

Technical Article

基于 TI GaN FET 的 10kW 单相串式逆变器的设计注意事项



Riccardo Ruffo 和 Vedatroyee Ghosh

鉴于对能源可持续性和能源安全的担忧，当前对储能系统的需求不断加速增长，尤其是在住宅太阳能装置领域。市面上有一些功率高达 2kW 且带有集成式储能系统的微型逆变器。当系统需要更高功率时，也可以选用连接了储能系统的串式逆变器或混合串式逆变器。

图 1 是混合串式逆变器的方框图。常见的稳压直流母线可将各个基本模块互联起来。混合串式逆变器包含以下子块：

- 用于执行最大功率点跟踪的单向 DC/DC 转换器。
- 用于电池充电和放电的双向 DC/DC 转换器。电池可在夜间或停电期间供电。
- DC/AC 转换器，负责将直流转换为交流电源并保持低电流总计谐波失真 (THD)。
- 微控制器 (MCU)，用于测量电流和电压、控制电源开关、执行绝缘监测、检测串拱和启用通信。
- 电源优化器，用于尽可能提高光伏面板的可用功率，而不受辐照度和温度等外部变量的影响。

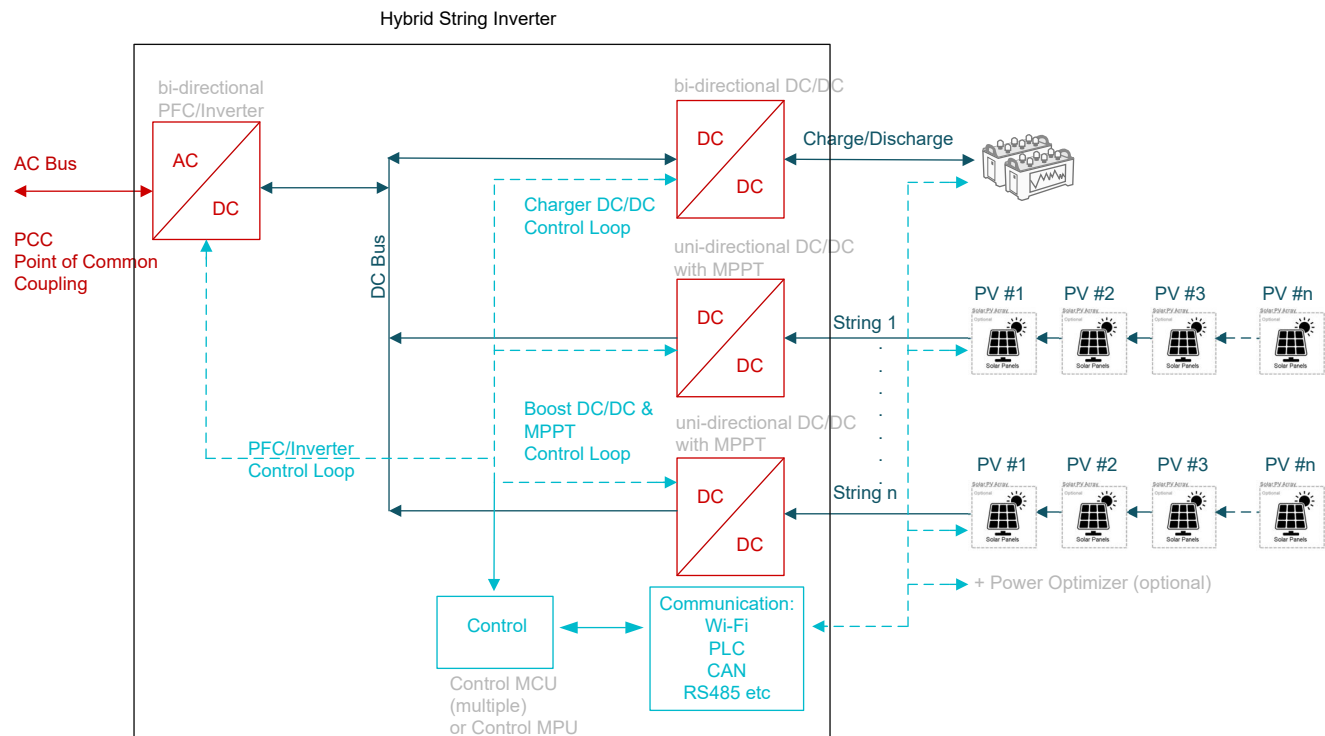


图 1. 连接到电网的混合串式逆变器的原理图

IGBT 与 GaN FET 的比较

串式逆变器由电源开关组成，例如绝缘栅双极晶体管 (IGBT)。这种功率器件存在尾电流和二极管反向恢复等问题，会导致开关损耗较高。此外，这些现象受温度影响，会导致更高的功率损耗，尤其是在采用静态散热解决方案时。因此，这些功率器件需要在低频下运行，需要体积更大的无源元件和散热器。开关频率典型范围为 5kHz 至 15kHz。

氮化镓 (GaN) 等宽带隙电源开关没有少数载流子现象，因此能够减少开关损耗。开关损耗降低后，能够在保持系统损耗不变的情况下提高开关频率，从而减少无源元件的数量。平均而言，开关频率可以提高 6 倍。

