

分布式光伏发电对配电网电压稳定性的影响

王建平

中国石油长庆油田分公司清洁电力开发项目部 陕西 西安 710299

【摘要】：随着“绿色发展”战略的深入推进，分布式光伏发电凭借零碳、分散式供电优势，正快速渗透城乡配电网系统。但其出力受光照强度、天气变化影响显著，具有强间歇性与随机性，接入后会改变配电网原有功率流向，易引发节点电压越限、电压波动幅度增大等问题，直接制约配电网安全稳定运行。因此，本文简要分析了分布式光伏发电技术的原理，并针对分布式光伏发电对配电网电压稳定性的影响进行了深入探究，提出了电压稳定性调控的实践策略，以期优化光伏并网调控策略，提升配电网新能源消纳能力。

【关键词】：分布式光伏发电；配电网；电压稳定性；影响

DOI:10.12417/2811-0722.26.03.078

引言

现阶段，我国电力行业处于高速发展阶段，促进了我国经济发展，电力系统中的科技含量也越来越高，尤其是光伏发电技术，充分引入了太阳能，减少了电力运行中的污染。作为一种新型的发电技术，光伏发电虽然具备了环保特性，但是比较容易受到周边环境的影响。基于太阳能的发电主要包含两种途径，即在中高电压路径下接入输电网和以低电压线路为依托。在这两种途径下会出现电压越限问题，对配电网电压产生影响。因此，加强分布式光伏发电对配电网电压稳定性的影响研究具有重要意义。

1 分布式光伏发电技术原理探究

分布式光伏发电技术以光伏效应为核心原理，依托光伏组件将太阳能直接转化为电能，其运行系统主要由光伏阵列、逆变器、汇流箱、配电柜及相应监测装置构成。当太阳光照射到光伏电池板上时，电池板内的半导体材料吸收光子能量，使内部电子脱离原子束缚形成自由电子，进而在电场作用下定向移动产生直流电。而逆变器作为核心转换设备，可将直流电逆变为符合电网标准的交流电，满足用户负载用电需求或实现余电并网。此外，汇流箱负责汇集多路光伏组件的输出电流，配电柜则承担电能分配与安全保护功能，监测装置可实时追踪光照强度、输出功率等参数，保障系统稳定运行。

2 分布式光伏发电对配电网电压稳定性的影响分析

2.1 功率流反转引发电压偏移

传统配电网以单向辐射架构运行，电能从电源侧单向流向负荷侧，电压会随输电距离增加呈现自然衰减特性，电网设计时已根据这一规律预设变压器分接头位置与线路参数，确保各节点电压维持在允许范围。分布式光伏发电并网后，系统功率传输模式发生本质转变，形成“源荷互动”的双向功率流，彻底打破了传统配电网的功率传输逻辑。光伏系统出力处于高位时，多余电能将反向注入配电网，打破原有馈线电压“近端高、远端低”的分布规律。而当光伏出力远超本地负荷消耗时，逆

流电能会沿馈线向上游传导，使馈线上游节点电压持续抬升，这种抬升效应会随逆流功率的增大而加剧。

2.2 出力波动性加剧电压波动

分布式光伏发电的能量输出高度依赖自然光照条件，云层移动、昼夜交替、阴晴变化、季节更替等自然因素，都会导致其出力在短时间内产生剧烈波动，呈现显著的间歇性与随机特性，且这种波动难以精准预判。这种出力波动会直接打破配电网实时功率平衡，引发节点电压的快速起伏，超出传统调压设备的响应调节能力。光伏出力突增时，接入点及周边节点电压会在分钟级甚至秒级内出现陡升，形成瞬时过电压；出力骤降时，电压又会迅速回落，可能接近电压下限。随着配电网中光伏渗透率的不断提高，电压波动的幅度会持续扩大、频率会明显增加，对精密制造、医疗设备、电子芯片生产等对电压质量要求极高的敏感负荷安全运行构成直接威胁，轻则导致设备精度下降、产品不合格，重则引发设备烧毁，严重影响整体供电质量与用户用电体验。

2.3 接入位置与容量的耦合影响

分布式光伏的接入位置与容量配置，是决定其对配电网电压稳定性影响程度的核心变量，二者与配电网固有阻抗特性形成复杂耦合关系，这种耦合效应会随光伏规模扩大而愈发显著。光伏系统接入负荷密集区域时，出力可优先满足本地用电需求，大幅减少电能远距离传输，降低对馈线功率潮流的扰动，因此对全网电压的影响较小，甚至可通过就近消纳减少电压损耗。若接入馈线远端、农村台区等负荷稀疏区域，由于本地消纳能力有限，出力过剩时极易造成末端电压越上限，且远端线路阻抗较大，电压抬升效应会被进一步放大。容量配置失衡同样危害显著，小容量光伏接入时，不仅难以提供足够的有功支撑，还可能因无功功率补充不足导致局部节点电压偏低；大容量接入则会因大规模功率倒送引发全域电压抬升，加剧电压稳定风险，同时还可能超出线路载流量，引发设备过载问题。

