

# Research on Electrical Design Optimization and Key Construction Technologies for Photovoltaic Power Generation Systems and Energy Storage Systems

Nan Liu

Guangdong Provincial Construction Engineering Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510000, China

## Abstract

Against the backdrop of the continuous expansion of new energy generation, photovoltaic power generation systems and energy storage systems are evolving from independent operation toward deep integration. The level of electrical design and construction directly affects system safety and economic performance. Focusing on the integrated application requirements of photovoltaic-storage systems, this study systematically analyzes key design aspects from the perspectives of electrical structure optimization, equipment selection and configuration, and operational control. Considering the parameter matching characteristics of both DC and AC sides, the coordinated control mechanisms of inverters, energy storage converters, and energy management systems are discussed. Meanwhile, from the viewpoints of construction organization and quality control, the technical essentials of electrical installation, wiring standards, and grid-connection commissioning are examined. By establishing a multidimensional optimization framework, technical support is provided for improving operational efficiency, reducing energy losses, and enhancing system stability of photovoltaic-storage systems.

## Keywords

photovoltaic power generation; energy storage system; electrical design; system optimization; construction technology

# 光伏发电系统和储能系统的电气设计优化与施工关键技术研究

刘楠

广东省建筑工程集团股份有限公司, 中国·广东广州 510000

## 摘要

在新能源发电规模持续扩大的背景下,光伏发电系统与储能系统逐步由独立运行向深度耦合发展,电气设计与施工水平直接影响系统安全性与经济性。围绕光储系统一体化应用需求,从电气结构优化、设备选型配置及运行控制等方面,对关键设计环节进行系统分析。结合直流侧与交流侧参数匹配特征,探讨逆变器、储能变流器及能量管理系统的协同控制机制。同时,从施工组织与质量控制角度,对电气安装、接线规范及调试并网过程中的技术要点进行梳理。通过构建多维优化思路,为提升光储系统运行效率、降低能量损耗及增强系统稳定性提供技术支持。

## 关键词

光伏发电;储能系统;电气设计;系统优化;施工技术

## 1 引言

在能源结构加速向清洁低碳转型的进程中,光伏发电已成为电力系统的重要组成部分,但其出力具有明显的间歇性与波动性特征,对电网稳定运行提出更高要求。储能系统作为调节电能时序的重要手段,在削峰填谷、平滑功率波动及提升消纳能力方面发挥着关键作用。随着光伏与储能技术的融合应用不断深化,系统由简单并列接入逐渐演变为多层

级、多功能的电气集成体系,对设计精度与施工质量提出更高标准。电气设计不仅需要兼顾设备匹配与系统效率,还需满足安全保护、可靠运行及经济运行等多重目标。与此同时,施工阶段的工艺控制与调试验证同样对系统性能产生重要影响。围绕光储系统一体化应用场景,系统梳理电气设计优化路径与施工关键技术,对于提升工程建设水平具有现实意义。

## 2 光伏发电系统与储能系统电气设计的总体架构与协同关系

### 2.1 光伏发电系统电气结构组成与运行机理

光伏发电系统由光伏组件、直流汇流箱、逆变器及升压并网单元构成,其电气结构呈现典型的“直流采集一功

【作者简介】刘楠(1999-),男,中国河北清苑人,本科,助理工程师,从事电气、光伏和储能研究。

率变换—交流并网”路径。组件端工作电压通常为 40V 左右，串联 20 块形成约 800V 直流电压等级，适配 1000V 或 1500V 系统标准，串联数量需满足最低工作电压不低于逆变器 MPPT 启动电压（一般为 250V~500V），同时不超过最大输入电压（通常 1100V 或 1500V）。组件在标准测试条件下输出电流约 10A~13A，多串并联后形成汇流电流 100A 以上，通过汇流箱集中后接入逆变器。逆变器将直流电转换为 50Hz 交流电并实现功率调节与并网控制。系统运行机理依赖于最大功率点跟踪算法，使组件输出功率保持在峰值附近，转换效率可达 98% 以上。整体结构通过直流侧优化与交流侧稳压，实现发电效率与并网质量的动态平衡。

