

# 新型配电网柔性互联技术在山区景区的应用示范研究

孙志民<sup>1</sup> 张宁<sup>1</sup> 余可<sup>1</sup> 胡中鲲<sup>2</sup> 汪文松<sup>1</sup>

1.国网安徽省电力有限公司潜山市供电公司 安徽 潜山 246300

2.国网安徽省电力有限公司安庆供电公司 安徽 安庆 246001

**【摘要】**：在双碳目标不断推进和新型电力系统加快建立的大环境下，山区景区配电网存在地形复杂、负荷季节性波动大、分布式新能源碎片化接入、供电可靠性低等诸多问题，传统的刚性网架已经不能满足文旅产业高质量发展的需要。本文以天柱山智慧配电网示范项目为研究对象，主要针对新型配电网柔性互联技术在实际应用中的问题进行分析，并提出相应的解决办法，对山区景区配电网运行中出现的主要问题进行了梳理，提出了一种适合于山区景区的柔性互联技术总体框架，对网架柔性升级、低压微网互联、源网荷储协同、自治自愈调控等关键技术的实施路径进行了详细的阐述，并且验证了技术应用后供电质量、运维效率、新能源消纳和民生保障的效果。研究表明，柔性互联技术可以很好地解决山区景区季节性重过载、末端低电压、新能源就地消纳不足等问题，大大提高配电网韧性及智能化水平，给类似山区景区新型配电网建设提供可以复制的示范经验。

**【关键词】**：新型配电网；柔性互联技术；山区景区；源网荷储协同；微网自治自愈

DOI:10.12417/2705-0998.26.02.097

## 引言

伴随着国家新型能源体系的建设规划不断推进，配电网是联系电源、负荷和用户的枢纽，正在向着智能化、柔性化、协同化的方向转变<sup>[1]</sup>。山区景区生态环保要求高、地形地貌复杂、旅游负荷季节性大、突发性强，分布式光伏、充电桩等新型负荷不断接入，传统配电网网架薄弱、设备老化、调控手段单一、故障处置滞后等问题突出，是制约景区文旅产业提档升级、民生用电保障的主要问题<sup>[2]</sup>。

柔性互联技术属于新型配电网的关键技术支撑，依靠创建交直流混合网架、布置智能调控设备、打通源网荷储互动链路，达成台区之间功率互济、负荷柔性转移、故障快速自愈，可以精确契合山区景区用电特性和发展需求。天柱山为国家5A级旅游景区和重点生态康养基地，旅游负荷峰值大、新能源接入分散，具有典型的山区景区配电网特点。本文以天柱山智慧配电网示范项目为基础，从柔性互联技术在山区景区的应用入手，对柔性互联技术在山区景区的应用模式、实施要点及应用价值进行系统的探究，为全国其它类似地区新型配电网的建设提供理论上的参考和实践上的借鉴。

## 1 山区景区配电网现状与核心痛点

### 1.1 项目区域概况

天柱山在安徽省潜山县境内，是中国世界地质公园、国家5A级旅游景区，是长三角重要的森林康养和职工疗休养基地，也是区域的核心发展支柱。2023年天柱山风景区接待游客257万人次，节假日单日游客量接近4万多人次，民宿、特色商铺、新能源充电桩、旅游配套设施等用电负荷呈爆发式增长，用电需求具有季节性、时段性、突发性三大特点，夏季和节假日用电高峰是平时的数十倍甚至上百倍，给配电网的承载能力带来很高的要求。区域内山地丘陵占比较大，配电网建设受地形影

