

电气分布式光伏多点并网对配电网电能质量影响及治理研究

石 骏

华润电力（湖北）销售有限公司 湖北 武汉 430063

摘 要：分布式光伏多点并网对配电网电能质量影响显著。本文系统分析了多点并网对电压、谐波、功率三方面质量的影响机理：光伏出力随机性导致节点电压越限与三相不平衡，逆变器非线性特征引发谐波叠加与谐振，大量有功注入造成功率因数下降与供需失衡。在此基础上，提出逆变器侧主动治理、电网侧被动治理、配电网结构优化及储能协同治理四类技术，并从技术标准、监测评估、运行管理三维度构建综合管控策略，为提升多点并网配电网电能质量提供系统方案。

关键词：分布式光伏；多点并网；配电网；电能质量

引言：随着“双碳”目标推进，分布式光伏在配电网中大规模多点并网已成趋势。然而，光伏出力的间歇性与随机性，叠加多点分散接入的累积效应，导致配电网电压越限、谐波畸变、功率因数下降等电能质量问题日益突出，严重制约电网安全高效运行。现有研究多聚焦单点并网影响，对多点并网叠加扰动机理及系统性治理研究不足。本文围绕多点并网电能质量影响机理，探讨逆变器治理、电网补偿、结构优化及储能协同等技术，并提出综合管控策略，为配电网高质量消纳分布式光伏提供理论与技术支撑。

1 分布式光伏并网与配电网电能质量基础理论

1.1 分布式光伏发电系统结构

分布式光伏发电系统是适配配电网低压侧并网的分布式发电装置，整体结构简洁、模块化特征显著，主要由光伏组件、并网逆变器、汇流设备、配电保护装置及监控单元五部分构成。光伏组件为核心发电单元，通过光伏生特效应将太阳能直接转化为直流电，多以阵列形式规模化布置于建筑屋顶、厂区空地等场景。汇流设备负责将多组光伏组件输出的低压直流电汇总，减少线路损耗，为逆变环节提供稳定输入。并网逆变器是系统能量转换与并网核心设备，可将直流电转换为适配配电网的工频交流电，同时承担并网同步、功率调节等基础功能^[1]。配电保护装置包含断路器、熔断器、防雷装置等，可在过压、过流、孤岛等异常工况下快速切断电路，保障设备与电网安全。监控单元可实时采集发电功率、电网电压、电流等运行数据，实现系统运行状态的实时监测与远程调控，是分布式光伏智能化运行的重要支撑。

1.2 配电网电能质量评价指标

配电网电能质量是衡量电网供电可靠性与供电品质的核心标准，依托多项国家标准指标实现量化评价，核心指标涵盖电压、谐波、功率、频率四大维度。电压质量指标包含电压偏差、电压波动与闪变、三相电压不平衡度，直接反映电网供电电压的稳定性，是用户用电设备安全运行的基础保障。谐波质量指标以总谐波畸变率和各次谐波含有率为核心，主要表征电网波形的畸变程度，谐波超标会加剧设备发热、损耗，干扰电力计量精度。功率质量指标涵盖功率因数、有功功率与无功功率平衡度，反映电网电能的利用效率，功率因数过低会增加电网线路损耗，降低配电网输电能力。频率质量指标以电网频率偏差为主，保障电网频率稳定是电力系统同步运行的关键。另外，电压暂降、短时中断等暂态指标也是重要评价依据，多维度指标协同构成了配电网电能质量的完整评价体系，为光伏并网后的电能质量检测与治理提供依据。

2 分布式光伏多点并网对电能质量的影响机理分析

2.1 对电压质量的影响

分布式光伏多点并网直接打破配电网电压平衡。白天光照充足时，大量有功功率反向注入电网，抵消线路损耗，造成节点电压抬升，正午峰值时段多节点功率叠加使电压越上限问题更严重；傍晚或阴雨天光伏出力骤降，电网恢复单向供电，线路末端电压偏低，出现越下限情况。光照瞬时波动引发电压频繁闪变，多点叠加效应加剧波动幅度。此外，各节点出力不均衡造成三相电压分配不均，增大不平衡度，严重影响配电设备稳定运行。

2.2 对谐波质量的影响

多点并网是配电网谐波污染加剧的重要诱因。光伏

逆变器为非线性电力电子设备,交直流转换中产生3、5、7次等高次谐波,单点并网时可被电网消纳,不会超标。多点分散并网时,大量逆变器同频谐波相互叠加耦合,使整体谐波畸变率大幅升高^[2]。不同节点逆变器型号、工况各异,谐波频次幅值不同,易引发谐波谐振,进一步放大污染。谐波超标导致设备发热损耗加剧、缩短寿命,干扰计量装置精度,影响精密设备正常运行,严重破坏电网波形质量。

