 DOI: https://doi.org/10.12349/mit.v3i1.10711

Research on the Economic Power Supply Radius and Economic Power Factor of Rural Power Grids

Zi'ang Li[1] Huipeng Liang[2]

1. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing, 102488, China
2. Beijing Huashang Electric Lamp Co., Ltd., Beijing, 102488, China

Abstract

Currently, rural power grids play a fundamental role in regional energy allocation, and their operational efficiency directly affects the quality of power supply and economic levels. This paper studies two key parameters: economic power supply radius and economic power factor, analyzes their combined impact on grid losses, voltage levels, and investment costs, and establishes a multi-factor coupling analysis framework. Based on theoretical analysis, and according to the inherent relationship between power supply radius and power factor, a collaborative optimization approach is proposed, and a corresponding mathematical model is established. By combining typical regional cases, the technical effectiveness and economic efficiency of the optimization scheme are verified, providing a basis for refined planning of rural power grids.

Keywords

rural power grid; power supply radius; power factor; collaborative optimization

农村电网经济供电半径和经济功率因数的研究

李子昂[1] 梁会鹏[2]

1. 国网北京市电力公司，中国 · 北京 102488
2. 北京华商电灯有限公司，中国 · 北京 102488

摘 要

当前，农村电网在区域能源配置中具有基础性地位，其运行效率直接影响供电质量与经济水平。本文对经济供电半径、经济功率因数两个主要参数进行研究，分析二者对电网损耗、电压水平及投资成本的综合影响，建立多因素耦合分析框架。在理论分析的基础上，根据供电半径和功率因数之间的内在联系，提出协同优化思路，建立相应的数学模型。结合典型区域案例，对优化方案的技术效果和经济性进行验证，为农村电网精细化规划提供依据。

关键词

农村电网；供电半径；功率因数；协同优化

1 引言

农村电网在新型电力系统建设中承担基础支撑作用，供电结构和运行效率直接影响区域经济和能源利用水平。经济供电半径、经济功率因数属于关键的技术参数，对电网的投资强度、线损控制、电压质量具有决定性的作用。由于分布式能源接入以及负荷特性发生变化，传统的经验取值已经不能满足精细化规划的要求。急需用系统工程和经济性分析方法建立多因素耦合模型，统筹考虑负荷密度、线路阻抗、无功补偿配置，实现技术与经济的协调优化。

【作者简介】李子昂（1995–），男，中国北京人，硕士，工程师，从事农网配电营业研究。

2 农村电网经济供电半径分析

2.1 供电半径的影响因素分析

农村电网供电半径受技术、经济因素共同影响，负荷密度、空间分布是主要变量。负荷分散区域会造成线路延伸长度增大，单位供电成本明显提高，合理供电半径的下限被抬高。线路参数如导线截面、电阻率、架设方式等直接决定输电损耗水平，较大的电阻会增大电压降，使远端用户供电质量不能达到规范要求。电压等级的选择也会对供电半径产生影响，电压等级越高，远距离输电能力越强，但是建设投资和设备成本也会越高，需要在投资和运行损耗之间做出权衡。地形条件和气候环境也不能忽略，山区或者复杂地貌区域的线路建设成本和维护难度都会增大，限制供电半径的扩展空间。无功功率配置情况也会对供电距离产生间接影响，低功率因数运行状态会加重线路电流负担，使有效供电范围

缩小，影响整体经济性边界。

2.2 经济供电半径计算模型

经济供电半径的确定要依靠系统化成本函数的建立，将固定投资成本、运行维护费用和电能损耗费用统一到一个分析框架中。模型中需要对线路投资按单位长度进行折算，还要考虑变电设备配置和容量冗余的因素，使投资成本可以反映供电范围扩大所造成的边际变化。线损成本一般用电流平方乘以线路电阻来表示，增长趋势是非线性的，供电半径越大，损耗支出就越大。经济供电半径对应总成本函数的极小值点，可通过微分分析或数值优化方法求解其最优取值。实际应用中负荷增长预测要嵌入模型，防止短期最优结果和长期运行需求之间出现偏差。电压约束条件也要被包含到模型边界当中，保证计算结果符合末端电压合格率的要求。模型构建还要结合不同的导线类型、截面选择，形成多方案比较机制，提高计算结果的工程适用性。

