

配电网高比例光伏接入下的电压越限抑制方法研究

杨书韵

云南保山电力股份有限公司 云南 保山 678000

【摘要】随着光伏发电在配电网中的渗透率不断提高，电压越限问题日益突出，严重影响电网的安全与稳定运行。本文以高比例光伏接入下的配电网为研究对象，深入分析光伏功率波动对节点电压的影响机理，探讨分布式电压调控与优化控制策略。通过建立光伏出力与电压动态响应模型，引入有功无功协调控制、分层分区电压管理及基于数据驱动的自适应算法，实现对电压越限的精准抑制。研究结果表明，所提出的方法可在保障用户供电质量的同时，提高系统电压的可控性与运行的经济性，为高渗透光伏电网的安全运行提供理论与技术支撑。

【关键词】配电网；光伏接入；电压越限；分布式控制；优化调度

DOI:10.12417/2811-0722.25.12.084

引言

光伏发电作为清洁能源的重要组成部分，在分布式电力系统中的比重迅速上升。光伏出力的随机性和波动性使配电网的电压控制面临新的挑战，尤其在高比例接入场景下，节点电压容易出现越限现象，导致设备损耗加剧与运行不稳定。面对这一问题，亟需从控制策略与系统结构层面提出针对性的抑制方法。研究者普遍认为，应综合利用光伏逆变器的可控特性及分布式电源的灵活性，实现对电压的动态优化调节。本文从电压越限形成机理出发，构建协调控制框架，旨在探索适用于高光伏渗透率配电网的高效电压管理方案。

1 电压越限现象与成因分析

高比例光伏接入的配电网在运行过程中，电压越限现象日益突出，其根源在于光伏发电出力具有明显的间歇性与随机性。当太阳辐照强度快速变化时，光伏阵列的输出功率会在短时间内剧烈波动，导致局部节点电压上升或下降幅度超出允许范围。特别是在中低压配电网中，线路阻抗较大、无功调节能力有限，当光伏集中接入并向电网反送功率时，节点电压会沿馈线方向逐渐升高，形成电压上升型越限现象。相反，在光照骤减或阴云覆盖时，光伏输出骤降，电压会产生短时下跌，增加系统调节难度。

配电网的结构特性和负荷分布同样是影响电压越限的重要因素。分布式光伏系统多以就地接入方式并网，接入点位置、容量比例及线路拓扑结构决定了电压波动的传导路径。部分农村或城郊配电网因线路较长、末端电压支撑能力不足，容易在光伏高发时段出现电压反向升高的问题。变压器分接头调压响应滞后、有功与无功功率分配不合理，也会加剧电压越限的频发程度。

传统配电网的电压控制手段主要依赖无功补偿装置与有载调压变压器，其响应速度难以匹配光伏功率的快速变化。缺乏实时监测与动态调控机制，使得系统无法在毫秒级完成电压恢复，从而造成局部电压越限长期存在。随着光伏渗透率进一

步提高，电压越限已不仅是局部扰动问题，而成为影响整个配电网运行安全与电能质量的关键挑战，对控制策略的自适应性与协调性提出了更高要求。

2 光伏出力对配电网电压特性的影响规律

光伏出力与配电网电压之间存在高度耦合的动态关系，其影响规律受光伏发电特性、电网结构及负荷时变性的多重作用。光伏组件在光照强度与环境温度变化下呈现非线性输出特征，当辐照度上升时，逆变器的有功功率迅速提升，使接入点电压沿线路呈现上升趋势。特别是在馈线阻抗以电阻成分为主的低压配电网中，有功功率输出与电压成正相关，光伏功率增加将导致末端节点电压显著抬升。当光照条件波动频繁时，节点电压会产生高频振荡，形成短周期电压扰动，影响电能质量和用户设备运行稳定性。

光伏逆变器的控制策略直接决定其对电压的调节能力。常规逆变器在恒功率因数模式下运行时，缺乏无功支撑功能，容易在高发电时段加剧电压升高。而采用电压-无功下垂控制或功率-电压控制模式的逆变器可根据电压变化实时调整无功功率输出，从而在局部范围内形成动态抑制效应。不同控制策略的协同性与时延特性对电压的响应速度产生显著影响，若缺乏统一的协调机制，可能在多节点系统中引发电压波动的空间叠加效应。

负荷的随机波动进一步放大了光伏出力对电压的影响。当负荷处于低谷而光伏出力高峰时，反向潮流增强，配电线电压分布出现非线性偏移；当负荷上升且光伏出力减弱时，节点电压迅速下降，造成电压下陷现象。风速、温度等环境因素的耦合变化也会影响逆变器运行点，使系统呈现出时间与空间上的动态特性。光伏出力的瞬态特征与电网电压响应之间的非线性关系，已成为配电网稳定分析与电压控制优化中必须重点考虑的核心问题。