本文提出了一种基于 GaN 场效应晶体管 (FET) 的 10kW 串式逆变器。我们还将探讨 GaN 的优势，并重点介绍为住宅太阳能应用构建此类系统的优势。

基于 GaN 的串式逆变器的设计注意事项

图 2 所示为基于 GaN 且具有电池储能系统的 10kW 单相串式逆变器参考设计，包括所有有源和无源元件。

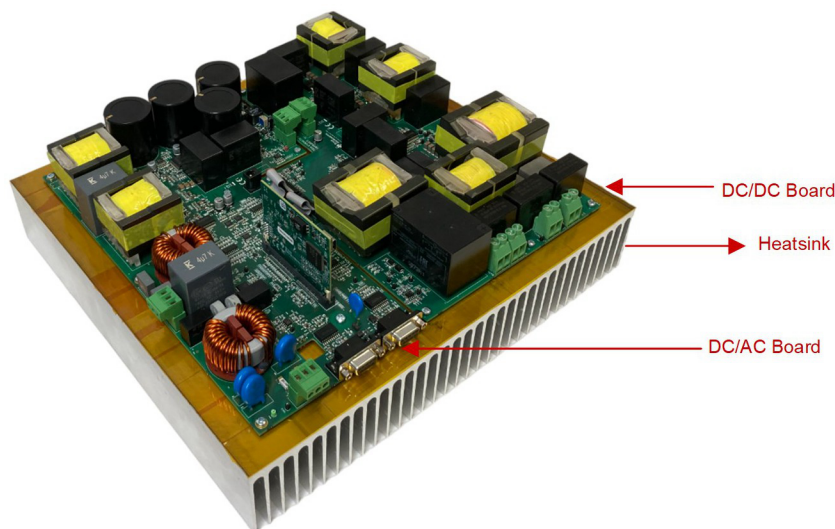


图 2. 基于 GaN 器件的 10kW 单相参考设计

图 3 是该转换器的原理图表示。

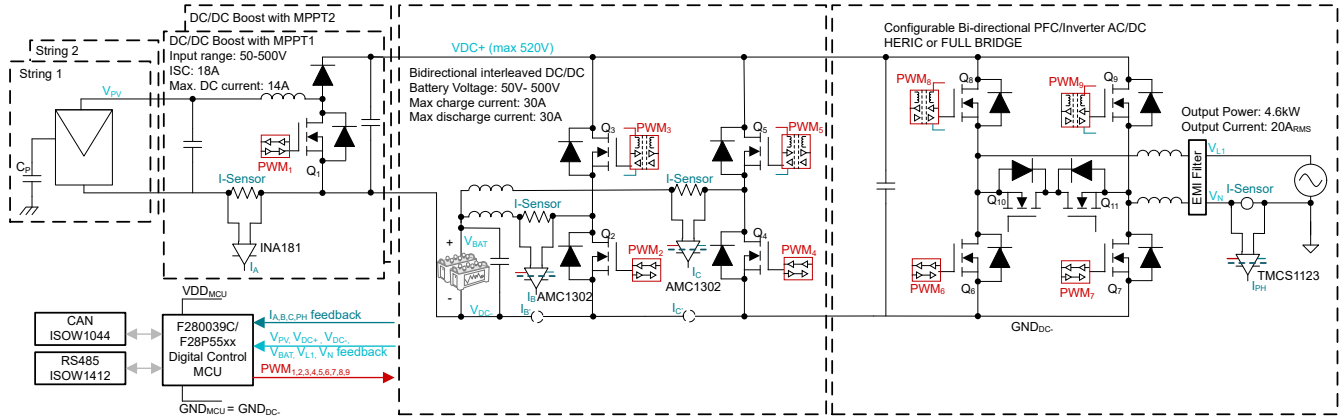


图 3. 单相串式逆变器参考设计方框图

该参考设计包含四个在不同开关频率下运行的电源转换系统：

- 两个升压转换器，用于实现两个独立的串式输入，每个转换器的额定功率为 5kW (134kHz)。
- 一个交错式双向 DC/DC 转换器，额定功率为 10kW (67kHz)。
- 一个面向电网的双向 DC/AC 转换器，额定功率为 4.6kW (89kHz)。

功率器件

由于能够在顶部为额定电压为 650V 的 30mΩ LMG3522R030 GaN FET 进行散热，因此热阻抗比底部散热器件更小。这些 FET 集成了栅极驱动器，可降低解决方案成本并缩小设计尺寸。

MCU

