

Design Guide: TIDA-011012

适用于中压应用的 50kW SiC 模块化固态变压器参考设计



说明

此设计实现了一款基于碳化硅 (SiC) 电源模块的三相固态变压器 (SST)。采用模块化架构, 可将多个变换器子模块串联堆叠, 以满足中压电网应用需求。高速开关 SiC 器件使 DC/AC 级能够以 10kHz 开关频率运行, 双有源桥 (DAB) 隔离级能够以 100kHz 开关频率运行, 从而减小高频磁性器件尺寸并提升整体功率密度。模块间通信可提供中压终端设备所需的高隔离电压电平。级联拓扑可将电网电压均匀分配至各子模块, 使系统能够采用标准低耐压等级 SiC 器件, 同时实现完整的中压运行能力。

Resources

TIDA-011012	Design Folder
UCC35131-Q1	Product Folder
UCC218915-Q1	Product Folder
TMS320F28P650DK	Product Folder
AMC0306M05	Product Folder
AMC1336	Product Folder
UCC33421	Product Folder
AMC23C12	Product Folder
ISOTMP35	Product Folder
TMCS1133	Product Folder

特性

- 额定功率 50kW 的参考设计, 采用模块化且可扩展架构。
- 中压直流链路的额定电压为 2.2kV, 低压直流链路额定电压为 1.5kV。
- 中压侧采用基于 SiC 电源模块的 H 桥转换器。
- 采用双有源桥 (DAB) 隔离式直流/直流转换级, 开关频率为 100kHz。
- 直流/交流转换器采用单极模式, 开关频率为 10kHz。
- 子模块之间采用光纤通信, 以满足所需隔离电压要求。
- 双向功率流功能, 支持电网到储能和储能到电网运行。
- 单个模块尺寸: 850mm × 300mm × 80mm。

应用

- [固态变压器 \(SST\)](#)
- [中央逆变器](#)
- [电源转换系统 \(PCS\)](#)
- [储能系统](#)



请咨询我司 TI E2E™ 支持专家

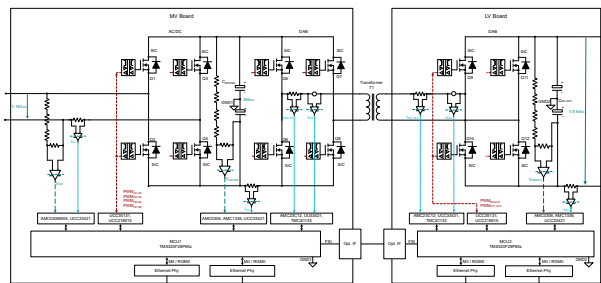


图 1-1. 方框图

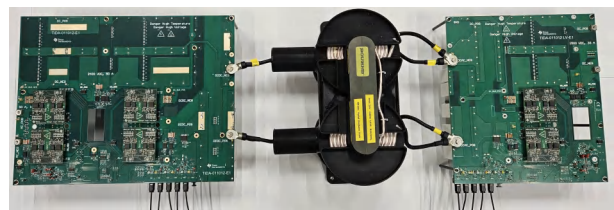


图 1-2. 电路板设置

1 系统说明

工业和商业设施中的电能转换与分配方式正在经历一场重大变革。几十年来，工频变压器一直是任何并网系统中不可或缺的组成部分。这些变压器虽然可靠，但庞大、笨重，且在接入低压电力电子系统时效率并不特别理想。如今，公用事业级光伏电站、并网电池储能系统以及高密度数据中心等应用，要求安装紧凑高效且具备更高功率等级。这种对技术创新的需求，给基于传统变压器架构构建的电力电子系统带来了巨大压力。

固态变压器 (SST) 应运而生，成为一种替代方案。固态变压器不依赖工作于 50Hz 或 60Hz 的大型铁芯变压器，而是通过高频电力电子级来实现相同的电气隔离和电压转换，其开关频率高于 10kHz。最直接的效果便是变压器尺寸和重量的显著减小。此外，从中压电网到直流链路的直接功率变换成为可能，从而提升了系统整体效率。

