示了直流/直流升压拓扑的方框图。该设计由两个具有一个公共输出轨的并联串式输入组成。每个输入都连接到一个直流/直流升压级，该升压级将可变串输出转换为更高且稳定的直流链路电压。该升压级控制着输入电压和电流，并可为每个串实现最大功率点跟踪 (MPPT) 算法。

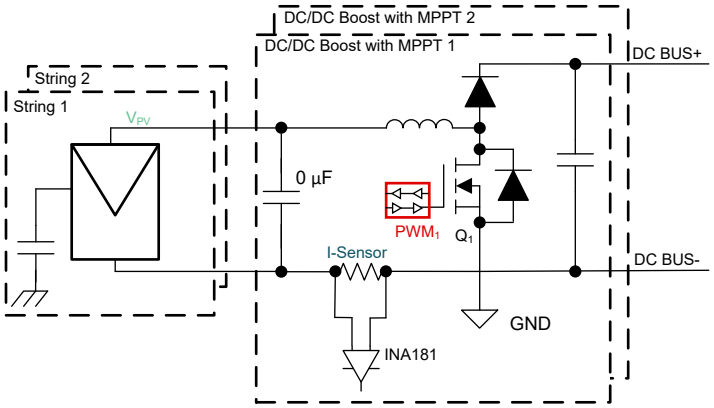


图 2-2. 直流/直流升压转换器方框图

考虑到电池板的额定电压为 50V，每个串可以包含 2 至 10 个串联的电池板，相当于最大输入电压为 50V 至 500V。这两款转换器的额定功率均为 3.6kW，能够提供 7.2kW 的总输出功率。

每个升压级均由一个 LMG3522R030 器件与一个 SiC 二极管、一个值为 160 µH 的升压电感器 145451 (D6754)、一个用于滤波的输入电容器和一个用于将输出纹波电压降至更低的公共输出电容器组成。通过 PLEC 仿真可以发现，LMG3522R030 30mΩ 器件在导通损耗（来自 $R_{DS(on)}$ 和开关损耗（来自输出寄生电容）之间达到了很好的权衡。为了实现整流级的高效率，此处使用了额定电压为 650V、额定电流为 20A 的 SiC 肖特基二极管 C6D20065G。

在这个应用中，由于直流链路电压保持恒定，因此升压转换器的占空比是可变的并取决于输入串电压。每个 GaN FET 的开关频率均为 120kHz。

Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

2.2.2 双向直流/直流转换器

图 2-3 展示了双向直流/直流转换器拓扑的方框图。在这样的非隔离式拓扑中，双向转换器可用于可能采用电池储能的系统。由于转换器需要在一个方向上充当电池充电器（降压模式）并且需要对电池放电（升压模式），从而在直流链路上提供更高且稳定的输出电压，因此双向性是必要的。

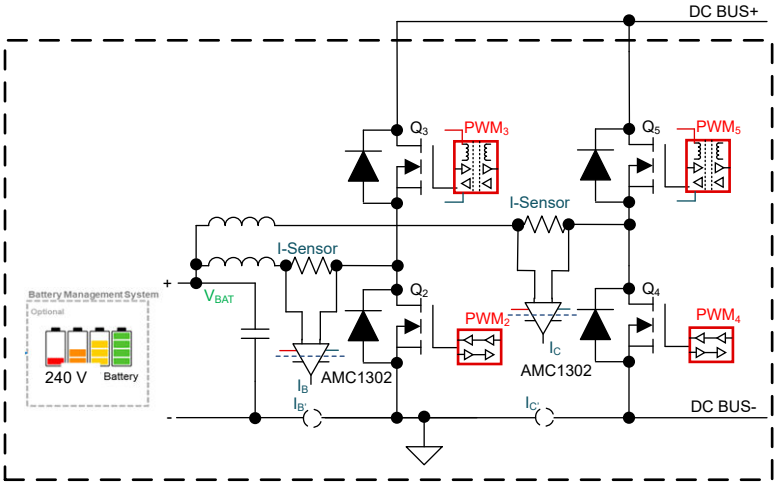


图 2-3. 双向直流/直流转换器方框图

在升压模式下，由于该转换器通过直流链路为逆变器供电，因此放电电流限制为 30A。在升压模式下，也可以采用 30A 的充电电流来达到更高的功率级别。结果，这导致 FET 的导通和开关损耗更高，因此可以进行分支交错。分支的并联还有助于跨输出 EMI 滤波器实现两倍的开关频率，这有助于减小尺寸。在桥臂之间应用 360°/2 等于 180° 的相位差，以减少纹波电流。两个分支需要相同的电流，从而产生 2 倍的输出电流，并且占空比是固定的，具体取决于电池电压和直流链路电压。此外，还会在半桥 FET 之间插入死区时间以避免电流路径短路，同时开关以互补方式进行切换。两个交错级都有单独的输入电容器和额定值为 186 μH 的 Bourns 电感器 145452 (D6755)，以及一个公共输出电容器，以尽可能地降低输出纹波电压。所有无源器件的设计都符合最坏情况下纹波和 EMI 条件的要求。

因此，这种设计的额定值可为降压级提供 3.6kW 的输出，并拥有为电池充电高达 7.2kW 的能力。每个交错级以 60kHz 的频率进行切换，从而产生 120kHz 的等效输出频率。