如图 3 所示，该参考设计由单个 MCU 控制。TMS320F28P550SJ 可对四个功率转换级进行实时控制、提供保护并实现多个控制环路。可以让 MCU 将电源地 (GND DC -) 作为参考。由于集成了栅极驱动器，也可以直接控制 GaN FET。底部不需要隔离式栅极驱动器 (Q1A、Q1B、Q2、Q4、Q6、Q7)。

电流检测

系统需要在不同转换器级的不同点进行电流测量。升压转换器使用基于并联的解决方案 (例如负电源轨上的 INA181) 来测量电流，因为 MCU 将电源地作为参考。在交错式转换器中，您需要使用高精度电流检测增强型隔离式放大器 AMC1302 等器件，在不同的时间和温度条件下以高精度度测量电池中的电流。内部 GaN 低压降稳压器生成的 5V 电压用于为电流检测放大器供电。在逆变器级中，可以使用霍尔效应电流传感器 (例如 TMC51123) 来测量电网电流。这种传感器具有高带宽和高准确度，有助于显著降低电流 THD。

实验结果

我们使用以下系统电压运行了此参考设计：

- 串式输入电压：350V。
- 标称电池电压：160V。
- 电网电压：230V。
- 直流链路电压：控制在 400V。

我们收集了转换器在不同场景下工作时的效率：

- 从串式输入中获取电力并输送至电网（见[图 4](#)）。
- 从电池中获取电力并输送至电网（见[图 5](#)）。
- 从串式输入中获取电力并输送至电池（见[图 6](#)）。

