

分布式光伏对低压台区电压分布的影响及优化措施

崔磊

国网冀北电力有限公司唐山供电公司, 河北 唐山 063000

DOI:10.61369/EPTSM.2025040008

摘要：本文系统探讨分布式光伏接入低压台区对电压分布的影响及优化措施。分析影响机理，阐述电压越限、波动加剧等负面影响，提出无功补偿、智能控制等优化策略，评估措施实施效果并展望，为提升低压台区电压质量提供参考。

关键词：分布式光伏；低压台区；电压分布；影响机理；优化措施

Impact and Optimization Measures of Distributed Photovoltaic on Voltage Distribution in Low Voltage Distribution Network

Cui Lei

Tangshan Power Supply Company, State Grid Ji Bei Electric Power Co., Ltd., Tangshan, Hebei 063000

Abstract： This paper systematically explores the impact of distributed photovoltaic (PV) access on low voltage distribution network and optimization measures. The impact mechanism is analyzed, the negative such as voltage exceedance and fluctuation aggravation are expounded, and optimization strategies such as reactive power compensation and intelligent control are proposed. The implementation effect of the measures is evaluated prospected, which provides a reference for improving the voltage quality of the low voltage distribution network.

Keywords： distributed photovoltaic; low voltage distribution network; voltage distribution; impact mechanism; optimization measures

引言

全球能源转型推进，分布式光伏因清洁、灵活在低压台区广泛应用。但分布式光伏接入改变传统低压台区潮流方向和功率分布，对电压分布产生复杂影响。深入研究其影响机理，探索有效优化措施，对保障低压台区电网安全稳定运行、提升供电质量意义重大。

一、分布式光伏接入低压台区的电压分布影响机理

（一）电压分布的基本原理

传统低压台区电网中，电能从高压侧经变压器降压后，通过配电线路输送到用户端。依据欧姆定律，线路电流在线路电阻和电抗产生电压降，致使各节点电压有差异。通常，离电源点越远，电压损耗越大，电压越低。负荷稳定且潮流方向固定时，电压分布特性相对稳定，遵循规律，可通过潮流计算等方法准确分析预测。

（二）分布式光伏接入后的电压变化

分布式光伏接入低压台区改变原有电网功率流向。光照充足时，分布式光伏向电网注入功率，使潮流方向改变。这种功率注入导致线路电流方向和大小变化，进而引起电压分布改变。比如，光伏接入点附近因功率注入电压升高；距光伏接入点远且负荷大的区域，可能因潮流变化电压降低。这种电压变化与光伏输出功率、电网拓扑结构、负荷特性等因素密切相关^[1]。

（三）影响电压分布的主要因素

影响分布式光伏接入后低压台区电压分布的因素多。首先是

分布式光伏装机容量和出力特性，装机容量大、出力高，对电压抬升作用明显；其次，电网线路参数，如线路长度、导线截面等，直接影响线路电阻和电抗，进而影响电压损耗；负荷大小和分布也是关键，负荷变化改变潮流分布，与光伏出力相互作用影响电压分布；此外，变压器变比、分接头位置及无功补偿装置配置等，也对电压分布有重要影响。

（四）电压偏差与波动的表现

分布式光伏接入后，电压偏差和波动问题突出。电压偏差是实际电压与额定电压偏离程度，可能出现过电压或欠电压。光伏出力大且负荷轻时易出现过电压；光伏出力不足或负荷高峰时可能导致欠电压。电压波动是电压短时间快速变化，主要由光伏出力随机性和间歇性引起，如云层遮挡使光伏输出功率瞬间变化，引起接入点附近电压波动，影响用户用电设备正常运行。

（五）电压质量评估体系

为准确评估分布式光伏接入后低压台区电压质量，建立完善评估体系。该体系包含电压偏差、电压波动与闪变、三相电压不平衡度等多个指标。电压偏差以实际电压与额定电压差值百分比衡量；

电压波动通过监测电压幅值变化幅度和频率评估；三相电压不平衡度反映三相电压差异程度。通过监测分析这些指标，可全面了解低压台区电压质量状况，为后续优化措施提供数据支持^[2]。

