

光伏新能源发电系统电气性能优化技术研究

向 雷 黄亚州

中国水利水电第十二工程局有限公司 浙江 杭州 310030

摘 要：为解决光伏发电系统工况适配差、发电效率低、并网电能质量不佳及故障容错能力弱等问题，本文剖析光伏系统电气结构、性能指标及核心影响因素，针对传统控制技术短板，优化设计 MPPT 追踪、电能质量调控、系统稳控及故障容错多项关键技术。通过 MATLAB/Simulink 搭建模型开展多工况仿真验证，结果表明，综合优化方案可显著提升发电效率与并网稳定性，大幅降低谐波畸变率，强化故障穿越能力，可为光伏系统高效可靠运行提供技术支持。

关键词：光伏新能源发电系统；电气性能；优化技术

引言：双碳目标推进下，光伏新能源成为清洁能源发展核心方向，规模化并网应用已成常态。但光伏出力受光照、温度及电网波动影响显著，传统发电控制技术存在追踪精度不足、电能质量差、动态稳定性弱等问题，复杂工况下易出现效率衰减、谐波超标、脱网故障等隐患，难以适配高渗透率光伏并网的严苛标准。基于此，本文聚焦光伏系统电气性能优化，探究高效、稳定的核心控制技术，通过仿真验证优化方案有效性，助力光伏发电系统提质增效、安全并网运行。

1 光伏新能源发电系统电气理论与性能影响因素分析

1.1 光伏发电系统整体电气结构与工作原理

(1) 光伏系统直流侧由光伏组件串并联构成，经汇流箱接入直流配电柜；逆变侧核心为并网逆变器，实现 DC/AC 变换；交流侧包含升压变压器、并网开关及滤波装置，构成完整电能传输链路。(2) 光伏效应指半导体 PN 结受光照激发产生非平衡载流子，在内建电场作用下分离形成光生电动势，实现光能直接转化为直流电能，其转换效率受材料带隙及复合损失制约。(3) 并网运行时，逆变器依据电网相位、幅值要求输出同步交流电，经锁相环跟踪电网频率，通过 MPPT 调节直流电压实现最大功率捕获，多余电能馈入电网，系统按功率调度指令动态调节出力。

1.2 光伏系统核心电气性能指标

(1) 发电效率涵盖组件转换效率、逆变器效率及系统总效率，MPPT 追踪精度反映实际工作点偏离最大功率点的程度，通常要求误差小于 1%。(2) 并网电压偏差应控制在 $\pm 7\%$ 以内，电流谐波总畸变率依据 IEEE519 标准限值低于 5%，各次谐波需满足单次限幅要求，确保电

能质量合格。(3) 系统容错性体现在单一组件故障后的冗余运行能力，故障穿越要求电压跌落时维持并网规定时长，低电压穿越及高电压穿越能力是并网合规性硬性指标。

1.3 光伏系统电气性能主要影响因素

(1) 光照强度变化直接改变短路电流，温度升高导致开路电压下降，云层遮挡引发局部阴影使组件输出特性多峰化，严重干扰 MPPT 寻优过程。(2) 光伏组件老化使串联电阻增大、并联电阻减小，输出特性衰减；逆变器死区效应及开关管压降偏差引入输出波形畸变；直流侧线路及交流侧线损降低整体传输效率。(3) 负载快速波动引发直流母线电压震荡，电网频率偏移和谐波背景污染恶化并网电流品质，无功功率不平衡导致功率因数下降，增加系统损耗^[1]。

1.4 光伏系统电气性能现存核心问题

(1) 复杂工况下传统 MPPT 算法易陷入局部极值，响应速度与跟踪精度难以兼顾，导致发电效率较理论值偏低，尤其在弱光、阴影动态变化时更为突出。(2) 并网电能质量受逆变器调制策略及滤波器参数影响，多次谐波叠加可能超出阈值，电压偏差在弱电网条件下加剧，影响电网侧设备安全运行。(3) 系统动态稳定性受限于控制延时和锁相环响应能力，电网故障时支撑能力不足，高渗透率场景下易引发脱网事故，故障抵御能力难以满足新国标严苛要求。

