Technical White Paper

SST 中的以太网

Gerome Cacho

摘要

对高效地将电网电力输送至模块的需求，以及制造上一代变压器所需的稀土原材料短缺，是推动固态变压器 (SST) 发展的主要因素。SST 在中压电网与高功率低压设备之间起到连接作用，这些设备包括电池储能系统（也称为储能解决方案）、数据中心的 800V 直流总线电源轨，以及电动汽车充电站。



图 1-1. 数据中心配电网络的演变

SST 是一种新型变压器实现方案。与传统变压器采用笨重的带绕组铁氧体磁芯（匝数比为 10:1 或更高）来升高或降低电压不同，SST 采用更纤薄的铁氧体磁芯，并利用电力电子器件控制和调节功率转换。与传统变压器相比，SST 还具备双向功率流动、更高的能源效率以及显著减小的尺寸和重量等优势。

本白皮书探讨了系统设计人员在开发 SST 模块时可能面临的挑战，以及德州仪器 (TI) 的以太网 PHY 如何在 SST 运行中发挥关键作用。

English Document: STDA059
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

1 SST 设计挑战

在改进传统变压器架构时，设计如此复杂的系统可能会带来一些挑战。

与传统变压器相比，SST 的一项主要优势是功率效率更高。但是，效率的提升与更高的开关频率密切相关。为实现这一点，需要更快地发送用于控制开关的数据。此外，如果采用菊花链方式运行，这些数据还需要通过一系列模块。由于数据需要经过整个链路才能到达所有必要的单元，因此器件延迟也会成为一个影响因素。

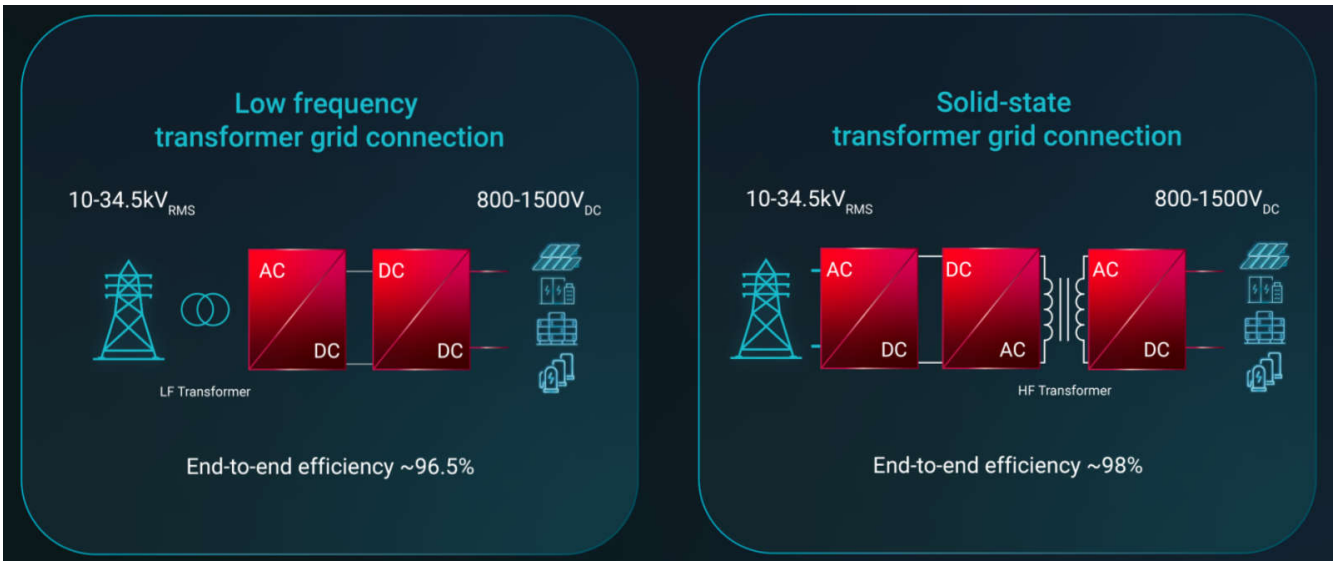


图 1-1. 传统（低频率）变压器与固态变压器拓扑的比较

与传统变压器相比，SST 的另一项主要优势是功率密度更高。SST 通过缩小变压器尺寸实现了这一优势；根据洛伦兹定律，更高的变压器频率可以降低对变压器尺寸的要求。此外，技术的发展推动了单级交流转换器的引入。这种技术将 AC-DC-AC 转换器简化为单级结构（例如矩阵转换器），在该结构中，输入信号无需经过中间整流即可进行调节和加速处理。经过这种简化后，必须通过 MV MCU 传输更多数据，以验证单级电路是否正常运行。这些数据必须在规定时间内发送完毕，以满足 MV 级控制环路带宽的要求。此外，随着开关速度进一步提高，验证各单元之间的同步情况也至关重要，以确保输出端不会发生争用。