中压电网的工作电压范围为 10kV 到 30kV。中压运行的难点在于，标准功率半导体器件无法承受如此高的电压等级。因此，拓扑选择成为解决该问题的关键。在文献中探讨过的各种转换器架构中，级联 H 桥 (CHB) 无疑是固态变压器设计中最具实用价值的选择。该方案并非将全部中压施加于一组开关器件上，而是将电压分散到多个串联的 H 桥功率单元上。由于每个独立器件均选自商用低压元件系列，因此每个单元仅承受总中压的一部分。此外，这些元件通常比高压器件速度更快、成本更低且特性表征更完善。

除了解决电压问题，CHB 拓扑的模块化结构还具有其他优势。例如，单元的数量可根据目标电压灵活增减，且该架构支持冗余设计。冗余意味着某个单元发生故障后，通常可以被旁路，而无需将整个转换器离线。

这些特性使得固态变压器成为光伏电站、电池储能系统以及数据中心未来所需电力基础设施中极具吸引力的构建模块。

本设计指南介绍了一款基于级联 H 桥拓扑构建的双向 50kW 固态变压器参考设计，其中每个子模块由中压侧的 H 桥转换器和用于隔离式 DC/DC 转换级的双有源桥 (DAB) 组成。中压直流链路额定电压为 2.2kV，低压直流链路工作电压为 1.5kV。子模块之间通过光纤链路进行通信，从而提供在中压电位差下运行所需的电气隔离等级。

1.1 主要系统规格

表 1-1. 直流/交流转换器关键系统规格

参数	规格	详细信息
标称交流功率	±50kVA	± 有功 ± 无功
标称交流电压	1000 VRMS	
标称交流电流	50 ARMS	
标称直流电压	2200VDC	
直流链路电压纹波	±200V	在 2200V 条件下
开关频率	5kHz 至 10kHz	H 桥单极
冷却方式	强制风冷	12V 风扇
最高环境温度	60°C	
功率 FET 规格	3.3kV , 22.5m Ω	SiC FET

表 1-2. 直流/直流转换器关键系统规格

参数	规格	详细信息
标称直流功率	±50kW	双向功率流动
中压侧标称直流电压	2.2kV	
中压侧标称直流电流	23A	
低压侧标称直流电压	1.5kV	
低压侧标称直流电流	33.3A	
开关频率	100kHz	
最高环境温度	60°C	
中压侧功率 FET 规格	3.3kV , 22.5m Ω	SiC FET
低压侧功率 FET 规格	2.3kV , 11.5m Ω	SiC FET

**小心**

请勿在无人照看的情况下使该设计通电。

**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，不应视为成品** 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部件、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。

2 系统概述

2.1 方框图

此参考设计由以下电路板组成：

- 中压板包含交流/直流转换级以及 DAB 转换器的一部分（2 个 H 桥）。
- 低压板包含 DAB 转换器的另一部分（1 个 H 桥）。
- 两块控制卡板 (TMDSCNCD28P65X) 分别用于中压板和低压板。
- 六块栅极驱动器板用于控制和保护功率 FET。