2.2.3 直流/交流转换器

图 2-4 显示了直流/交流级的方框图。逆变器级负责将直流电流转换为交流电流。该拓扑由 H 桥构成，每组对角开关在输出电压的一个半波期间以高频工作。与电网并联的附加开关允许在输出滤波器上产生额外的电压电平，从而使此电源转换系统成为三电平拓扑。这使得恒定的共模电压能够导致漏电流可忽略不计，因为 PV 输入级在续流阶段与交流电网解耦。

Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

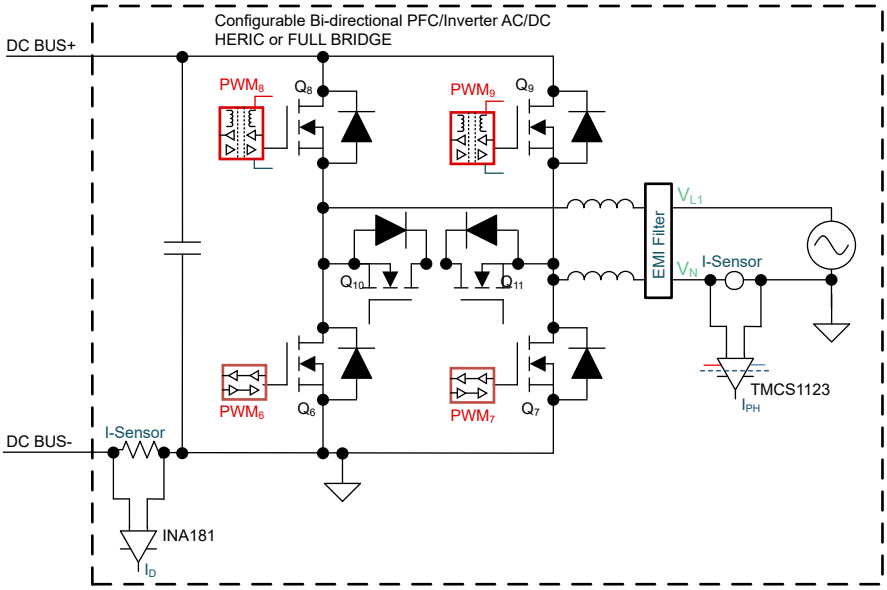


图 2-4. 直流/交流转换器方框图

这种拓扑是此类无变压器串式逆变器应用的理想选择，在这类应用中，交流电网和 PV 电池板之间没有可用的隔离。由于 PV 表面暴露在接地屋顶或附近的其他表面上方，因此共模电流是 PV 应用中众所周知的挑战。表面积较大会导致 PV 电池板与接地之间的杂散电容值较高，在潮湿环境或雨天，杂散电容可能高达 200nF/kWp。当转换器的共模电压没有得到很好的缓解时，这种寄生电容会导致高共模电流流入系统，并可能导致 EMI 和电网电流失真等问题。

该转换器以 100kHz 开关频率运行，用于正弦电网电流控制，从而使 EMI 滤波器设计变得紧凑。在 230V 电网下，能够以 15.6A_{RMS} 的输出电流实现 3.6kW 的输出功率。EMI 滤波器由分割在两个电源轨之间的升压电感器、两个共模扼流圈、Cx 电容器和 Cy 电容器组成。EMI 滤波器旨在衰减注入电网的差模和共模噪声。此外，直流链路上还存在电解电容器，以补偿此类单相应用中存在的电源纹波。对于此应用，所选的升压电感器为 Bourns 145453 (D6743)，其值约为 96 μH，直流电阻为 30mΩ。对于电解电容器，应考虑并联四个 ALH82D161DD600 的组合，其中每个电容器的额定值为 160 μF，从而导致总电容为 640 μF。

Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

2.3 重点产品

2.3.1 TMDSCNCD280039C - TMS320F280039C 评估模块 C2000™ MCU controlCARD™

德州仪器 (TI) 的 F280039C controlCARD （控制卡） (TMDSCNCD280039C) 提供了一种了解并实验 F28003x 器件的好方法。F28003x 器件是 TI 的 C2000™ 微控制器 (MCU) 系列成员。此 120 引脚 controlCARD 旨在提供滤波良好的稳健设计，能够在大多数环境中工作。

controlCARD™ 具有以下特性：

- F280039C 微控制器 – 高性能 C2000 微控制器位于 controlCARD 上
- 120 引脚 HSEC8 边缘卡接口 – 可兼容 C2000 的所有 180 引脚 controlCARD 类应用套件和 controlCARD。
- 内置隔离式 JTAG 仿真 – 通过 XDS110 仿真器提供的接口轻松连接 Code Composer Studio™，不需要使用额外的硬件。切换开关允许使用外部 JTAG 仿真器。
- 内置隔离式电源 – 从 USB Type-C® 连接器通过隔离栅传递 5V 电源。允许 controlCARD 完全由 USB Type-C 连接器供电和运行。F280039C 与 USB 端口完全隔离。
- 电源自动开关 – controlCARD 会自动切换到外部 5V 电源（如有）。无需额外配置。

