

# Research and Application of Integrated Photovoltaic Storage and Charging System Based on Solid-State Transformer

Heng Lu Tao Meng Anhu Zhu Liang Wang

Xi'an Weiguang Energy Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710119, China

## Abstract

With the advancement of the "dual carbon" goals and the deepening of the new energy revolution, the integrated photovoltaic storage and charging system has become a key carrier for energy transformation. However, traditional systems are confronted with challenges such as imbalance between energy supply and demand, low efficiency, and complex collaborative control. This paper focuses on the integrated photovoltaic storage and charging system based on Solid-State Transformer (SST), and discusses its technical principle, architecture design and application efficiency. Research shows that SST, with its power electronics technology and intelligent control capabilities, can achieve efficient energy conversion, multi-source coordinated regulation and bidirectional power flow, effectively enhancing the energy efficiency and stability of the system. Based on the analysis of actual case data, this paper verifies the technical and economic feasibility of SST application in photovoltaic storage and charging projects, and puts forward prospects for its future development. This research provides important theoretical and practical references for the innovative upgrading of photovoltaic storage and charging systems.

## Keywords

solid-state transformer; photovoltaic-storage-charging integration; multi-port energy router; energy management system; New energy accommodation

## 基于固态变压器的光储充一体化系统研究与应用

芦恒 孟涛 住安湖 王亮

西安为光能源科技有限公司, 中国·陕西 西安 710119

## 摘要

随着"双碳"目标的推进和新能源革命的深入,光储充一体化系统已成为能源转型的关键载体。然而,传统系统面临能源供需失衡、效率低下及协同控制复杂等挑战。本文重点研究基于固态变压器(Solid-State Transformer, SST)的光储充一体化系统,探讨其技术原理、架构设计及应用效能。研究表明,SST凭借电力电子技术和智能控制能力,能够实现高效能量转换、多源协同调控和双向功率流动,有效提升系统能效与稳定性。结合实际案例数据分析,本文验证了SST在光储充项目中应用的技术经济性,并对其未来发展前景提出展望。本研究为光储充系统的创新升级提供了重要理论和实践参考。

## 关键词

固态变压器; 光储充一体化; 多端口能量路由器; 能源管理系统; 新能源消纳

## 1 引言

在"双碳"战略目标推动下,全球能源结构正经历深刻变革。光伏发电、储能系统和电动汽车充电设施的融合发展已成为推动能源转型的重要路径。然而,传统光储充系统存在诸多局限性:能源供需失衡突出,光伏发电的间歇性和随机性导致与充电需求匹配困难;系统效率低下,多级能量转换环节造成损耗累积;协同控制复杂,光伏、储能和充电设备多源异构,系统兼容性差,形成"数据孤岛",调度响应延迟常较大,影响电网稳定性。这些因素严重制约了光储充一体化系统的规模化发展和经济效益。

固态变压器(SST)作为电力电子技术的颠覆性创新,为解决上述问题提供了新思路。SST摒弃了传统变压器的铁心和线圈结构,以IGBT、SiC-MOSFET等半导体器件为核心,通过高频电力变换实现电压转换和能量控制。相比传统变压器,SST展现出革命性优势:效率可达98.5%以上,同时空间占用减少50%以上,支持模块化扩展;同时实现变压、故障限流、无功补偿和潮流控制等多功能集成。

本研究旨在深入分析SST技术在光储充一体化系统中的应用价值,探索其系统架构设计、能量管理策略和实际应用效能,为促进新能源高效利用和电动汽车充电基础设施发展提供理论支持和技术参考。<sup>[1]</sup>

【作者简介】芦恒(1991-),男,中国陕西西安人,硕士,工程师,从事固态变压器应用及微电网研究。

## 2 固态变压器技术原理与优势

### 2.1 SST 技术原理与基本结构

固态变压器 (SST) 又称电力电子变压器, 是一种基于电力电子变换技术实现电压变换和能量控制的新型电力设备。其基本工作原理是通过高频电力变换替代传统变压器的电磁感应原理: 首先将工频交流电整流为直流电, 再通过高频逆变器生成高频交流电, 最后经过高频变压器隔离和调节, 输出所需电压和频率的电能。<sup>[2]</sup>

SST 的基本结构通常包括三级变换电路:

