

Application Note

在住宅光伏逆变器中使用 650V 集成式 GaN 功率级的系统级优势



Bowen Ling, Harald Parzhuber, Vedatroyee Ghosh

摘要

本应用手册讨论了如何在住宅太阳能串式逆变器中使用集成式 650V GaN 功率级。本文以 TIDA-011008 作为研究案例，分析了效率、热行为、开关性能、功率密度优势以及系统级成本优化。

内容

1 简介.....	2
2 为何在光伏逆变器中使用 GaN ?	2
2.1 TI GaN 模块说明.....	2
2.2 GaN 与 IGBT 成本比较.....	3
3 3.6kW GaN 串式逆变器的实测性能.....	5
3.1 DC/DC 升压性能.....	5
3.2 DC/AC 逆变器性能.....	5
3.3 热性能.....	7
3.4 系统效率和功率密度.....	7
4 总结.....	8
5 参考资料.....	8

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

住宅光伏逆变器需要平衡高效率、紧凑尺寸和具有竞争力的成本。传统的基于 IGBT 的设计通常会限制开关频率以降低开关损耗，这增加了磁性元件、电容器和热管理硬件的尺寸。集成式 GaN 功率级可实现高效的 100kHz 运行，在保持良好转换效率的同时减小无源元件尺寸。与传统硅基实现方案相比，这种组合使设计人员能够提高功率密度并降低整体系统 BOM 成本。

2 为何在光伏逆变器中使用 GaN ?

2.1 TI GaN 模块说明

与传统硅 IGBT 相比，GaN 器件的开关损耗显著更低。LMG3660 的集成式驱动器架构通过消除外部栅极驱动器进一步减少了元件数量。其他优势包括更低的开关损耗、更低的 EMI 滤波器噪声、更低的冷却要求以及更容易的系统实现。

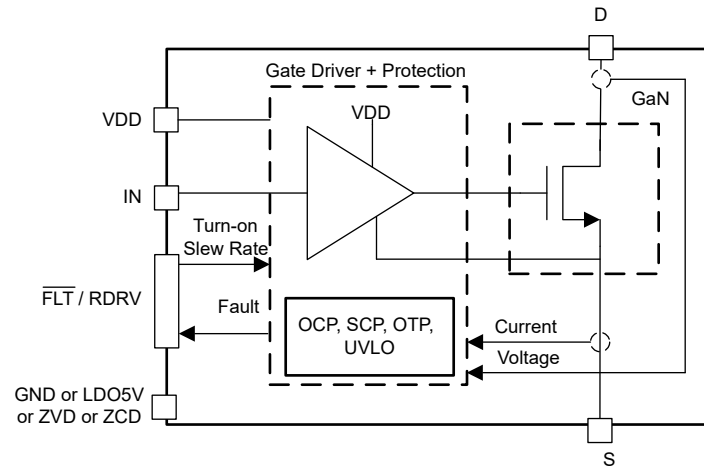


图 2-1. LMG366x 的方框图

与非集成式 GaN 晶体管相比，LMG366x 的集成式驱动器设计显著降低了栅极驱动器环路中的寄生电感。这种集成使 GaN 功率级能够以干净的波形和超过 40V/ns 的高转换率进行开关，同时保持仅 12.5% 的低过冲。

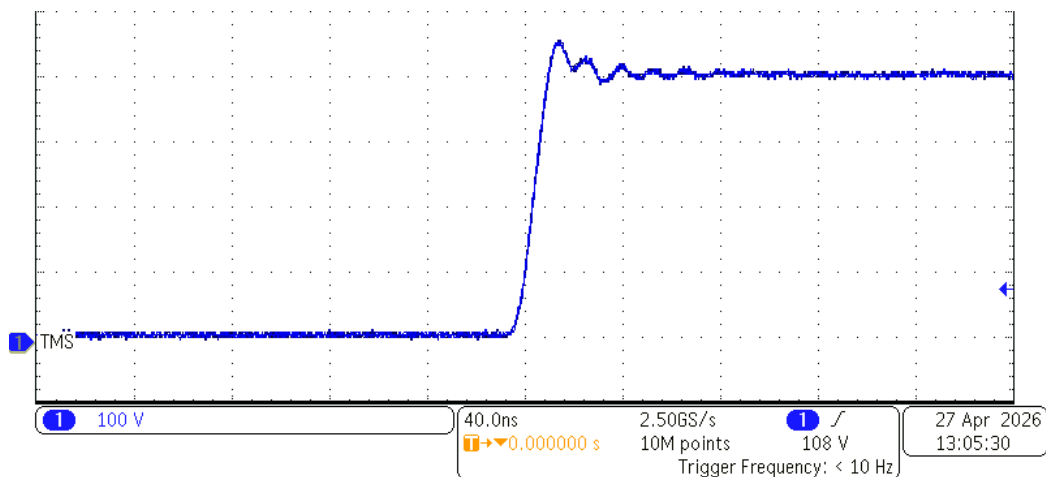


图 2-2. LMG366x 的开关行为 (上升沿)