2.3 对功率质量的影响

多点并网严重扰动配电网功率平衡,降低功率质量与利用效率。光伏以输出有功为主,无功调节能力弱,大量有功无序注入改变原有功率配比,导致功率因数大幅下降。用户侧多为感性负荷需无功支撑,光伏挤占有功通道造成无功供需失衡,线路无功损耗显著增加。光伏出力间歇性使并网节点有功频繁波动,多点分散性让全网调控难度大增。大发时段有功冗余出现功率倒送,出力不足时易造成供需缺口,导致电网运行经济性大幅下降。

3 分布式光伏多点并网电能质量治理技术

3.1 逆变器侧主动治理技术

逆变器侧主动治理技术是从扰动源头改善电能质量的核心技术,通过优化并网逆变器控制策略,实现谐波抑制、电压调节与功率优化,适配多点并网治理需求。该技术摒弃了传统逆变器仅实现能量转换的单一功能,通过升级嵌入式控制算法,赋予逆变器主动调控能力。针对谐波污染问题,采用有源滤波控制技术,实时检测电网谐波分量,通过逆变器输出反向补偿电流,抵消电网中的高次谐波,从源头降低谐波畸变率。针对电压波动与越限问题,引入自适应电压无功控制策略,可根据并网节点电压实时数据,动态调节无功功率输出,精准补偿电压偏差,抑制电压波动。通过优化最大功率点跟踪算法,弱化光伏出力瞬时波动对电网的冲击,避免功率剧烈震荡。多点并网场景下,各逆变器可独立完成本地电能质量治理,无需依赖电网侧设备,响应速度快、调控精度高,可有效分散治理压力,实现多点扰动的源头精准管控,大幅提升并网电能质量。

3.2 电网侧被动治理技术

电网侧被动治理技术是依托电网加装辅助治理设备,对光伏并网引发的电能质量问题进行末端补偿与修正,是当前配电网应用最广泛的治理手段。常用设备包含静止无功发生器、有源电力滤波器、无功补偿电容器、稳压器等,适配各类电能质量扰动问题的治理。其中,有源电力滤波器主要用于滤除电网谐波、抑制谐波谐振,可实时跟踪电网谐波变化,动态完成谐波补偿;静止无

功发生器可快速响应电网无功功率波动,精准调节无功输出,稳定电网电压,解决多点并网引发的电压偏差、功率因数偏低问题^[3]。线路稳压器可针对配电网末端电压波动、高低压越限问题进行实时调压,保障全网电压稳定。被动治理设备无需改造光伏机组,安装灵活、适配性强,可针对多点并网带来的叠加扰动问题进行集中治理,弥补逆变器侧主动治理的局限性。该技术运维简单、可靠性高,可与主动治理技术协同配合,全方位改善配电网电能质量。

3.3 配电网结构优化措施

配电网结构优化是从电网架构层面根治多点并网电能质量问题的根本性措施,通过优化电网拓扑、线路布局与网架结构,提升配电网光伏消纳与扰动抵御能力。针对分布式光伏分散并网导致的潮流紊乱、电压失衡问题,可优化配电网网架结构,完善环网供电架构,替代传统单辐射供电模式,实现电网功率灵活调配,均衡各支路潮流负荷。同时合理规划光伏并网点位,避免光伏集中扎堆并网,根据配电网各台区负荷承载力、线路容量,科学分配并网规模,杜绝局部功率冗余问题。另外,优化配电线路参数,更换老旧、线径过小的输电线路,降低线路阻抗与传输损耗,减少电压衰减与功率损耗。通过调整配电变压器分接头、优化台区负荷配比,适配光伏多点并网后的双向潮流工况。合理增设配电网分支线路,分散并网负荷压力,提升电网供电稳定性与冗余度,从架构层面提升配电网对分布式光伏的兼容能力。

3.4 储能系统协同治理

储能系统协同治理是依托储能设备的充放电特性,平抑光伏出力波动、平衡电网功率,实现电能质量的柔性治理,适配多点并网复杂工况。储能系统具备双向功率调节能力,可实现能量的储存与按需释放,有效解决光伏发电间歇性、随机性带来的电能质量问题。在光照充足、光伏出力过剩时段,储能系统吸收电网冗余有功功率,避免电网功率倒送、电压抬升超标;在光照不足、光伏出力低谷时段,储能系统释放储存电能,补充电网功率缺口,稳定电网电压与功率平衡。储能系统可配合电网完成无功补偿,动态调节电网功率因数,抑制电压波动与闪变。多点并网场景下,分布式储能可分散布置于各光伏并网台区,与光伏机组协同运行,实现分区治理、精准调压调功,也可通过集中式储能统筹调控全网功率。该治理方式柔性强、调控精度高,可大幅降低光伏并网对配电网的扰动,提升电网运行稳定性与经济性。