2.3 不同区域供电半径对比分析

由于各个区域的资源禀赋、负荷结构、经济发展水平等各方面的差异，造成经济供电半径存在明显的分化特征。平原地区负荷相对集中，线路建设条件较好，供电半径可以适当扩大，在合理范围内延长供电距离，仍然可以保持较低的单位供电成本。山区、丘陵地带地形复杂，线路路径曲折，施工成本高，供电半径受到严格限制，过长的线路会大大增加投资强度和故障风险。沿海经济发达地区负荷密度大，用电需求稳定增长，供电半径设计更倾向于紧凑布局，以保证电压质量及供电可靠性。欠发达地区负荷增长缓慢，供电半径可以在一定程度上放宽，但是要注意远端用户电压偏差和线损上升的问题。不同区域还存在气候差异对设备运行状态的影响，高湿或者强风环境会增大线路故障概率，间接影响供电半径的经济边界设定。综合比较可以给区域电网规划提供差异化的决策依据。

3 农村电网经济功率因数研究

3.1 功率因数对电网运行的影响

功率因数是反映有功功率和视在功率之间关系的指标，功率因数的变化会直接影响到电网运行状态以及设备的利用率。当功率因数偏低时，系统中无功功率所占比例增大，线路电流增大，导线电阻损耗增大，线损水平提高，电能输送效率降低。较大的电流会使得变压器、开关设备长期处于高负载状态，缩短设备的使用寿命，增加运行风险。电压质量也受到功率因数变化的制约，无功功率不足或者分布不合理都会引起电压波动和压降问题，影响终端用户的用电稳定性。农村电网负荷结构以感性负荷为主，电动机和农业生产设备占比较高，功率因数偏低现象比较普遍，造成系统运行经济性受到持续影响。在远距离供电情况下，低功率因数会加大电压损失，限制供电能力，削弱电网整体承载水平。

3.2 经济功率因数确定方法

经济功率因数的确定要以无功补偿成本和电能损耗费用之间的平衡关系为基础进行分析。模型构建时一般将补偿装置投资折算成年均费用，再结合运行维护成本形成完整的支出项。线损费用是根据功率因数变化所引起的电流差异来计算的，电流降低可以减少损耗支出，带来经济收益。建立总成本函数，将功率因数作为变量引入，对函数进行极值分析，可以求得对应的最优功率因数取值。在具体的计算过程中要考虑到负荷的波动特性以及季节性变化，使模型的结果具有动态适应性。补偿装置类型选择也会对经济结果产生影响，集中补偿和分散补偿在投资和效果上存在差异，应根据电网结构合理配置。电压约束条件和设备容量限制要纳入计算边界，保证优化结果满足实际运行要求。

3.3 功率因数优化控制策略

功率因数优化控制依靠无功功率的合理配置和动态调节。农村电网中可以采用并联电容器组、静止无功补偿装置、分布式电源逆变器等无功支撑方式。分级补偿结构可以提高调节的灵活性，变电站侧承担基础无功供给，配电线路和用户侧承担局部调节任务，使无功功率分布更加均衡。自动投切控制策略可以根据负荷的变化来实时调节补偿容量，防止出现过补偿或者欠补偿的情况，提高系统的运行稳定性。智能化监测手段给优化控制提供数据支持，用在线监测装置获取电压、电流、功率因数信息，可以实现精细化调节。根据季节性负荷的差别，要创建分时控制策略，保证补偿装置在各种运行状况下有合适的投入水平。结合配电自动化系统，可以提高控制响应速度和调节精度，使功率因数长期处于经济运行区间。

4 供电半径与功率因数协同优化

4.1 耦合关系机理分析

供电半径与功率因数之间存在显著的物理耦合关系，其本质源于电流、电压及功率分量之间的相互作用。供电半径延伸会使得线路阻抗累积增大，在一定的负荷条件下，电流沿线路传输过程中产生更大的电压降，功率因数偏低时电流幅值增大，电压损耗呈叠加效应。耦合关系使得远距离供电区域更容易出现末端电压偏低的问题，影响电能质量。功率因数的变化还会改变线路损耗结构，在有功功率输送相同的情况下，功率因数越低，视在功率需求越大，导线载流量增加，热损耗增大，供电半径的经济边界被限制。无功功率在网络中分布形态对供电范围有调节作用，合理配置无功补偿设备可以在一定程度上缓解电压下降趋势，使供电半径得到扩展。负荷特性能调节耦合关系，感性负荷占比提高会加强功率因数对电流的放大作用，放大供电距离对系统损耗的敏感程度。不同的电压等级下，该耦合机制存在差异，高电压等级具有更好的抗电压骤降能力，但是它对于功率因数的变化仍然有明显的反应，在规划时需要综合考虑线路长度、负荷分布和无功配置，使系统运行处于稳定区间。