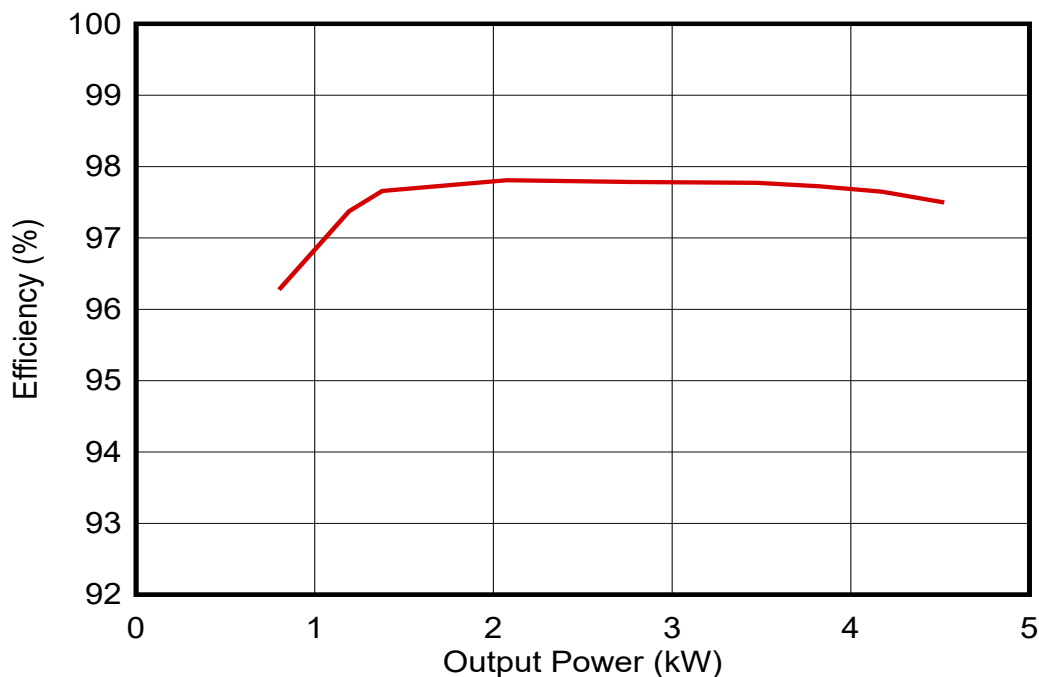


图 4. 将光伏面板输出的电力转换到电网时的效率 (350V_{DC}、230V_{AC})

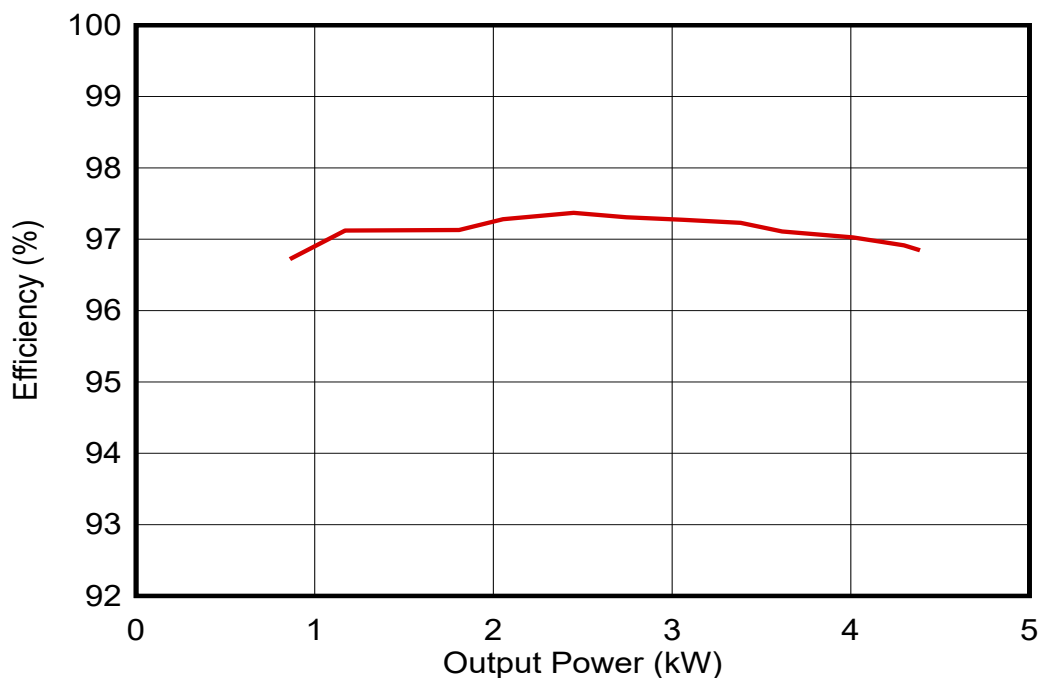


图 5. 将电池输出的电力转换到电网时的效率 (160V_{DC}、230V_{AC})

