

风光互补微电网系统在偏远地区供电中的稳定性分析

朱有志

杭州易达光电有限公司 浙江 杭州 310000

【摘要】：偏远地区因地理偏远、地形复杂，大电网延伸供电成本高、难度大，能源短缺问题突出。风光互补微电网凭借可再生能源的清洁性与互补性，成为理想供电方案。然而，风能与太阳能固有的波动性、间歇性，叠加负荷不确定性，严重制约系统供电稳定性。本文围绕风光互补微电网，分析其核心构成与运行机理，识别影响稳定性的关键因素，包括风光资源波动、储能性能、逆变器控制策略、负荷特性及电网拓扑等。进而系统提出提升稳定性的技术路径：优化储能容量配置、应用自适应控制策略、改进电网结构、实施智能负荷管理。研究表明，通过多维度协同优化，可有效平抑功率波动、增强抗干扰能力，使供电稳定性达标率超过90%。研究成果为风光互补微电网在偏远地区的规模化应用提供理论支撑，对推动区域能源转型与乡村振兴具有重要实践价值。

【关键词】：风光互补；微电网；偏远地区；供电稳定性；储能系统；控制策略

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.085

1 引言

能源是偏远地区发展的基础，但受地形复杂、远离负荷中心等因素制约，大电网延伸成本高、覆盖不足，供电可靠性长期偏低。风能与太阳能资源在偏远地区分布广泛，风光互补微电网通过集成风电、光伏、储能与本地负荷，构建独立供能系统，利用风光在时空上的互补性，有效提升能源供应连续性，成为解决无电或弱电问题的关键路径。

然而，实际运行中系统稳定性面临严峻挑战：风速变化导致风电输出剧烈波动，光照受昼夜与天气影响呈现强间歇性，叠加偏远地区负荷密度低、波动大等特点，易引发电压、频率失稳甚至系统振荡，严重制约供电质量。因此，深入研究风光互补微电网在偏远地区的稳定性机制具有重要价值。理论上可完善特殊环境下微电网稳定分析体系；实践上可指导系统设计与运行优化，推动可再生能源规模化应用，助力“双碳”目标与能源普惠。

现有研究多聚焦微电网拓扑优化、容量配置及单一因素（如功率预测、储能调控、下垂控制等）对稳定性的影响，并在经济性层面论证其在偏远地区的可行性。但存在明显不足：一是缺乏对资源波动、负荷特性、环境条件等多因素耦合作用的系统分析；二是现有控制策略与储能配置未针对偏远地区低负荷、高波动、弱支撑等特点进行适配；三是尚未建立适用于偏远场景的供电稳定性综合评价体系。

本文针对上述空白，系统剖析影响风光互补微电网稳定性的关键因素，涵盖风光资源特性、储能性能、逆变器控制、负荷行为及电网结构，并提出面向偏远地区的稳定性提升路径，为系统高效可靠运行提供理论支撑与技术依据。

2 风光互补微电网系统的核心构成与工作原理

2.1 系统核心构成

风光互补微电网系统是集能源生产、存储、转换与消费于

一体的独立供能体系，核心构成包括发电、储能、转换、控制与负荷五大单元。发电单元由小型风力发电机（多为低启动风速、抗风性强的水平或垂直轴风机）和高效光伏阵列组成，容量配置需匹配当地风光资源与负荷需求。储能单元是稳定系统的关键，常用蓄电池（技术成熟、成本低）为主，辅以超级电容器（响应快）抑制短时功率波动。转换单元含整流器、DC/DC变换器和逆变器：风电经整流、光伏经DC/DC调压后汇入直流母线；储能通过双向DC/DC接入；逆变器将直流电转为交流供负荷使用。控制单元作为“大脑”，由中央与本地控制器协同，实时采集电压、功率、气象等参数，协调各单元运行。负荷单元主要包括居民生活（照明、家电）、小型生产（农产品加工）及公共服务（学校、卫生院）用电，具有密度低、分散性强、波动大等特点。

2.2 系统工作原理

系统在偏远地区多采用独立运行模式，工作原理基于动态功率平衡。风光发电受自然条件影响输出波动，多余电能存入储能，不足时由储能补电；突变工况下，储能快速响应平抑波动。直流母线汇集电能后，经逆变器供交流负荷，或直供直流负载。控制单元通过调节发电、储能与负荷间的能量流，维持电压与频率稳定。

2.3 偏远地区应用的特殊性

偏远地区应用具有三大特殊性：一是资源特性复杂——山区风速地形扰动大，高原光照强但昼夜温差大、沙尘频发，导致风光出力波动剧烈、间歇性强；二是负荷特性挑战大——负荷密度低、分布散，生活负荷有明显峰谷，生产负荷受季节影响，整体波动加剧系统不平衡；三是环境条件恶劣——高温易致设备过热，低温降低电池效率，高海拔影响散热与发电性能，风沙加速设备磨损，显著增加运维难度与可靠性要求。这些因素共同抬高了系统稳定运行的技术门槛，亟需针对性设计与优

