

分布式电源接入对配电网电压质量的影响及治理措施

周海艳

宁夏天净元光电力设计有限公司 宁夏 银川 750000

摘要: 分布式电源接入配电网后, 因出力间歇性、潮流双向性等特点, 易引发电压偏差、波动、谐波污染、三相不平衡等问题。具体表现为末端电压超限、电压闪变频发、谐波畸变率上升、三相电压失衡。治理措施包括配置SVG/SVC等无功补偿装置、部署储能系统平抑波动、采用Q-V下垂控制等智能逆变器策略、优化网架结构, 并结合政策激励推动技术落地, 以保障电压质量与系统稳定性。

关键词: 分布式电源接入; 对配电网电压质量的影响; 治理措施

引言: 随着能源转型加速, 分布式电源(如光伏、风电)在配电网中的渗透率持续攀升。这类电源具有出力间歇、位置分散、双向潮流等特性, 在提升清洁能源利用效率的同时, 也对传统配电网的电压质量构成挑战, 引发电压越限、波动、谐波污染及三相不平衡等问题。如何平衡分布式电源的灵活接入与配电网的稳定运行, 成为智能电网建设的关键课题。本文从影响机理、定量分析及治理策略三方面展开研究, 为构建高弹性配电网提供理论支撑与实践参考。

1 分布式电源接入对配电网电压质量的影响机理

1.1 潮流分布改变

(1) 传统配电网潮流呈单向分布, 由变电站母线向用户端逐级输送电能, 潮流方向固定且可预测。而分布式电源(如光伏、风电)接入后, 当出力大于本地负荷时, 多余电能会反向输送至上级电网, 形成“源-荷”双向潮流, 即反送电现象。例如, 正午居民台区光伏集群出力高峰时, 电能会从台区低压侧反向流向配电变压器高压侧, 打破传统潮流格局。(2) 双向潮流导致节点电压变化显著: 一方面, 分布式电源接入点越靠近配电网末端, 反送电时末端电压升高越明显, 如农村偏远台区接入光伏后, 正午电压可能超出额定值5%-10%; 另一方面, 线路电压降不再呈单调递减趋势, 受反向潮流影响, 部分线路会出现电压升, 造成线路电压降分布不均, 增加电压调控难度。

1.2 电压波动与闪变

(1) 分布式电源出力具有强间歇性, 光伏受光照强度(如云层遮挡)影响, 功率波动频率可达秒级; 风电受风速突变影响, 短时间内功率变化幅度可达额定值的20%-30%。这种出力骤变会导致配电网有功功率失衡, 进而引发并网点电压快速波动, 波动幅度通常在 $\pm 2\%$ - $\pm 5\%$, 超出国标允许范围。(2) 储能系统充放电、电

动汽车快充等冲击性负荷, 会产生短时大功率冲击电流(如储能快充电流可达额定电流的3-5倍)。电流突变会在线路阻抗上产生瞬时压降, 导致电压快速起伏, 形成电压闪变, 尤其在负荷密集且分布式电源渗透率高的区域, 闪变频率可达10-20次/分钟, 影响精密设备运行^[1]。

1.3 谐波污染与谐振问题

(1) 分布式电源依赖逆变器、换流器等电力电子设备并网, 这些设备在能量转换过程中会产生3、5、7次等特征谐波电流。谐波电流注入配电网后, 会在线路阻抗上产生谐波电压, 导致电压畸变, 总谐波畸变率(THD)可能从传统电网的3%升至8%以上, 干扰继电保护装置正常工作。(2) 分布式电源的滤波电容、配电网线路电感与电网中的并联电容器组, 易构成LC谐振回路。当谐波频率与回路谐振频率接近时, 会引发串联或并联谐振, 导致局部节点电压异常升高(可能达额定值的1.5倍), 严重时烧毁变压器、电容器等设备。

1.4 三相不平衡与孤岛效应

(1) 大量单相分布式电源(如居民户用光伏)多接入配电网单相线路, 导致三相负荷分配不均。例如, 某台区A相接入多户光伏, B、C相接入负荷少, 会造成三相电压偏差超过2%, 引发电动机发热、照明设备亮度不均等问题。(2) 分布式电源与电网断开后若继续运行(孤岛效应), 由于缺乏电网支撑, 电压和频率会随出力、负荷变化大幅波动, 电压偏差可能达 $\pm 10\%$ 以上, 频率偏离50Hz ± 0.2 Hz范围, 不仅损坏用户设备, 还会对电网检修人员构成触电风险。

1.5 无功功率与电压调节挑战

(1) 不同类型分布式电源无功特性差异大, 如异步风力发电机运行时需吸收约10%-20%额定功率的无功, 若未及时补偿, 会导致并网点电压降低; 而光伏逆变器若未启用无功调节功能, 会造成配电网无功功率分布失

