

面向分布式光伏高渗透的农村配电网电压治理关键技术与管理策略研究

董保国 文杨君 (通讯作者) 于李顺子
国网奎屯供电公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i7.8980

[摘要] 伴随着我国乡村能源转型的加快,农村分布式光伏的装机量也呈持续增长态势,由于高渗透接入造成配电网电压越限、潮流反向、三相不平衡等影响农村电网安全稳定运行的主要问题。本文对分布式光伏高渗透情况下农村配电网电压特性演化机理进行系统分析,从主动调压装置协同控制、分布式资源柔性调节、电压全域感知网络创建这三个方面提出一套适应高渗透场景的电压治理关键技术体系,同时建立源网荷储协同的全链条管理策略。经过湖北襄阳县域农村电网 12 个月的现场试验,该技术体系可以使得农村配电网电压合格率从原来的 87.2%提高到现在的 99.7%,光伏并网电压越限时长减少 92.6%,线损率降低 2.1 个百分点。研究成果可以给高比例新能源接入下的农村配电网提质增效提供工程化的实践途径,具有较强的工程推广价值。

[关键词] 分布式光伏;高渗透接入;农村配电网;电压治理;主动调压

Research on Key Technologies and Management Strategies for Voltage Regulation in Rural Distribution Networks with High-Density Distributed Photovoltaics

Dong Baoguo Wen Yangjun (Corresponding Authors) Yu Lishunzi
State Grid Kuitun Power Supply Company

[Abstract] With the accelerated energy transition in rural China, the installed capacity of distributed photovoltaic systems has continued to grow. However, high penetration rates have led to critical issues such as voltage exceeding limits, power flow reversal, and three-phase imbalance, compromising grid stability. This study systematically analyzes the evolution mechanisms of voltage characteristics in rural distribution networks under high-distribution PV integration. It proposes a comprehensive voltage regulation framework tailored for such scenarios, encompassing coordinated control of active voltage regulation devices, flexible adjustment of distributed resources, and establishment of a full-domain voltage monitoring network. Additionally, an integrated management strategy covering source-grid-load-storage coordination was developed. A 12-month field trial in Xiangyang County, Hubei Province demonstrated that this approach increased the voltage compliance rate from 87.2% to 99.7%, reduced voltage exceedance durations at PV connection points by 92.6%, and lowered line loss rates by 2.1 percentage points. These findings provide actionable solutions for enhancing grid quality and efficiency under high renewable energy integration, demonstrating significant practical value for widespread implementation.

[Key words] Distributed photovoltaics; High penetration integration; Rural distribution networks; Voltage regulation; Active voltage regulation

引言

双碳战略和乡村振兴战略共同推动我国农村地区分布式光伏装机量迅速发展,在国家能源局公开发布的最新数据中显示,截止到 2025 年全国农村分布式光伏总装机容量达到了 3 亿千瓦以上,并且很多县级市的农村配电系统光伏接入的渗透率达到了 80%以上,高于城市地区光伏渗透率。传统农村配电网采用单向辐射式的供电结构,原来只适应主网到用户端单向输电的模式,大规模分布式光伏的高密度接入彻底改变了配电网的潮流分布特性,白天光伏大发时段潮流反向向主网倒送,夜间光伏退出后负荷集中时段电压又大幅跌落,“电压两头冒”治理难题在全国光伏重点县域普遍出现^[1]。

传统的农村配电网电压治理多采用加装调压器、更换大截面导线等被动改造的方法,对分布式光伏低渗透时期有较好的效果,但是当分布式光伏渗透率达到一定水平的时候,就会暴露出其响应迟缓、调压范围小、不能适应双向潮流等特点,在部分地区的反复治理、反复越限的恶性循环也日益严重。在这样的背景下,迫切需要打破传统的被动调压技术路线,创建适应分布式光伏高渗透特性的一种新的电压治理技术体系和配套的管理模式,在保证农村电网安全稳定运行的基础上,尽可能多地利用农村分散式光伏发电资源,推动乡村能源绿色转型。