二、分布式光伏对低压台区电压分布的负面影响

（一）电压越限问题

分布式光伏接入后，电压越限是常见问题。白天光伏大发时段，大量功率注入电网，尤其在末端线路，因线路电阻和电抗，电压明显升高，可能超过规定电压上限。长期电压越限会加速用电设备绝缘老化，缩短设备寿命，甚至引发设备故障，影响用户正常用电安全。同时，过高电压可能损害电网保护装置和计量设备，影响电网可靠运行。

（二）电压波动加剧

因光伏出力受光照强度、天气等因素影响，具有随机性和间歇性，导致电压波动加剧。频繁电压波动对一些电压敏感用电设备，如精密仪器、电子设备等产生不良影响，使其工作性能下降甚至故障。此外，电压波动还可能引起灯光闪烁，影响用户视觉感受和生活质量。对一些工业用户，电压波动可能导致产品质量不稳定，增加生产损耗，降低生产效率^[3]。

（三）电压不平衡

在三相四线制的低压台区电网中，如果分布式光伏接入配置不合理，很容易引发三相电压不平衡问题。部分用户安装的分布式光伏系统可能只接入某一相，使得该相的功率注入大幅增加，而其他两相的负荷却相对不变。这种不均衡的功率注入会导致三相电流不平衡，进而引发三相电压不平衡。例如，当某一相接入大量分布式光伏时，该相电流可能是其他两相的数倍，造成三相电压偏差过大。电压不平衡不仅会增加线路和变压器的损耗，降低设备的运行效率，还会使电动机等三相设备出现过热现象，加速设备老化，缩短设备使用寿命，严重时甚至可能引发设备故障，影响整个电网的安全稳定运行。

（四）对保护装置的影响

分布式光伏的接入会显著改变电网短路电流的大小和方向，对原有的保护装置产生诸多不利影响。其一，当电网发生线路故障时，光伏电源的反送电会使短路电流的大小和方向发生变化，导致保护装置无法准确判断故障情况，进而出现误动作，比如不必要的跳闸，影响非故障区域的正常供电。其二，光伏电源的存在可能降低保护装置的灵敏度，使其无法及时检测到故障电流，从而不能迅速切除故障，导致故障范围不断扩大，严重威胁电网的安全运行。这不仅增加了电网故障修复的难度和时间，还可能引发更严重的连锁反应，造成大面积停电事故^[4]。

（五）对电网规划与运行的挑战

分布式光伏的大量接入给电网规划与运行带来了全新的挑战。在电网规划方面，因为分布式光伏的装机容量和发电出力具有很强的不确定性，难以准确预测其对电网的具体影响，所以传统的电网规划模式不再适用。规划人员需要考虑更多的不确定因素，如光伏的安装位置、容量变化、出力特性等，以提高电网规

划的灵活性和适应性。在电网运行方面，为了维持电压稳定和电网可靠运行，需要对分布式光伏的出力进行实时监测和精确控制，并协调其与负荷之间的关系。这对电网运行管理人员的技术水平和管理能力提出了更高的要求，需要采用先进的监测设备和智能控制系统，以实现电网的精细化管理。

三、分布式光伏接入低压台区的电压优化措施

（一）无功补偿优化

无功补偿是改善低压台区电压质量的有效手段。在分布式光伏接入的低压台区，合理配置无功补偿装置，像并联电容器、静止无功发生器（SVG）等，能够根据光伏出力和负荷的实时变化，动态调整无功功率补偿量。当光伏出力较大，导致电压升高时，无功补偿装置可以吸收多余的无功功率，进而降低电压；当负荷增大，引起电压降低时，无功补偿装置则发出无功功率，提升电压^[5]。另外，采用分组投切的方式，可根据实际运行情况灵活调整补偿容量，既能满足不同工况下的电压调节需求，又能提高无功补偿的经济性和效果。通过合理的无功补偿优化，能够有效缓解分布式光伏接入带来的电压波动问题，提升电网的电压稳定性。