衡,威胁电压稳定性。(2)传统电压调节装置适应性下降:有载调压变压器调节周期长(分钟级),无法应对分布式电源引发的快速电压波动;固定电容器组只能分档补偿,易导致无功过补或欠补,难以匹配分布式电源出力的动态变化。

2 分布式电源接入对电压质量影响的定量分析

2.1 仿真模型构建

(1)当前主流采用MATLAB/Simulink或DIgSILENT搭建含分布式电源的配电网模型。MATLAB/Simulink凭借丰富的电力系统模块库,可快速构建光伏、风电等分布式电源的等效模型,并实现与配电网线路、负荷的协同仿真;DIgSILENT则在配电网潮流计算与暂态分析中优势显著,能精准模拟分布式电源接入后的电网动态运行过程,为定量分析提供可靠模型基础。(2)参数设置需贴合实际配电网特性,线路阻抗依据电缆或架空线型号确定,采用正序阻抗参数反映线路功率损耗;负荷特性按用户类型设置为恒功率、恒阻抗或恒电流负荷,模拟不同用电场景;分布式电源出力曲线需结合实际监测数据,如光伏出力参考典型日光照强度变化曲线,风电出力匹配风速时序数据,确保模型参数的真实性与仿真结果的准确性。

2.2 关键指标评估

(1)选取电压偏差、电压波动率、谐波畸变率(THD)、三相不平衡度作为核心评估指标。电压偏差通过计算节点实际电压与额定电压的差值占比,衡量电压偏离标准值的程度;电压波动率统计单位时间内电压的变化幅度,反映电压稳定性;THD依据GB/T14549标准,计算电压中各次谐波分量的方均根值与基波分量方均根值的比值,评估谐波污染程度;三相不平衡度通过负序电压与正序电压的比值,量化三相电压失衡情况。

(2)对比不同治理措施的改善效果时,需在相同仿真场景下测试。如接入静止无功发生器(SVG)进行无功补偿,可监测到电压偏差缩小10%-20%,电压波动率降低30%以上;配置储能系统后,能平抑分布式电源出力波动,使电压波动率控制在2%以内,同时减少谐波传递,THD可从5%降至3%以下,通过数据对比直观体现治理措施的有效性。

3 分布式电源接入下电压质量的治理措施

3.1 无功补偿与电压调节技术

(1)静态无功补偿器(SVC)与动态无功发生器(SVG)是常用的无功补偿装置。SVC通过晶闸管控制电抗器、电容器的投切,实现无功功率的静态调节,适用于负荷波动较平缓的场景,可有效抑制电压偏差,在

配电网末端接入SVC后,能将电压偏差控制在 $\pm 5\%$ 的合格范围内。SVG则基于电力电子变流器技术,可快速跟踪无功功率变化,动态输出容性或感性无功,响应时间仅为毫秒级,能应对分布式电源出力骤变引发的电压波动,例如在风电场站附近配置SVG,可将电压波动率降低40%以上,显著提升电压稳定性^[2]。(2)分布式电源逆变器的无功控制策略是改善电压质量的关键手段,其中Q-V下垂控制应用广泛。该策略依据节点电压偏差自动调节逆变器的无功输出,当节点电压高于额定值时,逆变器减少无功注入甚至吸收无功;当电压低于额定值时,增加无功输出,通过“电压-无功”的下垂特性实现分散式电压调节。此外,还可结合功率因数控制、恒无功控制等策略,例如光伏逆变器采用Q-V下垂控制后,能实时响应配电网电压变化,使接入点电压波动幅度缩小至2%以内,避免电压越限。

3.2 储能技术的作用

(1)不同类型的储能设备对电压波动的平抑效果各有侧重。蓄电池储能能量密度高、充放电寿命长,适合平抑中长时间尺度(分钟至小时级)的电压波动,如光伏出力日内变化导致的电压缓慢升降,配置蓄电池储能后,可将电压波动幅度控制在1.5%以下。超级电容器功率密度高、响应速度快,能应对毫秒至秒级的电压骤变,如储能系统充放电冲击引发的电压闪变,其可在数十毫秒内完成功率补偿,有效抑制闪变现象。飞轮储能则兼具功率密度与能量密度优势,适用于高频次、短时间的电压波动平抑,且维护成本低,在工业配电网中应用潜力显著。(2)储能系统与分布式电源的协同控制策略是提升治理效果的核心。通过充放电调度优化,可实现“电源-储能-负荷”的协同运行:当分布式电源出力过剩时,储能系统充电,避免反送电导致的电压升高;当出力不足时,储能放电补充功率,防止电压下降。例如,光伏电站与储能系统采用“峰谷互补”调度策略,白天光照充足时储能充电,傍晚光照减弱时储能放电,不仅平抑光伏出力波动,还能使配电网电压维持在额定值 $\pm 3\%$ 的范围内。此外,还可通过协同控制实现无功-有功联合调节,进一步提升电压稳定性^[3]。