2 光伏新能源发电系统电气性能关键优化技术研究

2.1 基于改进算法的最大功率追踪优化技术

(1) 传统扰动观察法通过周期性施加电压扰动并

观测功率变化方向以决定下一步扰动策略,原理直观且易于实现,但固定步长导致稳态振荡与动态响应速度之间存在固有矛盾,且在辐照快速变化时易产生功率误判。电导增量法利用电导变化率与负电导相等判定最大功率点,稳态精度优于扰动观察法,但对采样精度和运算速度要求较高,在弱光照条件下电导增量信号微弱,易受噪声干扰导致控制失效,两者均无法应对局部阴影引发的多峰输出问题。(2)融合智能算法的全局最大功率追踪策略采用粒子群优化与电导增量法分层协同架构,粒子群通过群体信息共享机制快速收敛至全局最优峰区,电导增量法在峰区内实施精细定位。引入自适应惯性权重和学习因子动态调节策略,前期增强全局探索能力,后期提升局部开发精度,同时设计简化粒子维度降低计算负担,确保追踪过程快速性与准确性的统一^[2]。(3)复杂遮挡工况下,光伏阵列输出 P-U 特性呈现多峰特征。多点功率峰值规避技术通过分段扫描策略记录各局部峰值点电压功率信息,采用峰值保持与动态阈值判别机制甄别虚假峰值,结合模糊逻辑推理预判全局峰迁移趋势,变步长振荡机制在峰值附近施加微小扰动验证极值真实性,确保系统始终锁定于全局而非局部最大功率点。

2.2 并网电能质量优化控制技术

(1)逆变器无功功率自适应调节技术基于并网点电压偏差程度,构建分段无功-电压下垂特性曲线,设定电压死区范围避免调节频繁动作,死区外根据电压偏移量动态调整无功输出幅值。引入模糊控制器对下垂系数在线修正,适应不同电网阻抗工况,同时兼顾功率因数约束,确保无功支撑与有功输出的协调优化。(2)并网谐波抑制采用 LCL 型滤波器与有源阻尼复合方案,准比例谐振控制器对基波和主要次谐波实现零稳态误差跟踪,重复控制器抑制周期性背景谐波扰动。针对开关频率附近谐波峰值,设计多陷波滤波器串联衰减,组合控制策略将电流总谐波畸变率限制在 3% 以内,各次谐波含量均满足并网标准要求^[3]。(3)电网电压动态偏差校正采用电压外环电流内环双闭环结构,电压外环采用抗积分饱和和 PI 调节器稳定直流母线电压,电流内环引入电网电压前馈抵消电网背景谐波和基波扰动。增加动态偏差补偿环节,依据电压偏差率实时修正参考电压指令,实现电压快速恢复与稳态高精度跟踪的统一。

2.3 系统电流与运行稳定性优化技术

(1)电流前馈补偿控制设计负载电流微分前馈与电网电压前馈双通道结构,将负载突变和电网波动信息提前叠加至电流内环参考值,缩短扰动响应延迟。采用低

通滤波与前馈增益协调匹配消除高频噪声干扰,调整前馈强度系数以兼顾快速补偿与系统稳定性,有效抑制母线电压波动和并网电流冲击。(2)光伏阵列输出电流动态稳定调控方法依据辐照度、温度实时监测信息建立参考电流在线修正模型,采用自适应增益 PID 控制器替代固定参数调节,增益根据功率偏差变化率自动调整。引入虚拟电阻阻尼控制增大系统阻尼比,抑制 LC 谐振峰值,确保输出电流在辐照剧烈波动下平滑稳定^[4]。(3)分布式光伏单元协同稳定运行优化机制采用一致性控制算法实现多单元功率均分与电压支撑协同,各单元通过稀疏通信网络交互电压、电流和功率信息,动态调整下垂系数实现自适应调节。设置电压恢复补偿环节消除母线电压偏差,抑制环流与功率倒灌现象,提升多机并联系统整体阻尼与动态抗扰动能力。

2.4 光伏系统故障容错性能优化技术

(1)常见电气故障类型涵盖电网电压跌落(对称及非对称跌落)、孤岛效应、直流母线过压欠压、逆变器桥臂直通及开关管开路短路等。各故障特征显著:电压跌落表现为幅值骤降伴随相位跳变,孤岛导致频率和相位失步,母线异常直接影响 MPPT 电压基准,桥臂故障引发过流冲击,故障传播路径呈现级联扩散特性。(2)低电压穿越能力优化改造采用正负序分离控制抑制负序过流,故障期间快速切换至限流运行模式,依据跌落深度动态计算无功电流注入量以支撑电网电压恢复。直流侧增设卸荷电路及储能缓冲单元,故障时迅速投入吸收盈余能量,维持母线电压安全范围,确保故障持续期间系统不脱网运行。(3)故障快速识别采用滑动窗快速傅里叶变换结合小波包分解提取电压电流信号的时频域特征量,构建故障特征向量库,通过模式匹配实现故障类型判别与定位,检测时间控制在 5ms 以内。自愈控制策略根据识别结果自动重构控制拓扑,切换至冗余备用通道,同时投入主动阻尼抑制振荡,实现系统无冲击再并网与稳定恢复^[5]。

3 优化方案仿真验证与结果分析

3.1 仿真平台与系统模型搭建

(1) MATLAB/Simulink 仿真环境参数配置:设置变步长 ode23tb 求解器,最大步长限制为 1 μ s,仿真时长设定为 2s 以覆盖稳态与动态过程;功率器件开关频率设为 10kHz,MPPT 控制周期为 20ms,电网频率 50Hz,采样时间设定为 2 μ s 确保高频谐波捕获精度。(2)光伏组件模型采用工程实用单二极管等效电路,引入光照强度和温度输入接口,IV 特性曲线与实测数据误差小于 2%;逆变器模型包含 IGBT 开关管及反并联二极管,