图 2-1 展示了这款 50kW 基于 SiC 的模块化固态变压器的原理图。

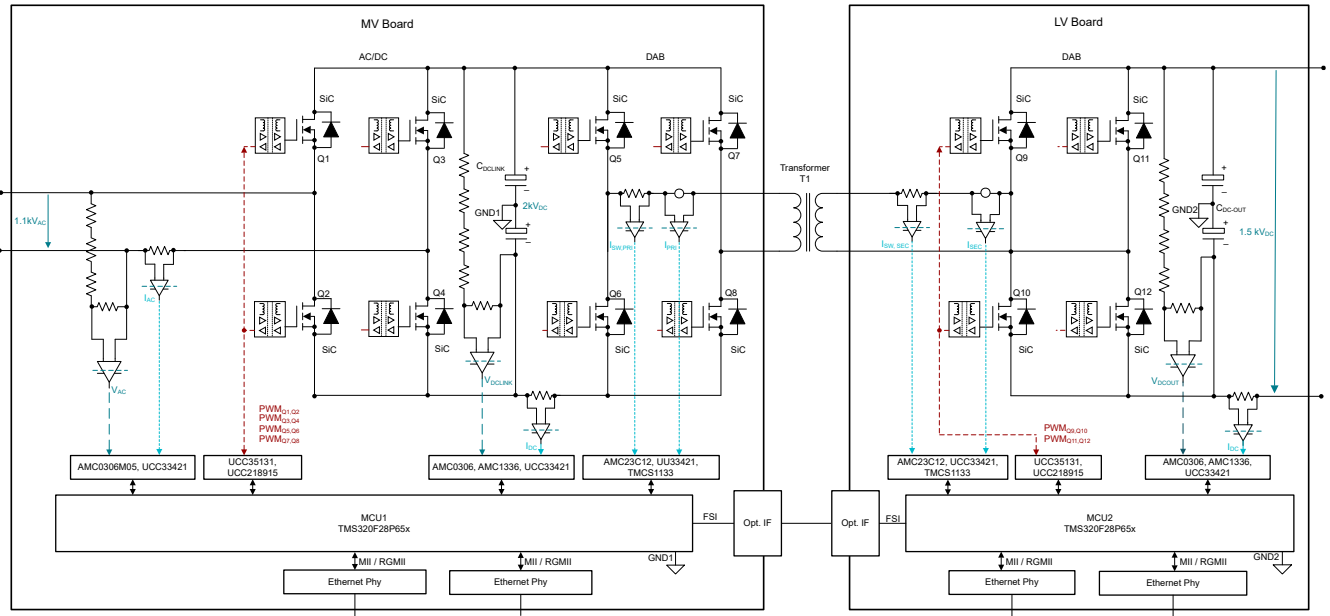


图 2-1. 50kW 基于 SiC 的模块化固态变压器原理图

2.2 设计注意事项

图 2-2 展示了该固态变压器的基本架构，其功能是将电能从三相中压电网转换至直流输出。在电网侧，多个 H 桥子模块串联连接，从而实现中压在各功率单元上的均匀分布。在输出侧，DAB 转换器并联连接，共同执行降压功能，并为低压直流链路供电。一个主控制器协同各本地子模块控制器共同调节输出电压，同时将输入电流整形为与电网电压同相。从电路隔离的角度来看，每个中压子模块均以电容中点作为参考电位，这有效地将每个子模块内部隔离元件所需承受的电压降低了一半。

