

新能源光伏电站 AVC 系统应用研究

李晓宇

国能亿利能源有限责任公司电厂

DOI:10.12238/etd.v6i10.17162

[摘要] 新能源光伏电站作为清洁能源的重要支柱,其稳定运行与高效管理对能源结构转型至关重要。AVC(自动电压控制)系统作为提升光伏电站并网性能的核心技术,通过实时监测与动态调节无功功率,有效抑制电压波动,增强电网稳定性。本文聚焦AVC系统在光伏电站的应用,分析其控制策略、优化方法及实际运行效果,旨在探索提升系统响应速度与调节精度的技术路径,为新能源大规模并网提供理论支撑与实践参考。

[关键词] 新能源光伏电站; AVC系统; 应用

中图分类号: TM615 文献标识码: A

Research on the Application of AVC System in New Energy Photovoltaic Power Plants

Xiaoyu Li

Guoneng Yili Energy Co., Ltd. Power Plant

[Abstract] As a crucial pillar of clean energy, the stable operation and efficient management of new energy photovoltaic power plants are essential for the transformation of the energy structure. The Automatic Voltage Control (AVC) system, as a core technology to enhance the grid-connected performance of photovoltaic power plants, effectively suppresses voltage fluctuations and improves grid stability through real-time monitoring and dynamic regulation of reactive power. This study focuses on the application of the AVC system in photovoltaic power plants, analyzing its control strategies, optimization methods, and practical operational effects. The aim is to explore technical pathways for improving system response speed and regulation accuracy, providing theoretical support and practical references for the large-scale grid integration of new energy sources.

[Key words] New Energy Photovoltaic Power Plant; AVC System; Application

引言

随着新能源的快速发展,光伏电站装机容量持续攀升,其对电网的稳定运行影响日益显著。自动电压控制(AVC)系统作为保障电网电压质量、提升光伏电站并网性能的关键技术,能够有效解决光伏出力波动导致的电压越限问题。本文通过深入研究AVC系统在新能源光伏电站中的具体应用,分析其控制原理、实施难点及优化策略,旨在为提高光伏电站的电压调控能力、促进新能源高效消纳提供科学依据。

1 新能源光伏电站AVC系统理论基础

1.1 光伏电站并网特性分析

(1) 光伏发电的间歇性与波动性: 光伏发电依赖光照强度、温度等自然条件,白天光照变化会导致出力波动,多云、阴天时出力骤降,夜间则无出力,这种间歇性与波动性会冲击电网电压稳定,增加电压调节难度。(2) 电压/无功功率耦合关系: 光伏电站并网运行时,输出功率变化会改变线路无功功率流向与大小。

根据电路原理,线路阻抗存在有功和无功分量,无功功率变化会直接影响节点电压,电压偏差又会反作用于无功功率交换,二者紧密耦合,需协同控制。

1.2 AVC系统基本原理

(1) 电压无功控制目标: 首要目标是保障电压合格率,使并网点电压维持在规定范围;其次通过优化无功功率分布降低电网网损,提升运行经济性;同时避免无功设备频繁投切,减少机械损耗,实现设备寿命管理。(2) 分层控制架构: 厂站层负责接收调度指令、分析全站数据并制定控制策略;间隔层接收厂站层指令,控制对应间隔设备,反馈运行状态;设备层为执行层,包括逆变器、无功补偿装置等,按间隔层指令调节无功输出^[1]。

1.3 关键技术需求

(1) 实时数据采集与通信技术: 依托SCADA系统采集电压、电流等常规数据,通过PMU获取高精度同步相量数据,需保障通信网络低延迟、高可靠,确保数据实时传输,为控制决策提供支撑。

(2)控制策略算法:传统PID算法响应快、易实现,适用于常规工况;智能优化算法(如粒子群、遗传算法)能应对复杂工况,实现多目标优化,提升控制精度与适应性。(3)与AGC/调度系统的协同控制:需与AGC系统协调有功、无功控制,避免相互干扰;同时接收调度中心指令,结合电站实际工况调整控制策略,保障电网整体稳定运行。

2 新能源光伏电站AVC系统设计与实现

2.1 系统总体架构

(1)硬件组成:监控主机作为系统核心,采用高性能工业计算机,具备数据存储、运算分析及人机交互功能,可实时显示电站电压、无功功率等关键参数;通信网络采用双层架构,上层以光纤以太网实现监控主机与调度中心的数据传输,下层通过工业总线(如RS485)连接各执行机构,保障数据传输的稳定性与实时性;执行机构涵盖光伏逆变器、静止无功发生器(SVG)、并联电容器组等,负责接收控制指令,精准调节无功输出以稳定电网电压。(2)软件功能模块:数据采集模块通过与硬件设备通信,实时采集并网点电压、电流、光照强度、设备运行状态等数据,经滤波、校验后存储至数据库;策略计算模块基于采集数据,结合预设控制目标与算法,动态生成无功调节策略,如判断是否投切电容器组、调整逆变器无功出力比例;指令下发模块将计算得出的控制指令转化为设备可识别的信号,通过通信网络传输至执行机构,同时实时反馈指令执行结果,形成闭环控制。