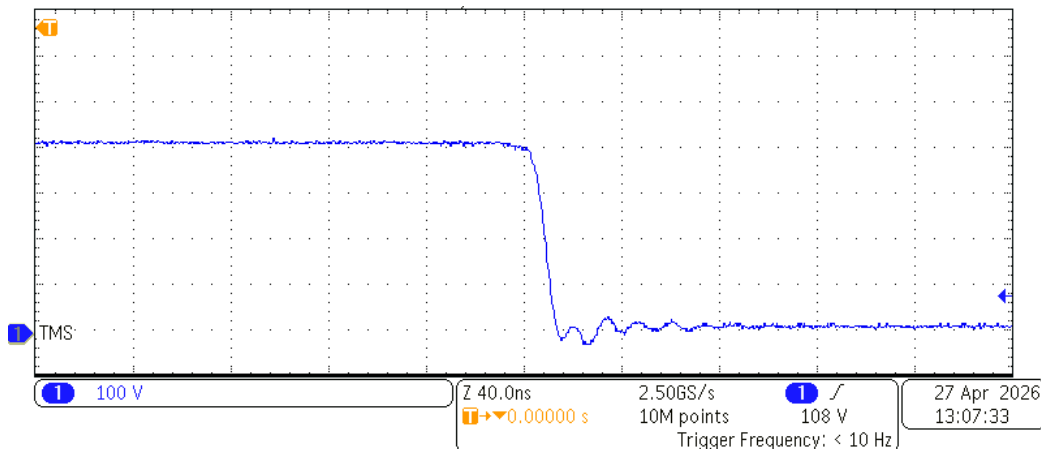


图 2-3. LMG366x 的开关行为 (下降沿)

2.2 GaN 与 IGBT 成本比较

尽管 GaN 器件的元件价格可能高于同类 IGBT，但系统级分析得出了不同的结论。当考虑到对所有主要子系统的影响时，TIDA-011008 设计表明，基于 GaN 的实现方案比等效的基于 IGBT 的设计可实现约 11% 的总物料清单 (BOM) 成本降低。

如图 2-4 所示，最显著的成本降低与磁性元件和电容器有关。这些节省主要得益于 GaN 功率级所支持的更高开关频率。

为了保持高 MPPT 效率，必须最小化升压转换器的输入电压纹波，这需要足够的输入电容。由于电容需求与开关频率成反比，100kHz 基于 GaN 的升压转换器所需的输入电容仅为类似的 33kHz 基于 IGBT 的设计的约三分之一。这种降低直接降低了电容器成本和体积。

更高的开关频率也有利于 EMI 滤波器设计。因为对于给定的 EMI 滤波器，传导差模噪声衰减通常随频率增加而改善，所以基于 GaN 的设计可以用更小的 x 电容器实现相同的滤波性能。这些因素共同显著降低了电容器总成本。

磁性元件是另一个主要的成本节约来源。提高的开关频率大幅降低了升压级和 DC/AC 逆变器级所需的电感值，使电感器体积更小、重量更轻、价格也更低。此外，因为更高频率的共模噪声更容易衰减，可对共模扼流圈进行优化，从而进一步降低磁性元件成本。

如 TI GaN 模块说明部分所述，由于集成了栅极驱动器，因此不需要单独的栅极驱动器，在大多数情况下只需要一个 PWM 缓冲器或数字隔离器。

除了图 2-4 中所示的 BOM 节省之外，因无源元件减少而实现的紧凑设计还可以降低外壳成本，并且还可以降低存储、运输和安装成本。虽然这些节省未包含在 BOM 比较中，但它们为降低逆变器的总系统成本提供了额外机会。