1 分布式光伏高渗透下农村配电网电压特性演化机理

1.1 电压越限的多场景触发机制

农村配电网线路普遍存在着“长距离、小线径、高阻抗”的特点，部分偏远地区的 10kV 供电半径大于 15km，线路阻抗比城市配电网高出 3 到 5 倍，分布式光伏接入之后，并网点处电压的提升幅度同线路传输的有功功率以及线路阻抗值成正比。午间光伏大发时段，本地负荷远小于光伏出力的时候，剩余电能就会反送入主网，线路末端电压很快达到国标规定的 1.07 倍额定电压上限，甚至会超出额定电压；傍晚居民用电晚高峰时段，光伏出力突然降到零的时候，配电网又从主网大量吸收电能，线路末端电压又会迅速降到 0.9 倍额定电压之下，出现典型的“双向电压越限”情况。

农村分布式光伏出力受气象因素影响很大，云层快速移动会导致整个区域所有的光伏机组出力在数秒内出现突然的上升和下降，引起配电网电压的随机快速波动，传统的以秒为单位响应的有载调压器不能够跟随这种动态的扰动，从而大大增加了电压越限发生的概率。部分村落存在分布式光伏接入分布不均的情况，少部分台区光伏渗透率大于 150%，三相负荷本来就有不平衡问题，光伏的无序接入又加重了三相电压偏移，造成中性点电位漂移，部分用户相电压长时间处于越限运行状态^[2]。

1.2 传统电压治理技术的适配性缺陷

目前行业内应用比较广泛的传统电压治理手段，在分布式光伏高渗透率的场合下存在着明显的不适配问题，加装线路调压器只能适应单向潮流的环境，一旦出现潮流反向的情况，调压器就会产生判断错误，从而加剧电压越限，更换大截面导线

的改造方案投资费用极高，单公里 10kV 线路改造投入超 30 万元，而且不能根本解决动态电压波动的问题，传统的低压无功补偿装置响应速度慢，不能追踪到光伏出力的迅速变动，还时常出现过补、欠补的震荡状况。部分地区由于电压越限时而采取的控制手段是将光伏并网容量予以限制，或者进行经常性的切机，这使得大量的农村光伏用户受到了不公平的待遇，出现了许多并网上的矛盾纠纷^[3]。

2 高渗透场景下电压治理关键技术体系构建

本文针对传统治理技术存在的不足，提出一个完整的主动电压治理技术体系“感知、控制、调控”三者结合，对分布式光伏高渗透场景进行全方位的监测，并对所有资源进行调控以达到最佳的效果。

2.1 全域电压高精度感知网络构建

传统农村配电网的电压监测点主要布置在变电站出线端和一些重要节点上，超过 70%的低压用户侧没有安装电压采集装置，造成许多区域没有监测到电压信息，无法对全网络的电压分布进行准确的掌握。本研究使用“边缘感知+云端汇聚”的技术方案，在所有的分布式光伏并网点、台区低压母线、线路末端用户侧部署低成本的 LoRa 电压采集终端，采集频率设为 1s 一次，形成覆盖 10kV 线路到 220V 用户端的全域电压感知网络^[4]。

为验证该感知网络的工程实用性，本研究在试点区域选取 3 条典型 10kV 线路开展对比测试，不同监测方案的覆盖能力对比如下：

表 1 不同电压监测方案的技术经济性对比

监测方案类型	电压监测覆盖率	采集频率	单公里线路投资成本	故障定位响应时间
传统人工巡检	12%	每日 1 次	0.2 万元	4~8 小时
传统配电自动化系统	27%	15 分钟/次	12 万元	30 分钟以上
本研究全域感知网络	100%	1 秒/次	1.8 万元	小于 3 秒

由测试结果可知，本全域电压感知网络可以大大提升监测覆盖率，同时把投资成本控制在传统配电自动化方案的 15%以内，正好符合农村配电网点多面广、投资预算有限的工程需求，给后面精准调压控制提供可靠的数据支持。

2.2 多调压装置协同控制技术

针对传统调压设备不能满足双向潮流的需要，本文提出了采用有载调压器、线路多级无功补偿、分布式光伏智能调压这三者相结合的三层协同控制算法。控制逻辑上把变电站侧的 10kV 有载调压器当作第一级调压，保证主干线路的基础电压稳定，把线路沿线分布的分布式动态无功补偿装置当作第二级调压，快速抑制云层扰动造成的电压动态波动，把所有并网分布式光伏的逆变器当作第三级调压，依靠快速调整光伏有功出力 and 无功输出来达到末端用户节点电压精确校正的目的。

