

光伏发电与储能系统融合的技术创新

郭磊¹ 訾悦²

1. 天津中泰智达电气科技有限公司 天津 301701

2. 天津天利电子科技有限公司 天津 300308

摘要: 在“双碳”目标引领与能源体系转型背景下,光伏发电与储能系统融合是破解光伏出力间歇性、提升能源利用效率的关键。本文阐述光储融合的基础理论与核心要素,重点分析协同控制、系统集成、储能适配及安全防护技术创新,剖析当前技术与产业瓶颈,展望智能化、模块化发展趋势,提出多层次优化建议,为光储融合技术规模化应用与高质量发展提供理论与实践参考。

关键词: 光伏发电; 储能系统; 融合; 技术创新

引言: 全球能源转型深入推进,光伏发电因清洁可再生优势成为新能源发展核心,但出力波动性、消纳率偏低等问题制约其规模化发展。储能系统作为能量缓冲载体,与光伏深度融合可实现“发-储-用”一体化,破解发展瓶颈。当前光储融合已从政策引导转向市场刚需,亟需通过技术创新突破核心壁垒。基于此,本文聚焦光储融合技术创新,梳理相关理论与技术,为能源结构优化、实现“双碳”目标提供支撑。

1 光伏发电与储能系统融合的基础理论与核心要素

1.1 光伏发电系统的核心原理与技术特性

(1) 光伏发电的能量转换原理是基于光生伏特效应,太阳辐射光子撞击半导体PN结,激发电子-空穴对分离,形成光生电动势,通过电路收集转化为电能。关键组件中,光伏组件决定光电转换效率,逆变器负责将直流电转换为交流电,支架系统保障组件接收最优光照,各组件协同决定系统整体出力水平。(2) 光伏发电出力具有显著的间歇性和波动性,受太阳辐射强度、天气变化、昼夜交替等自然因素影响,正午光照充足时出力达到峰值,阴天、夜间则出力骤降或为零,这种特性导致其出力难以稳定匹配用电需求。(3) 当前光伏发电技术存在明显瓶颈,核心是消纳率偏低,大量光伏电力因出力不稳定无法被电网有效接纳而弃光;同时系统稳定性不足,出力波动易引发电网电压、频率波动,且极端天气下组件易受损,影响长期运行可靠性。

1.2 储能系统的分类与核心技术特性

(1) 储能系统主要分为三类:电化学储能(如电池储能)、机械储能(如抽水蓄能、飞轮储能)、电磁储能(如超导储能),此外还有热能储能、氢能储能等新型类别,各类储能技术基于不同原理实现能量的存储与释放。(2) 主流储能技术中,锂离子电池能量密度高、响

应速度快,适用于分布式光储场景;液流电池循环寿命长、安全性高,适合大规模储能项目;抽水蓄能技术成熟、成本较低,但受地理条件限制,适用场景有限。(3) 储能系统在光储融合中承担核心功能,削峰填谷可存储光伏峰值出力、补充低谷时段电力缺口;平滑出力能缓解光伏出力波动,保障供电稳定性;应急供电可在电网故障或光伏断供时,为负载提供临时电力支撑^[1]。

1.3 光储融合的核心逻辑与约束条件

(1) 光储融合的核心逻辑是能量匹配与协同运行,通过储能系统存储光伏多余电力、释放短缺电力,实现“发-储-用”一体化,使光伏出力与用电需求精准匹配,提升能源利用效率。(2) 技术约束主要包括容量匹配,光伏与储能容量需合理配比才能避免资源浪费或出力不足;响应速度,储能系统需快速跟踪光伏出力变化;效率损耗,能量转换与存储过程中存在一定损耗,影响系统整体效益。(3) 经济约束体现为储能设备成本较高,导致光储项目初期投资大、回收周期长;环境约束则要求储能材料环保、可回收,避免电池报废等带来的环境污染,同时需符合区域能源环保政策要求。

2 光伏发电与储能系统融合的关键技术创新

2.1 光储协同控制技术创新

(1) 基于人工智能的光储出力预测技术实现了短期与中长期预测的双重优化,突破传统预测方法的局限性。短期预测依托深度学习算法,整合实时光照、温度、云层移动等多维度数据,精准预测未来1-24小时光伏出力波动,误差控制在10%以内;中长期预测结合气象大数据与机器学习模型,分析季节变化、气候规律对光伏出力的影响,为系统容量规划、电力调度提供科学依据,有效降低出力波动带来的运行风险^[2]。(2) 自适应协同控制策略核心在于动态功率分配与充放电优化,能够根据光