**输入级:** 采用整流电路 (如 PWM 整流器) 实现 AC/DC 转换, 通常具备单位功率因数运行能力和双向功率流动特性。

**隔离级:** 由高频变压器和 DC/AC/DC 转换电路组成, 实现电气隔离和电压转换。这一级通常工作在高频范围 (kHz 级别), 大幅减小变压器体积和重量。

**输出级:** 根据应用需求, 可提供交流或直流输出<sup>[3]</sup>, 满足不同负载的供电要求。

这种多级结构使 SST 不仅能够实现电压变换, 还集成了多种功能于一体, 如无功补偿、谐波抑制、故障限流和能量管理等, 成为一个多功能的电力控制节点。

### 2.2 SST 与传统变压器的综合对比

与传统变压器相比, SST 在多项性能指标上展现出显著优势, 表 1 对两者进行了全面比较。

表 1 固态变压器与传统变压器的综合对比

	传统变压器 LFT	固态变压器 SST
原理	机械架构, 铁芯 + 绕组	电子架构, 固态半导体
成本	大量铜, 材料有限, 成本或上浮	硅代铜, 近零铜, 成本大幅下降
尺寸	工频变换, 尺寸不再变化	高频变换, 尺寸大幅缩小
智能	本体不具备智能化条件	可观、可测、可控、可调
功能	无法隔离电能质量, 有励磁涌流	隔离和治理电能质量, 无励磁涌流
场景	只能交流变压, 难以调压	交 / 直流灵活变换, 宽范围调压

这些性能优势使 SST 特别适用于光储充一体化系统, 能够有效解决多能源接入、电能质量管理和系统效率提升等关键问题。

### 2.3 SST 在光储充系统中的技术优势

在光储充一体化应用中, SST 展现出多方面的技术优势:

**高效能量转换:** SST 通过减少能量转换环节, 显著提升系统效率。

**多源协同调控:** SST 本质上是一个多端口能量路由器, 能同时接入光伏直流电、储能电池、交流电网, 并根据需要转换输出, 这种特性完美契合光储充系统需求, 实现多能源的灵活接入和高效利用。<sup>[4]</sup>

**双向功率流动:** SST 支持能量双向流动, 允许光伏发电过剩时向电网馈电, 或在电网供电不足时从储能系统获取电能, 提高系统灵活性和可靠性。

**电能质量优化:** SST 具备谐波隔离功能, 输入电流 THD < 3%, 输出电压 THD < 1%, 远优于传统变压器。这有效解决了光储充系统中因电力电子设备大量使用导致的电能质量问题。

**系统稳定性提升:** SST 采用虚拟同步机控制技术, 为电力电子化系统提供惯性阻尼, 解决可再生能源并网导致的低惯性问题。

## 3 光储充一体化系统架构设计

### 3.1 系统整体架构

基于 SST 的光储充一体化系统采用分层分布式架构, 主要包括物理设备层、能量控制层和云平台管理层三个层次。

**物理设备层**是系统的基础, 包括:

**光伏发电单元:** 安装在园区屋顶、车棚等区域的太阳能光伏组件, 将太阳能转化为电能。**储能系统单元:** 采用锂电池、液流电池或混合储能系统, 储存光伏发电富余电量, 并在用电高峰时段释放。

**电动汽车充电设施:** 包括交流充电桩、直流充电桩以及大功率超充设备, 满足不同电动汽车的充电需求。

**固态变压器单元:** 作为系统的核心能量路由设备, 实现多电压等级交直流变换和多源能量协调分配。<sup>[5]</sup>

**能量控制层**是系统的大脑, 包括:

**本地控制器:** 负责采集设备运行数据并执行控制指令, 包括光伏逆变器控制器、储能变流器控制器、充电桩控制器等。

**协调控制器:** 具备智能网关数据采集、协议转换、存储等功能, 还具备新能源的使用策略控制功能, 可以按照预设的逻辑控制光伏出力、储能充 / 放电、充电桩充电控制以及负荷调节等功能。

**能源管理系统 (EMS):** 作为系统的智慧中枢, 通过 "感知 - 分析 - 决策" 闭环, 重构光储充微电网的运营逻辑。

**云平台管理层**是系统的远程监控和运维中心, 基于云计算和大数据技术, 实现多站点、跨区域的能源站点集中监控和智能运维。<sup>[6]</sup>

### 3.2 关键组件功能设计

#### 3.2.1 多端口 SST 能量路由器

多端口 SST 能量路由器是基于 SST 的光储充系统的核心设备, 其设计采用模块化架构, 通常包含以下端口:

