

光伏电站并网引发电压波动的电气自动化抑制方案研究

赵付全, 臧文涛

(徐州三新供电服务有限公司邳州分公司)

【摘要】在“双碳”目标驱动下,光伏电站装机规模快速增长并大量并网,但因其输出功率的间歇性与波动性,常引发电网电压波动,威胁电能质量与系统稳定,亟需电气自动化抑制方案破解难题,本研究针对光伏电站并网过程中引发的电压波动问题,深入分析其产生机理与影响因素,系统探讨电气自动化抑制技术与方案。通过结合电力电子技术、智能控制算法及自动化监测系统,提出基于无功补偿、调压控制、储能协同等多维度的电压波动抑制策略,旨在提升光伏电站并网稳定性与电网电能质量,为新能源电力系统的安全可靠运行提供理论与实践参考。

【关键词】光伏电站;并网;电压波动;电气自动化;抑制方案

中图分类号: TM615

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2025.S2.058

Research on the Electrical Automation Suppression Scheme of Voltage Fluctuations Caused by Grid Connection of Photovoltaic Power Plants

ZHAO Fu-quan, ZANG Wen-tao

(Xuzhou Sanxin Power Supply Service Co., Ltd. Pizhou Branch)

【Abstract】Driven by the "dual carbon" goals, the installed scale of photovoltaic power plants has grown rapidly and a large number of grid connections. However, due to the intermittency and volatility of its output power, it often causes power grid voltage fluctuations, threatening the quality and system stability of electricity. There is an urgent need for electrical automation suppression solutions to solve the problem. This study focuses on the voltage fluctuation problem caused by the grid connection of photovoltaic power stations, deeply analyzes its generation mechanism and influencing factors, and systematically explores the electrical automation suppression technology and solutions. By combining power electronics technology, intelligent control algorithms and automated monitoring systems, it proposes a multi-dimensional voltage fluctuation suppression strategy based on reactive compensation, voltage regulation control, energy storage coordination, etc., aiming to improve the grid connection stability of photovoltaic power plants and the power quality of power grid, and provide theoretical and practical references for the safe and reliable operation of new energy power systems.

【Keywords】photovoltaic power station; grid connection; voltage fluctuation; electrical automation; suppression scheme

1 引言

光伏发电是重要的可再生能源,其装机容量持续增长。电气自动化技术凭借实时监测、精准控制等特性及智能决策优势,成为解决光伏电站并网电压波动的关键技术手段。深入研究并提出行之有效的电气自动化抑制方案,对于促进光伏能源高效利用、确保电网安全稳定运行具有重要意义。

2 光伏电站并网电压波动的影响因素

光伏电站并网运行时,电压波动受多重因素耦合影响,其中光照强度与温度变化直接作用于输出功率,是诱发电压波动的首要因素^[1]。研究表明,当光照强度从 $200\text{W}/\text{m}^2$ 增至 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 时,光伏组件输

出功率呈近似线性增长,具体而言,光照每提升 $100\text{W}/\text{m}^2$,功率约增加 $18\%\sim 22\%$;温度每上升 1°C ,晶体硅光伏组件输出电压降低 $0.3\%\sim 0.5\%$,功率同步下降 $0.4\%\sim 0.6\%$ 。这类功率骤变易导致配电网接入后电压骤升或骤降。

以 5MW 光伏电站实测数据为例,晴天光照剧烈变化时,其并网点电压波动幅度可达额定电压的 $\pm 12\%$ 。此外,电网阻抗特性与光伏接入位置同样关键,配电网的线路电阻、电抗等阻抗参数直接影响电压降落。当光伏电站接入配电网末端,若线路阻抗为 $(0.3+j0.4)\Omega/\text{km}$,电站输出功率 1MW 、线路长度 1km 时,仅线路电阻造成的电压损耗就达 300V ;接入点距电源越远,线路阻抗越大,电压波动越显著。

光伏电站容量与电网短路容量的比值,也是电

压波动幅度的核心决定因素。该比值超过15%时,电压波动风险将显著提升。部分农村配电网接入小型光伏电站后,此比值常超20%,致使电压问题频发。

3 光伏电站并网引发电压波动的电气自动化抑制方案

3.1 对智能逆变器进行无功补偿

智能逆变器通过动态无功补偿实现电压稳定控制,核心优势在于快速响应与精准调节能力。支持四象限运行的现代智能逆变器可灵活切换感性与容性无功模式,无功调节范围达 ± 1.0 功率因数^[2]。以三相并网逆变器为例,其额定容量500kVA,可输出 ± 500 kvar无功功率,响应时间 < 5 ms,能在电网电压波动瞬间快速提供无功支撑。当电网电压降至额定值80%时,该逆变器可在10ms内输出400kvar无功功率,使电压在50ms内恢复至额定值95%以上。