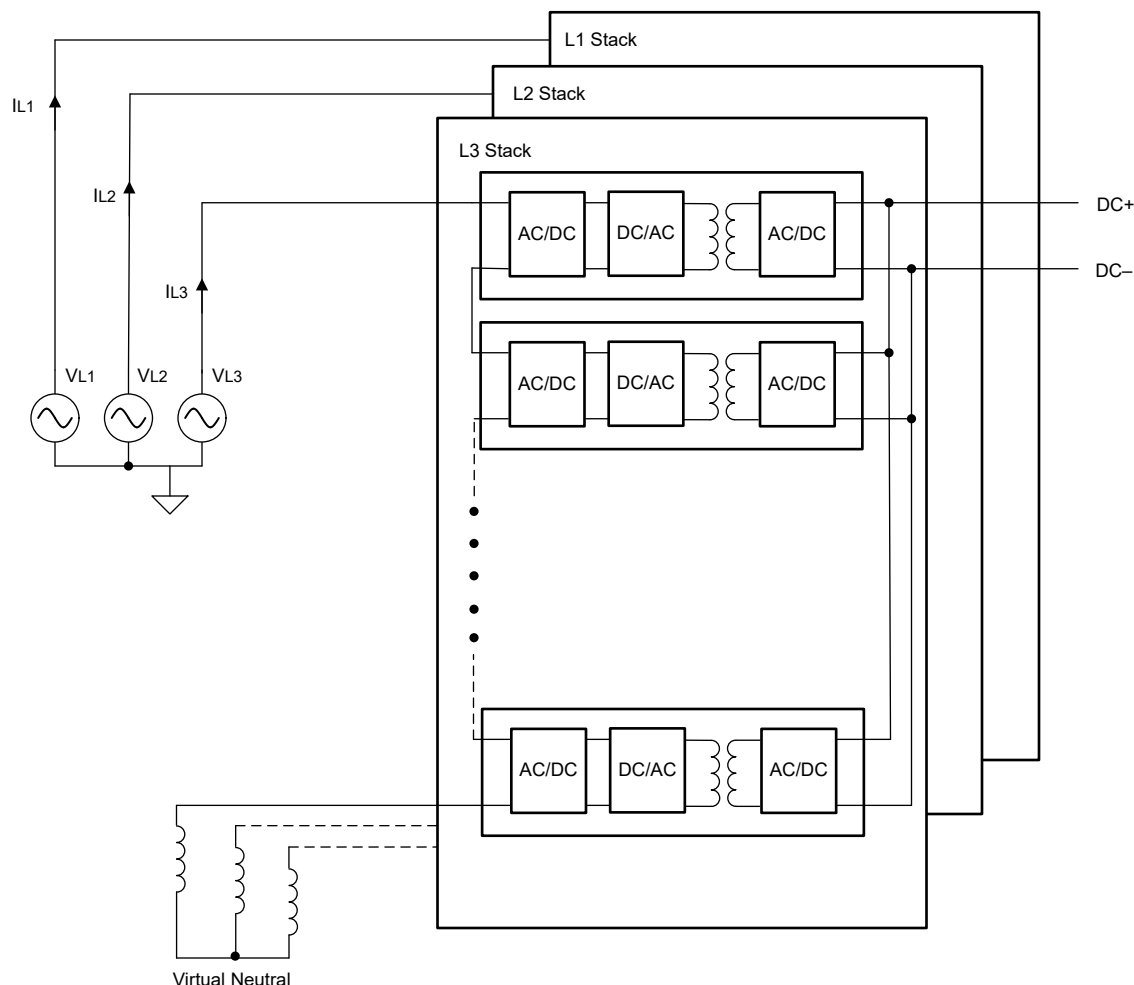


图 2-2. 堆叠概述

2.2.1 直流/交流转换器

文献中针对中压变换级提供了多种拓扑方案。其中，H 桥是最直接易行的实现方式，因为它无需额外的保护电路或钳位元件。H 桥可在双极性开关模式或单极性开关模式中运行。单极性开关模式实际上使滤波器所检测到的等效输出开关频率加倍。当使用多个 H 桥单元时，通过在各单元之间对 PWM 载波进行移相处理，可进一步倍增输出端的等效开关频率。移相技术能够显著降低升压电感所需的电感量。该拓扑中，直流链路电容器的容值按吸收两倍基频的固有功率纹波来选取。这一容值选取是有意为之的设计决策，旨在避免将此纹波传导至 DAB 变换器，从而避免使设计过度复杂化。