2.2 控制策略优化

(1)基于模型预测控制(MPC)的动态调节:通过建立光伏电站及电网的数学模型,预测未来短时间内(如5-15分钟)的电压变化趋势,结合系统约束条件(如设备调节范围、响应速度),提前制定多步控制方案,避免电压出现大幅波动,相比传统PID控制,能有效提升电压调节的前瞻性与稳定性。(2)多目标优化算法:采用改进的粒子群优化算法或遗传算法,以电压合格率(目标值 $\geq 99.5\%$)和运行经济性(降低网损、减少设备能耗)为优化目标,构建多目标函数,通过权重分配平衡两目标优先级,在保障电压合格的同时,减少无功设备投切次数与电能损耗,提升电站整体运行效益^[2]。(3)考虑天气因素的自适应控制策略:整合气象站实时数据(光照强度、温度、云层覆盖情况)与历史数据,建立天气-出力关联模型。当预测到光照骤降(如乌云过境)时,提前增大无功补偿装置出力,预防电压跌落;光照稳定时段则采用常规控制策略,实现控制策略随天气变化的自适应调整,增强系统对复杂工况的适应性。

2.3 通信与安全设计

(1)与电网调度系统的数据交互协议:采用IEC61850标准协议实现站内设备与调度系统的无缝通信,该协议支持面向对象的数据建模,可快速传输设备状态、测量值等信息;同时兼容104规约,作为备用通信协议,适用于部分老旧调度系统,保障数据交互的兼容性与可靠性,确保调度中心实时掌握电站运行状态并下发控制指令^[3]。(2)网络安全防护机制:数据传输层面采用SSL/TLS加密技术,对监控主机与调度中心、执行机构间的通信

数据进行加密处理,防止数据被窃取或篡改;权限管理采用分级授权机制,将系统用户分为管理员、运维人员、监控人员等角色,不同角色仅拥有对应操作权限(如管理员可修改控制参数,监控人员仅能查看数据),同时记录用户操作日志,便于追溯异常操作,保障系统运行安全。

3 AVC系统在新能源光伏电站的实证研究

3.1 案例电站概况

(1)电站规模、地理位置、设备参数:案例电站位于我国西北地区某光伏产业园区,总装机容量200MW,采用“全额上网”运营模式,共布设55万片445W单晶硅光伏组件,配套20台10MW集中式逆变器。并网点电压等级为110kV,接入当地220kV变电站,站内配置2套20Mvar静止无功发生器(SVG)及4组10Mvar并联电容器组,年均有效光照小时数约2800h,光照资源丰富但昼夜温差大、天气突变频发。(2)原有电压控制方式及存在问题:原有电压控制采用“人工手动+固定阈值”模式,即运维人员根据监控数据手动投切电容器组,且仅当并网点电压超出 $10\text{kV} \pm 5\%$ 范围时才进行调节。该方式存在三大问题:一是响应滞后,电压异常时人工操作需30-60分钟,易错过最佳调节时机;二是调节精度低,固定阈值控制导致电压在阈值边缘频繁波动,合格率仅92.3%;三是无功设备投切频繁,每月电容器组投切次数超80次,设备机械损耗严重,年均维护成本增加约15万元。

3.2 实验方案设计

(1)测试场景:覆盖三类典型工况,晴天场景选取夏季晴天(日均光照强度 $800-1000\text{W}/\text{m}^2$),测试系统在稳定光照下的电压控制精度;阴天场景选取春季多云天(光照强度波动范围 $200-700\text{W}/\text{m}^2$,每30分钟波动一次),验证系统对间歇性光照的适应性;故障工况模拟110kV线路单相接地故障(持续0.5秒),测试系统在电网扰动下的电压恢复能力,每种场景连续测试72小时,采集每秒数据。(2)对比指标:核心对比指标包括电压波动范围(考核并网点电压偏离110kV额定值的最大幅度)、响应时间(从电压越限到执行机构动作的耗时)、无功补偿容量(单位时间内SVG与电容器组的总无功输出量),同时辅助监测设备投切次数、网损率等衍生指标,以全面评估AVC系统性能^[4]。

