

分布式光伏并网的电能质量影响及治理措施

龙登新

三亚多益实业开发有限责任公司 海南三亚 572000

摘要：随着“双碳”战略目标的深入推进和可再生能源技术的快速发展，分布式光伏发电系统因其清洁、灵活、靠近负荷中心等优势，在全球范围内得到广泛应用。然而，大量分布式光伏电源接入配电网后，其固有的间歇性、波动性和逆变器非线性特性对传统电网的电能质量带来了新的挑战。本文系统分析了分布式光伏并网对电压偏差、电压波动与闪变、谐波、三相不平衡以及频率稳定性等关键电能质量指标的影响机理；在此基础上，从设备级、系统级和管理级三个维度，综合阐述了包括改进逆变器控制策略、配置动态无功补偿装置、优化配电网结构、引入储能系统以及完善标准与调度机制在内的多种治理措施；最后，结合未来高比例可再生能源渗透的发展趋势，对电能质量治理技术的发展方向进行了展望。研究表明，通过多层级协同治理，可以有效提升含高比例分布式光伏配电网的电能质量水平，保障电网安全稳定运行。

关键词：分布式光伏；电能质量；谐波；电压波动；逆变器；治理措施

引言

能源结构转型是可持续发展的核心，太阳能光伏发电近年爆发式增长。分布式光伏发电（DPV）因投资小、建设快等优势，成为城乡能源供给重要部分。根据国家能源局数据，截至2024年底，我国分布式光伏累计装机超2亿千瓦，占光伏总装机近50%，部分区域配电网渗透率超30%。但传统配电网是单向潮流、稳定负荷的“被动网络”，分布式光伏大量接入使其变为“主动配电网”（ADN），带来诸多电能质量问题。电能质量关乎用电设备安全等，当分布式光伏出力因天气等因素波动，或大量光伏逆变器并网时，会引发电压越限、谐波污染、闪变加剧等问题，严重时致保护误动、设备损坏甚至局部电网崩溃。所以，深入研究分布式光伏并网对电能质量的影响机理，提出综合治理措施，对保障新型电力系统安全、优质、高效运行意义重大。

一、分布式光伏并网对电能质量的主要影响

（一）电压偏差与越限

电压偏差是指实际电压与额定电压之间的偏离程度。在传统辐射状配电网中，电压沿馈线方向呈单调下降趋势。分布式光伏并网后，其向电网注入有功功率，改变了线路潮流方向和大小。当光伏出力较大而本地负荷较小时，可能出现“反向潮流”，导致馈线末端电压被抬升，甚至超过国家标准（GB/T12325-2008）规定的 $\pm 7\%$

（35kV及以上）或 $+7\%/-10\%$ （20kV及以下）的允许偏差范围。电压越限问题在以下场景尤为突出：一是高渗透率区域：光伏装机容量接近或超过当地最大负荷。二是长馈线、高阻抗线路：线路压降对功率变化更为敏感。三是午间光照强、负荷低谷时段：光伏出力峰值与负荷低谷叠加。

（二）电压波动与闪变

电压波动是指电压有效值的一系列快速变动或连续改变，通常由负荷的快速变化引起。闪变则是指电压波动造成照明设备亮度发生明显变化，进而引起人眼不适的主观感受。分布式光伏出力受云层遮挡、太阳高度角变化等因素影响，具有显著的随机性和间歇性。例如，一片快速移动的云层可在数秒内使光伏出力骤降50%以上。这种快速的功率注入变化会在配电网中产生相应的电压波动。尤其在弱电网（短路容量小）或远离主变电站的末端节点，电压波动幅度更大，闪变指标（Pst）更容易超标。

（三）谐波污染

谐波是指频率为基波频率（50Hz）整数倍的正弦波分量。分布式光伏系统通过电力电子逆变器将直流电转换为交流电并网。逆变器中的开关器件（如IGBT）在高频开关过程中会产生丰富的谐波电流。尽管现代逆变器普遍采用脉宽调制（PWM）技术和滤波电路来抑制谐波，但在以下情况下仍可能成为谐波源：逆变器控制策略不当或参数失配。多台逆变器并联运行时，若其谐波

频谱相近,可能发生谐振放大^[1]。电网背景谐波与逆变器输出谐波相互作用,激发串/并联谐振。谐波会导致变压器和电机过热、继电保护误动作、计量误差增大,并干扰通信系统。

(四) 三相不平衡

在低压配电网中,分布式光伏通常以单相形式接入(尤其是户用光伏)。如果各相接入的光伏容量差异较大,或者各相负荷本身就不平衡,那么在光伏出力时段,会加剧系统的三相电流/电压不平衡度。不平衡不仅增加线路损耗,还会导致电动机振动、发热,缩短设备寿命,并影响电能计量的准确性。