有关该器件的更多详细信息，请参阅 TMDSCNCD280039C 产品页面。

2.3.2 LMG3522R030 具有集成式驱动器、保护和温度报告功能的 650V 30mΩ GaN FET

LMG3522R030 GaN FET 具有集成式驱动器和保护功能，适用于开关模式电源转换器，可让设计人员实现更高水平的功率密度和效率。LMG3522R030 集成了一个硅驱动器，可实现高达 150V/ns 的开关速度。与分立式硅栅极驱动器相比，TI 的集成式精密栅极偏置可实现更高的开关 SOA。这种集成特性与 TI 的低电感封装技术相结合，可在硬开关电源拓扑中提供干净的开关和超小的振铃。可调栅极驱动强度允许将压摆率控制在 20V/ns 至 150V/ns 之间，这可用于主动控制 EMI 并优化开关性能。高级电源管理功能包括数字温度报告和故障检测。GaN FET 的温度通过可变占空比 PWM 输出进行报告，这可简化器件加载管理。报告的故障包括过热、过流和 UVLO 监控。

有关该器件的更多详细信息，请参阅 LMG3522R030 产品页面。

2.3.3 TMCS1123 - 精密霍尔效应电流传感器

TMCS1123 是一款电隔离霍尔效应电流传感器，具有业界出色的隔离功能和精度。该器件还提供与输入电流成正比的输出电压，且在所有灵敏度选项下均具有出色的线性度和低漂移。具有内置漂移补偿功能的精密信号调节电路能够在没有系统级校准的情况下，在温度和寿命范围内的最大总误差小于 1.75%，或在一次性室温校准（同时包括寿命和温度漂移）的情况下的最大总误差小于 1%。交流或直流输入电流流经内部导体，所产生的磁场可由集成式片上霍尔效应传感器进行测量。无磁芯结构消除了对磁集中器的需求。差分霍尔传感器可抑制外部杂散磁场产生的干扰。低导体电阻将可测量电流范围提高至 ±96 A，同时更大程度地降低功率损耗并降低散热要求。绝缘能够承受 5000V_{RMS}，加上最小 8.1mm 的爬电距离和电气间隙，可提供高达 1100VDC 的可靠寿命增强型工作电压。集成式屏蔽可提供出色的共模抑制和瞬态抗扰度。固定的灵敏度使 TMCS1123 能够通过单个 3V 至 5.5V 的电源运行，因此消除了辐射测量误差并提高了电源噪声抑制能力。

有关该器件的更多详细信息，请参阅 TMCS1123 产品页面。

2.3.4 AMC1302 - 具有 ±50mV 输入电压的增强型隔离式精密放大器

AMC1302 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。该隔离栅经认证可提供高达 5kV_{RMS} 的增强型电隔离，符合 VDE V 0884-11 和 UL1577 标准，并且可支持最高 1.5kV_{RMS} 的工作电压。该隔离栅可将系统中以不同共模电压电平运行的各器件隔开，并保护电压较低的器件免受高电压冲击。AMC1302 的输入针对直接连接低阻抗分流电阻器或其他具有低信号电平的低阻抗电压源的情况进行了优化。出色的直流精度和低温漂支持在 –40°C 至 +125°C 的扩展工业级工作温度范围内，在 PFC 级、直流/直流转换器、交流电机和伺服驱动器中进行精确的电流控制。集成的无分流器和无高侧电源检测特性可简化系统级设计和诊断。

有关该器件的更多详细信息，请参阅 AMC1302 产品页面。

Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

2.3.5 ISO7741 EMC 性能优异的四通道、3 个正向、1 个反向增强型数字隔离器

ISO7741 器件是高性能、四通道数字隔离器，可提供符合 UL 1577 的 5000V_{RMS}（DW 封装）和 3000V_{RMS}（DBQ 封装）隔离额定值。该系列包含的器件具有符合 VDE、CSA、TUV 和 CQC 标准的增强绝缘等级。ISO7741B 器件专为仅需要基本绝缘额定值的应用而设计。在隔离 CMOS 或 LVCMOS 数字 I/O 时，ISO774x 器件可在低功耗下提供高电磁抗扰度和低辐射。每条隔离通道的逻辑输入和输出缓冲器均由双电容二氧化硅（SiO2）绝缘栅相隔离。这些器件配有使能引脚，可用于将各自输出置于高阻态以适用于多主驱动应用中，并降低功耗。ISO7740 器件具有四条方向全部相同的通道，ISO7741 器件具有三条正向通道和一条反向通道，而 ISO7742 器件具有两条正向通道和两条反向通道。

有关该器件的更多详细信息，请参阅 ISO7741 产品页面。

2.3.6 ISO7762 EMC 性能优异的六通道、4 个正向、2 个反向增强型数字隔离器

ISO7762 器件是高性能六通道数字隔离器，可提供符合 UL 1577 的 5000V_{RMS}（DW 封装）和 3000V_{RMS}（DBQ 封装）隔离额定值。该系列器件还通过了 VDE、CSA、TUV 和 CQC 认证。在隔离 CMOS 或 LVCMOS 数字 I/O 时，ISO776x 系列器件可提供高电磁抗扰度和低辐射，并具备低功耗特性。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。ISO776x 系列器件采用所有可能的引脚配置，因此所有六个通道都可以处于同一方向，或者一个、两个或三个通道处于反向，而其余通道处于正向。