2.2.2 直流/直流转换器

文献中记载了多种隔离式直流/直流转换器拓扑。在固态变压器应用中，最常被考虑的是 CLLC 谐振变换器和双有源桥转换器。两者各有优势，但本设计选用 DAB 拓扑，是因为其双向控制简单，这与并网储能应用的需求非常契合。由于隔离变压器在系统中承担中压侧与低压侧之间的电气隔离屏障，因此每个 DAB 单元内的隔离变压器必须额定承受完整的中压电网电位。若所有 DAB 转换器并行运行，通过交错其开关模式，可以显著降低输出直流链路上的高频电流纹波。需要特别指出的是，本设计中的 DAB 转换器并非按照处理来自电网侧的低频功率纹波来选型。H 桥级的直流链路电容器完全吸收了功率纹波，从而使 DAB 的设计目标更加聚焦和优化。

2.3 重点产品

2.3.1 UCC35131-Q1

UCC35131-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 IGBT、SiC、Si 和 GaN 隔离式栅极驱动器和 UIR 传感器供电。该器件采用专有集成变压器、倒装芯片封装和高级控制架构，可实现高功率密度和

低噪声。该器件能够在 85°C 环境温度下提供 2.0W 的典型输出功率。高精度双路输出电压可通过电阻分压器设置，为 SiC、IGBT 和 GaN 器件实现低导通电阻、快速可靠的开关控制。低延迟反馈控制可降低用于快速负载瞬态的输出电容，并支持动态电压编程。宽输入电压和可调 VIN UVLO 支持电动汽车的宽电池电压范围和稳压输入电源轨。该器件可在 5.5V 至 20V 的 VIN 范围内运行，且可承受高达 28V 的 VIN 瞬态过压。集成保护特性、故障报告电源正常引脚和使能功能可提高系统稳健性，减少外部元件数量。具有 8.2mm 爬电距离和间隙的 SOIC 封装可提供高隔离能力。

2.3.2 UCC218915-Q1

UCC218915-Q1 是一款电隔离单通道前置驱动器，设计用于直流工作电压高达 1500V 的 SiC MOSFET 和 IGBT，具有先进的保护功能、出色的动态性能和稳健性。UCC218915-Q1 具有双 2.8A 输出，可直接驱动外部缓冲器 NMOS/PMOS 对。输入侧通过 SiO₂ 隔离技术与输出侧进行隔离，支持高达 1.06kVRMS 的工作电压、10kV_{PK} 的浪涌抗扰度，隔离层寿命超过 40 年，并提供较低的器件间偏移，共模瞬态抗扰度 (CMTI) > 200V/ns。UCC218915-Q1 集成了以下保护功能，有助于优化 SiC 和 IGBT 的开关行为并增强系统稳健性：

1. 快速过流和短路检测
2. 故障发生后受控软关断
3. 故障报告
4. 有源米勒钳位
5. 高压侧有源短路输入
6. 输入侧和输出侧电源欠压锁定 (UVLO)

2.3.3 TMDSCNCD28P65X - controlCARD 评估模块

TMDSCNCD28P65X 是一款低成本的评估与开发板，专为 TI C2000™ MCU 系列中 F28P65x 器件的初期评估和原型设计而打造。该器件配备 HSEC180 (180 引脚高速边缘连接器)。需要使用 180 引脚的底座 TMDSHSECDOCK 对 TMDSCNCD28P65X 进行评估。如需单独购买 TMDSHSECDOCK 或作为捆绑套件购买，请参阅 [TMDSHSECDOCK](#) 产品页面。

硬件特性

- 隔离式板载 XDS110 USB 转 JTAG 调试探针，支持实时系统内编程和调试
- 标准 180 引脚 controlCARD HSEC 接口
- 2 端口 EtherCAT 从站控制器
- 标准 180 引脚 HSEC 接口提供模拟 I/O、数字 I/O 和 JTAG 信号
- 硬件文件位于 C2000Ware 中的 boards\controlCARDs\TMDSCNCD28P65X

软件功能

- TI Code Composer Studio IDE - 适用于 TI 微控制器和嵌入式处理器的集成开发环境
- 软件开发套件 (SDK)
- C2000Ware - 底层器件驱动程序和示例。
- MotorControl SDK - 适用于各种三相电机控制应用的电机控制系统开发套件
- DigitalPower SDK - 适用于各种交流/直流、直流/直流和直流/交流电源应用的数字电源系统开发套件