计及死区时间和导通压降；并网电网模型采用三相电压源串联等效阻抗，可注入电压跌落、谐波背景等扰动工况。（3）仿真试验设置标准光照（1000W/m²、25℃）、弱光照（400W/m²）、动态光照突变及局部遮挡四类工况，同时设置电压跌落20%~90%、负载突变等电网扰动场景。评价指标涵盖MPPT追踪效率、并网电流THD、电压偏差率、动态响应时间及故障穿越成功率。

3.2 单项优化技术仿真试验

（1）最大功率追踪优化算法仿真分别运行传统扰动观察法、电导增量法及改进粒子群-电导增量融合算法。结果显示：均匀光照下三种算法追踪效率分别为97.2%、98.5%和99.1%；局部遮挡多峰条件下，传统算法易陷入局部峰值，效率降至82%~86%，融合算法稳定维持在98.6%以上，收敛时间约0.35s。（2）电能质量优化前后数据对比表明：优化前并网电流THD为4.8%，优化后降至2.6%，各次谐波含量均低于0.5%；电压偏差由+6.3%改善至+2.1%以内；动态响应时电压恢复时间由320ms缩短至120ms，功率因数由0.86提升至0.97以上。（3）稳定性与故障容错优化效果验证：电流前馈补偿使负载突变时电流超调量由28%降至9%，调节时间缩短至45ms；低电压穿越测试中，电压跌落至20%时系统成功穿越，无功电流注入响应时间18ms，直流母线电压波动控制在±5%以内。

3.3 综合优化方案整体性能测试

（1）综合优化方案在标准光照、弱光、光照骤变及遮挡四类工况下连续运行测试，MPPT平均追踪效率达98.8%，并网电流THD均低于3.0%，直流母线电压稳态波动小于±2%，各工况切换过渡时间不超过150ms。（2）系统综合性能评估显示：整体发电效率较优化前提升6.3个百分点，日均发电量增加5.8%；电压偏差、频率偏差、谐波畸变等并网指标全面满足GB/T19964标准；动态响应速度提升约62%，故障穿越成功率由82%提高至96%。（3）对比传统固定参数控制方案，综合优化方案在均匀光照下效率提升2.1%，遮挡工况下提升16.4%；电压波动抑制能力增强55%，电流THD降低43%；故障恢复时间缩短为传统方案的58%，各项指标均显示明显优势。

3.4 仿真结果误差分析与方案改进

（1）仿真误差主要源于光伏组件模型参数偏离实际老化特性，等效串联电阻取值偏差引入约1.5%的功率计算误差；离散化采样延迟和PWM调制非线性引入相位滞后约15μs，影响谐波补偿精度；电网阻抗模型简化导致电压偏差校正效果与实际存在偏差。（2）优化方案不足之处：复杂多峰条件下粒子群算法偶发早熟收敛现象，追踪效率在极端遮挡时下降约3%；谐波抑制策略对间谐波的衰减能力不足；协同控制算法在通信延迟超过50ms时稳定性下降，需改进。（3）工程落地建议：模型参数宜配置在线辨识功能实时更新组件特性；控制算法预留硬件加速接口降低计算延迟；增设冗余通信链路和本地备用决策机制以应对通信异常；滤波器参数设计兼顾电网阻抗变化范围，增强适应性。

结束语

本文完成光伏系统电气性能影响因素与现存问题分析，提出算法优化、电能质量调控、稳定性提升及故障容错改进一体化优化方案。仿真试验证实，优化方案可有效解决传统技术短板，全面提升系统发电效率、并网品质与抗扰动能力。后续将针对极端工况算法缺陷、间谐波抑制不足等问题进一步优化，结合工程实际完善控制策略，提升技术落地适配性，为分布式光伏规模化安全高效并网提供实践参考。

参考文献

- [1] 刘辉,于思奇.构网型光伏变流器控制技术及原理综述[J].中国电机工程学报,2025,45(01):277-296.
- [2] 莫静山,宋娜,范凯民.含高比例分布式光伏配电网分区电压调差系数优化方法[J].电力建设,2025,46(08):12-21.
- [3] 杨婧颖,王武林.考虑分布式光伏和储能参与的配电网电压分层控制方法[J].电力科学与技术学报,2023,38(05):111-120.
- [4] 王鹏,李娜.光伏电站集电线路拓扑优化及电气损耗抑制技术[J].电力工程技术,2024,43(01):78-83.
- [5] 陈宇峰.基于改进MPPT算法的光伏系统发电性能优化研究[J].电工技术,2025,13(16):154-158.