

分布式光伏电站电能质量调节控制技术研究应用

李 亭 张雅絮

玉门油田分公司 甘肃酒泉 735200

摘 要：随着全球能源转型进程加快，分布式光伏电站凭借清洁低碳、部署灵活等优势实现规模化发展，但光伏出力的间歇性、波动性及电力电子设备的非线性特性，导致谐波污染、电压波动与闪变、三相不平衡等电能质量问题日益凸显，严重威胁电网安全稳定运行及用电设备正常工作。为此，本文就对分布式光伏电站电能质量调节控制技术应用进行了探究，以期为分布式光伏电站电能质量治理提供理论支撑与技术参考，助力分布式光伏的规模化、高质量发展。

关键词：分布式光伏电站；电能质量；调节控制

分布式光伏电站作为可再生能源利用的重要形式，在能源结构转型中发挥着关键作用，近年来全球装机容量持续快速增长，其并网运行已成为电网发展的重要组成部分。但电站中大量使用的逆变器等电力电子设备属于非线性负载，运行过程中会向电网注入谐波电流、产生无功功率，引发电压波动、波形畸变、三相不平衡等一系列电能质量问题，进而降低电网供电可靠性，影响精密用电设备的正常运行。因此，开展分布式光伏电站电能质量调节控制技术研究，明确核心问题产生机理，优化调节控制策略，提升电能质量治理效果，对于保障电网安全稳定运行、促进分布式光伏产业可持续发展具有重要的理论价值和工程实践意义。

一、分布式光伏电站电能质量调节控制的价值

（一）保障电力系统安全稳定运行的核心支撑价值

分布式光伏电站电能质量调节控制技术的首要价值，体现在对电力系统安全稳定运行的基础性保障作用。电力系统的稳定性和安全性依赖于电能质量指标的持续合格，但光伏发电的波动和电力电子设备的非线性导致的谐波污染、电压波动等问题，从根本上来说，都是破坏电力系统运行平衡的因素。调节控制技术采用主动抑制源头干扰和被动补偿已出现问题的双重途径，能够显著降低谐波畸变率、稳定电压波动、缓解三相不平衡，从而减少电网设备因电能质量超标而产生的额外损耗和故障风险。对中低压配电网来说，这项技术有助于减少线路和变压器的热量损失，防止继电保护装置的误操作，保持电网的频率和电压之间的动态均衡，确保电力系统从发电端到用电端的闭环稳定，为整个电力系统的稳定运行提供了坚实的技术保障。

（二）推动分布式光伏产业规模化发展的关键赋能价值

电能质量问题是制约分布式光伏产业进一步扩张的核心瓶颈，而调节控制技术为突破这一瓶颈提供了关键解决方案，具备显著的产业赋能价值。分布式光伏电站的并网适配性直接取决于其电能质量水平，缺乏有效调节控制措施的光伏项目，在并网后可能会因为电能质量的问题而限制其输出，甚至可能暂停并网操作。通过对逆变器控制策略的优化和高效补偿设备的配置，调节控制技术能够确保光伏电站的电能输出特性达到电网并网的标准，从而降低并网的难度，并增强光伏项目的实施可能性。从产业运营的视角来看，这项技术有助于减少因电能质量不达标而产生的罚款和停机损失，同时也能提高光伏电站的发电效率和运营收益，从而增强分布式光伏产业在市场上的竞争力。

（三）助力能源结构转型与低碳发展的战略支撑价值

在当前全球能源转型和“双碳”发展目标战略大环境下，分布式光伏电站电能质量调节控制技术具有重大战略价值，为能源结构优化和低碳发展提供了关键支持。作为清洁和低碳能源的关键组成部分，分布式光伏的大规模发展成为减少对化石能源依赖和降低碳排放的关键途径。同时，电能质量的调节和控制技术对光伏能源的使用效率和可替代性有着直接的影响。通过改善光伏电站电能质量，该项技术可以增加清洁电能对终端能源消费的比重，降低化石能源发电产生的碳排放和环境污染问题，促进能源消费结构向着低碳化方向转变。在能源安全方面，该项技术可强化分布式光伏和电网协同运行能力、促进清洁能源消纳、减少进口能源依赖、确保国