总体而言，为了实现功率效率更高、空间密度更大的 SST 模块，对更快速、确定性更高的通信方式的需求日益增长。

English Document: STDA059
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

2 需要更快的通信？TI 以太网 PHY 可助一臂之力

以太网 PHY 收发器有助于应对这些常见挑战。与较早期的通信类型相比，以太网能够提供速度更快、确定性更高的通信。

SST 的典型控制环路的刷新率为 100 微秒 (10kHz)。根据数据接口的不同，传统通信方式一直采用 CAN、LIN 或 RS-485。但是，这些通信方式的数据速率最高仅为 500kbps 至 1Mbps。以太网能够提供更快速的通信链路，数据速率高达 1Gbps。对于特定类型的以太网，传输距离长达 15m，且在此距离内能够保持稳定的数据速率；对于最常见的以太网类型，传输距离长达 100m。相较于 CAN、LIN 和 RS-485，以太网在带宽和传输距离方面都有显著提升。

与较早期的通信拓扑相比，由于网络的实现方式，存在固有的延迟。从主从设备之间的确认机制到其他总线机制，在多点连接环境中，节点之间的数据发送耗时并不确定。这使得 SST 内的控制环路难以同步。由于大多数以太网拓扑采用点对点连接，因此其延迟的确定性要高得多，具体延迟取决于器件，通常为纳秒至微秒级。此外，还有 EtherCAT 等用于系统同步的实时通信系统。这类系统能够增强以太网通信能力，且不会增加 PHY 子系统的硬件成本。在 EtherCAT 系统中，拓扑是贯穿菊花链的点对点结构，而非多点连接拓扑。

2.1 TI 以太网 PHY 产品选择

TI 提供两种类型的以太网：标准以太网和单线对以太网。标准以太网支持长达 100m 的布线长度，固定数据速率为 10Mbps、100Mbps 和 1Gbps。这种以太网使用 CAT5e 或 CAT6 电缆，通过其中的两对或四对双绞线进行通信。单线对以太网具有相近的数据速率，但速率配置更加固定 (每个器件仅支持一种速率，而标准以太网器件支持多种速率) ，并且仅使用一对双绞线进行通信。然而，由于串行化和双向通信会导致模拟电路与数字电路的设计有所不同，因此需要以缩短电缆长度为代价。

对于 10/100Mbps 标准以太网，DP83822xF 和 DP83826A 最适合用于此应用。如果要求实现最低的确定性延迟 (数十纳秒) ，并且模块需要通过最严格的 EMC 测试，则建议使用 DP83826A。DP83822xF 是德州仪器 (TI) 针对中压 (MV) 光连接设计的 100BASE-FX 器件。对于 1Gbps 标准以太网，DP83869HM 最适合用于该应用，并支持 100Mbps 和 1Gbps 速率下的铜缆及光纤连接。德州仪器 (TI) 还提供一款 50kW SST 参考设计 TIDA-011012。该设计采用基于 DP83826 的单条铜缆菊花链，并在低压 (LV) 和中压 (MV) 控制板之间设置局部光纤连接。这可使通信环路实现 10/100Mbps 的数据吞吐量，每块 LV 控制板配备两个 PHY。

德州仪器 (TI) 还提供速率为 10Mbps、100Mbps 和 1Gbps 的单线对以太网 (SPE) PHY 收发器。SPE 允许采用更轻的电缆布线，从而降低 SST 的成本和重量，同时仍能保持较高的传输速率和数百纳秒级的延迟。对于 100Mbps 应用，DP83TC817S-Q1 是最合适的 PHY；对于 1Gbps，则建议使用 DP83TG721x-Q1。与标准以太网类似，这些器件采用点对点连接方式，最适合用于控制环路的菊花链中。德州仪器 (TI) 还提供符合 10BASE-T1S 标准的多点连接 10Mbps PHY。在 SST 中采用 T1S 以太网，可直接升级 CAN、LIN 和 RS-485，实现更高的传输速率；如果从后几种技术升级而来，还可以保留现有的布线架构。对于纯收发器，DP83TD53x-Q1 是一款模拟前端 (AFE) 器件，带有 OA-3 引脚，可与 SoC 进行数字通信。DP83TD555J-Q1 是一款增强型 T1S 器件，集成了 AFE、物理层防冲突 (PLCA) 层、PHY 控制层、媒体访问控制层和 SPI 接收器，可轻松实现 T1S 通信与兼容 SPI 的 SoC 之间的连接。

3 结语

固态变压器的通信需求日益增长，而以太网能够通过提供更高的带宽、更低且更具确定性的延迟，甚至通过光接口实现中压电路的电气隔离，来满足这些需求。TI 的 PHY 产品系列涵盖支持多种速率的标准以太网及支持单一速率的单线对以太网，能够满足这类不断发展的配电设备日益增长的通信需求。

4 其他资源

- 请参阅固态变压器已准备好重塑电网级电力输送

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