## 2.2 储能系统电气构成及其接入方式设计

储能系统电气构成包括电池簇、电池管理系统、储能变流器及配电保护单元，构成“储能单元—功率变换—系统接入”的电气路径。以磷酸铁锂电池为例，单体电压约 3.2V，16 串组成 51.2V 电池模块，多个模块串联形成 600V~1000V 直流母线电压等级，容量配置按系统需求常见为 1MWh、5MWh 等级，充放电倍率控制在 0.5C~1C 范围内。储能变流器容量通常按电池容量的 0.5~1 倍配置，如 1MWh 系统配置 500kW~1000kW PCS 设备。接入方式包括直流侧耦合与交流侧耦合两种形式，直流耦合减少一次变换损耗，系统效率可提升 2%~3%，交流耦合则具有更强的扩展性与改造适应性。接入点需满足电压等级匹配要求，常见为 0.4kV 低压接入或 10kV 中压并网，通过变压器升压并实现与主网的电气隔离与功率交换<sup>[1]</sup>。

## 3 光伏发电系统电气设计优化的关键技术路径

### 3.1 组件串并联配置与直流侧电气参数优化

组件串并联设计需综合考虑电压等级、环境温度及组件特性参数，以 1500V 系统为例，单块组件开路电压约 49V，在最低温度 -10℃ 条件下电压上升至约 55V，串联数量控制在 26 块以内可确保不超过系统电压上限。工作电流按组件额定电流 12A 计算，若并联 10 路则汇流电流达到 120A，需选用额定电流 160A 以上汇流箱并配置直流断路器与防雷保护装置。直流侧线缆截面按电流密度 4A/mm<sup>2</sup> 选取，120A 电流需采用 35mm<sup>2</sup> 铜芯电缆，线路电压降控制在 1.5% 以内。MPPT 通道配置通常为每路输入电流不超过 26A，确保多串输入时跟踪效率达到 99% 以上。通过优化串并联结构与参数匹配，可将系统直流侧损耗控制在 2% 以内，同时提高发电稳定性与设备利用率。

### 3.2 逆变器选型及并网控制策略优化设计

逆变器选型需匹配光伏阵列容量与电网接入要求，常见配置为组件容量与逆变器容量比值控制在 1.1~1.3 范围内，以提升设备利用率。以 1MW 光伏阵列为例，可选用 800kW 逆变器，允许一定程度的超配以提高发电量。逆变器效率通常达到 98.5% 以上，具备多路 MPPT 输入通道（一般为 6~12 路），可适应不同方位组件接入。并网控制采用电压型控制策略，输出电压等级为 380V 或 690V，通过升压变

压器接入 10kV 电网。谐波含量需控制在 THD≤3%，功率因数调节范围在 0.9 滞后至 0.9 超前之间<sup>[2]</sup>。逆变器具备低压穿越能力，在电网电压跌落至 0.2p.u. 时仍能维持运行约 0.15s，确保系统稳定性。通过优化选型与控制策略，可实现并网质量提升与电网适应能力增强。

## 4 储能系统电气设计优化的核心技术体系

### 4.1 储能电池系统选型与容量配置优化

储能电池选型需结合循环寿命、能量密度及安全性能进行综合评估，磷酸铁锂电池循环寿命可达 6000 次以上，能量密度约 140Wh/kg，适用于大规模储能应用。容量配置依据负荷曲线与光伏出力特性确定，常见配置为储能容量占光伏装机容量的 20%~50%，例如 10MW 光伏系统配置 2MWh~5MWh 储能系统。电池系统标称电压通常为 768V 或 1024V，额定电流按充放电倍率计算，0.5C 倍率对应电流约为容量的一半。电池簇内部通过 BMS 实时监测电压、温度与 SOC，电压偏差控制在 ±10mV 以内，温差控制在 5℃ 以内。通过合理选型与容量匹配，可实现系统运行效率提升至 90% 以上，并延长电池使用寿命。