2.4 无功功率失衡破坏电压支撑

无功功率的动态平衡是维持配电网电压稳定的核心前提，分布式光伏系统的无功调节能力直接决定节点电压的控制效果，其调节灵活性对电网电压支撑至关重要。当前多数分布式光伏逆变器以最大化有功输出为核心设计目标，主要工作在单位功率因数模式，其自身具备的无功调节潜力未得到充分挖掘，难以根据电网电压实时变化灵活提供或吸收无功功率。光伏出力剧烈波动引发电网无功需求突变时，系统缺乏快速响应的无功调节机制来维持动态平衡，进而导致节点电压幅值偏离额定值，出现电压偏高或偏低的异常情况。此外，分布式光伏的分散性的特点，使得无功功率难以集中调控，容易在局部区域形成无功盈余或缺口，进一步破坏电压支撑体系，诱发电压不稳定问题。

2.5 谐波污染间接影响电压质量

分布式光伏发电系统的核心设备逆变器，在直流转交流的电能转换过程中，其内部开关器件的高频通断动作会产生大量谐波电流，常见的有3次、5次、7次等特征谐波，且谐波含量会随逆变器运行工况变化而波动。这些谐波电流注入配电网后，会与电网阻抗相互作用形成谐波电压，导致电压波形发生畸变，偏离标准正弦波。畸变的电压不仅直接降低供电质量，不符合电能质量国标要求，还可能与配电网中的变压器、电容器组、电抗器等感性或容性元件形成串联或并联谐振回路，使谐波分量被大幅放大，引发局部节点电压异常升降，形成谐振过电压。长期的谐波污染会加速电网设备绝缘老化，缩短设备使用寿命，同时干扰有载调压变压器、无功补偿装置等调压设备的正常工作，使其调节精度下降、响应滞后，破坏配电网固有的电压调节机制，对电压稳定性构成持续性潜在威胁。

3 分布式光伏发电配电网电压稳定性调控策略探讨

3.1 优化光伏逆变器无功调节能力

充分挖掘光伏逆变器的无功调节潜力是实现电压实时管控的基础手段。通过升级逆变器控制策略，摒弃单一有功输出模式，构建“有功-无功”协同调控机制，依据配电网电压监测数据动态调整无功出力。相关案例如下表1：

表1 优化光伏逆变器无功调节能力案例表

应用场景	调控措施	实施效果
高渗透率光伏台区	逆变器按电压阈值动态切换无功模式	压波动幅度缩减，响应时延 < 0.5s
城郊配电网低谷	闲置逆变器吸收容性无功	电压越上限问题解决，合格率达 99.2%

节点电压偏低，逆变器自动切换至感性无功输出模式，通过补充无功功率抬升电压。电压偏高，则转为容性无功吸收状态，抑制电压过度抬升。同时，借助电网调度系统下发的电压阈值参数，使逆变器具备自主响应能力，无需依赖主网调压指

令即可完成局部电压修正，尤其适用于光伏渗透率较高的区域配电网，实现电压波动的快速平抑。

3.2 配置分布式储能系统协同调控

分布式储能系统凭借充放电灵活性，成为平抑光伏出力波动、稳定电压的关键支撑。下表2为相关应用案例：

应用场景	调控措施	实施效果
工商业光伏园区	储能与光伏联动充放，平抑出力波动	电压波动 ≤ ±2%，满足国标要求
海岛微电网	储能快速响应光伏骤降，补充功率	电压恢复时间 < 1s，供电稳定

通过建立储能与光伏的协同控制逻辑，将储能系统接入光伏并网节点附近，实时追踪光伏出力变化。光伏出力骤增导致电压抬升时，储能系统立即启动充电模式，吸收多余电能减少功率倒送。光伏出力骤降引发电压跌落时，储能系统快速放电补充功率缺口，维持配电网功率平衡。另外，利用储能系统的能量缓冲特性，可在负荷低谷时段储存光伏电能，高峰时段释放，既优化了能源利用效率，又避免了因功率突变引发的电压剧烈波动，为配电网提供持续的电压支撑。