家能源供应安全。

二、当前电能质量调节控制技术应用的 key 问题

(一) 协同控制难度大

分布式光伏电站的电能质量治理涉及主动调节技术与被动补偿技术的协同、多台治理设备的协同、光伏电站与电网的协同等多个层面，当前协同控制能力不足的问题较为突出。在主动调节与被动补偿技术协同方面，两者缺乏有效的联动机制，主动调节技术主要从源头上抑制电能质量问题，被动补偿技术主要对已产生的问题进行治理，但现有系统中两者多独立运行，未能根据电网运行状态和光伏出力变化进行动态协同，导致治理效率低下，甚至出现过度补偿或补偿不足的情况。在多台治理设备协同方面，分布式光伏电站中往往部署多台 APF、SVG 等设备，但由于缺少统一的控制策略，这些设备之间可能会出现控制上的冲突，这可能会导致补偿效果的相互抵消，甚至可能加重电能的质量问题。在光伏电站与电网的协同工作中，光伏电站的调节控制策略没有充分考虑到电网的运行限制，电网也缺乏对光伏电站调节能力的有效感知和调度，这导致光伏电站的调节潜力没有得到充分的发挥，电网对光伏电站的接纳能力受到限制。

(二) 动态响应速度不足

在极端工况下（如强云层遮挡导致光伏出力骤降、电网故障引发电压突变），现有电能质量调节控制技术的动态响应速度仍难以满足要求。主动调节技术中，光伏出力预测存在误差，尤其是超短期预测受气象因素突变影响，预测精度下降，导致主动调度策略滞后于实际出力变化；逆变器控制策略虽然动态响应性能优于传统控制，但在毫秒级的快速波动场景下，仍存在调节延迟，无法及时抑制电能质量问题。被动补偿技术中，部分设备的响应速度较慢，难以跟踪快速变化的谐波电流和无功功率；即使是响应速度较快的 APF、SVG，在多目标治理场景下，由于控制算法复杂度增加，动态响应速度会受到影响，导致补偿不及时。

(三) 成本与效率平衡矛盾

电能质量调节控制技术的成本与效率平衡是制约其大规模应用的关键因素。主动调节技术中，模型预测控制、虚拟同步发电机等先进控制策略对硬件计算能力要求较高，需要配置高性能的控制器和传感器，增加了设备投资成本，光伏出力预测系统的建设和维护也需要投入大量资金，且预测精度的提升往往伴随着成本的显著增加。被动补偿技术中，APF、SVG、DVR 等电力电子

设备的制造成本较高，尤其是大容量设备的价格昂贵，导致分布式光伏电站的初始投资压力较大，同时，这类设备运行过程中会产生一定的有功损耗，增加了电站的运行成本。

(四) 高渗透率下适配性不足

随着分布式光伏电站渗透率的不断提升，电网运行特性发生显著变化，传统电能质量调节控制技术的适配性面临挑战。在高渗透率场景下，光伏出力的波动性和随机性进一步增强，电网的惯性和阻尼特性减弱，频率波动、电压稳定性问题更加突出，现有主动调节技术提供的虚拟惯量和阻尼支撑不足，难以维持电网的动态稳定，被动补偿设备的容量配置往往基于低渗透率场景设计，在高渗透率下，谐波电流、无功功率的变化幅度和频率大幅增加，现有设备的容量和调节范围无法满足治理需求，导致电能质量问题加剧。而且高渗透率下分布式光伏电站的集群效应明显，多座光伏电站的电能质量问题相互叠加，对电网的影响范围和程度扩大，现有针对单座电站的调节控制技术难以应对集群化带来的复杂问题，需要从集群协同治理的角度进行技术优化。

三、电能质量调节控制技术的优化方向

(一) 融合智能控制算法，提升调节控制精度与适应性

融合智能控制算法是提升电能质量调节控制精度与适应性的核心路径。在逆变器控制策略优化中，需将机器学习算法与模型预测控制、虚拟同步发电机技术深度结合，通过机器学习算法挖掘电网运行状态与光伏出力变化的内在规律，动态调整控制参数以适配复杂工况，显著增强控制策略的灵活性与精准度。基于强化学习的逆变器控制策略可通过与电网环境的持续交互自主学习最优控制逻辑，在谐波抑制、无功补偿、频率稳定等多目标治理中实现动态平衡。在光伏出力预测环节，应整合多种预测方法的技术优势构建混合预测模型，通过物理模型奠定预测的理论基础，依托机器学习算法修正极端气象条件下的预测偏差，提升超短期与短期预测的准确性，为主动调节控制提供可靠的数据支撑。

(二) 构建多维度协同治理体系，强化协同控制能力

构建“来源—网络—荷—储存”多维度协同治理体系以破除不同技术，设备和主体间协同壁垒。构建了主动调节技术和被动补偿技术联动机制并通过对电网电能质量状态进行实时监控动态地分配二者治理任务，在光伏出力起伏较小的情况下，主要采用主动调节技术从根本上遏制电能质量问题；在光伏功率波动较大或电网

