Technical Article

固态变压器已准备好重塑电网级电力输送

Harald Parzhuber，电网基础设施和电力输送系统经理

- 固态变压器 (SST) 可实现高效、紧凑的电力输送，可扩展至 35kV 和 6MW。
- 碳化硅 (SiC) 技术的进步正在加速 SST 在数据中心、电动汽车 (EV) 充电和储能应用中的普及。



长期以来，SST 一直有望提高功率转换效率、缩小系统尺寸，并实现灵活的电源架构。直到最近，技术和经济上的限制阻碍了它们的广泛应用，但额定电压高达 3.3kV 的先进 SiC 功率器件正在克服这些障碍。这些器件可以实现更高的开关频率、更高的直流链路电压和更少的转换器单元，从而支持更紧凑的架构。随着 SST 的研发目标转向 2MW 至 6MW 的功率级别，以及高达 35kV 的电网电压，工程师必须优先考虑先进的转换器拓扑、高压隔离、实时控制和可靠的通信。

这些能力正推动着 SST 在数据中心、兆瓦级 EV 充电及并网储能领域的普及应用。在数据中心，基于 SST 的电源架构可将整体电网到图形处理单元的电力输送效率提高一个百分点以上。鉴于单个人工智能 (AI) 计算机架的功耗约为 1MW，这种微小的效率提升在大型数据中心设施中就能转化为可观的节能收益。

图 1 展示了从采用低频变压器以及多级 AC/DC 和 DC/DC 转换的传统架构，向从中压电网通过高频变压器直接转换为 $800V_{DC}$ 或 $1.5kV_{DC}$ 的架构转变。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

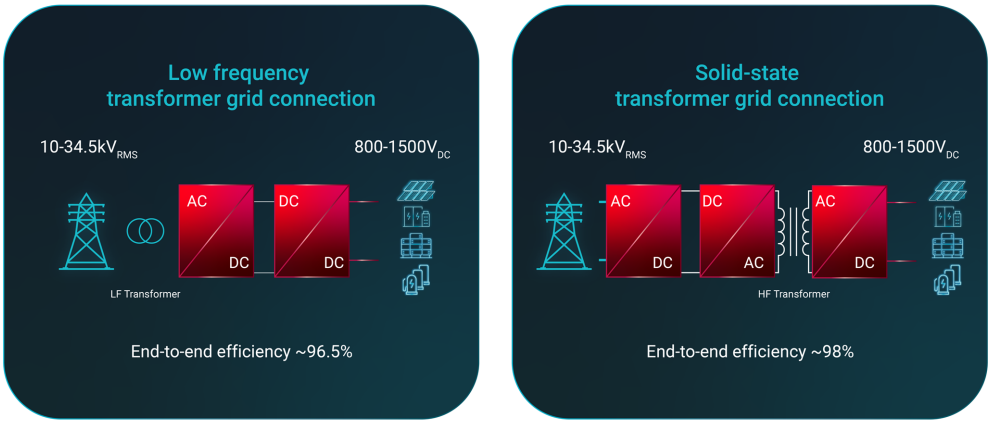


图 1. 基于低频变压器的电网连接与采用 SST 实施方案的能效对比

使 SST 成为低频变压器可行替代方案的变革

现代 SiC 器件支持更高的开关频率，同时降低功率损耗，从而提高整体系统效率。更高的工作频率还支持更小的无源器件，从而实现更紧凑的设计和更低的材料成本。德州仪器 (TI) 借助隔离式栅极驱动器、隔离技术、感应解决方案和实时控制功能为这些系统提供支持，使大规模 SST 部署变得日益切实可行。