**光伏接入端口:** 支持光伏直流直接接入, 减少能量转换环节, 提升光伏发电利用效率。

**储能接口端口:** 提供直流接口直接连接储能系统, 实现高效充放电控制。

电网交互端口：实现与公共电网的能量交互，支持并网和离网两种运行模式，并具备无缝切换能力。

负载输出端口：为充电设施及其他负载提供适宜电压等级的交流或直流供电，支持功率动态分配。

这种多端口设计使 SST 能量路由器能够实现多能源无缝接入与转换，大幅提升系统集成度和运行效率。

### 3.2.2 能源管理系统 (EMS)

能源管理系统是基于 SST 的光储充系统的智能控制核心，其功能主要包括：

动态能量优化：通过 AI 驱动的负荷预测，基于历史用电数据与天气信息，提前 24 小时预测光伏出力与充电需求，误差率 < 5%。实施多目标优化策略，在电价低谷期优先储能充电，高峰期释放储能并联动光伏供电，实现峰谷套利收益最大化。<sup>[7]</sup>

多源协同控制：打破数据壁垒，支持 Modbus、IEC61850 等多种通信协议，兼容光伏逆变器、储能 BMS、充电桩等设备，数据采集延时 < 500ms。通过“源-网-荷-储-充”多维数据融合，生成实时能效分析报告，帮助用户识别高耗能环节。

安全防护管理：构建三级安全防护体系，包括设备层、传输层和应用层。

### 3.2.3 系统工作模式与调控策略

基于 SST 的光储充一体化系统支持多种工作模式，可根据电网状态、能源供需情况和经济运行需求灵活切换：

并网运行模式：系统与公共电网连接，通过 SST 实现与电网的能量交互。在此模式下，系统可参与电网需求响应，根据电网调度指令调整运行状态。

离网运行模式：当公共电网发生故障时，系统可在毫秒级内切换至离网运行模式，依靠本地光伏和储能资源保障重要负荷的供电。

混合运行模式：系统可根据需要部分并网、部分离网运行，实现运行方式的灵活组合。<sup>[8]</sup>

系统的调控策略主要包括：

经济性调度策略：基于电价信号和负荷预测，以运行成本最低或经济效益最大化为目标，优化调度光伏、储能和充电设施的运行状态。

稳定性控制策略：针对光伏发电波动性和充电负荷随机性，通过 SST 的快速调节能力和储能的功率支撑，维持系统电压和频率稳定。

可靠性提升策略：通过设备 N-1 备用、网络重构和孤岛划分等措施，提高系统供电可靠性和故障恢复能力。

## 4 应用案例与性能分析

### 4.1 典型案例分析

苏州昆山充电电站项目

苏州昆山开发区供电所充电电站是世界首台基于固态变

压器直挂充电矩阵的商业化运行场站。该充电站仅通过一台设备——10kV/800kW 固态变压器，同时满足 13 辆新能源汽车快速充电的需求。



该项目的技术特点和运行效果包括：

高效运行：经现场实测，该站充电效率最高达 95%，较常规充电场站提升 3% 以上。同时 SST 基本无空载损耗，如表 2 实际运行数据，场站综合效率可达 92.5%+，可大量节约电费。

智能调控：充电站依托柔性充电技术，智能调节充电功率，减少能量损耗，达到车、桩、站、网的实时互动，并可满足大功率汽车即插即用的需求。

空间节约：采用 SST 技术后，设备体积和重量大幅减小，节省了安装空间，提高了场地利用效率。

表 2 场站实际运行数据

项目	2025/6/14	2025/6/15	2025/6/16	2025/6/17
后台电量	2610.89	1938.00	3358.57	3457.82
用采电量	2885.80	2144.00	3652.60	3735.00
电量差	274.91	206.00	294.03	267.18
转换率	0.9047	0.9039	0.9195	0.9257

### 4.2 性能对比分析

为了全面评估基于 SST 的光储充系统的性能优势，表 3 对比了传统方案与 SST 增强方案的关键性能指标。

从表 3 可以看出，基于 SST 的光储充系统在多项性能指标上显著优于传统方案，在生命周期成本、运行效率和维护需求等方面具有明显优势，尤其 10kV 电源点距离充电场站越远、场地面积越大、投建功率越大、规模越大，越省钱。<sup>[9]</sup>