（二）有载调压技术

有载调压变压器可以在不停电的情况下，通过调节分接头位置改变变压器变比，进而调整输出电压。在分布式光伏接入的低压台区安装有载调压变压器，可依据实时监测到的电压变化，自动调节分接头，将电压严格控制在合理范围之内。通过对各节点电压进行实时监测，并结合光伏出力和负荷的动态变化，制定科学合理的调压策略，能够实现对电压的动态调节。例如，当检测到某节点电压过高时，有载调压变压器自动调整分接头，降低输出电压；相反，当电压过低时，则升高输出电压。这种方式能够有效解决电压越限问题，显著提高低压台区的电压质量，保障电网的稳定运行^[6]。

（三）智能控制策略

借助先进的智能控制技术，包括先进的监测系统、自动化控制装置和智能算法，能够实现分布式光伏与电网的协同控制。通过实时监测光伏出力、负荷、电压等关键参数，并运用智能算法对这些数据进行分析 and 预测，可制定出最优的控制策略。一旦检测到电压越限，智能控制系统能够迅速自动调整光伏的有功和无功出力，或者控制无功补偿装置和有载调压变压器动作，从而维持电压稳定。另外，智能控制策略还可以实现多台分布式光伏之间的协调运行，使它们在不同的工况下相互配合，共同应对电网的变化，提高电网的整体稳定性和可靠性，为用户提供更加优质、稳定的电力供应。

（四）电网结构优化

合理优化电网结构是解决分布式光伏接入后电压问题的重要途径。通过增加配电线路的联络开关，能够显著提高电网的灵活性和供电可靠性。当某条线路出现电压问题时，可通过联络开关调整潮流分布，将负荷转移到其他线路，从而改善电压状况。同时，适当缩短线路长度、增大导线截面，能够有效降低线路的电

阻和电抗，减少功率传输过程中的电压损耗。此外，优化变压器的布局和选型，合理配置变压器容量，提高变压器的运行效率，也有助于改善电压分布。比如，在负荷集中区域合理增设变压器，避免因供电半径过长导致电压下降。通过这些电网结构优化措施，能够从根本上提升电网的承载能力和电压调节能力，适应分布式光伏接入后的运行需求^[7]。

（五）政策与技术标准

制定完善的相关政策与技术标准，是规范和引导分布式光伏合理接入与稳定运行的关键。在政策层面，政府应出台鼓励支持分布式光伏合理接入的政策，明确规定电压质量要求以及各参与主体的责任和义务，为分布式光伏的健康发展提供政策保障。在技术标准方面，需制定严格的分布式光伏接入技术规范，涵盖接入容量限制、功率因数要求、电压调节能力等多个方面，确保分布式光伏接入后不会对电网电压质量造成严重影响。通过政策引导和技术标准约束，能够促进分布式光伏与低压台区电网的协调发展，实现经济效益和社会效益的双赢，推动分布式光伏产业的可持续发展。

四、优化措施的实施效果评估与展望

（一）评估指标体系

科学合理的评估指标体系是衡量优化措施成效的核心工具。在电压质量指标中，电压合格率是统计周期内电压处于国标允许偏差范围的时长占比，能直观反映供电稳定性；电压偏差平均值通过计算实际电压与额定电压的差值，可揭示偏离程度；电压波动幅度用于衡量电压短时间的变化范围；三相电压不平衡度则分析三相幅值或相位的差异。在电网运行指标方面，电网损耗降低率通过对比优化前后的线损电量，体现传输效率的提升；设备故障率下降率反映设备运行稳定性的改善。通过前后数据的纵向对比与行业标准的横向参照，能够系统量化评估优化效果^[8]。

（二）实施效果分析

实际应用中，上述优化措施取得一定效果。如无功补偿优化有效降低电压偏差，提高电压合格率；有载调压技术快速响应电压变化，将电压稳定在合理范围；智能控制策略实现分布式光伏和电网精细化管理，提升电网稳定性和可靠性；电网结构优化减少电压损耗，改善电压分布；政策与技术标准实施规范分布式光伏接入和运行，保障电网安全稳定。但不同地区和电网结构下，