有关该器件的更多详细信息，请参阅 ISO7762 产品页面。

2.3.7 UCC14131-Q1 汽车类、1.5W、12V 至 15V V_{IN}、12V 至 15V V_{OUT}、高密度、> 5kV_{RMS} 隔离式直流/直流模块

UCC14131-Q1 是一款符合汽车标准的高隔离电压直流/直流电源模块，旨在为 GaN、IGBT、SiC 或 Si 栅极驱动器供电。UCC14131-Q1 集成了一个变压器和一个具有专有架构的直流/直流控制器，可实现高效率和非常低的发射。该器件可通过 12V 稳压输入提供隔离式 12V 输出，用于驱动 GaN 和 Si MOSFET，以及通过 15V 稳压输入提供隔离式 15V 或 18V 输出，以便偏置 SiC MOSFET 或 IGBT 的驱动器电路。高精度可提供更好的通道增强，从而实现更高的系统效率，而又不会对功率器件栅极造成过应力。UCC14131-Q1 可以高效地提供高达 1.5W（典型值）的隔离式输出功率。该模块需要非常少的外部元件，并且具有片上器件保护功能，可提供额外的特性，例如输入欠压锁定、过压锁定、输出电压电源正常比较器、过热关断、软启动超时、可调隔离式正负输出电压、使能引脚和开漏输出电源正常引脚。

有关该器件的更多详细信息，请参阅 UCC14131-Q1 产品页面。

2.3.8 ISOW1044 具有集成直流/直流电源的低辐射、5kV_{RMS} 隔离式 CAN FD 收发器

ISOW1044 器件是一款电隔离式控制器局域网 (CAN) 收发器，内置隔离式直流/直流转换器，无需在空间受限的隔离式设计中使用单独的隔离式电源。低发射、隔离式直流/直流转换器符合 CISPR 32 辐射发射 B 类标准，在简单的两层 PCB 上仅使用两个铁氧体磁珠。额外的 20mA 输出电流可用于为板上的其他电路供电。该器件具有一个集成的 10Mbps GPIO 通道，有助于去除用于诊断、LED 指示或电源监控的额外数字隔离器或光耦合器。

有关该器件的更多详细信息，请参阅 ISOW1044 产品页面。

2.3.9 ISOW1412 具有集成电源的低辐射、500kbps、增强型隔离式 RS-485、RS-422 收发器

ISOW1412 器件是电隔离 RS-485、RS-422 收发器，内置隔离式直流/直流转换器，无需在空间受限的隔离式设计中使用单独的隔离式电源。低辐射、隔离式直流/直流转换器符合 CISPR 32 辐射发射 B 类标准，在简单的两层 PCB 上仅使用两个铁氧体磁珠。额外的 20mA 输出电流可用于为板上的其他电路供电。集成的 2Mbps GPIO 通道有助于去除用于诊断、LED 指示或电源监控的任何额外数字隔离器或光耦合器。

有关该器件的更多详细信息，请参阅 ISOW1412 产品页面。

2.3.10 OPA4388 四通道、10MHz、CMOS、零漂移、零交叉、真 RRIO 精密运算放大器

OPA4388 精密运算放大器是一款超低噪声、快速稳定、零漂移、零交叉器件，可实现轨至轨输入和输出运行。这些特性及出色的交流性能与仅 0.25μV 的失调电压以及 0.005μV/°C 的温漂相结合，使得 OPA4388 成为驱动高精度模数转换器 (ADC) 或缓冲高分辨率数模转换器 (DAC) 输出的理想选择。该设计在驱动模数转换器 (ADC) 时具有出色的性能，而不会降低线性度。OPA388（单通道版本）提供 VSSOP-8、SOT23-5 和 SOIC-8 三种封装。

Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

OPA2388（双通道版本）提供 VSSOP-8 和 SO-8 两种封装。OPA4388（四通道版本）提供 TSSOP-14 和 SO-14 两种封装。所有版本的额定工作温度范围均为 -40°C 至 +125°C。

有关该器件的更多详细信息，请参阅 OPA4388 产品页面。

2.3.11 OPA2388 双通道、10MHz、CMOS、零漂移、零交叉、真 RRIO 精密运算放大器

OPA2388 精密运算放大器是一款超低噪声、快速稳定、零漂移、零交叉器件，可实现轨至轨输入和输出运行。这些特性及出色的交流性能与仅 0.25μV 的失调电压以及 0.005μV/°C 的温漂相结合，使得 OPA2388 成为驱动高精度模数转换器 (ADC) 或缓冲高分辨率数模转换器 (DAC) 输出的理想选择。该设计在驱动模数转换器 (ADC) 时具有出色的性能，而不会降低线性度。OPA388（单通道版本）提供 VSSOP-8、SOT23-5 和 SOIC-8 三种封装。OPA2388（双通道版本）提供 VSSOP-8 和 SO-8 两种封装。OPA4388（四通道版本）提供 TSSOP-14 和 SO-14 两种封装。所有版本的额定工作温度范围均为 -40°C 至 +125°C。

有关该器件的更多详细信息，请参阅 OPA2388 产品页面。

2.3.12 INA181 26V 双向 350kHz 电流检测放大器

INA181 是一款专为成本优化型应用而设计的电流检测放大器。该器件属于双向电流检测放大器（也称为电流分流监控器）系列，可在独立于电源电压的 –0.2V 至 +26V 共模电压范围内检测电流检测电阻器两端的压降。INAx181 系列器件在四个固定增益器件选项中集成了匹配的电阻器增益网络：20V/V、50V/V、100V/V 或 200V/V。此匹配的增益电阻网络可最大限度地减少增益误差，并降低温度漂移。这些器件由 2.7V 至 5.5V 单电源供电。单通道 INA181 消耗的最大电源电流为 260μA，而双通道 INA2181 消耗的最大电源电流为 500μA，四通道 INA4181 消耗的最大电源电流为 900μA。INA181 采用 6 引脚 SOT-23 封装。INA2181 采用 10 引脚 VSSOP 和 WSON 封装。INA4181 采用 20 引脚 TSSOP 封装。所有器件选项的额定扩展工作温度范围均为 –40°C 至 +125°C。