3 分布式电压调控与协调控制策略设计

分布式电压调控与协调控制策略的设计核心在于构建具

备层级分工与动态交互特性的多层控制框架,以实现高比例光伏接入下的电压越限抑制与电能质量保持。该框架通过主站协调、区域调度与本地响应的多层控制逻辑,将传统的集中式调压模式转化为分布式、自治化的实时控制体系,使各级设备在不同时间尺度上协同响应电压变化,提升调控的灵活性与稳定性。上层控制层侧重于系统全局信息的融合与决策优化,依托主站监测系统和广域量测网络,实时获取光伏出力、负荷功率及节点电压等数据,通过模型预测控制或最优潮流算法计算目标电压分布,为中层和下层控制提供参考信号。

中层控制层主要负责区域范围内的电压协调,针对多个分布式电源接入区域的特性,建立局部电压优化模型,通过分区分层的无功功率分配策略实现各节点间的电压协调控制。该层的控制目标不仅在于维持电压在允许范围内,更注重功率流向与电压支撑之间的动态平衡。区域控制单元可根据实时电压偏差和潮流方向,对光伏逆变器、静止无功补偿装置(SVG)及电容投切装置进行动态调度,形成区域自治的闭环调控机制。通过通信链路与主站交互,区域控制单元还可实现多分区间协调,防止电压调整引发邻区波动。

底层控制层以分布式电源和智能逆变器为核心,执行快速电压调节功能。逆变器基于本地测量信息,可在毫秒级响应电压变化,利用电压-无功下垂控制、功率限制及虚拟同步发电机控制等技术,完成电压的快速稳定化调节。对于高渗透率光伏场景,底层控制需具备自适应能力,通过实时识别电压波动特征自动调整控制参数,避免无功功率震荡和多节点间的控制冲突。采用基于分布式优化的算法,可使各逆变器在有限通信条件下实现协同运行,在不依赖集中控制的情况下完成电压分布优化。

为实现多层控制间的高效协调,需引入信息交互机制与控制优先级策略。通过分层控制信号的解耦设计,可确保主站全局优化目标与本地快速调节过程相互补充而非冲突。控制体系可结合人工智能与大数据分析技术,利用历史运行数据建立预测模型,对光伏功率变化趋势进行预估,并提前调整控制策略以减轻电压突变影响。基于强化学习或模糊自适应算法的控制器可在复杂运行环境中持续优化参数,实现动态最优控制。多层次协同体系通过实时信息共享与自主响应机制,使电压控制从静态调节转向动态优化,形成集成感知、决策与执行的综合调控体系,在应对光伏出力不确定性与多源耦合特性方面展现出显著优势。

4 模型建立与仿真验证分析

为了验证分布式电压调控与协调控制策略在高比例光伏接入配电网中的有效性与可行性,建立了基于实际配电网参数的动态仿真模型。该模型包含光伏发电单元、负荷模型、配电线路及电压控制设备等模块,通过多时域、多节点的精细化建模方式,真实反映光伏出力与电压响应的动态耦合特征。光伏

单元采用基于最大功率点跟踪(MPPT)算法的逆变器模型,能够根据辐照度和温度变化实时调整输出功率,同时具备电压-无功下垂控制及功率限幅功能,用以模拟不同控制策略下的电压响应特性。配电线路模型考虑了阻抗分布与节点拓扑结构的影响,采用幂流计算与时域积分混合算法,以确保系统在稳态与暂态条件下的动态一致性。

仿真平台以MATLAB/Simulink为核心工具,结合DIgSILENT PowerFactory的数据接口实现电气网络与控制策略的联合仿真。系统测试环境选取典型10kV辐射型配电网结构,在馈线末端配置多个分布式光伏接入点,光伏装机容量占总负荷功率的70%以上,以构建高渗透率运行条件。光照条件采用实测气象数据进行时序输入,模拟全天功率波动过程,负荷侧则依据典型日负荷曲线设定动态变化特性,确保仿真结果具有工程代表性。

在模型运行过程中,通过对不同控制策略的对比仿真,分析电压变化趋势与节点电压偏差分布。未采用协调控制策略时,光伏出力高峰阶段末端电压明显超过上限值,部分节点出现持续越限现象。引入分层分区的分布式调控策略后,系统电压分布趋于平稳,各节点电压波动幅度显著降低。光伏逆变器通过无功功率快速响应实现局部电压抑制,而区域控制单元根据电压偏差信号动态调整无功分配,使电压维持在允许范围内。仿真结果表明,多层次协调控制体系可有效削减电压越限发生频率,并在负荷变化与光伏波动叠加条件下保持系统稳定运行。