优化措施实施效果有差异，需根据实际情况调整优化。

（三）技术挑战与未来方向

现有优化措施在推广过程中面临技术瓶颈。在复杂的配电网环境下，智能控制算法受谐波、通信延迟影响，指令滞后率达到15%，影响调节的精准性。无功补偿装置单台成本为5-10万元，有载调压变压器成本更高，达20-50万元，这制约了企业的投入。光伏出力受天气影响较大，当前预测误差率在15%-25%，导致功率控制困难。未来需要研发自适应算法，利用边缘计算缩短响应时间；通过新材料和规模化生产降低设备成本；结合气象大数据与深度学习，将预测误差率控制在10%以内^[9]。

（四）跨学科融合趋势

解决低压台区电压问题需要跨学科协同创新。电力电子技术与计算机技术结合，可以开发出微秒级响应的智能调压设备；通信技术与物联网技术协同，能够构建秒级数据采集的监测网络。大数据和人工智能通过挖掘历史数据，能够提前72小时预测电压异常，准确率超过90%。某地区搭建智能调控平台，整合光伏、储能与配电数据，实现全网智能决策，使电网运行效率提升25%。跨学科融合正成为提升电网智能化管理的关键路径。

（五）全球经验借鉴

国际上在分布式光伏与电网融合方面成果丰富。德国建立全链条政策体系，强制光伏实现低电压穿越，故障时光伏脱网率降至3%以下。美国借助微电网和需求侧响应，部分区域分布式能源自给率达到40%。日本通过“电力池”平台实现余电高效交易。我国电网规模大、地域差异明显，可以借鉴德国完善技术规范，学习美国提升系统灵活性，参考日本优化市场机制，进而制定符合国情的发展策略，推动电网清洁智能转型^[10]。

五、结束语

分布式光伏接入低压台区对电压分布产生复杂影响，带来系列问题 and 挑战。深入研究影响机理，采取无功补偿优化、有载调压技术、智能控制策略、电网结构优化及完善政策与技术标准等多种优化措施，可有效改善低压台区电压质量，保障电网安全稳定运行。但随着分布式光伏进一步发展，仍需不断探索创新，应对新出现技术挑战，加强跨学科融合，借鉴全球经验，推动分布式光伏与低压台区电网协调、可持续发展。

参考文献

- [1] 郭雷, 郭鹏, 史学杰, 等. 配电低压台区分布式光伏消纳能力评估方法研究 [J]. 电气技术与经济, 2025, (03): 11-13+16.
- [2] 韩周, 单永梅, 程鑫. 低压台区侧分布式光伏监测调控系统设计 [J]. 电力电子技术, 2025, 59(03): 78-82.
- [3] 蔡木良, 吴朝晖, 夏鹏轩, 等. 分布式光伏台区电压越限问题机理分析及治理方法 [J]. 江西电力, 2025, 49(01): 7-12.
- [4] 戚沁雅, 戴奇奇, 刘发胜, 等. 江西省配网侧分布式储能发展需求探讨 [J]. 江西电力, 2025, 49(01): 13-18+27.
- [5] 杨恒, 孟垂攀, 姚芳, 等. 含分布式光伏的低压台区多场景建模仿真与线损分析 [J]. 微型电脑应用, 2025, 41(01): 10-13+19.
- [6] 刘阳, 宗瑾, 陈璨, 等. 考虑分布式光伏逆变器的低压配电台区过电压自动化治理 [J]. 自动化与仪表, 2025, 40(01): 23-27.
- [7] 胡伟强, 胡军伟, 蒋行舟, 等. 分布式光伏对低压台区配电网电压的影响分析 [J]. 光源与照明, 2024, (12): 113-116.
- [8] 赵景涛, 张颖媛, 郑舒, 等. 大规模分布式光伏接入下低压配电网综合治理设备的研究与应用 [J]. 农村电气化, 2024, (12): 1-5.
- [9] 赵翔宇, 朱萍萍. 分布式光伏对用电信息采集系统线损的影响 [J]. 农村电工, 2024, 32(12): 33-34.
- [10] 邵磊, 王智男, 刘宏利, 等. 基于节点聚类的低压台区分布式光伏接入位置研究 [J/OL]. 天津理工大学学报, 1-7[2025-04-24].