图 2-5 重点展示了受益于 100kHz GaN 运行的主要元件。减少的电容器、磁性元件、栅极驱动器共同促成了整体 BOM 成本的降低。

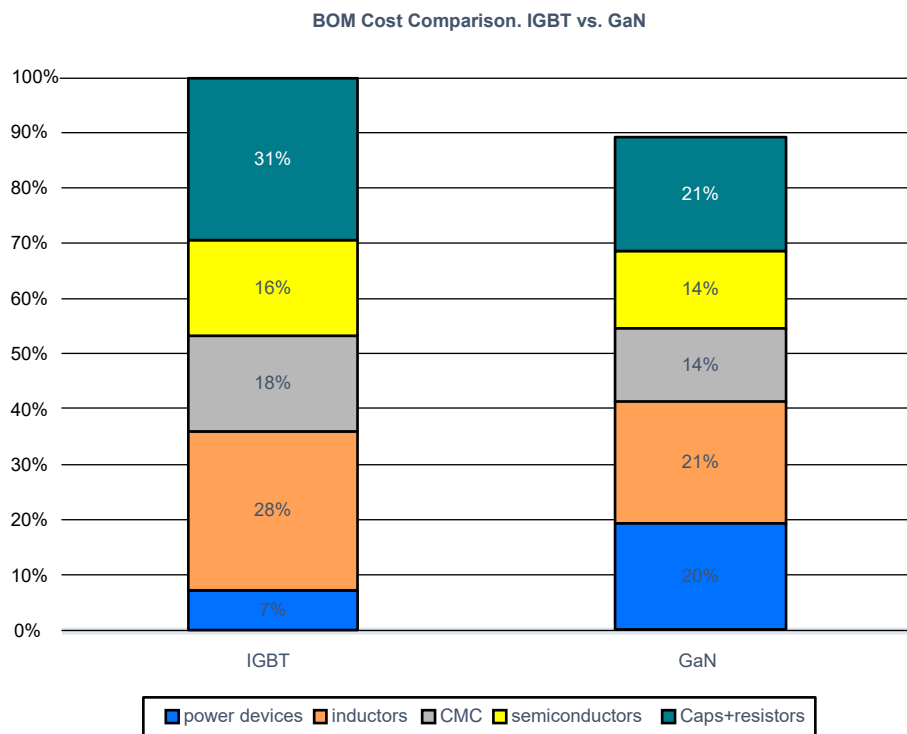


图 2-4. IGBT 和基于 GaN 的设计的成本比较

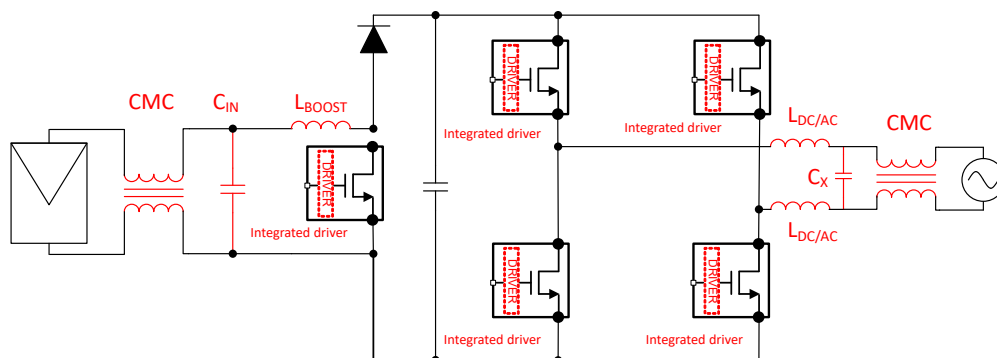


图 2-5. 系统方框图

3 3.6kW GaN 串式逆变器的实测性能

3.1 DC/DC 升压性能

TIDA-011008 升压级在宽 PV 输入范围内运行，输出为经过稳压的 400V 直流链路电压。在宽工作范围内测得的效率高于 99%。在 200V 和 250V 输入电压、约 500W 输出功率下，转换器进入准 ZVS 工作区域，降低了开关损耗并提高了轻负载效率。图 3-1 显示，对于大于 200V 的输入电压、400V 输出电压，硬开关非同步升压级在大多数情况下效率高于 98.5%，这简化了散热器设计。

