

光伏新能源发电系统电气性能优化技术研究

楼嘉平

浙江华云清洁能源有限公司 浙江 杭州 310000

摘要：光伏新能源发电系统电气性能优化是提升能源利用效率的关键。本文围绕系统电气构成、现存问题及优化方向展开研究，分析环境与设备因素对电气性能的影响，指出发电效率、系统稳定性及能量传输损耗等方面的不足。提出从组件、逆变器及传输线路三方面开展技术升级，并阐述适配条件、实施流程与运维保障方法，为光伏系统电气性能优化提供理论支撑与实践指导。

关键词：光伏新能源；电气性能；优化技术；发电效率；系统稳定性

引言：在全球能源转型背景下，光伏新能源凭借清洁、可再生的特性成为能源结构调整的重要方向。光伏发电系统通过光电转换实现太阳能到电能的转化，其电气性能直接影响发电效率、系统稳定性及能源传输损耗。当前，光伏系统在运行中面临组件效率受限、逆变器控制精度不足、传输线路损耗偏高等问题，制约了大规模应用的经济性与可靠性。深入研究电气性能优化技术，突破现有瓶颈，对推动光伏产业高质量发展具有重要意义。

1 光伏新能源发电系统电气性能相关基础

1.1 光伏发电系统电气构成

光伏发电系统电气架构由能量转换、传输与控制三部分协同构成。能量转换单元以光伏组件为核心，通过半导体材料的光伏效应将太阳辐射能转化为直流电能^[1]。组件内部采用串并联结构，电池片串联提升输出电压，并联增加输出电流，以满足不同应用场景的功率需求。直流侧传输网络包含汇流箱与直流配电柜，汇流箱通过防雷模块与断路器实现多路组串电流汇集，直流配电柜则集成熔断器、接触器等保护元件，确保直流母线电压稳定。能量转换的二次环节由逆变器主导，将直流电转换为符合电网标准的交流电，根据应用场景差异，逆变器分为组串式、集中式与微型三类，分别适配分布式屋顶、地面电站与户用系统。交流侧传输网络包含交流配电柜与升压变压器，交流配电柜通过无功补偿装置与电能质量监测模块优化输出特性，升压变压器将低压交流电升至中高压等级，降低长距离传输损耗。控制与保护系统贯穿全环节，通过数据采集单元实时监测电流、电压与温度参数，结合PLC或嵌入式控制器实现最大功率点跟踪、孤岛检测与故障隔离功能，保障系统安全高效运行。

1.2 电气性能的主要影响因素

1.2.1 环境因素

光照强度与光谱分布直接影响光伏组件输出功率，标准测试条件下（STC）的辐照度为 1000W/m^2 ，实际运行中，云层遮挡、昼夜交替导致辐照度波动，引发输出功率动态变化。这种动态变化给光伏系统的稳定运行带来了挑战，需要系统具备相应的调节能力来适应不同的光照条件。温度对组件性能的影响呈现负相关性，电池片温度每升高 1°C ，转换效率下降约 0.4% ，高温环境加剧载流子复合，降低开路电压与填充因子。环境湿度通过影响组件封装材料的透水性，间接改变电气绝缘性能，长期高湿条件可能导致绝缘电阻下降，引发漏电流风险。

1.2.2 设备因素

组件制造工艺差异导致初始效率与衰减特性分化，单晶硅组件因晶体结构完整，初始效率高于多晶硅，但制造成本较高；薄膜组件虽成本较低，但效率衰减率显著高于晶硅组件。不同类型组件的优缺点决定了在不同应用场景中的适用性，需要根据实际需求进行合理选择。逆变器拓扑结构与控制算法决定转换效率与电能质量，传统两电平逆变器输出谐波含量较高，三电平逆变器通过增加电平数降低谐波失真，提升并网兼容性。传输线路的电阻与电感参数影响能量损耗，直流侧采用铜芯电缆可减少电阻损耗，交流侧通过优化线径与布局降低电感效应，抑制电压波动与功率振荡。

2 光伏新能源发电系统电气性能现存问题

2.1 发电效率相关电气问题

光伏组件作为能量转换的核心单元，其电气性能直接决定发电效率。当前，光伏电池片材料的光电转换特性存在固有局限，硅基材料在吸收光谱范围与载流子收集效率方面难以突破理论极限，导致部分光能无法有效转化为电能^[2]。组件内部串并联结构的设计缺陷进一步加剧效率损失，电池片间电流失配现象普遍存在，当局部区域受遮挡或出现热斑时，旁路二极管虽能防止组件烧

毁, 但会直接旁路整个子串, 造成显著功率输出下降。此外, 逆变器作为直流到交流的转换枢纽, 其最大功率点跟踪算法的响应速度与精度直接影响能量捕获能力。传统扰动观察法在快速变化的光照条件下易出现功率振荡, 而电导增量法对传感器精度要求较高, 实际应用中难以完全匹配动态环境需求, 导致发电效率无法达到理论峰值。