突然出现故障的情况下，可以启动被动补偿技术进行快速补偿，从而形成“源头抑制加末端治理等”的协同模式。设备协同层面上，利用分布式协同控制策略对多个APF、SVG和逆变器进行统一控制目标分配，并通过信息交互使设备间协调工作，避免了控制冲突和增强了整体治理效果如基于一致性算法实现多设备协同控制可以使各个设备不需要中心控制器，独立形成控制共识以平衡无功功率分配与协同抑制谐波电流。从主体协同层面上，构建光伏电站-电网调度中心信息交互机制，光伏电站将自身调节能力及运行状态反馈给电网，电网将电能质量治理要求及调度指令下达给光伏电站，从而实现光伏电站-电网协同优化运行。

（三）推动硬件技术升级与成本优化，平衡成本与效率

推动硬件技术升级与设计优化是平衡电能质量治理成本与效率的核心路径。在电力电子器件应用上，以宽禁带半导体器件替代传统硅基器件这类器件具备开关速度快、导通损耗低、耐高温耐高压的核心优势能显著提升APF、SVG、逆变器等关键设备的动态响应速度与运行效率同时有效缩减设备体积和重量间接降低生产制造与安装部署成本。在设备拓扑结构优化上聚焦变换器核心设计采用模块化、标准化架构提升设备扩展性与兼容性降低生产环节的定制化成本和后期维护难度模块化多电平变换器凭借输出电压谐波含量低、容量扩展灵活的特性已成为大容量分布式光伏电站电能质量治理的优选方案。在成本控制层面依托规模化生产扩大器件采购与设备制造的规模效应通过供应链整合优化原材料采购、生产加工等环节的成本结构同时基于全生命周期理念优化设备容量配置避免过度设计造成的资源浪费在保障治理效果的前提下实现成本与效率的动态平衡。

（四）依托数字化技术，实现治理系统智能化升级

依托物联网、大数据、云计算等数字化技术，推动电能质量治理系统的智能化升级是提升治理精准度与效率的关键路径。在数据采集层面，需部署覆盖光伏组件、逆变器、并网点及电网关键节点的高精度、高频率传感器与监测终端，实时采集光伏出力动态数据、电网电压电流波形数据、总谐波畸变率、电压波动值等核心电能质量指标数据，同时同步收集环境气象数据与设备运行状态数据，构建全维度、高保真的数据源，为后

续分析与控制提供基础支撑。在数据处理层面，利用大数据分析技术对多源异构数据进行清洗去噪、关联匹配与深度挖掘，通过提取数据特征识别电能质量问题的演变趋势、关键影响因子及潜在风险隐患，精准量化光伏出力波动、设备运行状态与电能质量超标之间的映射关系，为调节控制策略的动态优化提供科学的数据支撑。在调度控制层面，搭建一体化数字化调度平台，整合光伏出力预测结果、电网实时运行数据、设备健康状态数据及电能质量监测数据，通过嵌入智能决策算法实现治理过程的实时监控、自动研判与精准调控，同时引入边缘计算技术将部分实时控制任务下沉至设备端，减少数据传输延迟，提升系统对电能质量异常的快速响应能力，实现治理系统从被动应对向主动预判、从分散控制向协同优化的转型。

结论

综上所述，分布式光伏电站的规模化发展是全球能源转型的必然趋势，但其引发的谐波污染、电压波动与闪变、三相不平衡、频率偏差等电能质量问题，已成为制约其高质量发展和电网安全稳定运行的关键瓶颈。通过融合智能控制算法、构建多维度协同治理体系、推动硬件技术升级与成本优化、依托数字化技术实现智能化升级等策略有效解决分布式光伏电站并网带来的电能质量问题，提升电网对分布式光伏的接纳能力，推动分布式光伏产业的规模化、高质量发展，为全球能源转型和“双碳”目标的实现提供有力支撑。

参考文献

- [1] 侯保国. 储能协同的分布式光伏电站系统集成技术的研究[J]. 能源新观察, 2025, (06): 31-33.
- [2] 张建. 分布式光伏电站发电效率提升策略研究[J]. 光源与照明, 2023, (10): 121-123.
- [3] 张震坤. 分布式光伏电站并网对配电网影响及接入方式分析[J]. 设备管理与维修, 2023, (10): 28-30.
- [4] 吴芳柱, 陆柳敏. 低压分布式光伏接入对台区电能质量影响分析[J]. 电工电气, 2022, (07): 22-27.
- [5] 张玲. 电能质量对生产的影响及解决方案探究——以某分布式光伏电站电能质量测试案例为例[J]. 大众标准化, 2021, (05): 14-16+19.