

分布式光伏并网对配电网电压稳定性的影响及调控策略

刘光辉 楼颖锋

国网绍兴供电公司 浙江绍兴 312000

摘要: 分布式光伏的规模化并网, 重塑了配电网潮流方向以及无功平衡特性, 对配电网电压稳定性也产生了巨大影响。文章系统分析了光伏渗透率、出力波动引发的电压偏差、暂态波动等问题机理, 并从逆变器主动调节、储能协同支撑和设备联动三个维度, 提出了有效的调控策略, 并结合IEEE33节点与实际42节点系统对调控策略的应用效果进行了验证。结果显示, 调控策略能够有效降低电压越限率和网损, 从而为分布式光伏的大规模并网下的电网稳定运行提供可靠支撑。

关键词: 分布式光伏; 配电网; 电压稳定性; 影响; 调控策略

前言

分布式电源是一种新型发电方式, 主要是借助太阳能、风能等清洁能源发电。“双碳”目标驱动下, 我国分布式电源呈现出了爆发性增长的态势, 截至2024年底, 分布式光伏发电总装机容量达到了3.7亿千瓦, 占全国发电总装机的11%左右。然而, 随着分布式光伏电源接入配电网的比例不断增加, 其对配电网电压稳定性的影响也逐渐显现, 分布式光伏本身出力间歇性与反送功率特性打破了传统配电网单向潮流的格局, 使得电压越限、波动加剧等问题变得越发突出, 需要建立起高效可靠的调控机制, 保障配电网的稳定可靠运行。

一、分布式光伏并网的意义

分布式光伏并网是能源领域转型的关键举措, 其核心价值在于重新构筑能源供给模式, 实现电能的就近生产、就近消纳。分布式光伏能够充分挖掘工业厂房、农业大棚等闲置空间资源, 将太阳能转化为电能并直接供给周边用户, 减少电能传输环节的线损, 提高能源利用效率。分布式光伏并网可以补充配电网供电能力, 缓解电网负荷压力, 并且在主电网发生故障时, 分布式光伏能够作为应急电源独立运行, 保障关键设施的基本用电。

“双碳”目标下, 分布式光伏并网有着突出的环保意

义, 能够减少二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物等污染物的排放, 改善空气质量。从用户角度分析, 分布式光伏并网后, 能够通过自发自用、余电上网模式, 降低电费支出, 将多余电量出售给电网, 还可以获得较为稳定的收益。从社会层面, 分布式光伏并网能够带动光伏组件制造、安装运维等产业链条的发展, 创造大量就业岗位, 推动智能配电网技术升级, 减少对进口能源的依赖性^[1]。

二、分布式光伏并网对配电网电压稳定性的影响

分布式光伏并网对配电网电压稳定性的影响, 主要体现在静态电压偏差、动态电压波动和谐波畸变叠加三个方面:

(一) 静态电压偏差

光伏出力和负荷的功率平衡会直接决定节点电压的静态分布, 其核心影响因素主要表现在渗透率和接入位置。依照电网企业分布式电源承载力评估通用数据, 当光伏渗透率从10%提高到50%时, 380V配网末端的节点电压偏差会从2.1%增加到7.8%, 超过《电能质量供电电压偏差》(GB/T 12325-2008)规定的 $\pm 7\%$ 上限。

不同电压等级接入的光伏, 对配电网电压偏差的影响有着明显差异, 10kV接入的工商业光伏接入点距离配电网主干线, 电压偏差较380V用户光伏低, 35kV大型工商业光伏在满发时段, 会导致区域电压提升0.05-0.08pu, 需要借助无功调节的方式, 抑制电压越限风险。

(二) 动态电压波动

光伏出力本身存在波动性, 其会通过功率-电压耦合关系, 引发动态电压波动。依照电力行业实测数据, 正午时分, 如果出现云层快速遮挡太阳的情况, 光伏出力会在0.2s内从90%降低到30%, 并网电压随之下降,

作者简介:

刘光辉 (1984.08-), 男, 汉族, 山东省莱州市, 学士, 工程师, 研究方向: 配网规划建设。

楼颖锋 (1988-), 男, 汉族, 浙江省诸暨市, 学士, 工程师, 研究方向: 变电主网施工安装。

波动频率可以达到5Hz, 超过《电能质量 电压波动和闪变》(GB/T 12326-2008)规定的2Hz限值^[2]。

电压波动传导的特性和配电网拓扑结构存在密切关联, 辐射型配电网中, 波动从接入点到末端表现出逐步增大的趋势; 含有分支线路的配电网中, 电压波动会在节点位置产生叠加效应, 导致局部电压波动率显著提升。逆变器低电压穿越过程中, 无功注入策略会导致暂态电压波动加剧, 如果没有做好优化控制, 电压波动标准差可能较正常值高2倍以上。