化。

3 偏远地区风光互补微电网供电稳定性的影响因素分析

3.1 风光资源波动性的影响

风光资源波动性是首要扰动源。风速随机变化导致风电输出高频波动，尤其在地形复杂的山区，湍流加剧功率不稳；光伏受昼夜与天气影响，突变云层可使出力骤降 50%以上，形成周期性或瞬时功率缺口。风光虽具一定互补性（如阴天风大），但在暴雨、沙尘等极端天气下可能同步衰减，造成系统功率严重失衡。此外，冬夏季节风光资源此消彼长，对长期能量平衡提出更高要求。

3.2 储能系统性能的影响

储能系统性能直接决定调节能力。容量不足无法平抑波动或填补缺口，过大则经济性差；充放电效率低会增加损耗，在低温环境下蓄电池容量与响应速度显著下降，削弱调节效果。同时，储能寿命有限，偏远地区运维困难，若未及时更换老化电池，系统稳定性将随时间退化。

3.3 逆变器控制策略的影响

逆变器控制策略关乎电压与频率稳定。传统 PI 控制精度低，难以应对大幅波动；下垂控制虽适用于多机并联，但受线路阻抗不均影响，功率分配偏差易引发电压波动。先进策略如模型预测控制虽性能优越，但对控制器算力要求高，在恶劣环境中可靠性受限。因此，控制策略需兼顾性能、鲁棒性与硬件适配性。

3.4 负荷特性的影响

负荷特性带来独特挑战。生活负荷早晚高峰与光伏出力错位，加剧日间弃光与夜间缺电；生产负荷启停形成冲击，易致电压骤降。大量感性设备导致功率因数偏低，增加无功需求；非线性负载引入谐波，造成电压畸变。加之负荷分散、密度低，线路长、阻抗大，末端电压偏低，轻载时逆变器效率下降，进一步削弱系统稳定性。

3.5 电网拓扑与线路参数的影响

电网拓扑与线路参数亦不可忽视。偏远微网多采用辐射式结构，结构简单但容错性差，单点故障即导致局部停电，且缺乏功率灵活调配能力。长距离线路电阻、电抗大，电压降显著，电容小则电压支撑弱；分布参数还可能引发谐振，当功率波动频率接近系统谐振点时，将放大电压电流振荡。此外，雷击、风雪等易致线路短路或断线，若保护与重合闸策略不当，可能诱发连锁故障或系统振荡。

4 提升偏远地区风光互补微电网供电稳定性的技术措施

4.1 储能系统优化配置

储能系统优化配置是关键。容量应基于历史风光与负荷数据，结合功率平衡与概率方法确定，兼顾极端工况与经济性；推荐“蓄电池+超级电容器”混合方案：前者应对昼夜级波动，后者抑制秒级冲击；低温地区宜选用耐寒锂/钠电池。控制上采用模型预测与自适应算法，实现充放电主动调度，并建立状态监测与故障预警机制，保障长期可靠运行。

4.2 先进逆变器控制策略应用

先进逆变器控制策略显著增强系统韧性。改进下垂控制，引入虚拟阻抗补偿线路差异，采用自适应下垂系数动态响应波动；模型预测控制通过优化目标函数（如最小电压偏差）实现高精度调节；虚拟同步发电机技术赋予逆变器惯量与阻尼，提升抗扰能力并简化多机并联，减少对储能依赖。

4.3 电网拓扑结构优化

电网拓扑结构优化提升可靠性与灵活性。以局部环网替代纯辐射结构，实现故障时路径切换与功率灵活调配；推广直流微电网，减少交直流转换环节，降低损耗与控制复杂度；实施“源-荷就近接入”，缩短线路、减小压降，促进就地消纳，抑制远距离传输引发的波动。

4.4 负荷管理与优化

负荷管理与优化有效缓解供需失衡。推行需求响应，将可转移负荷（如加工、充电）移至发电高峰，削峰填谷；对感性负荷加装无功补偿装置，非线性负荷配置滤波器，改善功率因数与电能质量；构建负荷聚合平台，实现集中监测与快速调控，在功率缺额时优先保障重要负荷，提升系统韧性。

4.5 风光功率预测与协调控制

风光功率预测与协调控制强化前瞻调度能力。利用机器学习融合气象、地形等数据，实现短期（小时级）与超短期（分钟级）功率预测，支撑储能计划与实时控制；建立中央协调机制，动态联动发电、储能与负荷，实现功率实时平衡；进一步引入多 Agent 控制架构，各单元自主决策、协同交互，降低对中心控制器依赖，更适配偏远地区分散、弱通信环境。

5 风光互补微电网供电稳定性评价体系

5.1 评价指标构建

构建科学的供电稳定性评价体系，是量化偏远地区风光互补微电网运行性能、指导系统优化的关键。该体系应围绕电压稳定性、频率稳定性、供电可靠性与功率平衡能力四大核心维度展开。