典型的 SST 实施方案在中压侧 (AC_{MV}) 使用堆叠的 AC/DC 转换器，并在低压侧使用并联的 DC/DC 输出 (图 2)。

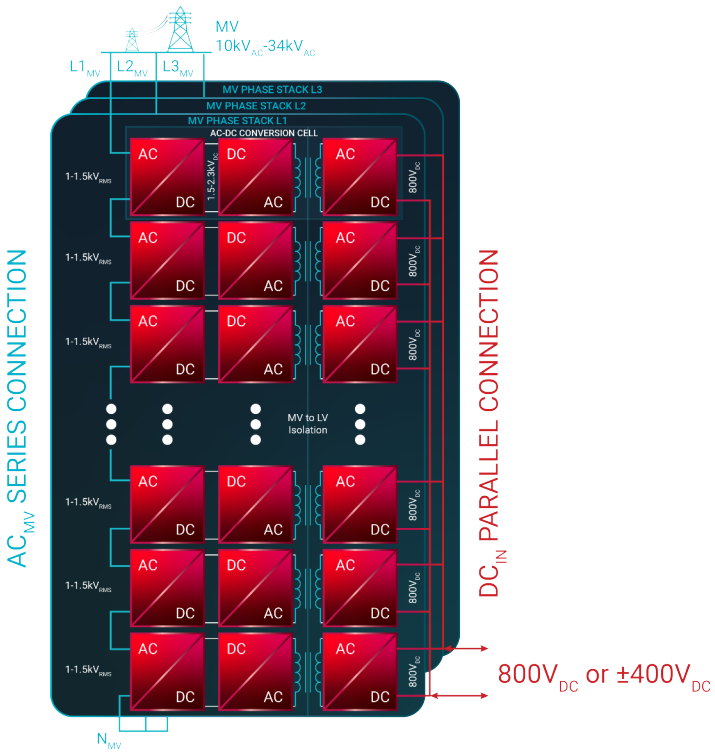


图 2. 典型的 SST 实施方案，采用堆叠的空调与机械通风转换器及并联的低压输出

功率半导体的击穿电压直接影响设计人员实现 SST 架构的方式。虽然早期实施主要依赖于 1.7kV 功率器件，但额定电压为 2.3kV 和 3.3kV 的 SiC 模块的可用性显著重塑了系统设计。具体而言，这些器件支持更高的直流链路电压，从而能够减少所需的单元总数。例如，可以将原本需要 100 个 1.2kV 器件转换器单元的 SST，减少至使用

English Document: SSZTDE9
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

3.3kV SiC 器件的约 50 个单元。这种减少简化了系统设计，缩小了物理尺寸，并降低了通信架构的复杂性，因为每个转换器单元都必须与中央控制器进行通信。图 3 展示了随着 SiC 额定电压从 1.2kV 提升至 3.3kV，单元数量在不同中压等级下是如何缩减。

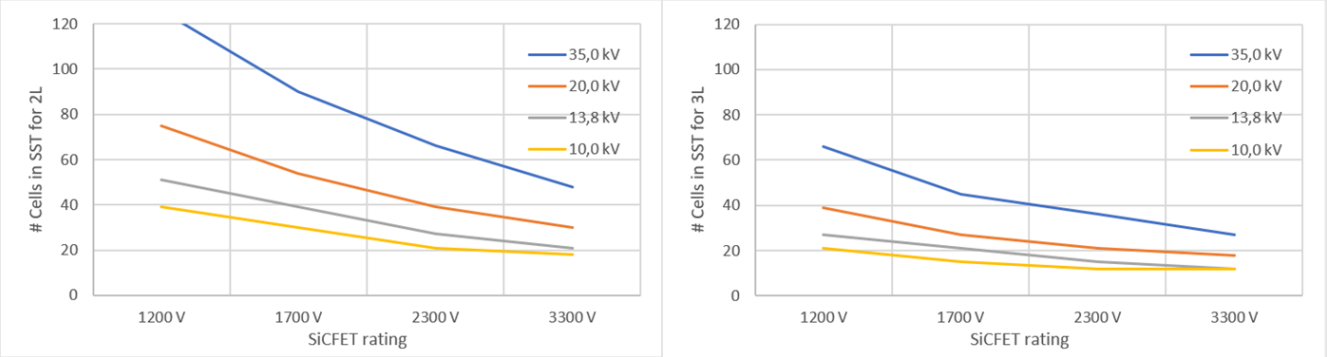


图 3. 基于 SiC 额定电压的 2L 与 3L 转换单元规模缩减

与此同时，更高的功率密度和更快的开关速度对配套电子器件提出了更高的要求。栅极驱动器必须提供先进保护功能（如退饱和检测）、支持可调压摆率控制、为功率模块提供充足的栅极驱动电流，并能在高达 100V/ns 的极高共模瞬态抗扰度条件下可靠运行。此外，当单个转换器单元内的工作电压超过 2kV 时，隔离式栅极驱动器实现方案还需要特定的设计技术（例如级联隔离栅）以保持可靠运行。

虽然 2.3kV 至 3.3kV 范围内的器件在架构和成本之间进行了实际权衡，但它们也提供了冗余策略。在 N + 1 或 N + 2 相位堆叠配置中，当使用更高电压的 SiC 器件时，每增加一个冗余单元，都意味着已安装功率容量会出现更大且更昂贵的增量。相位堆叠冗余概念通常使用 N + 1 或 N + 2 配置，以便系统可以在单个单元发生故障时继续运行。因此，工程师必须在减少单元数量与增加每个冗余单元的成本之间进行权衡。

SST 的电压要求与功率等级

SST 相关的功率和电压等级也在不断提高。早期实施通常仅限于约 1MW。目前，中压并网太阳能和储能系统 (ESS) 的功率通常从 2MW 至 4MW 左右起步，部分系统可达 6MW。因此，新型 SST 的开发必须支持 2MW 至 6MW 范围内的功率等级，且已有几家制造商发布了处于该功率等级的系统。