### 4.2 储能变流器与能量管理系统协同优化设计

储能变流器作为能量转换核心设备，承担直流与交流之间的双向转换功能，其效率通常达到 97% 以上。PCS 容量按储能系统功率需求配置，如 1MW/2MWh 系统配置 1MW PCS 设备，支持充放电切换时间小于 50ms。能量管理系统通过采集光伏出力、负荷需求及电网状态数据，实现功率分配与调度控制。数据采集周期通常为 1s 级别，控制指令响应时间小于 200ms。EMS 通过预测算法对未来 15min~60min 负荷进行估算，调节储能充放电功率，使系统运行在最优状态。协同控制下系统综合效率可提升至 88%~92%，并显著降低峰值负荷压力。

### 4.3 储能系统安全保护与电气隔离技术优化

储能系统安全设计需构建多层次保护体系，包括电池级、模块级及系统级保护。电池系统配置过压、欠压、过流及过温保护，触发阈值分别为单体电压 3.65V、2.5V、电流 1.2 倍额定值及温度 60℃。电气隔离通过直流断路器与接触器实现，分断能力不低于 20kA，确保故障状态下快速切断电路。系统配置绝缘监测装置，绝缘电阻低于 50kΩ 时发出报警信号。消防系统采用气体灭火或水喷淋系统，响应时间小于 10s。电气隔离与保护设计可将故障扩展风险降低至 5% 以内，并提升系统运行安全性与稳定性<sup>[3]</sup>。

## 5 光储系统电气施工关键技术与质量控制方法

### 5.1 直流侧与交流侧电气施工工艺控制要点

光储系统施工阶段需围绕直流侧与交流侧的电气连续性与安全性展开精细化控制。直流侧电压等级常为 1000V 或 1500V，组件串接后电压可达 1200V 以上，施工过程中接插件压接电阻需控制在 0.5mΩ 以内，接触不良将导致局部发热温升超过 20℃，增加故障风险。直流电缆敷设需采

用耐紫外线光伏专用电缆，截面一般为 4mm<sup>2</sup> 或 6mm<sup>2</sup>，允许电流分别为 55A 与 70A，线路压降控制在 2% 以内。汇流箱接入端需进行极性校验与绝缘测试，绝缘电阻不低于 2M $\Omega$ 。交流侧施工涉及 0.4kV 或 10kV 系统，电缆敷设需满足载流量与短路耐受要求，10kV 电缆常用截面为 70mm<sup>2</sup> 至 240mm<sup>2</sup>，短路电流承受能力需达到 25kA 以上。接地系统施工中接地电阻控制在 4 $\Omega$  以内，防雷接地与工作接地采用共用接地网结构，通过环形接地体实现电位均衡，保障系统运行稳定性。

## 5.2 电气设备安装与接线规范化施工技术

电气设备安装需严格控制设备基础水平度与垂直度，逆变器及储能变流器安装偏差控制在  $\pm 2\text{mm}$  以内，设备间距保持不小于 800mm 以满足散热与检修要求。变压器安装需确保油位正常且绕组绝缘电阻不低于 100M $\Omega$ ，空载损耗与负载损耗需符合设计值偏差不得超过  $\pm 5\%$ 。接线施工中铜排连接采用螺栓压接方式，接触面需进行镀锡处理，接触电阻控制在 50 $\mu\Omega$  以内，连接螺栓扭矩按 M12 规格控制在 70N $\cdot\text{m}$  左右。电缆终端制作需采用热缩或冷缩工艺，10kV 电缆终端局放水平需低于 10pC，确保长期运行稳定。控制电缆布线应与动力电缆分层敷设，间距不小于 300mm，避免电磁干扰。标识系统需完整，电缆编号、设备编号与图纸一致率达到 100%，实现施工质量与运行维护的有效衔接。

## 5.3 系统调试、并网检测与运行验证关键技术

系统调试阶段需完成设备单体试验与系统联动试验，逆变器启动电压一般设定在 250V 以上，输出电压偏差控制在  $\pm 1\%$  范围内。储能系统充放电测试需验证其容量与效率，1MWh 系统放电容量不低于 0.9MWh，往返效率达到 85% 以上。并网检测环节需重点测试谐波、电压偏差与频率稳定性，谐波总畸变率 THD 控制在 3% 以内，频率波动范围保持在 49.5Hz 至 50.5Hz 之间。继电保护调试需验证动作时间与整定值，过流保护动作时间小于 0.2s，差动保护动作灵敏度达到 0.5In。系统运行验证需进行连续 72h 试运行，记录功率输出曲线与设备温升情况，关键设备温升不超过额定值的 80%。通过调试与验证可确保系统达到设计性能要求，实现安全并网与稳定运行<sup>[4]</sup>。