4 电能质量综合管控策略

4.1 技术标准与规范

完善的技术标准与规范是分布式光伏多点并网电能质量管控的基础依据,可实现光伏并网、设备运维、质量治理的标准化、规范化管理。当前电力行业已出台配电网电能质量、分布式光伏并网接入等相关国家标准,明确了电压偏差、谐波畸变率、功率因数等核心指标的限值要求。针对多点并网的特殊性,需进一步细化专项技术规范,完善分散式光伏并网的接入标准,明确不同台区、不同并网规模的光伏接入容量、并网接口技术要求。同时统一并网逆变器、储能设备、治理装置的设备技术标准,规范设备选型、安装调试、检修维护流程,杜绝不合格设备并网引发的电能质量问题。制定光伏并网电能质量治理技术规范,明确主动治理、被动治理、储能协同治理的适用场景与技术标准,统一治理效果考核指标。通过健全全流程技术标准体系,填补多点并网管控的规范空白,为电能质量检测、治理、考核提供权威依据,实现光伏并网的合规化、标准化运行。

4.2 监测与评估体系

构建全方位、智能化的电能质量监测与评估体系,是精准把控光伏多点并网电能质量状态、实现精细化管理的关键手段。依托物联网、大数据、电力传感技术,在各光伏并网节点、配电台区、变电站布设智能监测终端,实时采集电压、谐波、功率、频率等电能质量数据,实现全网电能质量状态的全天候动态监测。搭建云端数据监测平台,对采集的数据进行汇总分析、实时预警,精准定位电能质量超标点位、扰动类型与扰动成因,解决多点并网扰动分散、难以排查的问题。建立科学的电能质量评估模型,结合实时监测数据、光伏运行数据、电网负荷数据,对配电网电能质量水平进行量化评估,预判不同时段、不同并网规模下的电能质量变化趋势。定期开展电能质量专项评估,形成评估报告,为治理方案优化、并网规模规划、电网改造升级提供数据支撑,实现从被动治理到主动预判、精准管控的转变。

4.3 运行管理优化

运行管理优化是保障分布式光伏多点并网配电网电能质量持续稳定的重要举措,通过完善管理制度、优化运行

策略、强化运维管控,实现电网高效稳定运行。首先,建立光伏并网台账管理制度,对辖区内所有分布式光伏的装机容量、并网位置、设备参数、运行状态进行统一备案,实现并网设备的精细化台账管控。其次,优化电网日常运行调度策略,结合光照预测、负荷预测数据,提前制定光伏并网功率调度方案,合理调控各节点光伏出力,平抑电网功率波动,规避电压、功率超标问题^[4]。同时,建立常态化运维巡检机制,定期对光伏并网设备、电能质量治理装置、配电线路进行检修维护,及时排查设备故障与运行隐患,保障治理设备、并网设备正常运行。另外,完善异常工况应急管理机制,针对电能质量超标、电网扰动等问题,制定快速处置流程,提升电网应急调控能力,全方位提升配电网光伏并网运行管理水平。

结束语

本文系统分析了分布式光伏多点并网对配电网电压、谐波、功率质量的影响机理,提出了涵盖逆变器主动治理、电网侧被动补偿、网架结构优化及储能协同的多元治理技术体系,并从标准规范、智能监测、运行管理三方面构建了综合管控策略。多点并网电能质量治理需源头与末端协同、技术与管理并重,未来应结合人工智能与数字孪生技术,实现电能质量的实时感知、精准预判与智能调控,推动配电网向高比例光伏友好型电网转型,助力新型电力系统建设。

参考文献

- [1]农灿.基于集群划分的含分布式光伏配电网有功-无功多目标优化[J].青海电力,2023,42(4):10-17.
- [2]刘科研,盛万兴,马晓晨,等.基于多种群遗传算法的分布式光伏接入配电网规划研究[J].太阳能学报,2021,42(6):146-155.
- [3]缪月森,王强钢,李云,等.基于ACGAN和多参数规划的分布式光伏容量域刻画方法[J].电工电能新技术,2025,44(7):116-128.
- [4]杨晴,罗平,李俊杰.考虑配电网三相不平衡度的分布式光伏并网容量规划[J].杭州电子科技大学学报(自然科学版),2023,43(6):42-51.