2.3.4 AMC0306M05

AMC0x06M05 是一款精密型隔离式 Δ - Σ 调制器，具有 ± 50 mV 差分输入和数字输出。输入针对通常用于电流检测应用的低阻抗分流电阻器的连接进行了优化。隔离栅将在不同共模电压电平下运行的系统器件隔离。该隔离栅抗电磁干扰性能极强。该隔离栅经过认证，可提供高达 5kVRMS 的增强型隔离 (DWV 封装) 和高达 3kVRMS 的基础型隔离 (D 封装) (60s)。AMC0x06M05 的输出位流与外部时钟同步。结合 sinc3、OSR 256 滤波器，该器件可在 78kSPS 的采样率下实现 16 位有效位分辨率或 84dB 的动态范围。AMC0x06M05 采用 8 引脚宽体和窄体 SOIC 封装。该器件的完全额定工作温度范围为 -40°C 至 +125°C。

2.3.5 AMC1336

AMC1336 是一款精密 Δ - Σ 调制器，通过抗电磁干扰性能极强的电容式双隔离栅将输出与输入电路隔离开。该隔离层经过认证，可以按照 DIN VDE V 0884-11 和 UL1577 标准提供高达 8000V_{PEAK} 的增强型隔离。与隔离式

电源结合使用时，该隔离式调制器可将系统中以不同共模电压等级运行的各器件隔离，并防止电压较低的器件损坏。AMC1336 独特的双极 $\pm 1\text{V}$ 宽输入电压范围和高输入电阻支持该器件直接连接高电压应用中的电阻分压器。与数字滤波器（例如集成到 TMS320F28004x、TMS320F2807x 或 TMS320F2837x 微控制器系列中的数字滤波器）配合使用以抽取输出位流时，该器件可在 82kSPS 的数据速率下实现具有 87dB 动态范围的 16 位分辨率。在高侧，AMC1336 由 3.3V 或 5V 电源供电。隔离式数字接口由 3.0V、3.3V 或 5V 电源供电。AMC1336 可在 -40°C 至 $+125^{\circ}\text{C}$ 的更宽工业级温度范围内提供额定性能。

2.3.6 UCC33421-Q1

UCC33421-Q1 是一款采用集成变压器技术且符合汽车标准的直流/直流电源模块，可提供 1.5W 的隔离式输出功率。该器件可支持 4.5V 至 5.5V 的输入电压工作范围，并可通过 5.5V 的可选余量调节 5.0V 输出电压。

UCC33421-Q1 具有专有变压器架构，可实现 5kVRMS 隔离额定值，同时支持低 EMI 和出色的负载调节。

UCC33421-Q1 具有保护特性，能提高系统稳健性，例如具有故障报告机制的使能引脚、短路保护和热关断功能。UCC33421-Q1 采用小型化、薄型 SSOP (5.85mm $\times$ 7.50mm) 封装，高度为 2.65mm，间隙和爬电距离 $> 8.2\text{mm}$ 。

2.3.7 AMC23C12

AMC23C12 是一款响应时间较短的隔离式窗口比较器。开漏输出与输入电路由抗电磁干扰性能极强的隔离栅隔开。该隔离栅经认证可提供高达 5kVRMS 的增强型电隔离，符合 VDE 0884-17 和 UL1577 标准，并且可支持最高 1kVRMS 的工作电压。比较器的窗口电压以 0V 为中心，这表示如果输入电压的绝对值超出跳变阈值，则比较器就会跳变。可通过单个外部电阻器在 $\pm 20\text{mV}$ 至 $\pm 300\text{mV}$ 之间调节跳变阈值，因此，该比较器窗口的阈值范围为 $\pm 20\text{mV}$ 至 $\pm 300\text{mV}$ 。REF 引脚上的电压大于 550mV 时，负比较器会被禁用，仅正比较器正常运行。此模式下的基准电压可高达 2.7V。此模式对于监测电压电源尤其有用。器件上的开漏输出支持输出状态与输入状态保持一致的透明模式（锁存输入连接至 GND2）或在锁存输入信号的下降沿上清除输出的锁存模式。AMC23C12 采用 8 引脚宽体 SOIC 封装，其整个汽车工作温度范围为 -40°C 至 $+125^{\circ}\text{C}$ 。