2.2 系统稳定性相关电气问题

光伏发电系统的稳定性受制于多重电气因素。在并网运行场景下, 逆变器与电网的交互特性成为关键挑战。弱电网条件下, 电网阻抗的不确定性会引发逆变器输出电流谐波放大, 甚至导致系统失稳。多逆变器并联运行时, 各单元间存在环流通道, 若控制策略不完善, 环流会引发功率器件过热、输出电压波动等问题, 严重影响系统长期稳定运行。直流侧稳定性同样不容忽视, 光伏阵列输出功率的间歇性会导致直流母线电压频繁波动, 若储能装置响应速度不足, 可能触发保护装置误动作, 造成系统停机。此外, 极端天气条件下, 组件表面温度骤变会引发电池片性能衰减, 直流侧绝缘性能下降, 进一步威胁系统安全稳定运行。

2.3 能量传输过程中的电气损耗问题

能量从光伏组件到电网的传输路径存在多环节损耗。直流侧损耗主要源于电缆电阻与连接器接触电阻, 长距离传输时, 线损占比显著增加, 尤其在低压直流系统中, 电流较大导致焦耳热效应突出。交流侧损耗则集中于逆变器输出滤波器与变压器等设备, 滤波电感与电容的等效串联电阻会产生额外热损耗, 而变压器铁芯的磁滞损耗与涡流损耗随负载率变化呈现非线性特征。此外, 多级能量转换架构进一步放大了损耗累积效应, 直流汇流箱、直流配电柜等中间环节的设备效率差异会导致整体系统效率下降。值得关注的是, 部分损耗具有动态特性, 如逆变器开关器件的导通损耗与开关损耗随调制策略变化, 若未采用软开关技术或优化调制方式, 损耗峰值可能显著增加。

3 光伏新能源发电系统电气性能优化技术方向

3.1 光伏组件电气性能优化技术

光伏组件作为能量转换的核心单元, 其电气性能优化需围绕材料、结构与制造工艺开展多维度技术升级^[3]。在材料研发层面, 新型光伏材料的探索与应用不断深入, 钙钛矿材料凭借优异的光吸收能力与可调控的能带结构, 成为提升光电转换效率的重要研究方向。通过改善钙钛矿层与载流子传输层之间的界面适配性, 抑制载流子复合损耗, 能够有效提升组件的开路电压与短路电

流输出。针对传统硅基组件, 钝化发射极及背面接触技术已实现产业化推广, 而异质结与隧穿氧化层钝化接触技术则通过增设超薄氧化层与本征非晶硅层, 进一步降低电池表面复合速率, 改善电池片的填充因子。在结构设计优化方面, 双面发电组件通过优化背面透光结构, 能够充分利用环境反射光与散射光, 提升整体光能利用率与发电量。同时, 智能组件技术通过在组件内部集成微型逆变或功率优化器件, 实现单块组件乃至单体电池片级别的最大功率点跟踪控制, 缓解传统组件受局部遮挡影响造成的发电损耗, 保障组件整体电气输出性能稳定高效。

3.2 逆变器电气性能优化技术

逆变器作为直流到交流的转换核心, 其性能优化需聚焦拓扑创新与控制策略升级。在拓扑结构方面, 模块化多电平换流器(MMC)技术通过级联子模块实现高压大容量输出, 降低开关频率与滤波需求, 适用于中高压直流并网场景。针对组串式逆变器, 三电平拓扑结构通过增加电平数, 减少输出电压谐波, 提升电能质量, 同时降低开关损耗, 提高转换效率。在控制策略层面, 改进型最大功率点跟踪算法结合扰动观察法与电导增量法优势, 通过动态调整步长与采样周期, 平衡跟踪速度与精度, 适应快速变化的光照条件。此外, 虚拟同步发电机(VSG)技术通过模拟同步发电机机械与电磁特性, 为逆变器提供惯性支撑与频率调节能力, 增强弱电网条件下的系统稳定性。针对多逆变器并联场景, 分布式协同控制策略通过相邻单元信息交互, 实现功率均分与环流抑制, 避免集中式控制带来的通信延迟与单点故障风险。

3.3 电气传输线路优化技术

电气传输线路的优化需兼顾损耗降低与可靠性提升。直流侧采用中压直流输电技术可减少传输电流, 降低线路电阻损耗; 优化电缆截面积与导体材料, 如采用铝合金或碳纤维复合芯导线, 能在保证机械强度的同时减少重量与成本; 优化直流汇流箱与配电柜内部布局及母排设计, 缩短电流路径, 减少接触电阻与涡流损耗^[4]。在交流侧, 滤波器参数优化是降低谐波的关键, 通过精确建模逆变器输出特性与电网阻抗, 设计LCL滤波器参数, 实现谐波衰减与系统稳定性平衡。此外, 引入柔性交流输电(FACTS)技术如静止同步补偿器(STATCOM), 可动态调节无功功率、抑制电压波动。结合光伏系统夜间不发电且有空载损耗的运行特点, 提出变压器基于日照时间的智能停机节能技术, 通过内置天文算法或GPS时钟获取当地日出日落时间, 在太阳完全落下后停机、升起前开机, 进一步降低空载损耗。长距