实践中,智能逆变器常采用下垂控制策略,依据并网点电压变化实时调节无功输出。以10MW光伏电站为例,配置新型智能逆变器后,设定电压—无功下垂系数为0.05(标么值),当电压从1.0pu降至0.95pu时,逆变器自动增发250kvar无功功率,将电压波动范围控制在 $\pm 1\%$ 内。

分布式光伏集群项目中,多台逆变器可通过通信网络实现协同控制。50台100kW逆变器采用一致性控制策略,无功调节同步误差 < 1 ms,显著提升区域电网电压稳定性。此外,逆变器可结合电网调度指令实现有载调压:夜间光伏功率为0时,通过吸收无功降低电压,使变压器分接头调节次数减少60%。

3.2 储能协同调压

储能系统与光伏电站协同运行,通过充放电动态调节实现电压双向精准控制。以锂电池储能系统为例,某2MW/4MWh储能电站配置于光伏并网点,充放电响应时间 < 100 ms,功率调节精度达 $\pm 1\%$ 。当光伏电站输出功率骤降1.5MW时,储能系统可在200ms内释放对应功率,维持并网点电压平稳,避免电压跌落超出额定范围^[3]。

反之,当电网电压偏高时,储能系统迅速充电吸收过剩电能。实测数据显示,光伏输出过剩导致电压升至1.1pu时,储能系统在300ms内吸收800kW电

能,将电压恢复至1.02pu左右。容量配置需结合光伏电站规模及电压波动控制需求,研究表明,10MW光伏电站配置2MW/4MWh储能系统后,可将电压波动范围由 $\pm 12\%$ 压缩至 $\pm 3\%$ 。

储能系统通常采用分层控制策略:上层根据电网调度指令制定充放电计划,下层通过实时监测电压、功率等20余项参数,动态调整充放电策略执行过程。光储联合电站应用模糊控制算法后,将电压波动均方根值由8.5V降至2.3V,电能质量显著提升。此外,储能系统可与智能逆变器协同工作,当智能逆变器无功补偿达到上限时,储能系统快速介入,实现“无功+有功”联合调节,使电压调节效率提升40%(见图1)。

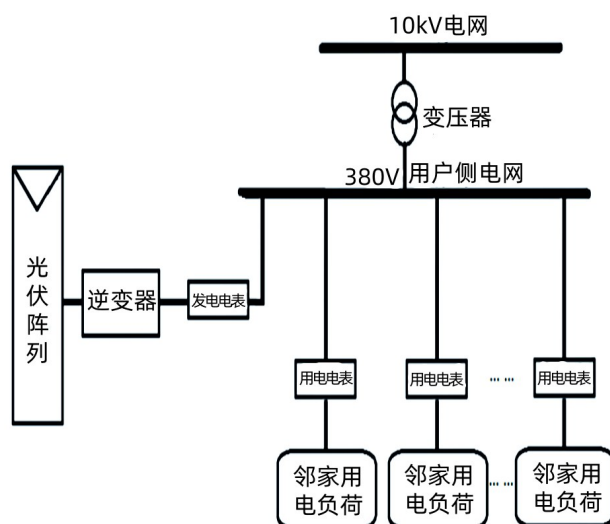


图1 储能协同调压

3.3 分布式电源的集群控制

分布式电源集群控制通过协同优化实现电压统一管控。以区域电网接入的50MW分布式光伏、风电及小水电集群为应用场景,采用多代理系统(MAS)集群控制技术,各电源节点通过5G通信网络实现数据实时交互,通信延迟 < 10 ms。当短时光照骤减导致光伏功率下降15MW时,集群控制系统可在200ms内协调风电增发8MW、小水电增发5MW,并指令部分光伏逆变器增发2Mvar无功功率。

控制策略采用分层分布式架构:主控制中心每500ms下发1次优化指令,子控制器基于本地测量数据实时微调执行。实测显示,系统可将集群内各电源功率分配误差控制在3%以内。基于电压灵敏度矩阵,结合模型预测控制(MPC)技术,可提前10分