(三) 谐波畸变叠加

光伏逆变器电力电子开关操作时, 会产生特征谐波, 其在叠加配电网背景谐波的情况下, 会进一步加剧电压畸变。依照工业配电网电能质量监测数据, 10MW级光伏并网后, 配电网3次、5次谐波电压畸变率从原本的1.2%和0.8%提升到3.5%和2.1%, 叠加后总畸变率接近《电能质量 公用电网谐波》(GB/T 14549-1993)规定的5%上限。

当光伏渗透率升高时, 谐波放大风险也会随之增大。光伏渗透率超过30%时, 逆变器脉冲宽度调制引发的谐波会和线路等效阻抗产生谐振耦合^[3], 导致局部谐波电压畸变率升高, 加速配电系统中异步电机的绝缘老化。不同品牌逆变器的谐波相位差异会引发相应的随机叠加效应, 扩大谐波畸变率的波动范围, 进一步增加电能质量管控难度。

三、配电网电压稳定性调控策略

想要有效缓解分布式光伏并网对配电网电压稳定性的负面影响, 必须针对静态电压偏差、动态波动及谐波畸变三类核心问题, 构建分层协同的调控体系。在光伏渗透率超过30%的情况下, 单纯依靠传统的调压设备, 并不能满足电压管控需求, 而借助逆变器无功调节、储能动态支撑与传统设备联动的组合策略, 能够形成基础防控-应急响应-全局优化的完整治理链路。

(一) 逆变器主动调控策略

逆变器是光伏并网的核心接口设备, 其具备无功调节能力, 可以为配电网电压调控提供技术支撑:

(1) 基础调节模式优化。一是固定功率因数模式, 适用于10kW及以下光伏系统, 借助参数优化的方式, 对功率因数进行合理设定, 以此来完全避免电压越限问题, 满足配电网末端对于电压管控的要求。二是电压-无功控制模式, 其主要是利用电压-无功下垂特性, 完成实时调节, 通过对电压阈值、调节死区、下垂斜率等的合理调节, 能够减少配电网电压越限次数, 降低线损^[4]。

(2) 智能化调节升级。一是动态功率因数模式, 主要针对工商业负荷波动场景, 采用双核微控制单元, 可以将响应时间控制在50ms以内, 功率因数范围可以按照时段分段设置, 如在负荷高峰期, 功率因数设定为0.9-1.0, 在负荷低谷期, 功率因数设定为0.95-1.0。可以通过适当提升配电网平均功率因数的方式, 降低无功损耗。二是四象限运行模式, 通过d-q轴解耦控制实现有功与无功独立调节, 高比例光伏场景下, 当中午电压升高时吸收无功, 光伏满发时发出无功, 以此来降低弃光率, 提升光伏消纳能力。

(二) 储能系统协同调控策略

储能系统可以借助功率转换系统中的PQ控制模式, 提供动态无功支持, 其核心主要体现在基于电压状态的自适应调节。实践中, 需要建立电压智能感知因子的综合表征稳定性状态

$$\gamma(t) = \omega_1\gamma_1(t) + \omega_2\gamma_2(t) + \omega_3\gamma_3(t) \quad (1)$$

公式中, $\gamma(t)$ 表示电压智能感知因子, $\gamma_1(t)$ 表示电压幅值偏移指标, $\gamma_2(t)$ 表示电压裕度分量, $\gamma_3(t)$ 表示波动速率分量, 权重系数 $\omega_1=\omega_2=0.4$, $\omega_3=0.2$ 。当 $\gamma(t) < 10$ 时, 储能系统无动作; 当 $30 \leq \gamma(t) < 80$ 时, 依照基础值100%输出无功; 当 $\gamma(t) \geq 80$ 时, 启动最大无功容量。

(三) 设备系统联动调控策略

利用配电网现有的设备, 如有载调压变压器(On-load tap changer, OLTC)、电容器组等, 建立起传统设备-新能源设备协同调控体系, 从而实现全局电压优化。

(1) 有载调压变压器联动优化。有载调压变压器和光伏下垂控制协同, 能够切实提升配电网电压调节的连续性, 借助FB函数光滑化处理调压约束, 在42节点配电网中, 分季节训练数据驱动误差补偿模型后, 线损计算精度提升明显, 对比全负荷样本模型, 误差可以降低60%左右。在运用有载调压变压器进行联动优化时, 需要将调压间隔设置为5min, 电压死区 $\pm 1\%$, 通过与逆变器协同的方式, 能够将电压偏差控制在2%以内。

(2) 分区协调控制策略。采用电压灵敏度指标进行分区划分, 计算节点电压对光伏无功的变化量, 以阈值0.02pu/Mvar确定分区边界。区间内使用节点配对调节, 区间则基于交替方向乘子算法, 对无功补偿量进行优化。IEEE33节点系统测试表明, 该策略对于电压波动的抑制率可以达到91%, 求解时间不超过1s。