有关该器件的更多详细信息，请参阅 INA181 产品页面。

Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

3.1 硬件要求

此参考设计的硬件由以下各项组成：

- 直流/直流电路板
- 直流/交流电路板
- TMDSCNCD280039C 控制卡
- USB Type-C® 电缆
- USB 隔离器
- 笔记本电脑

对 DUT 供电和进行评估需要以下测试设备：

- 直流电源 Keysight N8950A
- 直流电源 Elektro-Automatik EA-PS 3080-20C
- 直流负载 Chroma 63208A
- 功率分析仪 Tektronix PA-4000

3.2 测试设置

建议的测试顺序如下所示：

1. 直流/直流电路板，输入端有两个独立的直流电源，用于连接到输出端直流负载的升压级
2. 直流/直流电路板，输入端有直流电源，用于连接到输出端直流负载的双向直流/直流级

3.2.1 直流/直流升压级

图 3-1 显示了电路板的连接。出于安全原因，请确保在直流电源上选择正确的电压和电流限值。直流负载需要配置为具有所需电压和电流限值的恒压模式。直流/直流电路板的直流总线与直流/交流电路板相连，用于控制信号的连接器也是如此。直流负载需要配置为恒压模式，直流总线电压为 450V，最大电流为 9A。

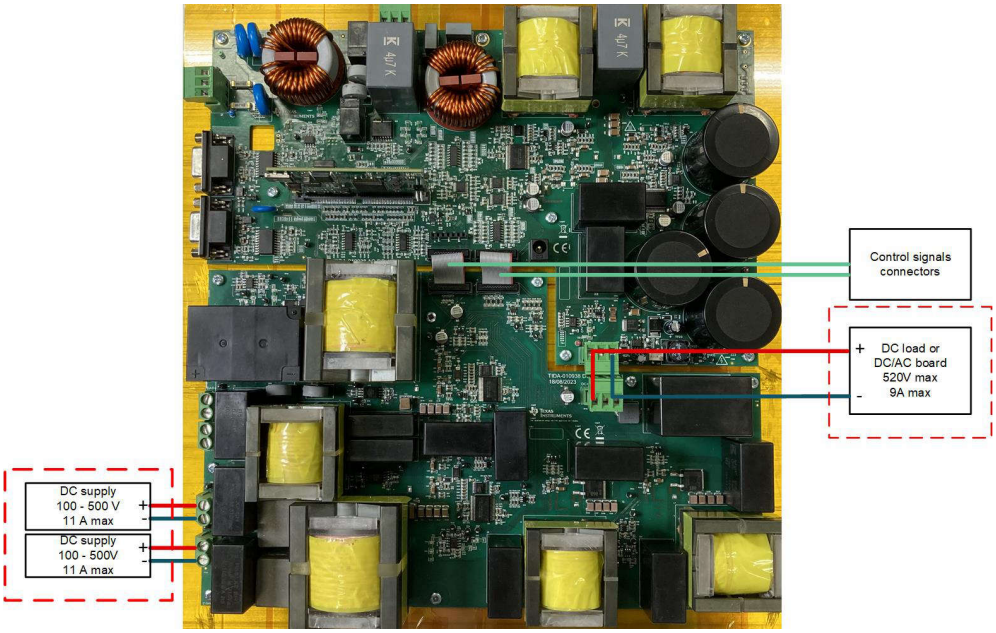


图 3-1. 用于测试直流/直流升压的连接

English Document: TIDUF64
Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

3.2.2 双向直流/直流级

图 3-2 显示了电路板的连接。出于安全原因，请确保在直流电源上选择正确的电压和电流限值。直流负载需要配置为具有所需电压和电流限值的恒压模式。直流/直流电路板的直流总线与直流/交流电路板相连，用于控制信号的连接器也是如此。直流负载需要配置为恒压模式，直流总线电压为 400V，最大电流为 20A。