电网电压的要求也在同步演变。早期的 SST 设计主要针对 10kV 和约 13.8kV 的中压电网，而未来的几代产品预计将支持高达 35kV 的电网电压。这些更高的功率和电压等级对功率密度、绝缘以及高压隔离提出了额外的要求。TI 通过专为支持高效、并网高压电力系统而设计的栅极驱动、隔离、传感和控制技术来满足这些要求。

SST 的架构选择

虽然早期的 SST 设计主要依赖两电平 H 桥转换器（见图 4），但在下一代 SST 的 AC/DC 级中，多电平拓扑（尤其是有源中点钳位 (ANPC) 转换器）正变得越来越普遍。这些拓扑结构满足了现代系统更高的电压应力和效率要求。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

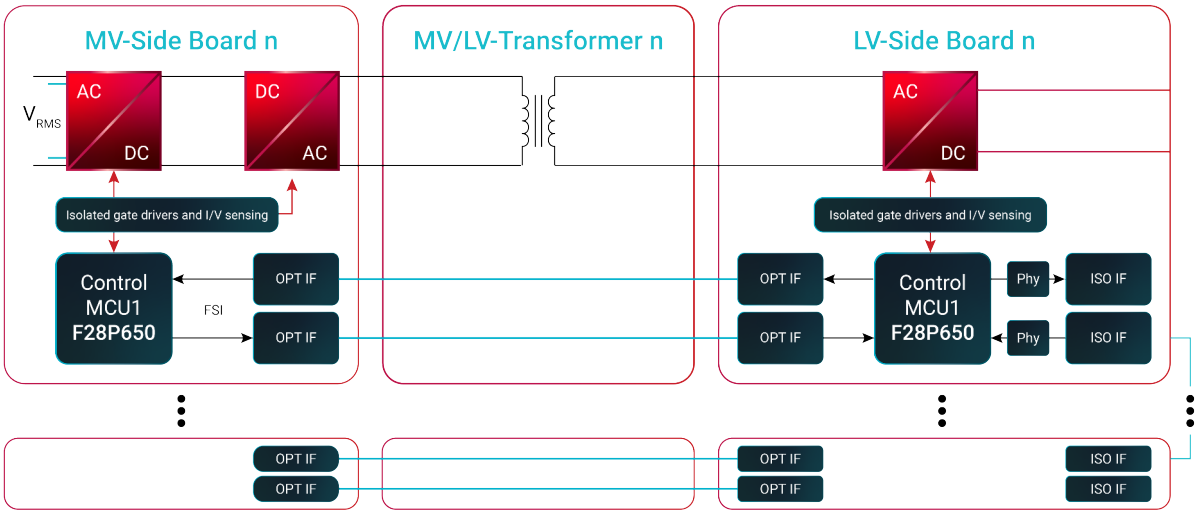


图 4. 采用 AC/DC 和隔离式 DC/DC 的转换单元架构

对于隔离式 DC/DC 级，设计人员通常会在相移双有源电桥 (DAB) 转换器和谐振 CLLLC DAB 转换器之间进行选择。由于 SST 内部有多个 DC/DC 转换器并联连接，为了简化同步，通常更倾向于使用固定频率拓扑，如移相 DAB。相比之下，CLLLC DAB 架构会导致略有不同的开关频率，从而可能产生可听及的差拍频率或难以滤除的电气干扰。

为了满足各种应用要求，TI 提供了以下器件技术：

- 实时微控制器 (MCU) 支持针对两电平 H 桥和多电平拓扑的成熟调制技术，包括 ANPC、中点钳位、T 型和飞跨电容器转换器。
- 专为满足 2.3kV 和 3.3kV SiC 功率模块工作电压要求而设计的高压栅极驱动器和隔离器件。
- 隔离传感解决方案可提供针对高压、高频环境优化的精准电流和电压传感。

通过将控制 MCU（例如 TI 的实时 C2000™ MCU）的接地端连接至直流母线的中点，设计人员可以降低隔离栅上的电压应力，并将相关的工作电压保持在 2kV 以下。

随着 SST 架构不断演进，以支持更高的功率水平、更高的电网电压、更大的功率密度及更集成的控制，围绕功率半导体的配套技术变得日益重要。高压栅极驱动器、隔离、传感、实时控制和可靠的系统通信，在赋能下一代 SST 系统方面均发挥着重要作用。

要克服的设计特定挑战

除了架构选择之外，设计人员在 SST 设计还面临一项重大的技术挑战：每个转换器单元内 AC/DC 级与隔离型 DC/DC 级的同步。这些功能跨越两个不同的电压域运行。AC/DC 级和隔离型 DC/DC 转换器的初级侧在中压侧工作，而隔离型 DC/DC 转换器的次级侧在低压侧工作。