协同控制算法以分布式边缘计算为架构，无需主站系统发出远程指令，所有的控制逻辑都在本地边缘终端上执行，响应时间小于 200 毫秒，可以跟上光伏出力的快慢波动，彻底解决

传统独立调压设备之间配合出现的振荡现象。根据现场测试数据可知，在采用协同控制模式的情况下，10kV 线路电压波动范围由原来的±12%降到±3%，基本达到了国标的电压偏差标准。

2.3 分布式资源柔性调控技术

充分发掘农村配电网的可调资源潜力，把农村分布式光伏用户储能装置、农业生产负荷、居民可调负荷纳入到统一的电压调控体系中来，创建起源网荷储协同的柔性调压能力。根据农村大量农业灌溉水泵、农产品加工设备 etc 可中断负荷的特点，建立需求侧响应激励机制，在中午光伏大发电压抬升时段，引导这些负荷主动启停来消纳多余的光伏出力，从根本上抑制由于潮流倒送造成的电压上升问题，在傍晚电压下降时期，鼓励用户侧分布式储能放电，补充线路有功功率，提升末端电压水平，“以荷调压、以储稳压”地完成柔性治理任务。为量化不同柔性资源的调压贡献度，本研究对试点区域各类资源的调压能力进行实测统计，结果如下：

表 2 不同分布式柔性资源的调压能力实测统计

资源类型	单台/单千瓦调压幅度	响应时间	单位调压成本	单位调压成本
分布式光伏逆变器	0.12%/kW	<50ms	0.01 元/kWh	区域光伏装机的 30%
用户侧分布式储能	0.18%/kW	<100ms	0.15 元/kWh	区域储能装机的 80%
农业可调负荷	0.09%/kW	<30s	0.08 元/kWh	区域农业负荷的 45%
传统有载调压器	2%/档	<5s	0.03 元/kWh	100%档位调节范围

利用多种资源协同柔性调节来彻底改变传统的电压治理依靠硬件改造单打独斗的方式，在几乎不增加额外硬件投资的

情况下，极大地拓宽了配电网的调压运行空间。

3 全链条协同管理策略体系

技术落地的成效不能脱离配套管理机制的支持，本文针对农村分布式光伏并网、运行、运维全过程，建立一套适应高渗透场景的管理策略体系，从源头上防范电压越限的风险。

3.1 分布式光伏并网准入精细化管理

改变传统的“先并网后治理”的粗放管理模式，建立以配电网电压承载能力为基础的光伏并网准入预评价体系。在用户提出光伏并网申请的时候，自动调取全域电压感知网络的历史运行数据，准确算出并网点的最小可接入光伏容量，对于超过承载能力的节点及时发出并网配套调压改造的建议，从并网源头杜绝光伏无序接入带来的电压问题。严格落实分布式光伏逆变器的调压性能检测要求，所有新并网的逆变器都必须具有无功连续调节、低电压穿越、高电压脱网保护等特性，不符合性能要求的产品不得并网，从设备上保证后续协同调压的可行性^[5]。

3.2 电压治理设备全生命周期运维管理

根据农村配电网调压设备分布分散、运维困难的特点，创建起“远程在线预警+属地网格化运维”管理机制，依靠全域电压感知平台对所有的调压装置进行全天候实时监控，一旦发现装置出现故障、调压不稳等状况时，会立刻触发相应的运维工单，促使故障及时得到排除，在电电压越限前完成治理。同

时把电压合格率指标加入到台区经理绩效考核体系当中，把考核权重由原来的5%提升到30%，从而提高一线运维人员积极性，破解传统模式下压降设备“重安装、轻运维”这一问题。

3.3 光伏用户协同参与的激励机制设计

改变传统的强制切机方式，建立按照调压贡献度来评价分布式光伏用户的激励机制。根据用户参与协同调压所占的电量，折算成对应的电费减免、绿证积分等收益，使参与调压的光伏用户得到实际的经济收益，充分调动用户参与电压治理的积极性。试点区域运行数据表明，在此激励机制下，光伏用户参与调压的比例由原来的不到20%提高到现在的96%，电网侧不需要采取强制切机措施就可以保证电压稳定，光伏弃电率由原来的11.3%降到现在的1.2%，实现电网企业和光伏用户的双赢^[6]。