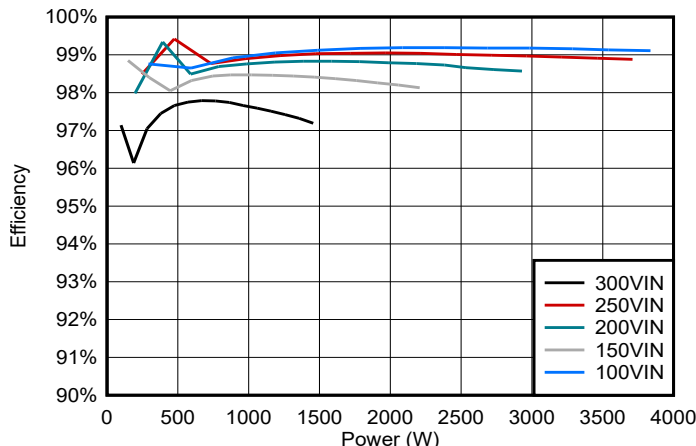


图 3-1. DC/DC 升压效率与输出功率间的关系

3.2 DC/AC 逆变器性能

该逆变器级与 230VAC 电网连接，采用以 100kHz 开关频率工作的双极全桥架构，可提供高达 3.6kW 的功率。测量结果显示，满载效率约为 98.0%、CEC 加权效率约为 98.2%。

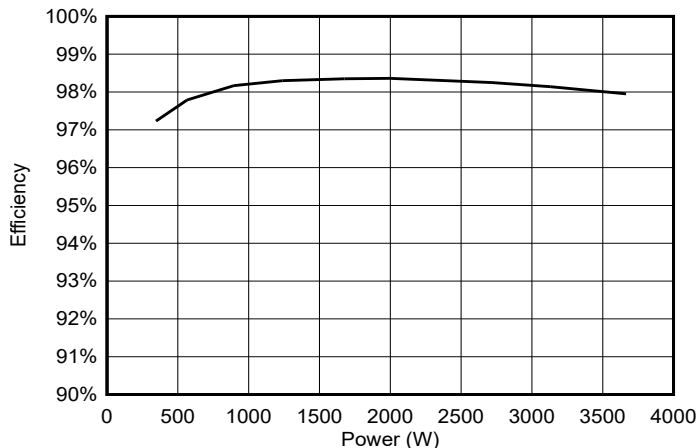


图 3-2. DC/AC 逆变器效率与输出功率间的关系

除了高效率之外，逆变器还表现出优异的输出电流质量。如图 3-3 和图 3-4 所示，CH1 为输出电流，CH2 为输出电网电压，CH3 为直流链路电压，使用电网仿真器进行测试。在 400VIN、230VAC 下且负载约为 80% 时进行测试，显示输出电流 THD 仅为 1.23%。在 200VIN、35VAC 的极轻负载条件下的测量也表明，谐波性能良好，正弦电流波形干净。这些结果证明了基于 GaN 的功率级和控制架构能在宽工作范围内有效地保持低失真。

在图 3-5 中，CH1 为输出电流，CH2 为直流链路电压，CH3 为输出电网电压，实际电网测试显示无功功率运行良好，电网电压 THD 约为 4.2%，在 45% 的负载下输出电流 THD 仅为 3.5%。这表明，即使在不稳定的公用电网上运行，逆变器也能保持优异的电流质量，非常适合住宅并网太阳能应用。