这些电压域之间的隔离栅必须能够承受 SST 完整的相电压（相线对中性线电压）。在额定电压为 35kV 线对线的系统中，该电压可以达到约 20kV。满足此要求需要进行充分的物理隔离，并提供适当尺寸的间隙和爬电距离，如图 5 所示，其中高频变压器位于中间。在中压印刷电路板 (PCB) (图 5A) 和低压 PCB (图 5B) 上，隔离间隙必须符合转换器模块的工作电压要求，而在新型 SST 系统中，该工作电压通常不超过 2kV。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

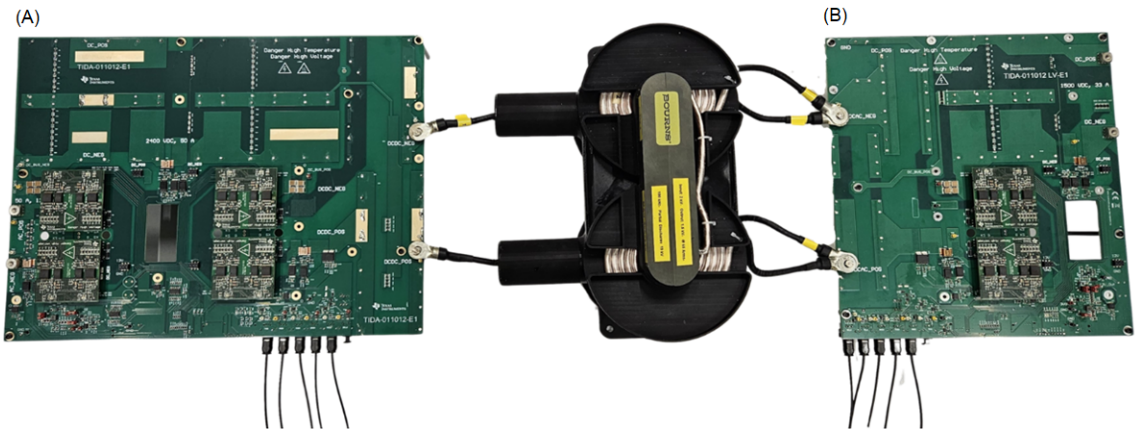


图 5. 基于 SiC 的 50kW 模块化 SST，在中压 (A) 和低压 (B) PCB 之间具有塑料光纤接口

设计人员可以使用光链路或射频技术来实现跨越该高压隔离栅的通信。凭借低延迟、强抗电磁干扰能力和高隔离特性，光纤通信目前是首选方案。因此，更具成本效益的高速光收发器将在降低 SST 系统总体成本方面发挥重要作用。

此外，设计人员还必须开发中央控制器与每个相位堆叠内各个独立转换器单元之间的通信。基于广泛采用且可靠的协议建立标准化通信架构，不仅能简化互操作性，还能更轻松地应对不断演变的网络安全要求，包括欧盟《网络弹性法案》等监管框架。

TI 提供资源和参考设计，可帮助设计人员缩短产品上市时间。例如，前文在图 5 中展示的面向中压应用的 50kW 基于 SiC 的模块化固态变压器参考设计就是一个很好的起点。

采用 SST 后将受益的其他应用

SST 的研发在 EV 充电领域也正迅速推进，特别是针对兆瓦级充电基础设施。目前，运营商将这些系统接入最高运行电压为 690V_{AC} 的低压电网，并通过传统的低频变压器将它们与中压电网连接起来。

SST 能够实现与中压电网更直接的连接，并通过减少发电端与 EV 电池之间的功率转换级数来提高能效。这种架构对于重型 EV 和配备多个充电终端的充电站点尤其具有吸引力。

中压并网 ESS 是另一个引人注目的应用。在太阳能与储能一体化的设施中，将集中式太阳能逆变器直接连接到 ESS 的直流侧，可以省去在集中式逆变器中将太阳能从直流转换为交流，然后再从交流转换回直流进行存储的需求——这种两步转换会造成能量浪费。通过 SST 接入中压电网的直流耦合太阳能加储能架构简化了整体功率转换链，减少了转换损耗，并提高了系统效率。

在这些应用中，SST 实现了在能量转换和电力传输方面更简单且更高效的架构。

关于作者

Harald Parzhuber 负责管理德州仪器 (TI) 的可再生能源系统团队。他拥有三十多年的工程经验，涵盖从设计与测试工程到产品定义和系统工程等多个领域。此外，他在工业自动化领域拥有四项专利。Parzhuber 获得了德国兰茨胡特应用技术大学的电气工程硕士学位。

其他资源

- 观看 50kW SST 设计的演示视频：《取代 AI 数据中心的传统变压器》。

商标

C2000™ 是德州仪器 (TI) 的商标。

所有商标均为其各自所有者所有。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

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出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