2.3.8 ISOTMP35

ISOTMP35 集成了隔离栅，可承受高达 3000VRMS 的电压，具有一个模拟温度传感器，可在 -40°C 至 150°C 范围内实现 $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ 的斜率。通过这种集成，可将传感器与高压热源（例如，高压 FET、IGBT 或高压接触器）置于同一位置，而无需昂贵的隔离电路。与通过将传感器放置在较远位置来满足隔离要求的方法相比，直接接触高压热源还可提供更高的精度和更快的热响应。由 2.3V 至 5.5V 的非隔离式电源供电，ISOTMP35 可轻松集成到高压平面没有子稳压电源的应用中。集成隔离栅满足 UL 1577 的要求。表面贴装封装（7 引脚 SOIC）可提供从热源到嵌入式热传感器的出色热流，更大幅度地降低热质量并提供更精确的热源测量。这降低了对耗时热建模的需求，并通过减少由于制造和组装而产生的机械变化来提高系统设计裕度。ISOTMP35 AB 类输出驱动器提供强大的 500 μA 最高输出，可驱动高达 1000pF 的容性负载，并可直接连接到模数转换器 (ADC) 采样保持输入端。

2.3.9 TMCS1133

TMCS1133 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实现小于 1.4% 的最大灵敏度误差（含过温条件下 1.4% 的误差以及全生命周期误差），并且无需系统级校准。该精密信号调节电路在室温下进行一次校准后，其最大灵敏度误差（含全生命周期和温度漂移）可小于 0.9%。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 $\pm 96\text{A}$ ，同时更大程度地降低功率损耗并降低散热要求。绝缘能力可承受 5kVRMS，且爬电距离和间隙不小于 8mm，可提供高电平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。固定的灵敏度允许器件使用单个 3V 至 5.5V 的电源运行，因此消除了比例误差并提高了电源噪声抑制能力。

3 设计和文档支持

3.1 设计文件

要下载设计文件，请参阅 TIDA-011012 设计文件，网址：<https://www.ti.com/tool/TIDA-011012>。

3.1.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-011012](#) 中的设计文件。

3.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-011012](#) 中的设计文件。

3.2 文档支持

1. 德州仪器 (TI)，[三相工业系统的交流/直流电源转换拓扑比较电源设计研讨会](#)。
2. 德州仪器 (TI)，[针对 3 级电动汽车充电站的双向双有源电桥参考设计](#)。
3. 德州仪器 (TI)，[基于 GaN 的 11kW 双向三相 ANPC 参考设计](#)。
4. 德州仪器 (TI)，[11kW 双向三相三级 \(T 型\) 逆变器和 PFC 参考设计](#)。
5. 德州仪器 (TI)，[基于 GaN 的 15kW 至 30kW 双向三相加中性飞跨电容器参考设计](#)。
6. 德州仪器 (TI)，[适用于 3.3kV SiC-FET 且具有隔离式偏置电源的隔离式栅极驱动器板参考设计](#)。

商标

TI E2E™ and C2000™ are trademarks of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

4 作者简介

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，负责能源基础设施团队中太阳能领域的工作。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 目前是德州仪器 (TI) 的系统工程师，专注于电网基础设施和可再生能源，主要负责此参考设计。在加入 TI 之前，他获得了兰茨胡特应用技术大学的电气工程硕士学位。

重要通知和免责声明

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、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月