二、分布式光伏并网电能质量问题的治理措施

针对上述电能质量问题,需要构建一个涵盖设备、系统和管理层面的综合治理体系。

(一) 多级治理:提升逆变器性能与功能

1. 高级电压-无功(V-Q/VAR)控制

国际标准如IEEE1547-2018和中国国标GB/T19964均明确要求分布式电源具备动态无功调节能力。典型的V-Q控制曲线通常采用分段线性函数,例如:当并网点电压处于0.9-1.1p.u.区间时,逆变器可按预设斜率(如 $\pm 0.25\text{var/W}$ 或 $\pm 0.4\text{var/W}$)输出或吸收无功;当电压超出此范围,则强制进入满额无功支撑模式(如 $\pm 0.33\text{p.u.}$ 无功容量)。部分先进逆变器还支持自适应V-Q曲线整定,可根据本地短路容量自动调整无功响应强度,避免弱电网下因过度无功注入导致电压振荡。

2. 有功功率平滑控制

光伏出力突变主要源于云层快速遮挡,其时间尺度通常在秒级至分钟级。为此,可在逆变器控制系统中嵌入一阶低通滤波器或滑动平均算法,对MPPT输出的有功指令进行平滑处理。例如,设定有功功率上升/下降速率不超过额定功率的10%/min(典型值),既可显著降低电压闪变(Pst值可降低30%~50%),又不会过度牺牲发电效率^[2]。此外,结合短期辐照度预测(如基于天空成像或数值天气预报),可实现前馈式功率调度,进一步提升平滑效果。

3. 谐波抑制与主动滤波功能集成

尽管LCL型滤波器可有效衰减开关频率附近的高次谐波(如2kHz以上),但对低次谐波(如5、7、11次)抑制能力有限。为此,可采用:(1)重复控制:利用谐波的周期性特征,在控制器中引入内模,实现对特定次谐波的高精度跟踪与补偿;(2)多环控制结构:外环为

基波电流控制,内环为谐波电流抑制,两者解耦设计;(3)多功能逆变器(MFI):在满足自身并网需求的同时,通过检测公共连接点(PCC)电流,实时计算谐波分量,并注入反向补偿电流,等效于一台并联型有源电力滤波器(APF)。

(二) 系统级治理:优化电网结构与配置辅助设备

1. 动态无功补偿装置(SVC/SVG)的精准部署

静止同步补偿器(SVG)因其响应速度快(<10ms)、无级调节、不产生谐振等优势,已成为治理电压波动与闪变的首选。其容量配置需综合考虑:负荷波动特性(如电弧炉、轧机等冲击负荷);光伏出力波动统计特征(如95%概率下的最大dP/dt);电网短路容量(SCR)。工程实践中,常采用“主站集中+馈线分散”布局:在10kV母线侧配置大容量SVG(如 $\pm 2\text{Mvar}$)用于全局电压支撑,在长馈线末端或光伏密集接入点配置小型SVG(如 $\pm 100\sim 300\text{kvar}$)进行就地补偿。

2. 智能软开关(SOP)与柔性互联技术

智能软开关是一种基于背靠背电压源型换流器(VSC)的配电装备,可实现相邻馈线间的双向潮流灵活调控。其核心优势在于:打破传统联络开关“开/合”二元状态限制,实现连续功率调节;在故障隔离后快速恢复非故障区供电;通过协调控制多端口功率,主动均衡馈线负载,抑制电压越限^[3]。例如,在A、B两条馈线间安装一台1MWSOP,当A馈线因光伏大发导致电压过高时,可将部分有功功率转移至B馈线,同时提供无功支撑,实现“削峰填谷+电压调节”双重目标。

3. 储能系统(ESS)的多时间尺度协同控制

储能是解决光伏间歇性的根本性手段,其治理效能取决于控制策略的设计:(1)秒级-分钟级:通过一次调频或虚拟惯量控制,快速响应功率突变,抑制闪变;(2)小时级:执行削峰填谷策略,平抑日间净负荷曲线,缓解电压越限;(3)日前/日内:结合电价信号或调度指令,参与需求响应,优化系统运行经济性。实际工程中,常采用“光储一体机”架构,将光伏逆变器与储能变流器(PCS)集成于同一控制平台,共享直流母线,降低系统成本并提升响应协同性。

4. 配电网结构优化与运行方式调整

在规划阶段,应推行“光伏友好型”配电网设计:优先采用三相平衡接入,限制单相光伏接入容量(如不超过该相变压器容量的15%);在高渗透区域增设联络线,增强网络灵活性;推广使用调压型配电变压器(如