响较大，线路敷设困难，运维费用高，分布式光伏用户分散接入，新能源出力随机性大，使配电网运行调控更加复杂，急需依靠技术升级来解决供电保障问题。

### 1.2 传统配电网运行核心痛点

天柱山景区原有的配电网为传统的放射状刚性网架，不能满足文旅产业的发展以及新型负荷接入的需求，主要的难点有四个方面。一是网架结构薄弱，供电可靠性差，核心供电线路运行年限超过40年，部分线路存在卡脖子现象，两条主干线路一直重载运行，单电源供电模式下故障风险大，用户停电隐患严重。二是设备智能化程度不高，全域智能设备占比较小，数据融合利用效率不高，无法达到全域感知、智能研判的效果，故障识别与处理能力较弱，年均设备故障停电次数大于10次。第三，新能源消纳能力不足，60余户分布式光伏碎片化接入，光伏大发时段出现反向重过载、电压异常抬升问题，局部反向重过载率高达110%，新能源就地消纳和高效利用受阻。四是缺少源网荷储协同能力，各种可调资源各自为政，没有统一的调控策略，在节假日负荷高峰时不能互相补充，造成台区季节性重过载、用户末端低电压等问题频频发生，部分台区负载率最高达到118%。

## 2 新型配电网柔性互联技术核心框架与设计思路

### 2.1 技术核心内涵

新型配电网柔性互联技术冲破传统配电网刚性运作、单向供电的束缚，依靠数字化技术做支撑，创建起柔性互联网架，安置智能感知和调控设备，形成源网荷储协同体系，达成配电网功率灵活调节、故障迅速自愈、资源有效利用的目的。根据山区景区的特点，主要从三个角度来展开研究，分别是网架柔性化、调控智能化和运行自治化。一是网架柔性化，利用台区互联、线路联络形成环网和微网集群，改变传统的供电方式，

实现负荷互济；二是调控智能化，依靠智能终端和算法模型，对负荷、新能源、储能进行协同调节，平抑负荷波动和新能源出力波动；三是运行自治化，具备离网黑启动、故障自愈的能力，在极端情况下保证核心用户和重要旅游设施的持续供电，全面提升配电网韧性。

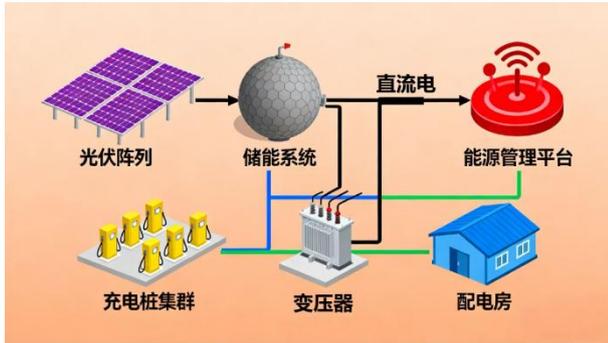


图 1 “光储充”一体化微网示意图

## 2.2 天柱山项目总体设计框架

根据天柱山景区的文旅特色和配电网实际情况，项目确定了“1341”的总体建设框架，把柔性互联技术作为核心，以建设天柱智网、护航高质发展为总目标，筑牢电网本质安全、智能装备支撑、数字平台应用三大基础，聚焦电网安全态势感知、智能运维辅助决策、源荷协同微网自治、智慧用电主动服务四大应用场景，打造山区景区新型智慧配电网示范样板。该框架与景区用电需求紧密相连，把柔性互联技术同文旅产业保障、民生用电服务深度融合起来，既重视技术的先进性又看重落地的实用性，防止出现过度建设、资源浪费的情况。

## 2.3 关键技术适配方案

根据山区景区地形复杂、通信覆盖不均、负荷波动大的特点，项目优化柔性互联技术适配方案，采用云边协同感知模式，克服了山区通信盲区的限制，搭建交直流混合低压微网，解决了长距离供电线损大、末端电压低的问题，部署构网型储能装置，实现了微网离网自治和黑启动，建立了源网荷储柔性调控模型，将光伏、储能、充电桩、民宿负荷等可调资源综合起来，实现全域功率平衡和新能源高效消纳，全方位适应景区配电网运行特性。