# 6 光储系统运行性能优化与工程应用支撑技术

## 6.1 系统运行监测与数据采集技术优化

光储系统运行依赖高精度数据采集与监测平台，采集终端需具备电压、电流、功率及温度多参数采集能力，采样精度达到 0.5 级，采样周期一般为 1s。数据通过工业以太网或光纤通信传输至监控中心，通信速率可达 100Mbps 以上，数据丢包率控制在 0.1% 以内。监测系统通过 SCADA 平台实现实时显示与历史数据存储，存储周期不少于 1 年，支持故障追溯与趋势分析。逆变器运行数据包括 MPPT 效率、直流输入功率及交流输出功率，实时偏差控制在  $\pm 2\%$  以内。储能系统需实时监测 SOC、SOH 及单体电压差，电压偏差超过 50mV 时触发均衡控制。通过优化数据采集与监测系统，

可实现运行状态可视化与故障预警能力提升。

## 6.2 负荷匹配与能量调度策略优化方法

光储系统运行优化核心在于负荷匹配与能量调度，需结合光伏出力曲线与负荷需求曲线进行动态调节。在典型日照条件下，光伏系统在 10:00 至 15:00 输出功率达到峰值，占日发电量的 60% 以上，储能系统在该时段进行充电，充电功率可达额定值的 80%。晚间负荷高峰阶段，储能系统放电功率按 0.5C 控制，持续时间可达 2h 至 4h，实现削峰填谷。调度策略基于 SOC 与电价信号进行控制，SOC 保持在 30% 至 80% 区间，避免过充过放导致电池寿命下降。负荷匹配误差控制在  $\pm 5\%$  以内，系统整体利用率提升至 85% 以上。通过优化调度策略，可实现电能利用最大化与运行成本降低。

## 6.3 系统可靠性提升与电气运维技术优化

系统可靠性提升依赖设备运行状态监测与预防性维护技术，关键设备故障率需控制在年故障率 1% 以内。逆变器平均无故障运行时间达到 50000h 以上，储能系统电池模块失效率低于 0.5%。运维过程中需定期进行红外测温检测，连接点温差超过 15 $^{\circ}\text{C}$  时需进行紧固处理。绝缘检测周期为每 6 个月一次，绝缘电阻低于 1M $\Omega$  需及时更换电缆或设备。在线监测系统通过大数据分析识别异常运行趋势，提前预警设备故障，预警准确率可达 90% 以上。运维技术通过标准化巡检与智能监测相结合，使系统可用率提升至 99% 以上，保障光储系统长期稳定运行<sup>[5]</sup>。

## 7 结语

光伏发电系统与储能系统的深度融合已成为新型电力系统构建的重要方向，电气设计优化与施工质量控制直接决定系统运行水平与工程效益。通过对系统架构、电气参数匹配及关键设备选型的优化，可有效降低能量损耗并提升发电效率；结合规范化施工与精细化调试技术，能够保障系统安全并网与稳定运行。在运行阶段，依托数据监测与调度优化，实现能量高效利用与负荷平衡。整体来看，光储系统的技术集成与工程应用水平将持续提升，为清洁能源高效利用提供有力支撑。

## 参考文献

- [1] 贾全旺.光伏发电系统电气设计中的关键技术分析[A].智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集(二)[C].重庆市大数据和人工智能产业协会、重庆建筑编辑部、重庆市建筑协会:2025:476-478.
- [2] 刘莹.屋顶分布式光伏发电系统电气设计技术研究[J].电气技术与经济,2024,(08):76-78.
- [3] 王有新.光伏发电系统及电站电气设计分析[J].光源与照明,2024,(03):96-98.
- [4] 陈登峰.分布式光伏发电系统电气设计与性能优化研究[J].光源与照明,2024,(03):99-101.
- [5] 王珏.分布式光伏发电系统电气设计分析[J].现代工业经济和信  
息化,2023,13(10):109-111.