离输电场景采用高压直流输电（HVDC）技术，能显著降低线路损耗，适配海上及偏远地区光伏电站电能外送。

4 光伏发电系统电气性能优化技术的应用要点

4.1 优化技术的适配条件

光伏发电系统电气性能优化技术的选择需紧密结合系统规模、运行环境及设备特性。针对分布式光伏系统，受限于安装空间与成本约束，组件级优化技术更具应用价值。例如，微型逆变器或功率优化器的集成可有效解决屋顶遮挡导致的局部失配问题，提升发电效率。而集中式大型光伏电站则需优先考虑逆变器拓扑升级与传输线路优化，通过采用三电平逆变器与中压直流输电技术，降低长距离传输损耗，提升系统整体经济性。运行环境方面，高温高湿地区需重点关注组件散热与电气绝缘性能，采用高导热系数背板材料与防潮型连接器，避免因环境应力导致性能衰减。在沙尘或盐雾严重区域，组件表面自清洁涂层与逆变器防护等级提升成为必要措施，以减少积尘与腐蚀对电气性能的影响。设备特性适配需考虑组件技术路线差异，钙钛矿组件因功率衰减特性与硅基组件不同，需调整最大功率点跟踪算法参数，避免因跟踪速度不匹配导致效率损失。

4.2 优化技术的实施流程

电气性能优化技术的实施需遵循系统性流程，从前期评估到后期调试形成闭环管理。前期评估阶段，需通过电气参数测试与建模分析，识别系统瓶颈环节。例如，采用红外热成像仪检测组件热斑分布，结合IV曲线测试定位低效子串，为优化技术选型提供数据支撑。设计阶段需根据评估结果制定差异化方案，针对逆变器效率不足问题，可选用碳化硅（SiC）功率器件替代传统硅基器件，通过降低开关损耗提升转换效率。实施阶段需严格遵循工艺规范，在组件安装环节，采用机械固定与电气连接分离设计，减少微裂纹产生风险；在逆变器调试环节，通过参数扫描确定最优控制带宽，平衡动态响应与稳定性需求。调试完成后需进行全工况测试，模拟光照强度突变、电网电压波动等场景，验证优化技术在实际运行中的适应性，确保性能提升目标达成。

4.3 优化技术的运维保障方法

运维保障是维持电气性能优化效果的关键环节，需建立预防性维护与智能诊断相结合的体系。预防性维护方面，制定组件清洗周期需考虑环境因素与发电量衰减率，在多雨地区可延长清洗间隔，而在干旱区域则需缩短周期以避免积尘遮挡。逆变器散热系统维护需定期清理防尘网与检查风扇运行状态，防止因散热不良导致功率器件降额运行^[5]。智能诊断技术通过部署传感器网络与数据分析平台，实现电气性能实时监测与故障预警。例如，在直流侧安装电流传感器监测组串电流一致性，当偏差超过阈值时触发告警，指导运维人员定位连接器松动或组件衰减异常问题。交流侧通过电能质量分析仪监测谐波含量与功率因数，结合机器学习算法预测滤波器电容老化趋势，提前安排更换计划。此外，建立运维知识库，将历史故障数据与解决方案进行结构化存储，为运维人员提供决策支持，缩短故障处理时间，保障系统长期稳定运行。

结束语

光伏新能源发电系统电气性能优化是系统工程，需从材料创新、拓扑升级、控制策略优化及运维管理等多维度协同推进。通过针对性技术改进与全生命周期管理，可有效提升发电效率、增强系统稳定性并降低传输损耗，为光伏系统在复杂环境下的高效运行提供保障。随着技术迭代与产业升级，光伏系统电气性能将持续优化，为能源清洁化转型注入更强动力。

参考文献

- [1]梁啸.光伏新能源发电系统电气性能优化技术研究[J].电力设备管理,2025(18):132-134.
- [2]张雷.光伏新能源发电系统电气性能优化技术研究[J].电气技术与经济,2025(6):35-37.
- [3]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(3):99-101.
- [4]杜任翔,江啸,黄凌辉.分布式光伏发电系统电气设计及性能提升策略研究[J].消费电子,2025(9):80-82.
- [5]谢伟.新能源光伏发电助力建筑电气节能减排探讨[J].电气技术与经济,2025(3):301-303.