3.3 实验结果分析

(1)AVC投入前后电压质量对比:投入AVC系统后,晴天场景电压波动范围从 $\pm 3.5\%$ 缩小至 $\pm 1.2\%$,阴天场景从 $\pm 5.8\%$ 缩小至 $\pm 1.8\%$,故障工况下电压恢复时间从12秒缩短至2.3秒,电压合格率从92.3%提升至99.7%,远超国家电网要求的98%合格标准,彻底解决电压频繁越限问题。(2)与调度指令的跟踪误差分析:调度中心每日下发8次电压控制指令(设定并网点电压目标值),AVC系统指令跟踪误差均控制在 $\pm 0.5\text{kV}$ 以内,平均误差 0.23kV ,误差率仅0.21%,远低于原有手动控制的 $\pm 2\text{kV}$ 误差范围,实现与调度系统的精准协同,满足电网调度对电压的精细化管理要求。(3)经济性评估:AVC系统通过优化无功功率分布,站内110kV线路网损率从3.2%降至2.1%,年均减少线损电量约220万kWh,按当地脱硫煤电价 $0.38\text{元}/\text{kWh}$ 计算,年增收约83.6万元;同

时,无功设备月均投切次数从80次降至15次,设备维护周期从6个月延长至12个月,年均节省维护成本12万元,综合年经济效益超95万元。

4 新能源光伏电站AVC系统的挑战与优化方向

4.1 实际应用中的问题

(1) 通信延迟对控制精度的影响: 当前AVC系统依赖SCADA/PMU数据传输与调度指令交互,若通信网络受干扰(如偏远地区信号弱、工业总线拥堵),易产生50-200ms延迟。当光照骤变或电网故障时,延迟会导致控制指令下发滞后,使电压调节偏差增大,极端情况下可能引发电压越限时长延长2-3倍,削弱系统对动态工况的响应能力。(2) 分布式光伏集群的协调控制难题: 分布式光伏电站分布零散、单机容量小(多为10-50MW),且接入配电网电压等级低(10-35kV)。现有AVC系统多针对集中式电站设计,难以实现多集群间无功功率的全局优化分配,易出现部分集群无功过剩、部分不足的“不均衡”问题,导致区域电网电压波动范围扩大至±4%以上,影响整体供电稳定性^[5]。(3) 储能系统与AVC的联合优化不足: 部分电站虽配置储能系统(如锂电池储能),但未与AVC形成协同控制机制—AVC调节无功时未考虑储能充放电状态,储能削峰填谷时也未配合无功补偿。这种“独立运行”模式浪费储能的电压支撑潜力,且在负荷低谷、光照充足时段,易出现无功与有功调节冲突,降低电站运行效率。

4.2 未来发展趋势

(1) 基于人工智能的AVC自适应控制: 引入深度学习(如LSTM神经网络)与强化学习算法,通过海量历史数据(光照、电压、负荷)训练控制模型,使AVC能自主学习工况变化规律,动态调整控制参数。例如,预测到极端天气时提前优化策略,无需人工干预即可实现精度±0.8%以内的电压控制,提升系统智能化水平。(2) 源网荷储一体化协同控制架构: 构建“光伏电源+电网调度+可

控负荷+储能”联动的AVC控制体系,将用户侧柔性负荷(如工商业用电)、储能充放电纳入电压调节范畴。当电压偏低时,除调用无功补偿装置外,可联动储能放电、降低可控负荷功率,形成多维度调节合力,进一步缩小电压波动范围。(3) 虚拟电厂(VPP)场景下的AVC扩展应用: 在VPP框架下,AVC系统将从单电站控制升级为多能源聚合调控工具,整合分布式光伏、风电、储能等资源,以“虚拟电源”身份参与电网调压。例如,电网电压偏高时,VPP-AVC可协调各电站吸收无功;电压偏低时统一释放无功,实现跨区域、多类型能源的协同调压,提升电网整体韧性。

5 结束语

综上所述,新能源光伏电站AVC系统的应用对于提升电网电压稳定性、优化电能质量具有显著作用。通过实际运行验证,AVC系统能有效应对光伏出力波动带来的电压挑战,增强电站并网的可靠性与适应性。未来,随着技术的不断进步,AVC系统将进一步实现智能化、精准化调控,为新能源的大规模接入与高效利用提供坚实保障,推动能源结构向更加清洁、低碳的方向转型。

[参考文献]

- [1]魏世贵,刘双.AGC/AVC在光伏电站的应用[J].江苏电机工程,2020,32(02):35-37.
- [2]姜润丰.新能源光伏电站光伏组件比选及经济性分析[J].价值工程,2025,44(10):26-28.
- [3]李亮,袁晶晶.新能源光伏电站接入配电网技术分析[J].光源与照明,2025,(02):124-126.
- [4]文乐,耿庆庆,李剑武,等.新能源光伏电站AVC系统应用研究[J].粘接,2024,51(11):121-124.
- [5]孙莉,刘晓航.AVC系统在新能源光伏电站中的应用研究[J].中国高新科技,2021,(19):88-89.