伏出力变化、电网负荷需求及储能状态,自动调整控制参数。当光伏出力过剩时,优先控制储能系统充电,避免弃光损失;当光伏出力不足时,调度储能系统放电补充,实现功率供需平衡;同时优化充放电节奏,延长储能电池使用寿命,提升系统运行经济性。(3)分布式光储系统的协同调度技术创新,打破了单系统独立运行的壁垒,通过物联网与边缘计算技术,实现多分布式光储单元的集群调度。采用去中心化调度架构,各单元可自主响应负荷需求,同时接受全局调度指令,兼顾局部供电稳定性与整体能源利用效率,适配分布式光伏分散布局、出力不均的特点,推动分布式光储系统规模化应用。

2.2 光储系统集成技术创新

(1)直流耦合与交流耦合集成架构的优化与创新,提升了光储系统的集成效率与灵活性。直流耦合架构优化后,光伏组件输出的直流电直接供给储能电池充电,减少直流-交流-直流的多次转换损耗,转换效率提升5%-8%;交流耦合架构则通过模块化设计,实现光伏、储能与电网的灵活对接,便于系统扩容与维护,适配不同规模的光储融合项目。(2)光储一体化组件的研发与应用取得突破性进展,将光伏组件与储能电池、逆变器等核心部件集成一体化模块,简化系统安装流程,降低占地面积。此类模块采用高效光伏电池与轻量化储能单元,兼顾发电与储能功能,可直接应用于屋顶、分布式电站等场景,解决传统光储系统组件分散、安装复杂的问题,推动光储融合向小型化、便捷化发展^[3]。(3)高转换效率PCS(储能变流器)的技术突破,成为光储融合系统能效提升的关键。通过优化电路拓扑结构、采用宽禁带半导体材料,PCS转换效率提升至98.5%以上,同时降低能耗与体积;新增智能调节功能,可快速响应光伏出力与电网电压变化,实现功率平滑输出,保障系统与电网的稳定对接,解决传统PCS转换效率低、响应滞后的痛点。

2.3 储能技术适配光储融合的创新升级

(1)长时储能技术与光伏的适配创新,重点突破液流电池、压缩空气储能与光伏出力的协同适配问题。液流电池通过优化电解液配方,提升能量密度与循环寿命,适配光伏中长期出力波动,可实现连续72小时以上稳定储能;压缩空气储能则依托规模化储能优势,结合光伏峰值出力特点,优化储能与释能节奏,解决大规模光伏消纳难题,适用于集中式光储电站。(2)钠离子电池在分布式光储系统中的应用创新,弥补了锂离子电池成本高、资源依赖强的不足。钠离子电池采用低成本原料,耐低温、安全性高,适配分布式光储场景的负荷需求,通过优化电池结构设计,提升能量密度与循环性能,可直接替换

传统锂离子电池,降低分布式光储项目的初期投资成本,推动其普及应用^[4]。(3)储能电池热管理技术创新,通过相变材料、液冷技术的应用,解决电池运行过程中的温度控制难题。相变材料可实现热量的高效存储与释放,维持电池温度稳定在20-35°C的最佳运行区间;液冷技术则通过精准控温,解决大规模储能电池集群的散热问题,降低电池热失控风险,同时延长电池循环寿命,提升储能系统运行可靠性。

2.4 光储融合的安全防护技术创新

(1)电池热失控预警与防控技术创新,构建了全流程预警防控体系。通过内置温度、电压、气体传感器,实时监测电池运行状态,利用人工智能算法识别热失控前兆,提前发出预警信号;同时采用防火防爆涂层、热阻隔结构设计,结合主动降温技术,有效遏制热失控蔓延,降低电池起火、爆炸风险。(2)光储系统的电气安全防护与防雷接地技术优化,提升了系统抵御外部风险的能力。优化电气回路设计,增设过流、过压、漏电保护装置,防止电气故障引发安全事故;改进防雷接地系统,采用一体化防雷设计,提升系统对雷电冲击的防护能力,避免雷电损坏光伏组件、储能设备及控制系统,保障户外光储系统稳定运行^[5]。(3)全生命周期安全监测与智能运维技术,实现了光储系统从安装、运行到退役的全流程管控。通过物联网技术实时采集系统运行数据,利用大数据分析诊断设备故障隐患,实现运维的精准化、智能化;建立电池退役回收体系,对废旧储能电池进行无害化处理与资源回收,兼顾安全与环保,推动光储融合系统可持续发展。