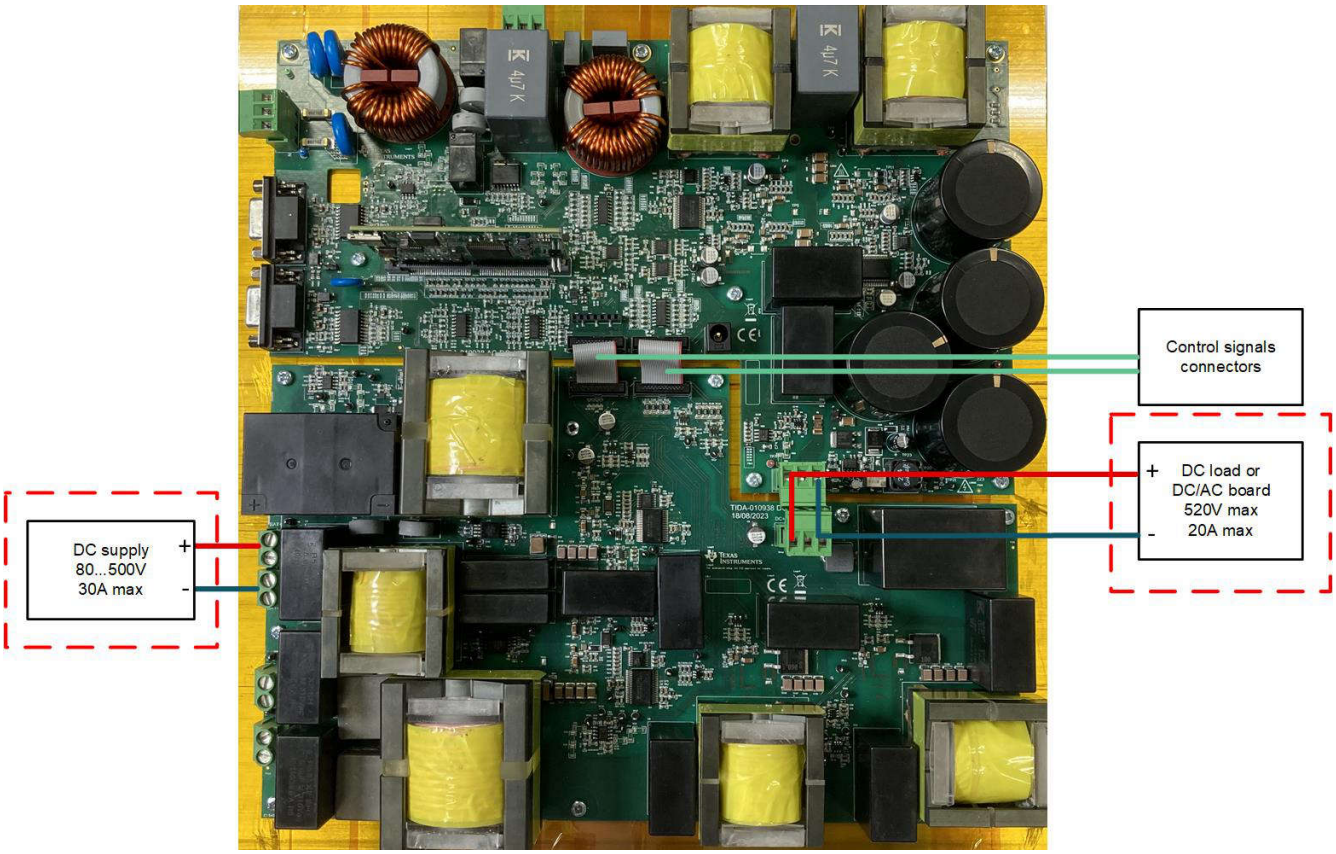


图 3-2. 用于测试双向直流/直流的连接

3.3 测试结果

3.3.1 直流/直流升压转换器

图 3-3 和表 3-1 显示了 450V 直流总线输出时的输入直流/直流转换器的效率。考虑的输入电压为 225V、350V 和 400V。对于 225V 输入，实现的峰值效率为 98.8%，其中升压转换器展示了占空比为 0.5 时最坏情况的纹波条件。从该表中可以看出，转换器在满载时的峰值效率为 99.3%。

Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

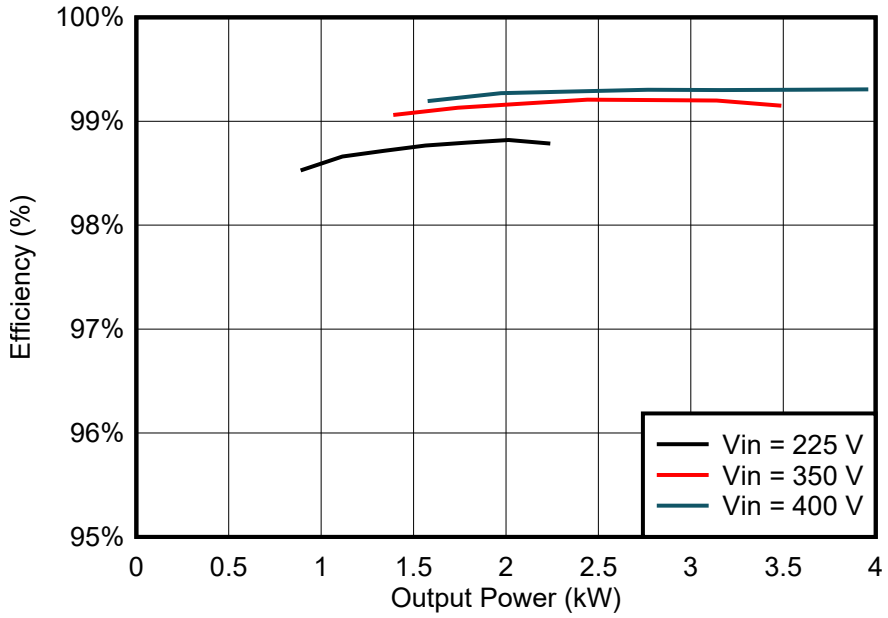


图 3-3. 450V 直流链路中直流/直流升压效率与输出功率间的关系

表 3-1. 直流/直流升压效率

输出功率	V_{IN} = 225V 时的效率	输出功率	V_{IN} = 350V 时的效率	输出功率	V_{IN} = 400V 时的效率
0.9kW	98.5%	1.4kW	99.0%	1.6kW	99.2%
1.1kW	98.6%	1.7kW	99.1%	2.0kW	99.3%
1.3kW	98.7%	2.1kW	99.2%	2.4kW	99.3%
1.6kW	98.8%	2.4kW	99.2%	2.8kW	99.3%
1.8kW	98.8%	2.8kW	99.2%	3.2kW	99.3%
2.0kW	98.8%	3.1kW	99.2%	3.6kW	99.3%
2.2kW	98.8%	3.5kW	99.1%	4.0kW	99.3%

Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

3.3.2 双向直流/直流转换器

图 3-4 和表 3-2 展示了在 400V 直流总线输出时，在降压模式下运行的双向直流/直流转换器的效率。所考虑的输入电池电压为 80V、160V、240V 和 320V，该表显示转换器可分别实现 97.9%、99.0%、99.2% 和 99.4% 的峰值效率。

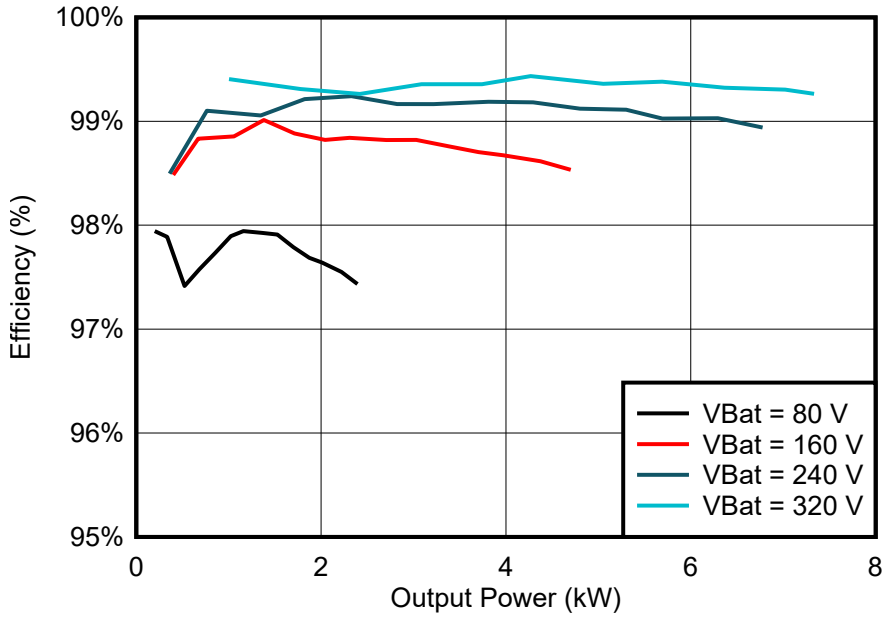


图 3-4. 400V 直流链路中双向直流/直流效率与输出功率间的关系

表 3-2. 双向直流/直流效率

输出功率	VBat = 80V 时的效率	输出功率	VBat = 160V 时的效率	输出功率	VBat = 240V 时的效率	输出功率	VBat = 320V 时的效率
0.2kW	97.9%	0.4kW	98.5%	0.4kW	98.5%	1.0kW	99.4%
0.3kW	97.9%	0.7kW	98.8%	0.8kW	99.1%	1.8kW	99.3%
0.5kW	97.4%	1.1kW	98.9%	1.3kW	99.1%	2.4kW	99.3%
0.7kW	97.6%	1.4kW	99.0%	1.8kW	99.2%	3.1kW	99.4%
0.9kW	97.7%	1.7kW	98.9%	2.3kW	99.2%	3.7kW	99.4%
1.0kW	97.9%	2.0kW	98.8%	2.8kW	99.2%	4.3kW	99.4%
1.2kW	97.9%	2.3kW	98.8%	3.2kW	99.2%	5.1kW	99.4%
1.4kW	97.9%	2.7kW	98.8%	3.8kW	99.2%	5.7kW	99.4%
1.5kW	97.9%	3.0kW	98.8%	4.3kW	99.2%	6.4kW	99.3%
1.7kW	97.8%	3.4kW	98.8%	4.8kW	99.1%	7.0kW	99.3%
1.9kW	97.7%	3.7kW	98.7%	5.3kW	99.1%	7.3kW	99.3%
2.0kW	97.6%	4.0kW	98.7%	5.7kW	99.0%		
2.2kW	97.6%	4.4kW	98.6%	6.3kW	99.0%		
2.4kW	97.4%	4.7kW	98.5%	6.8kW	98.9%		

Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

图 3-5 和表 3-3 进一步展示了此转换器在 400V 直流总线中的效率与输出电流间的关系，以展示处理高达 30A 电流的能力。

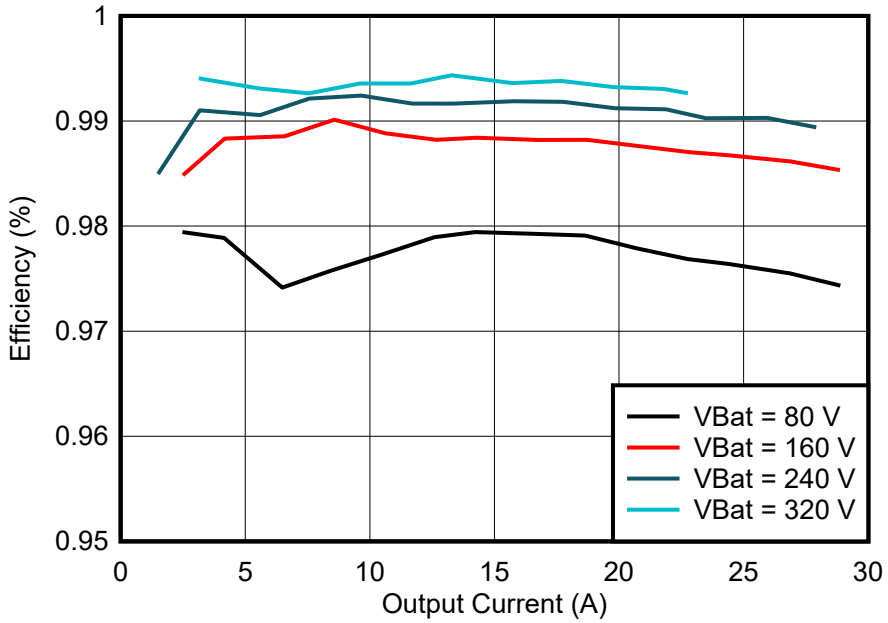


图 3-5. 400V 直流链路中双向直流/直流转换器效率与输出电流间的关系

表 3-3. 双向直流/直流转换器

输出电流	VBat = 80V 时的效率	输出电流	VBat = 160V 时的效率	输出电流	VBat = 240V 时的效率	输出电流	VBat = 320V
2.5A	97.9%	2.5A	98.5%	1.5A	98.5%	3.1 A	99.4%
4.1A	97.9%	4.2A	98.8%	3.2A	99.1%	5.6 A	99.3%
6.5 A	97.4%	6.6A	98.9%	5.6 A	99.1%	7.5 A	99.3%
8.5A	97.6%	8.6 A	99.0%	7.6 A	99.2%	9.6 A	99.4%
10.6 A	97.7%	10.6 A	98.9%	9.7 A	99.2%	11.7 A	99.4%
12.6 A	97.9%	12.7 A	98.8%	11.7 A	99.2%	13.3 A	99.4%
14.2 A	97.9%	14.3 A	98.8%	13.3 A	99.2%	15.7 A	99.4%
16.7 A	97.9%	16.7 A	98.8%	15.8 A	99.2%	17.7 A	99.4%
18.6 A	97.9%	18.7 A	98.8%	17.8 A	99.2%	19.8 A	99.3%
20.7 A	97.8%	20.8 A	98.8%	19.8 A	99.1%	21.8 A	99.3%
22.8 A	97.7%	22.8 A	98.7%	21.9 A	99.1%	22.8 A	99.3%
24.4 A	97.6%	24.4 A	98.7%	23.5 A	99.0%		
26.9 A	97.6%	26.9 A	98.6%	25.9 A	99.0%		
28.9 A	97.4%	28.9 A	98.5%	27.9 A	99.0%		

Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

4 设计和文档支持

4.1 设计文件

4.1.1 原理图

如需下载原理图，请参阅 TIDA-010938 中的设计文件。

4.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 TIDA-010938 的设计文件。

4.2 工具与软件

工具

TMDSCNCD280039C	TMS320F280039C C2000™ MCU controlCARD™ 评估模块

软件

Code Composer Studio™	集成开发环境 (IDE)

4.3 文档支持

1. 德州仪器 (TI)，*TMS320F280039C controlCARD 信息指南* 用户指南

4.4 支持资源

TI E2E™ 中文支持论坛是工程师的重要参考资料，可直接从专家处获得快速、经过验证的解答和设计帮助。搜索现有解答或提出自己的问题，获得所需的快速设计帮助。

链接的内容由各个贡献者“按原样”提供。这些内容并不构成 TI 技术规范，并且不一定反映 TI 的观点；请参阅 TI 的使用条款。

4.5 商标

C2000™, TI E2E™, and Code Composer Studio™ are trademarks of Texas Instruments.
USB Type-C® is a registered trademark of USB Implementers Forum.
所有商标均为其各自所有者的财产。

5 作者简介

VEDATROYEE GHOSH 是德州仪器 (TI) 德国公司的系统工程师，她在电网基础设施团队中专注于太阳能领域。Vedatroyee 于 2023 年获得了德国慕尼黑工业大学电力工程硕士学位。

RICCARDO RUFFO 2019 年在意大利都灵理工大学获得电气、电子和通信工程博士学位。他目前在德州仪器 (TI) 德国分公司担任系统工程师，负责电网基础设施和可再生能源领域的工作。他的主要工作包括电动汽车充电、感应式无线电力传输、光伏、可再生能源和储能应用。

ANDREAS LECHNER 是德州仪器 (TI) 电网基础设施系统工程师。Andreas 负责为全球电网基础设施领域的客户提供支持。Andreas 拥有德国兰茨胡特应用技术大学的硕士学位。

VSEVOLOD ELANTSEV 是德州仪器 (TI) 德国分公司的电网基础设施系统工程师。Vsevolod 专注于电源转换系统。Vsevolod 于 2011 年毕业于俄罗斯新切尔卡斯克的南俄罗斯国立技术大学。

Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

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出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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司