3.3 实施配电网拓扑结构优化重构

通过配电网拓扑结构的优化重构，可从根本上改善电压分布特性，提升光伏消纳能力，是应对分布式光伏并网电压问题的基础性技术手段。基于配电网实时运行数据，包括各节点电压、电流、功率潮流及光伏出力数据等，借助遗传算法、粒子群算法等智能优化算法，精准分析不同光伏接入容量、接入位置场景下的电压分布规律，合理调整馈线连接方式与分段开关、联络开关的运行状态，实现拓扑结构的动态优化。对于光伏集中接入区域，由于单点功率密度较高，易引发局部电压抬升和功率倒送压力，通过新增联络线构建环网供电结构，实现多电源协同供电，有效分散单一馈线的功率承载压力，避免因功率集中倒送导致的电压过载、设备发热等问题。对于偏远地区的光伏接入点，受地理条件限制原有线路可能存在路径过长、线径偏小的问题，通过优化线路路径、更换大线径导线等方式缩短供电距离，显著降低线路阻抗损耗，减少电能传输过程中的电压自然跌落，同时提升光伏出力的有效利用率。同时，结合区域负荷分布时空特性，动态调整变压器分接头位置，使配电网电压基准值与光伏出力的昼夜波动特性、季节变化规律相匹配，为电压稳定控制提供坚实的拓扑结构基础。

3.4 应用主动负荷管理实现源荷互动

主动负荷管理通过引导用户侧负荷灵活调整，打破传统“源随荷动”的供电模式，构建“源荷互动”的新型电压调控模式，有效降低光伏出力随机波动对配电网电压的冲击影响。相关部门可联合电网企业、用户建立完善的负荷响应机制，按照负荷的调节灵活性、重要性对可调节负荷进行分类管理，明确不同负荷的响应优先级和调节范围，形成标准化的负荷调控

体系。在光伏出力骤增且超出电网消纳能力时,通过分时电价、尖峰电价补贴等经济激励手段,或基于用户授权的直接控制手段,引导空调、电热水器、蓄冷蓄热设备等柔性负荷主动提升用电功率,快速消耗多余电能,从需求侧抑制电压抬升,缓解电网调控压力。在光伏出力骤降导致电网功率缺口时,协调工业生产中的可中断电机、储能式电动汽车、商用储能电站等负荷暂时降低运行功率,或切换至储能模式释放电能,弥补功率需求缺口,避免电压大幅跌落。同时,利用智能电表、物联网通信网络实现负荷运行状态的实时监测与数据反馈,搭建负荷调控可视化平台,确保负荷调整幅度、时机精准匹配光伏出力变化,在不影响居民正常生活用电和工业生产连续性的前提下,为配电网电压稳定提供高效的辅助调控能力。

3.5 构建智能调度系统实现全局优化

构建覆盖“光伏-配电网-负荷-储能”全环节的智能调度系统,是实现配电网电压全局优化调控、提升系统运行稳定性的核心保障,能够打破各调控环节的信息壁垒,实现多元资源的协同运作。该系统整合多元异构数据资源,不仅包括光伏出力短期及超短期预测数据、配电网实时运行参数、负荷实时监测信息及储能设备充放电状态,还融入气象数据、电网设备健康状态数据等,通过大数据挖掘、深度学习等人工智能算法,精准预测不同时间尺度下的电压波动趋势,提前识别潜在的电压

越限风险。基于预测结果和风险评估,系统自动制定多场景下的调压预案,统筹协调逆变器无功调节、储能设备充放电控制、负荷灵活调整、变压器分接头调节等多种调控手段,明确各措施的实施顺序、调控幅度,实现多维度协同配合,最大化调控效果。例如:在预测到次日光伏出力将大幅增加时,系统可提前指令储能系统做好充电准备,预留充足储能空间;同时通过电价信号引导居民、商业用户调整用电习惯,提升日间用电功率;同步协调光伏逆变器调整无功输出参数,多手段联动抑制电压抬升,以此避免单一调控手段的局限性和滞后性。此外,系统还具备自适应调整能力,可根据电网实际运行状态动态优化调控策略,确保配电网电压在光伏出力波动、负荷变化、设备故障等各种运行场景下均保持在合理范围。

总而言之,分布式光伏并网带来的电压稳定挑战,是新能源产业规模化发展过程中的必然课题,既关乎光伏能源的高效消纳,也影响配电网的安全可靠运行。当前,单一调控手段已难以满足复杂电网场景的需求,未来还需进一步强化拓扑优化、源荷互动、智能调度等多手段的深度融合,提升系统智能决策水平,推动调控技术创新与配电网升级改造同频共振。通过持续完善技术体系、优化运行机制,不断突破核心技术瓶颈,从而实现光伏高效消纳与配电网安全稳定运行的双重目标,为能源结构转型、“双碳”目标达成提供有力支撑,助力能源转型事业行稳致远。

参考文献:

- [1] 王静.分布式光伏发电对配电网电压稳定性的影响与调控策略研究[J].张江科技评论,2025,(09):62-64.
- [2] 李劼,凌佳焯.分布式光伏发电对配电网电压的影响分析[J].集成电路应用,2024,41(05):152-153.
- [3] 范成.分布式光伏发电对配电网电压的影响及电压越限的解决方案[J].电工技术,2023,(24):100-103.