带载调压 OLTC 或电子式调压器)。在运行阶段, 可通过配电自动化系统 (DAS) 实现: 动态调整 OLTC 分接头位置; 优化电容器组投切时序 (避免与光伏无功调节冲突); 实施网络重构, 改变潮流路径以改善电压分布。

(三) 管理级治理: 完善标准、规范与市场机制

1. 并网标准的动态演进与强制执行

当前, 我国《光伏电站接入电力系统技术规定》(GB/T19964) 虽对大型电站有明确电能质量要求, 但对户用及工商业分布式光伏的约束仍显薄弱^[4]。建议: 将 V-Q 控制、有功变化率限制、谐波电流发射限值等纳入分布式光伏并网强制认证; 引入“电能质量责任主体”概念, 明确业主对 PCC 点电能质量的连带责任; 建立“黑名单”制度, 对多次超标且拒不整改的项目暂停并网或收取惩罚性费用。

2. 全域电能质量监测与大数据分析平台

依托智能电表、专用监测终端和 5G 通信技术, 构建“台区-馈线-变电站”三级电能质量监测网络。通过大数据分析, 可实现: 谐波源定位 (如基于阻抗法或相关性分析); 电压问题根因诊断 (区分是光伏引起还是负荷引起); 治理效果量化评估 (如治理前后 Pst、THD、VUF 对比)。

3. 电能质量市场化激励机制探索

参考国外经验 (如德国“可再生能源附加费”中的质量调节条款), 可试点: (1) 无功服务补偿: 对逆变器提供的动态无功支撑按 kvar·h 计价; (2) 闪变责任分摊: 依据各分布式电源对 Pst 的贡献度, 分摊治理成本; (3) 绿色电能质量证书: 将优质电能作为差异化产品, 在绿电交易中溢价出售。此类机制有望激发分布式主体主动参与电能质量治理的积极性, 形成“谁污染、谁治理, 谁贡献、谁受益”的良性生态。

三、光伏介入电网时的风险

(一) 电能质量风险

光伏出力受光照、温度影响呈间歇性、波动性, 会导致电网电压波动、闪变, 影响用电设备正常运行。逆变器运行可能产生谐波污染, 若谐波含量超标, 会干扰电网中精密仪器和通信设备, 增加线路损耗。

(二) 系统稳定风险

大规模光伏集中接入时, 其低惯量特性会降低电网抗扰动能力, 易引发频率波动甚至失稳。分布式光伏分

散接入配网, 可能改变区域电网潮流分布, 导致部分线路过载, 影响配网供电稳定性。

(三) 安全运行风险

光伏电源与电网之间的相位、频率同步难度增加, 故障时可能引发孤岛效应, 威胁检修人员人身安全。极端天气 (如雷击、强风) 可能导致光伏组件或逆变器故障, 进而引发电网短路等连锁问题。

(四) 管理衔接风险

分布式光伏接入点多、分布散, 增加电网调度难度, 易出现调度指令执行滞后或偏差。部分光伏项目接入时未严格执行技术标准, 存在接口不匹配、保护配置不合理等问题, 影响电网整体安全。

结语

分布式光伏大规模并网是能源转型必然, 但其带来的电能质量问题不可忽视。本文剖析了其对电压偏差等多方面的影响机理, 从设备、系统和管理层面提出综合治理措施。研究表明, 升级光伏逆变器控制功能是成本低且直接的治理手段; 系统层面, 动态无功补偿装置和储能系统可有效解决电压波动等问题、支撑电网稳定; 健全技术标准等制度是保障措施落地的基石。展望未来, 随着分布式光伏渗透率提升及新型柔性负荷广泛接入, 配电网复杂性和不确定性将剧增。未来电能质量治理将呈现智能化趋势, 依托人工智能和大数据精准预测、溯源和自愈问题; 呈现协同化趋势, 打破“源、网、荷、储”壁垒, 实现多主体、多资源协同优化控制; 还会呈现标准化与定制化并存趋势, 在统一框架下提供定制化解决方案。

参考文献

- [1] 屈铭. 分布式光伏并网对电能质量的影响研究 [J]. 光源与照明, 2024, (04): 113-115.
- [2] 刘耀华. 分布式光伏并网的电能质量分析及治理研究 [D]. 合肥工业大学, 2024.
- [3] 王之豪, 朱宇翀. 分布式光伏并网发电系统接入配电网电能质量分析 [J]. 光源与照明, 2023, (09): 129-131.
- [4] 于欢. 分布式光伏并网对电能质量的影响分析 [J]. 光源与照明, 2023, (03): 124-126.