### 4.3 经济效益分析

基于 SST 的光储充系统带来的经济效益主要体现在以下几个方面：

能源成本节约：通过高效能量转换和智能调度，显著降低用电成本。

设备投资节约：SST 的多功能集成特性减少了额外设备的投资需求，如无功补偿装置、谐波滤波装置等。

表 3 光储充系统传统方案与 SST 增强方案性能对比

	传统方案	新方案	备注
变压器	传统箱变	固态变压器	变压整流一体化,全电力电子直挂
线缆	采用三相五线 380V 交流供电。	采用正负两极 800V 直流供电。	高电压、直流电供电①线缆数量减少;②线缆线径减少;
充电桩	两级模块架构,效率低,成本高	单级模块架构,效率高,成本低,可靠性高	效率提高 2% 以上
施工调试	周期长,多设备联调	工厂全套集成,一天系统上线	基本无需现场调试
绿电接入方式	交流耦合,效率低	光储直流高效接入	虚拟增容,绿电直供
系统集成度	功能性耦合,集成度差	光储充变一体化	可匹配高级策略
充电效率	90%~92.6%	94.5%~97%	10kV-枪端

运维成本降低: SST 的固态化设计和少维护特性显著降低了系统的运维成本。

政策收益增加: 通过参与需求响应、辅助服务等市场活动获取额外收益。

### 5 结语

本文全面研究了基于固态变压器的光储充一体化系统的关键技术、架构设计和应用效能,主要得出以下结论:

第一, SST 作为电力电子技术的创新应用,凭借其高效能量转换、多功能集成和智能控制能力,有效解决了传统光储充系统存在的效率低下、协同复杂和电能质量等问题。

第二, 基于 SST 的光储充系统采用多端口能量路由器作为核心设备,通过能源管理系统实现智能调控,支持多种运行模式灵活切换,显著提升了系统运行的经济性和可靠性。

第三, 当前 SST 技术仍面临成本较高、可靠性验证不足和标准缺失等挑战,但通过技术进步、规模效应和标准建设,这些问题将逐步得到解决。

第四, 未来基于 SST 的光储充系统将向技术融合化、应用场景多元化和系统规模化方向发展,并与数字技术、市场机制深度融合,成为能源互联网建设的关键支撑技术。

总体而言, 基于固态变压器的光储充一体化技术代表了能源系统的发展方向,对促进新能源消纳、提升能源利用效率和推动交通领域低碳转型具有重要意义。随着技术进步和成本下降, 该项技术将在更多领域得到广泛应用, 为构建

清洁、低碳、安全、高效的能源体系提供有力支撑。<sup>[10]</sup>

### 参考文献

- [1] 李强, 张伟. 固态变压器在配电网中的应用研究[J]. 电力系统自动化, 2020,44(3):56-63.
- [2] 陈志远, 黄强. 智能电网中固态变压器的优势与挑战[J]. 电气工程学报, 2022,51(4):95-102.
- [3] 郑泽东, 顾春阳, 李永东, 等. 采用多绕组高频变压器的新型多电平变换器拓扑及控制策略[J]. 电工技术学报, 2014,29(10):12-18.
- [4] 党存禄, 慈和乐, 党圆. 储能型固态变压器电能质量研究[J]. 电子技术应用, 2019,45(3):118-121,126.
- [5] 张勇, 徐晋, 李子润, 等. 基于离散状态空间小步合成的固态变压器大步长仿真方法[J]. 中国电机工程学报, 2025,45(3):1063-1073.
- [6] 张明锐, 林承鑫, 徐瑞新. 一种基于固态变压器的光伏发电并网技术[J]. 电力系统保护与控制, 2012,40(19):110-115.
- [7] 赵争鸣, 冯高辉, 袁立强, 等. 电能路由器的发展及其关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2017,37(13):3823-3834.
- [8] 汤春明, 葛琴, 肖凡, 等. 基于光伏电源支撑的多端口固态变压器故障穿越策略[J]. 电工技术学报, 2020,35(16):3498-3505.
- [9] 李志祥, 张哲, 赵剑, 等. 一种提升直流固态变压器全工况动态性能的新型线性化控制策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(20):6475-6485.
- [10] 张雪垠, 徐永海, 肖湘宁. 适用于中高压配电网的高功率密度谐振型级联H桥固态变压器[J]. 电工技术学报, 2018,33(2): 310-321.