钟预测电压变动趋势,据此动态调节各电源输出功率。工业园区应用该技术后,电压合格率从88%提升至99.2%,线路损耗率降低12%。

此外,集群控制可联动需求侧响应:电压偏高时,控制可调节负荷(如电热水器、充电桩)参与调压。试点项目中,通过需求侧响应与分布式电源协同,电压调节耗时缩短50%,硬件投资成本降低约30%(见图2)。

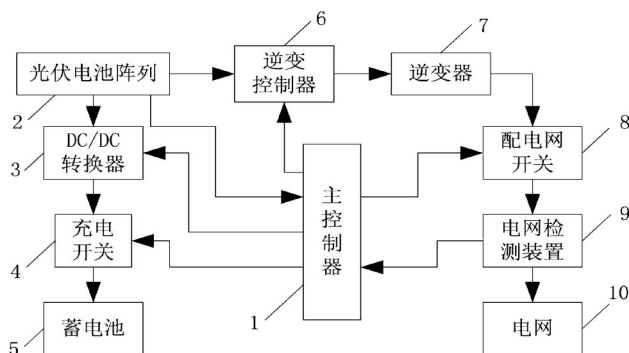


图2 分布式电源集群控制

3.4 柔性输电装置的使用

可控串联补偿器(TCSC)通过调节电路阻抗实现电压优化控制,在长距离光伏外送线路中安装150MvarTCSC装置后,线路传输能力提升30%,电压降落降低40%。其核心参数表现为:容抗调节范围0~150Ω,响应时间<20ms,可随线路潮流实时动态调节。

统一潮流控制器(UPFC)作为功能最完备的FACTS设备,可同时实现有功、无功及电压的协同调控。在220kV枢纽变电站部署UPFC后,成功实现电压偏差<±0.5%的高精度管控,系统故障时能快速提供500Mvar无功支撑,有效提升电网暂态稳定性。

此外,FACTS装置常与智能电表、相量测量单元(PMU)协同工作,依托广域测量系统实现全网电压协同管控。该方案在省级电网应用后,电压合格率提升至99.9%,网损同步降低8%。

4 光伏电站并网引发电压波动的电气自动化抑制方案效果评估

实际案例与仿真测试均验证,电气自动化抑制方案可显著提升光伏电站并网电压稳定性。以10MW光伏电站为研究对象,应用智能逆变器无功补偿、储能协同调压及AI预测自适应调节等综合方

案后,电压稳定性指标显著优化。方案实施前,电站并网点电压波动幅度达±12%,超出国家±7%的标准限值;实施后波动幅度缩减至±2.5%,电压合格率从82%提升至99.2%。

通过智能逆变器无功补偿技术,电站功率因数调节响应时间从100ms缩短至5ms,电压下降瞬间可输出额定容量80%的无功功率;2MW/4MWh储能系统结合AI预测模型,充放电控制误差率<1.5%,有效平抑光伏功率波动。将分布式电源集群控制策略应用于含光伏、风电的50MW区域电网后,借助多代理系统协同,各电源出力分配误差控制在3%内,区域电网线损率降低12%。

柔性输电设备应用方面,光伏外送线路所装150Mvar可控串联补偿器(TCSC),使线路电压降落降低40%,传输能力提升30%。仿真测试显示,该综合方案可将系统电压暂态稳定性提升50%,短路故障下电压恢复时间从200ms缩短至80ms,为光伏电站大规模并网提供了坚实技术支撑。

5 结语

本文通过研究光伏电站并网电压波动特性,提出电气自动化抑制方案并开展验证,有效提升了光伏电站并网运行稳定性。未来需结合电力技术发展持续优化抑制方案,强化其在实际工程中的应用,推动光伏产业与电网协同发展,为我国能源结构转型及“双碳”目标实现贡献力量。

参考文献

- [1] 高翔. 储能技术在光伏电站并网发电系统中的应用[J]. 内蒙古科技与经济, 2025 (13): 124-127.
- [2] 泮旭, 黄永章, 范子渊, 徐佳旺, 李晨阳, 许国瑞. 基于MGP的光伏电站启动并网控制及优化方法[J]. 智慧电力, 2025, 53 (7): 61-68.
- [3] 梁伟. 集中式并网光伏电站中电气自动化技术运用[J]. 电力设备管理, 2025 (14): 143-145.