4.2 联合优化模型构建

供电半径和功率因数的协同优化要创建多变量耦合模

型，将线路投资成本、无功补偿费用和电能损耗支出一同包含到目标函数当中。模型以最小化全寿命周期成本为目标，将供电半径作为空间变量，功率因数作为运行变量，建立电流表达式将两者关联到同一个计算框架中。电流大小由负荷功率和功率因数共同决定，线路损耗与电流平方成正比，线路电阻成正比，所以形成非线性耦合关系。模型约束条件有电压合格率、设备容量上限、功率因数运行范围等，保证优化结果具有工程可实施性。无功补偿配置属于决策变量之一，其投资成本与补偿容量呈正相关关系，补偿效果体现在功率因数提高和电流下降。求解方法可以采用迭代优化算法，对不同的供电半径和功率因数组合进行遍历计算，得到满足约束条件的最优解。在模型参数设定时应该加入负荷增长率和时间折现系数，使结果可以体现长期运行的经济性。多场景分析可以用来评价各个发展阶段的最优策略，给电网规划提供动态决策依据。

4.3 典型案例分析验证

以某平原农业县 10kV 配电网络为研究对象，该区域供电范围约 120km²，现有线路总长度约 86km，主干线平均供电半径约 7.5km，末端电压偏差问题比较突出。区域最大负荷为 6.8MW，负荷主要为灌溉电机、农产品加工设备，原始运行功率因数约为 0.72。对系统进行实测数据采集，在典型高负荷时段，主干线路电流约为 310A，末端电压最低降到额定值的 0.88p.u.，线损率约为 11.6%。经过进一步的分析可知，该区域负荷存在明显的季节性波动特点，在农灌高峰期负荷集中启动时，电流冲击和电压暂降的情况更加严重，线路一直处于高损耗的运行状态，而且无功功率分布不均，局部节点的电压支撑能力较差。针对上述问题建立协同优化方案，将供电半径调整和无功补偿配置纳入统一分析。首先对供电半径进行分段优化，将部分远端负荷分到新增分支线路中，使主干线有效供电半径缩短到 6.2km，新增线路长度约 9km，投资成本约为 78 万元，线路结构由单一辐射型向分段供电结构转变，降低主干线路负载集中度。其次在三处关键节点处设置并联电容器组，总补偿容量为 1.2Mvar，设备投资约为 32 万元，根据负荷曲线设置分级投切策略，使补偿容量随负荷变化动态调整，改善无功功率分布形态。优化后的系统功率因数提高到 0.91，高负荷时段线路电流降低到 245A，电压最低值提高到 0.94p.u.，线损率降低到 7.9%。节点电压波动幅度由原来的 ±8% 收敛到现在的 ±4% 以内，供电质量明显提高。进一步进行运行周期经济性测算，按年供电量 2800 万 kWh 计，线损降低带来的电量节约约为 103 万 kWh，折算经济收益约为 72 万元，考虑设备折旧和运维成本，年度净收益保持在较高水平。综合考虑线路改造和补偿设备投资，静态回收期为 1.5 年，经济性较好。在后续运行监测中，设备负载率由原来的接近 90% 下降到现在的约 70%，运行裕度明显提高，故障率呈下降趋势，检修频率得到有效控制。对比不同的优化路径可以发现，只调整供电半径可以降低部分电压损失，但是无功分布问题仍然存在；单独进行无功补偿很难缓解长距离供电带来的结构性损耗。协同优化方案在电压水平、线损控制、投资回报等各方面都具有综合优势，体现出多参数耦合调节的工程价值。对于类似区域推广应用时，根据负荷密度、线路走向、电源布点情况，进一步细化分区优化策略，引入配电自动化系统进行实时监测和动态控制，使优化效果在长期运行中持续稳定发挥作用。

5 结语

总之，农村电网经济供电半径、功率因数合理配置关系到系统运行效率和投资效益的协调统一，协同优化方法可以改善电压质量，降低网络损耗。根据负荷特性以及无功补偿配置综合分析，可以提高规划决策的科学性。智能配电技术和数据驱动的方法将会给参数优化提供更加准确的支持，动态调节机制与多场景仿真分析有望进一步提高电网运行的灵活性与适应能力，推动农村电网向高效、可靠方向持续演进。

参考文献

[1] 侯少文,韩飞. 农村电网改造工程对供电可靠性的提升研究 [J]. 农电管理, 2025, (11): 31-32.

[2] 严开睿. 浅谈如何提高农村电网供电可靠性 [J]. 农村电工, 2025, 33 (10): 43-44.

[3] 姚彬,冯译德. 电力工程视角下的农村电网改造与能效提升策略 [J]. 电工技术, 2025, (S1): 662-664.