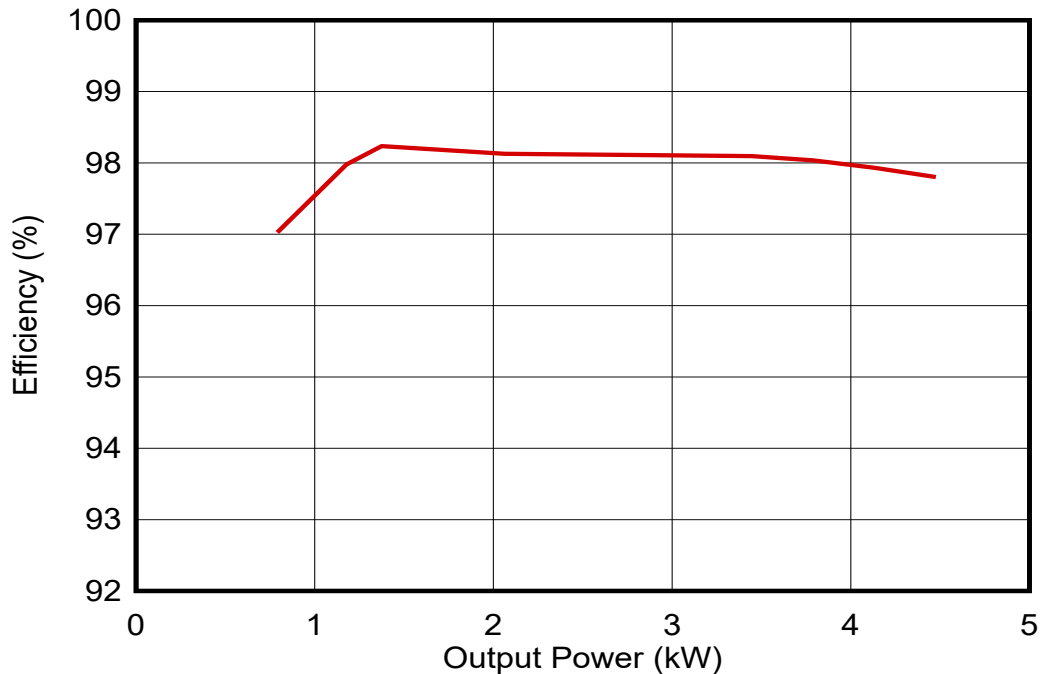


图 6. 将光伏面板的电力转换到电池时的效率 (350V_{DC}、160V_{DC})

这些图表明，即使开关速度比标准 IGBT 解决方案快六倍，整体效率仍然与当今的 IGBT 解决方案相当。包含辅助控制电源时，效率依旧保持在 98% 左右。所有三张图都包含两个电源转换级。

结语

GaN 有助于实现更高的功率密度，从而减轻终端设备的重量。串式逆变器参考设计具有接近 98% 的整体系统效率和 2.3kW/L 的功率密度，展现出优越的性能。此外，在考虑系统总成本时，实施集成栅极驱动器解决方案可降低成本。

其他资源

- 查看其他相关的 TI 参考设计：
 - [基于 GaN 的 1.6kW 双向微型逆变器参考设计](#)。
 - [在太阳能应用中用于机器学习电弧检测的模拟前端参考设计](#)。
 - [基于 GaN 的 400W MPPT 充电控制器和电源优化器参考设计](#)。
 - [与电池储能系统配合使用、基于 GaN 的 10kW 单相串式逆变器参考设计](#)。
- 阅读 How2Power 文章“[评估基于 GaN FET 的 10kW 串式逆变器的性能](#)”。

商标

所有商标均为其各自所有者所有。

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、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。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
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司