# 3 柔性互联技术在天柱山景区的实践应用

## 3.1 网架柔性升级与主网安全夯实

网架升级属于柔性互联技术的根基部分，项目首先对主网以及中压配电网展开柔性改造工作，以此来加强网架薄弱环节。完成 35 千伏变电站配电装置改造、核心 10 千伏线路大修升级，新建线路联络工程，使景区主网双电源供电，彻底改变原来的放射状单一运行方式。对老旧重载线路进行全面更换导线、优化杆型布置，消除卡脖子线路隐患，形成标准灵活的柔性网架结构，实现核心景区配电自动化全覆盖，为之后柔性互

联和协同调控打下硬件基础。

## 3.2 低压柔性互联微网构建

低压微网柔性互联是解决景区台区重过载、末端低电压的有效途径，选择景区内负荷集中、问题突出的 6 个核心台区，建立交直流混合柔性互联微网。对于距离较近的台区，采用低压联络开关进行直接互联；对于地形复杂、距离较远的台区，利用储能建设的时机架设直流输电通道，用双向逆变器和智能开关实现台区间柔性互联，把单个变压器供电模式升级为多个变压器、多个储能协同的微网集群供电模式。采用柔性互联的方式可以达到台区之间负荷均衡、功率互济的目的，降低系统的损耗，推迟新增设备的投资，促进分布式新能源的就近消纳。

## 3.3 源网荷储柔性协同调控

项目将景区内分布的光伏、低压储能、充电桩、民宿、制茶产业负荷等可调资源全部整合起来，创建起柔性保供潜力池，依靠智能融合终端和无线通信技术，使各类设备可以互连接起来。利用机器学习和负荷预测算法来分析负荷变化规律和新能源出力特性，提出最优的运行调控策略，使储能充放电智能调节、充电桩功率柔性控制、光伏出力优化调度得到实现。负荷高峰时储能装置自动投入释放电能，减轻台区重载压力；光伏大发时先就地消纳，防止反向重过载、电压越限，达到可再生能源利用率 100% 的目的，彻底解决了新能源消纳问题。

## 3.4 全域透明感知与智能运维支撑

为了保证柔性互联系统的高效运转，项目对智能感知设备进行了全方位的升级，布设了行波测距智能开关、线路在线监测、杆塔倾斜监测、无人机自主巡检等设备，达到对配电网全方面透明感知的目的。建立全景可视化的数字平台，补齐配电网拓扑结构，整合线路、设备、用户、新能源等各方面的数据，实现运行态势的实时监测、故障的准确研判、主动抢修的闭环管理。利用故障智能研判算法迅速找到故障类型和位置，配合无人机自主巡检，大大缩减了故障处理时间，故障自动识别率由原来的不足 40% 提高到了较高水平，运维模式由被动抢修转变为主动预判。



图 2 配电网全景透明感知监测图

### 3.5 微网自治自愈与应急保供

依靠柔性互联微网和构网型储能技术,项目可以提高微网的自治自愈能力和应急保供能力。正常运行时,微网实现功率互济、负载均衡;配变出现重过载或者局部故障的时候,系统会自动下发调控策略,闭合联络开关完成负荷转供,先保证核心用户的用电;如果出现极端故障造成全域失电,储能系统就会启动黑启动模式,迅速重建微网,优先保障民宿、旅游配套等重要负荷的供电,彻底消除山区景区故障停电造成的范围广、恢复慢的问题,筑牢景区用电安全防线。

## 4 应用示范成效分析

### 4.1 供电可靠性与供电质量显著提升

柔性互联技术落地后,天柱山景区配电网供电质量实现跨越式提高,供电可靠率达到99.999%,户均年平均停电时间为以前的十分之一以下,全部用户电压合格率达到99.99%,彻底解决民宿、商铺等用户的末端低电压问题,节假日负荷高峰时期供电稳定性得到保证,游客用电体验和商户经营满意度大大提高。对景区节假日单日客流接近4万人的极端负荷情况,柔性互联系统可以提前进行负荷预测和功率互济调度,从根本上杜绝了以前出现的高峰时段频繁跳闸、电压不稳定等行业通病。该种硬核供电保障直接解决了景区文旅服务的电力短缺问题,成为天柱山改善旅游服务品质、创建高端康养基地的主要硬件保证。