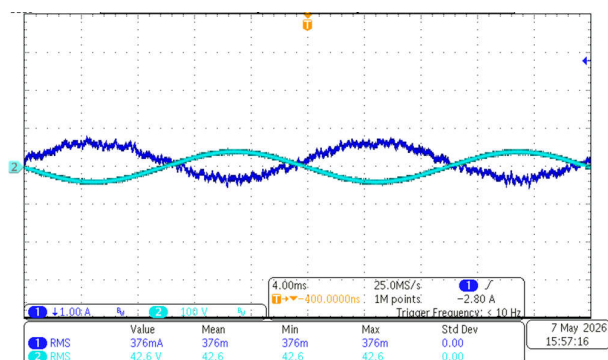


图 3-3. 电网仿真器，输出电流波形，轻负载

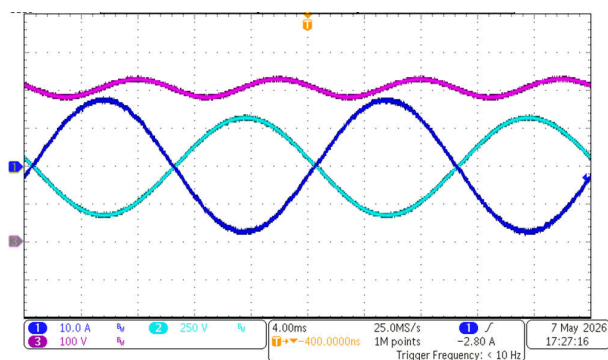


图 3-4. 电网仿真器，输出电流波形，重负载

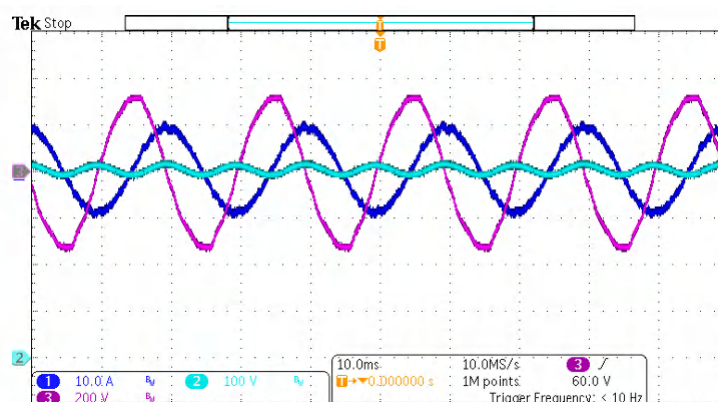


图 3-5. 实际电网输出电流波形

3.3 热性能

图 3-6 中的热性能测量结果表明，在高功率工作条件下，DC/AC 逆变器级的 GaN 器件温升约为 50°C。测试在散热器预热至约 40°C、环境温度约 30°C 的条件下进行，代表了现实中的高温工作环境。

GaN 器件温度使用放置在 LMG366x 功率级引脚附近的 ISOTMP35 温度传感器进行测量。尽管工作在 100kHz 开关频率下，测得的温升仍得到了良好控制，突出了集成式 GaN 设计的低损耗特性，并减少了对激进热管理措施的需求。

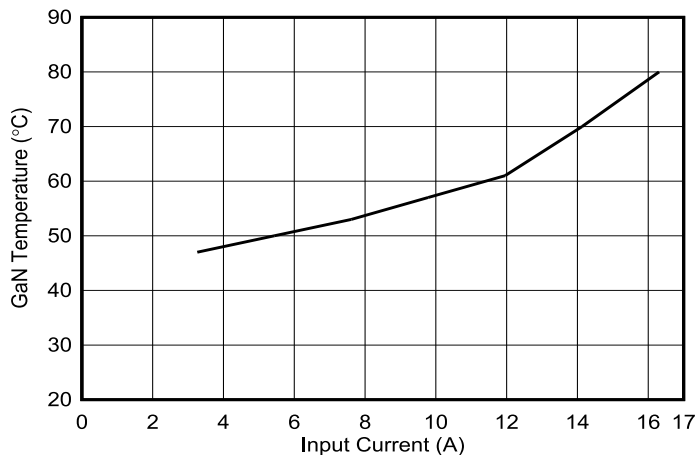


图 3-6. GaN 的温度数据

3.4 系统效率和功率密度

在升压级不开关的情况下，端到端效率可达到 97.5%，CEC 效率高达 97.3%。与传统的低频实现方案相比，以 100kHz 开关频率工作显著减小了升压电感器、输出滤波电感器和其他无源元件的尺寸。由此产生的磁性元件体积减小可实现更高的功率密度，并有助于实现紧凑的系统设计。如 TIDA-011008 所示，逆变器可以在 205mm × 205mm 的电路板平台上实现，同时保持高效率 and 热性能。

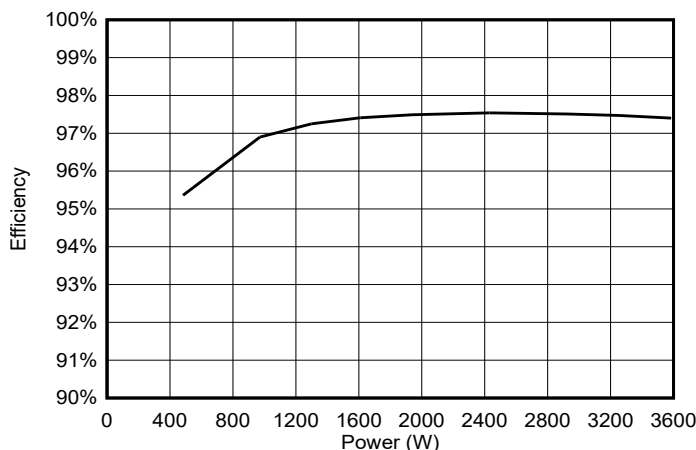


图 3-7. 系统效率

4 总结

GaN 技术带来的不仅仅是更高的效率。TIDA-011008 的结果表明，集成式 GaN 功率级可以同时改善效率、功率密度、热行为和整体系统成本。测量数据表明，经过适当优化的 GaN 设计可以在性能上超越传统 IGBT 架构，同时降低整体 BOM 成本。

5 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [3.6kW、基于 GaN 的单相串式逆变器参考设计](#), 设计指南。

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