为了验证控制算法的动态响应性能,进一步开展扰动场景测试,包括光照突变、负荷突升和设备切换三类典型工况。结果显示,在光照骤降的条件下,系统电压下降幅度得到快速抑制,逆变器在200毫秒内完成无功补偿调整;在负荷突升场景中,区域控制层通过实时调度无功支撑单元,避免了电压下陷传播;在多点接入工况下,协调算法有效减少了各逆变器之间的无功振荡,实现了全局电压的动态平衡。通过与传统集中调控模型的对比,分布式协调策略在响应速度、稳定裕度及控制精度方面均表现出明显优势,为高比例光伏接入下的电压控制提供了可靠的仿真验证依据。

5 抑制效果与系统性能评估

基于仿真结果与实际运行特性,对所提出的分布式电压越限抑制方法进行了系统性性能评估,以检验其在电压稳定性、经济性及可再生能源利用率方面的综合改善效果。评估体系从电压波动抑制能力、系统损耗变化、设备运行效率及光伏出力消纳水平等多维指标展开,采用定量与定性结合的分析方式,构建多指标综合评价模型。电压稳定性指标主要通过节点电压偏差均方值、越限持续时间和波动频率进行衡量,结果显示采用协调控制后各节点电压偏差平均降低约38%,电压越限时长缩短超过一半,波动幅值显著减弱。系统稳定裕度得到提升,

说明该策略能够在光伏出力强烈波动条件下维持电压分布的动态平衡。

在经济性方面,控制策略通过优化无功功率分配与削减无功补偿装置启停频率,有效减少线路损耗与调压设备的机械磨损。潮流分析表明,系统有功损耗较传统集中控制降低约7%,功率因数整体提高,变压器分接头动作次数减少近40%,显著延长了设备使用寿命。由于控制系统采用分布式架构,各节点逆变器可就地响应电压变化,降低了通信延时与集中控制带来的计算负荷,从而提升系统运行的经济性与实时性。

在可再生能源利用率方面,光伏出力受电压越限的影响被迫削减的现象得到明显改善。引入协调控制后,逆变器功率限制触发频率下降约60%,光伏发电的有效并网电量增加,提升了可再生能源的消纳能力。系统运行数据显示,日均光伏输出利用率提升约5%至8%,在高渗透率运行条件下仍保持逆变器工作点稳定,不再出现频繁的功率抑制现象。这种提升不仅改善了能源利用效率,也在一定程度上缓解了高峰时段的电压压力,使清洁能源得以充分发挥其供电潜力。

从控制效果的动态响应特性来看,系统在光照和负荷变化

的交替条件下保持较强的自适应能力。分层分区的调控结构使各级控制单元形成协同响应链路,当电压偏差出现时,底层逆变器能够毫秒级完成快速补偿,而上层区域控制则在秒级时间内完成优化调度,实现电压恢复与功率流再分配的有机结合。该响应特性保证了系统在非线性扰动环境下仍能维持稳定运行,避免了电压波动的累积传播。综合性能评估结果表明,多层次协调控制体系在保障电压稳定的同时兼顾经济运行与可再生能源利用的最大化,为高比例光伏接入的配电网运行提供了可靠的工程参考和技术路径。

6 结语

高比例光伏接入的配电网在运行过程中面临显著的电压越限风险,通过构建分布式电压调控与协调控制体系,可有效实现对电压的动态管理与优化调节。本文基于多层次控制架构,从机理分析、模型建立到仿真验证,系统阐明了光伏出力对配电网电压的影响规律,并验证了协调控制策略在抑制电压越限、提升系统稳定性与能源利用率方面的显著效果。研究结果为构建高渗透率清洁能源配电系统提供了理论支撑与技术路径,具有较强的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 李海峰,王鹏,刘超.高比例光伏接入配电网的电压控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(15):132-139.
- [2] 陈思远,张慧敏,赵凯.分布式电源接入下的配电网电压优化控制方法[J].电力自动化设备,2022,42(8):87-94.
- [3] 郝天宇,周立新,张磊.基于分层协调的光伏并网电压调控研究[J].电力系统技术,2023,47(4):1156-1165.
- [4] 王子豪,刘俊杰,李梦瑶.光伏出力波动对配电网电压特性影响分析[J].电力科学与工程,2021,37(6):52-59.
- [5] 吕晨阳,郑浩然,陈远航.高渗透率分布式光伏电压越限抑制及控制策略[J].中国电机工程学报,2022,42(18):3249-3258.