### 4.2 新能源消纳与能效水平持续优化

项目依靠源网荷储柔性协同调节,彻底解决了分布式光伏反向重过载、消纳不足的问题,在区域内全部分布式新能源都实现了全额就地消纳,年清洁能源消纳量超过10万千瓦时。台区负载率从高峰时段的110%以上降低到50%以下,配电网线损率控制在1.8%以内,设备运行能效明显提高,电网新增扩容投资减少,生态效益和经济效益双赢。改造前景区分布式光伏碎片化接入引起的电压超限、线路反向过载等问题,在柔性调控下全部消除,新能源发电全过程实现了就地消纳,没有产生任何弃电损耗。

### 4.3 运维智慧化与应急处置能力全面增强

智能装备全覆盖和数字平台搭建,使配电网运维模式由原

来的依赖人工转变为数字化、智能化,线路故障定位时间明显缩短,主动抢修闭环管理得以落实,设备故障停运次数明显下降<sup>[1]</sup>。无人机自主巡检、在线监测等技术的使用,使山区线路的人工运维难度和安全风险降低,灾害天气下可开展精准布防、快速抢修,电网抗灾避险能力与应急保供能力得到全面提升。以前在山区复杂的地形中人工巡检一次需要半天时间,故障排查全部依靠人工逐段核验,复杂的故障处理时间超过4小时,而智能系统可以实现故障的秒级定位和无人机的即时核查。全域透明感知体系创建起设备全生命周期健康档案,可以预先发出线路老化,杆塔倾斜这些隐秘隐患的警报,从而达成运维由“被动抢修”向“主动预估,超前防控”的全面转变。

### 4.4 赋能文旅产业与地方高质量发展

稳定可靠的电力供应,完全消除配电网短板给景区招商引资、文旅产业升级造成的障碍,推动天柱山国际康养小镇、森林康养基地建设,提升潜山文化旅游品牌知名度。智慧用电服务同差异化保障措施一起,削减了用户用电投诉的危险,达成电力服务同文旅发展深度交融,给地方经济社会高质量发展赋予了强有力的电力支持。

## 5 结论

本文以天柱山智慧配电网示范项目为依托,研究新型配电网柔性互联技术在山区景区的应用实践,结果表明,该技术可以精准解决山区景区配电网网架薄弱、负荷波动大、新能源消纳难、供电可靠性低等主要问题,通过网架柔性升级、源网荷储协同、微网自治自愈等方式来提高配电网的韧性、智慧化水平和供电保障能力,具有较好的技术可行性和推广价值。天柱山项目成功落地,给山区景区、生态敏感区新型配电网建设提供了一个可以复制、可以推广的示范模式。后续可以继续对柔性互联调控算法进行优化,提高微网集群协同调度的精度,拓展新能源和储能融合的应用场景,放大试点效应,以点带面推动新型配电网建设,助力双碳目标的实现和地方文旅产业的高质量发展。柔性互联技术将继续在山区、偏远负荷波动性大、电压波动大的地方得到应用,从而促使配电网更智能、更柔性、更高效。

## 参考文献:

- [1] 侯凯,汤雨,过亮,等.现代智慧配电网柔性互联技术研究综述[J].电力自动化设备,2025,45(10):186-200.
- [2] 曹善军,黄蔚,梁利娟,等.柔性互联技术在配电网中的应用研究[J].电工电气,2024,(04):43-47.
- [3] 王皓靖,郭佩乾,时珊珊,等.中压配电网多台区柔性互联技术应用现状与展望[J].电力系统自动化,2025,49(05):13-23.