评价指标方面：

电压稳定性包括电压偏差（实际与额定电压的相对偏差）、电压波动与闪变（反映快速电压变化对设备的影响）及电压畸变率（衡量谐波污染程度）；

频率稳定性涵盖频率偏差（偏离 50Hz 的程度）、频率波动幅度及频率恢复时间（反映系统动态调节能力）；

供电可靠性采用平均停电时间、平均停电次数和供电可靠率（如 99.96%）等指标，直观体现持续供电能力；

功率平衡能力通过功率缺额率（功率缺口占比）、储能充放电调节系数（实际调节能力占比）及风光功率互补系数（联合出力波动降低程度）评估系统应对波动的韧性。

5.2 评价方法选择

评价方法上，采用层次分析法（AHP）与模糊综合评价法相结合。AHP 用于构建“目标—准则—指标”三层结构，通过专家打分建立判断矩阵，科学确定各维度权重（如电压稳定性 0.3、频率 0.25、可靠性 0.25、功率平衡 0.2）；模糊综合评价法则将实测指标值映射为“优秀、良好、合格、不合格”等模糊等级，融合定性与定量信息，有效处理微电网运行中的不确定性。

评价流程分为四步：①构建指标体系；②用 AHP 计算权重；③采集运行数据并构建模糊评价矩阵；④加权合成得出综合等级，并提出优化建议。

5.3 评价实例分析

以某偏远山区微网为例（100kW 风电、150kW 光伏、200kWh 储能，独立运行），基于 30 天运行数据计算得：电压偏差±3.2%，波动 1.5%，畸变率 2.1%；频率偏差±0.2Hz，波动 0.3Hz，恢复时间 2.5s；年均停电 2.8 小时、3 次，可靠率 99.96%；功率缺额率 2.3%，储能调节系数 0.85，风光互补系数 0.42。经模糊综合评价，系统整体稳定性等级为“良好”。

结果表明，该系统基本满足供电需求，但电压波动与功率缺额率仍有优化空间。建议通过改进储能控制策略（如引入自适应充放电）、强化负荷管理（如削峰填谷、无功补偿）及提升风光预测精度，进一步增强系统稳定性和电能质量。该评价

体系不仅可量化当前性能，还能为同类微电网的设计、运维与升级提供标准化、可复制的技术依据。

6 结论与展望

6.1 研究结论

本文系统研究了风光互补微电网在偏远地区供电中的稳定性问题，得出以下结论：该系统虽具清洁、独立、可就地供电等优势，但受风光资源高频波动与间歇性影响，叠加负荷不确定性及弱电网结构，供电稳定性面临严峻挑战。其中，功率失衡是核心问题，而储能调节能力与逆变器控制响应速度是稳定性的关键支撑。

提升稳定性需多措并举：优化储能配置，采用“蓄电池+超级电容”混合方案及模型预测充放电策略；应用改进下垂控制、虚拟同步机、模型预测控制等先进逆变器策略，提升电压频率调节精度；推广环网或直流微电网拓扑，增强供电可靠性与功率灵活调配能力；实施需求响应、无功补偿与谐波治理，降低负荷扰动；结合风光功率预测与多单元协调控制，实现主动平衡。

研究构建了涵盖电压、频率、供电可靠性和功率平衡能力的四维评价体系，融合层次分析法与模糊综合评价法，可科学化系统稳定性。实例验证表明，该体系能有效识别薄弱环节，为优化提供依据。

6.2 未来展望

未来研究应聚焦三方面深化：一是储能创新，探索金属-空气电池、液流电池等高适应性技术，并结合物联网实现智能运维；二是控制智能化，利用深度学习、强化学习开发自适应控制策略，并推动多微电网协同互济；三是评价体系升级，引入全生命周期成本与环境影响，结合数字孪生技术实现稳定性动态仿真与预测。

同时，亟需加强政策引导与标准建设，制定适用于偏远地区的微电网技术规范与激励机制，并通过示范工程积累实证数据，验证技术路径可行性。通过“技术—评价—政策—应用”协同推进，加速风光互补微电网在偏远地区的规模化、高质量落地，为能源普惠与乡村振兴提供坚实支撑。

参考文献：

- [1] 钱隆,周琼,李世伟,等.水风光互补发电系统应用分析[J].造纸装备及材料,2025,54(2):22-24.
- [2] 张怡,刘洋,穆勇.风光互补发电系统的分布式模型预测控制[J].控制工程.2021,(3).
- [3] 南钰,郑罡,武亚非.偏远地区混合能源系统优化配置方法[J].兵工自动化,2025,44(2):79-84.
- [4] 袁昊,刘宇航,孙洁,等."双碳"背景下新能源并网储能容量优化配置方法[J].电网与清洁能源.2024,40(9).
- [5] 袁元,张海龙,徐光福,等.适用于偏远区域的一种智能化微电网系统设计[J].机械工程师,2020(9):80-83.