3.3 智能控制与保护技术

(1)分布式电源的智能并网技术可保障电网安全运行。孤岛检测技术能快速识别电网停电状态,避免分布式电源持续供电形成孤岛,常用的主动式检测(如注入扰动信号)与被动式检测(如电压频率监测)结合,可将检测时间缩短至200毫秒以内,确保及时切除分布式电源,消除安全隐患。快速保护装置如微型断路器、故障

电流限制器,能在故障发生时迅速切断故障回路,防止故障扩大导致电压崩溃,例如在分布式电源接入点配置快速保护装置后,故障切除时间可控制在50毫秒以内,减少电压异常持续时间。(2)基于大数据的电压预测与动态调节系统可实现前瞻性治理。通过采集分布式电源出力数据、负荷数据、气象数据等,利用机器学习算法(如LSTM、随机森林)预测未来数小时的配电网电压变化趋势,提前制定调节策略。例如,预测到次日中午光伏出力骤增可能导致末端电压升高时,提前调度储能系统充电、无功补偿装置准备吸收无功,避免电压越限。同时,动态调节系统可实时整合各监测点数据,通过云端平台下发控制指令,实现多设备协同调节,使配电网电压合格率提升至99.5%以上。

3.4 配电网规划与优化设计

(1)分布式电源接入点选址与容量优化是从源头降低电压质量影响的关键。选址时优先选择负荷密度高、电压水平偏低的节点,如配电网中后段,利用分布式电源出力支撑周边电压,避免接入电压已偏高的近端节点。容量优化需结合负荷特性与电网承载能力,通过潮流计算确定最大允许接入容量,例如采用粒子群优化算法、遗传算法等,在满足电压偏差、谐波等指标要求的前提下,实现分布式电源容量最大化利用,避免因容量过载导致电压越限^[4]。(2)多分段、多联络的网架结构能显著改善电压分布。通过将配电网线路分段,配置分段开关,可实现故障区段隔离,减少故障对电压的影响范围;增加联络线路则能实现负荷转移与功率互供,当某一区域分布式电源出力不足时,可通过联络线从其他区域获取功率,维持电压稳定。例如,传统辐射式配电网改造为“三分段四联络”结构后,电压分布更均匀,末端电压升高幅度降低50%以上,且电压恢复速度提升30%。

3.5 政策与标准支持

(1)分布式电源并网技术规范为治理措施提供技术依据。GB/T19964《光伏发电站接入电力系统技术规定》明确了光伏电站的电压调节、谐波控制、孤岛保护等要

求,例如规定光伏电站并网点电压偏差应符合GB/T12325要求,谐波畸变率(THD)不得超过5%,为分布式电源接入后的电压质量治理提供了标准指引。此外,GB/T29319《分布式电源接入配电网技术要求》、DL/T1578《风电并网运行控制规范》等标准,进一步细化了不同类型分布式电源的并网参数与控制要求,确保治理措施合规有效。(2)激励机制能促进治理措施的推广应用。政府可通过补贴政策降低治理成本,如对配置储能、无功补偿装置的分布式电源项目给予投资补贴,或对采用智能控制技术的配电网改造项目提供财政支持。电价政策方面,实行分时电价、辅助服务电价,鼓励储能系统参与调峰调频,通过电价差提升储能项目收益;对电压质量达标率高的分布式电源运营商给予电价奖励,激发其治理积极性。例如,某地区对配置SVG的光伏项目给予20%的投资补贴,使该地区光伏接入点电压合格率从85%提升至98%,有效推动了治理措施落地。

结束语

分布式电源的规模化接入为配电网带来清洁低碳转型机遇,但也对电压质量管控提出更高要求。本文系统分析了潮流双向化、出力间歇性等引发的电压偏差、波动和谐波问题,并提出无功补偿、储能协同、智能控制及网架优化等综合治理方案。未来需深化“源-网-荷-储”协同调控技术研究,完善标准体系与激励机制,推动分布式电源与配电网的友好融合,为构建安全、高效、清洁的现代能源体系提供坚实保障。

参考文献

- [1]李国栋,王崢.分布式电源接入对配电网运行指标的影响评估[J].低压电器,2021,(06):79-80.
- [2]陈莹.含分布式电源的配电网电压无功补偿优化研究[J].中国新技术新产品,2025,(03):44-46.
- [3]刘海涛,张爽.分布式电源接入光伏配电网电能分层模糊调度研究[J].电网与清洁能源,2025,(06):74-75.
- [4]王欣.考虑灵活性分布式电源的配电网故障定位方法研究[J].电气开关,2025,(08):72-73.