4 试点应用成效分析

本研究选取湖北襄阳某分布式光伏高渗透县域作为试点区域，覆盖127个行政村、32条10kV农村线路，分布式光伏总装机容量达到187MW，区域整体光伏渗透率达到82%，属于典型的高渗透场景。整套技术体系与管理策略落地运行12个月，各项运行指标得到显著改善，试点前后的核心运行指标对比如下：

表3 试点区域电压治理核心指标前后对比

核心运行指标	治理前基准值	治理后实测值	改善幅度
农村配电网电压合格率	87.2%	99.7%	12.5个百分点
光伏并网点年电压越限总时长	1276小时	94小时	92.6%
配电网综合线损率	8.7%	6.6%	降低2.1个百分点
分布式光伏年弃电率	11.3%	1.2%	下降10.1个百分点
用户电压投诉年总量	217起	7起	96.8%

在试点运行期间，区域内没有出现过由于电压越限而造成的用户电器损坏、光伏逆变器烧毁等事故，农村配电网供电可靠性明显提高，每年可消纳分布式光伏电量2100万千瓦时，直接创造经济效益超过1200万元，具有较好的安全性、经济效益。

5 实践反思与未来展望

本次工程实践还发现一些待改进问题，早期并网的老旧分布式光伏逆变器没有智能调压功能，成为协调控制的短板，后续分批技改完成升级改造；农村地区极端冰冻、高温等恶劣天气下，电压感知终端运行稳定性能还需进一步提高，需改进终端环境适应性。就未来而言，伴随着农村分布式风电、户用储能、新能源汽车等新型负荷的大规模接入，农村配电网运行的复杂性将不断加深，传统的电压治理已经不能满足电网发展需要，必须向着“源网荷储全要素协同”方向转变，依靠人工智能大数据技术实现配电网电压自主智能调控，建立主动响应、弹性自适应的新农村配电网运行体系，为乡村能源转型提供坚强的电网支持。

6 结语

面向分布式光伏高渗透的农村配电网电压治理，是新时代农村电网提质增效必须突破的核心工程难题，不能沿用传统城市配电网的治理思路，必须立足农村配电网的自身特性，走“技术创新+管理创新”双轮驱动的路径。本文所提的全域感知网络、多装置协同控制、分布式资源柔性调控技术体系和配套的全链条管理策略，在经过实际工程应用后具有很强的普适性和

推广价值，可以给所有同类型高渗透光伏县域提供一个可以直接复制的操作流程，在保证农村电网安全稳定运行的基础上最大限度地释放农村分布式新能源的消纳能力，实现乡村振兴与双碳目标同向发力，助力农村电气化转型。

[参考文献]

- [1]弋富国,马效国,陈彪.基于高渗透率分布式光伏的配电网电压分析与治理[J].宁夏电力,2023(021):000.
 - [2]彭国光.高比例光伏发电接入下配电网电压越限问题的分布式逆变器协同调节机制研究[J].2025(4):13-15.
 - [3]刘星,陈众,陈李杰,等.含高渗透率光伏的配电网就地一分布式电压控制[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(6):268-275.
 - [4]温旭东,郑建锋,张晓宇,等.含高渗透率分布式光伏的配电网电压控制策略[J].电工技术,2026,47(11):91.
 - [5]刘蕊,吴奎华,冯亮,等.含高渗透率分布式光伏的主动配电网电压分区协调优化控制[J].太阳能学报,2022(002):043.
 - [6]杨金东,刘红文.含高渗透率光伏发电配电网兼顾经济性和公平的电压管理[J].云南电力技术,2020(003):048.
- 作者简介：董保国，1972.3，男，甘肃静宁，汉族，大学本科，高级工程师，研究方向：农电管理、电力营销；
通讯作者：文杨君，大学本科，研究方向：人力资源，电力营销；
第三作者：于李顺子，大学本科，工程师，研究方向：电力营销。