(3) 二阶锥松弛无功优化。可以将配电网非凸潮流方程转化为二阶锥凸优化问题, 以线路损耗最小化作为

目标函数^[5]，约束条件应包含节点电压上下限、逆变器无功出力限值等。在IEEE33节点系统仿真中，优化后高电压节点电压出现了明显下降，配网总线损从原本的0.4103MW降低到了0.0247MW，降幅达到94%，优化问题的求解时间仅需0.65s。当电压调节幅度增大时，需要配合储能补偿逆变器的容量限制，但是即便如此，网损降幅依然可以达到45%。结合台区级协同控制逻辑，可以形成OLTC档位调节+逆变器无功调压+有功削减三级治理链路，通过测试并网点电压敏感度分配调节量，实现对电压越限的精准治理。

四、策略有效性验证

为了验证该策略体系的有效性，从仿真系统测试与实际工程应用两个维度，对比不同调控方案的电压越限率、网损及响应速度指标，进一步论证所提策略在高比例光伏接入场景下的适用性与优越性。

(一) 仿真系统测试

以IEEE33节点标准配电网系统（电压等级10kV，总负荷3.72MW+2.3MVAr）作为测试对象，将光伏渗透率设定为40%，对比不同调控策略的性能指标，结果如表1所示。

表1 不同调控策略性能指标

调控策略	电压越限率 (%)	网损 (MW)	响应时间 (ms)
无调控	12.3	0.4103	-
仅电压-无功控制	3.8	0.1872	50
逆变器+储能协同	0.6	0.0514	20
分区协调+二阶锥优化	0	0.0247	640

可以明确，分层协同调控策略（分区协调+二阶锥优化）能够完全消除电压越限，降低网损，很好地验证了策略的有效性及优越性。同时，为了验证集群场景下调控策略的适配性，增加高渗透率场景对比（光伏渗透率60%），采用电压管家+二阶锥优化条件策略^[6]，能够将电压标准差控制在0.009pu，无功环流消除率达到了100%。

(二) 实际工程应用

某乡镇级100kW光伏电站光伏渗透率为55%，采用逆变器+储能协同控制策略后，电压波动标准差从原来的0.032pu降低到了0.008pu，电压越限次数也从之前的日均10次降到了0次。某城镇1MW工商业光伏电站本身包含非线性负载，运用动态无源滤波+谐波补偿调控模式，电压谐波总畸变率从12%降低到了2.5%，电机维护

成本减少了40%。

国网某省在73个试点台区同时应用了台区大脑+多元协同算法，实现了配电变压器的零过载，过电压治理效能提升了50%，电压越限控制能力显著增强，85%的低压光伏项目通过接入单元，做到了协同控制^[7]。

结语

总而言之，分布式光伏并网会对配电网电压稳定性产生显著影响，其影响主要体现在静态电压偏差、动态电压波动与谐波畸变三个方面。当光伏渗透率达到30%以上时，需要采取多级协同调控机制来保障电压控制效果。实践中，光伏逆变器无功调节可以构筑起配电网电压控制的基础防线，电压-无功控制模式适用于户用场景，动态功率因数模式则适用于工商业场景，储能系统协同控制可以将应急响应压缩到毫秒级，电压智能感知因子与多工况策略能够显著提升调控精度，分区协调与二阶锥优化则从系统层面，实现了全局最优控制。仿真分析和工程验证数据均表明，调控策略体系能够有效消除电压越限，降低网损，为高渗透率光伏配电网的稳定可靠运行提供技术支撑。未来发展中，应加强对极端天气下多设备协同容错控制的研究，搭配低数据样本条件下的数据物理融合建模，进一步提升调控策略在不同场景中的适配性。

参考文献

- [1] 邓煌. 配电网中分布式光伏并网对电压稳定性的影响研究[J]. 建筑与施工, 2025, 4(16): 72-73.
- [2] 李天奇. 配电网中分布式光伏并网对电压稳定性的影响研究[J]. 工程建设与发展, 2025, 4(10): 172-174.
- [3] 朱国栋. 分布式光伏电站并网对区域电网电压与电流稳定性的影响[J]. 通信电源技术, 2023, 40(14): 97-99.
- [4] 李建斌, 舒征宇, 赵化达. 计及静态电压稳定性的配电网分布式光伏承载能力双层规划方法[J]. 国外电子测量技术, 2025, 44(4): 1-9.
- [5] 王军, 董济康, 田福银. 配电网中分布式光伏并网对电网的影响[J]. 灯与照明, 2025, 49(3): 86-88.
- [6] 马宁, 姜玉茹, 马欢欢, 等. 配电网中分布式光伏并网对电网影响的研究[J]. 模型世界, 2024(16): 82-84.
- [7] 洪晓爱. 大规模分布式光伏接入对配电网电能质量的影响研究[D]. 山东: 山东大学, 2024.