3 光储融合技术创新的现存问题与未来发展展望

3.1 光储融合技术创新面临的现存问题

(1)核心技术瓶颈尚未突破,长时储能成本高、协同效率不足尤为突出。以液流电池、压缩空气储能为主的长时储能技术,因核心材料依赖进口、制备工艺复杂,初期投资和运维成本居高不下,难以大规模推广;光储协同控制精度不足,现有预测算法在复杂气象条件下误差较大,功率分配与充放电调度的协同性欠佳,导致能量转换损耗偏高,制约了系统整体能效。(2)产业层面存在明显短板,技术标准不统一与产业链协同不足相互制约。不同企业的光储设备在接口规范、通信协议、安全标准等方面差异较大,导致系统集成难度大、兼容性差,增加了项目建设和运维成本;产业链上下游协同不畅,上游核心器件、中游系统集成、下游应用场景脱节,同质化竞争严重,缺乏核心技术引领的产业生态。(3)政策与市场机制不完善,抑制技术创新活力。光储系统

的辅助服务价值未得到充分体现,定价机制不健全,调峰、调频等服务的补偿标准不明确,项目投资回报周期长;补贴政策逐步退坡,而市场化激励机制尚未完善,社会资本参与积极性不足,企业技术创新的资金压力增大,制约了核心技术的研发投入。

3.2 光储融合技术创新的未来发展趋势

(1) 技术发展呈现智能化、模块化、低成本化三大明确趋势。智能化方面,人工智能、数字孪生、物联网技术深度融合,实现光储出力精准预测、智能调度、故障自诊断与自主运维,大幅提升系统运行效率;模块化方面,光储一体化预制模块逐步普及,通过标准化设计,大幅缩短项目建设周期,提升系统扩容灵活性和运维便捷性;低成本化依托新材料、新工艺的突破,推动钠离子电池、宽禁带半导体等新技术规模化应用,持续降低光储系统度电成本。(2) 应用场景持续拓展,向多元化、深度融合方向稳步推进。光储充一体化电站成为主流应用形态,融合快充、换电、V2G(车辆到电网)等功能,实现能源双向流动与高效利用;与虚拟电厂深度融合,整合光伏、储能及其他新能源资源,参与电网调度与市场化交易,提升电网运行灵活性;同时逐步向户用微电网、工业绿电制备、荒漠光伏储能等新兴场景延伸,拓宽技术应用边界,满足不同领域的绿色能源需求。(3) 产业链协同向纵深发展,技术创新聚焦核心领域。上下游企业将加强协同联动,重点推动核心材料、高端器件的国产化突破,构建自主可控、安全高效的产业链体系;技术创新方向将围绕长时储能经济性提升、跨场景协同控制算法优化、全生命周期绿色低碳运维等核心领域展开,形成“研发-中试-转化-应用”的良性循环,持续提升产业整体竞争力。

3.3 推动光储融合技术创新的对策建议

(1) 技术层面,加大核心技术研发投入,集中力量突破关键瓶颈。设立国家级专项科研基金,重点攻关长时储能、高效储能变流器(PCS)、高精度出力预测算法等“卡脖子”技术;鼓励产学研用深度协同,搭建联合

实验室和中试基地,加速实验室技术成果向产业化转化,提升技术成熟度和规模化应用能力。(2) 产业层面,强化产业链协同联动,完善技术标准体系。组建光储融合产业联盟,统筹协调产业链上下游资源,化解同质化竞争,推动形成分工明确、优势互补、协同发展的产业格局;加快制定统一的技术标准、安全规范和接口协议,解决设备兼容性问题,降低系统集成和运维成本,推动产业规范化发展。(3) 政策层面,优化政策支持体系,完善市场激励机制。健全光储系统辅助服务定价机制,明确调峰、调频等辅助服务的补偿标准,保障项目合理收益;出台税收优惠、贷款贴息等针对性扶持政策,缓解企业资金压力;完善绿色电力交易机制,引导社会资本有序参与,激发企业技术创新的内生动力,推动光储融合技术高质量发展。

结束语

光伏发电与储能系统融合是新能源产业高质量发展的必然选择,其技术创新贯穿协同控制、集成优化、安全运维全流程,既破解了光伏出力不稳定的行业痛点,也进一步拓展了储能技术的应用场景。尽管目前仍面临核心技术瓶颈、产业协同不足等问题,但随着技术迭代与政策完善,光储融合将向多元场景延伸、向高效低成本升级,助力实现能源绿色低碳转型。

参考文献

- [1]袁诚.光伏-储能联合系统容量配置优化技术研究[J].科技与创新,2025,(24):164-166.
- [2]高中迁.电压无功控制模型下的光伏电网储能技术[J].电气技术与经济,2025,(12):134-136.
- [3]李育波.储能技术在光伏发电系统中的应用研究[J].光源与照明,2024,(2):121-123.
- [4]何文.分布式光伏发电系统中储能技术的实践应用[J].电力设备管理,2024,(19):94-96.
- [5]陈寅超.储能技术在光伏并网发电系统中的应用[J].集成电路应用,2024,41(12):314-315.