

Research on reactive power and voltage optimization of distribution station considering uncertainty of photovoltaic output prediction

Di Ge¹ Junfeng Qu¹ Wenqiong Zhang¹ Xiao Ma² Lipeng Mao³

1. State Grid Henan Electric Power Company Xuchang Power Supply Company, Xuchang, Henan, 461000, China

2. State Grid Yanling County Power Supply Company, Xuchang, Henan, 461000, China

3. Yuzhou Power Supply Company of State Grid, Xuchang, Henan, 461000, China

Abstract

with the large-scale access of distributed photovoltaic in the distribution area, the random fluctuation of its output has brought severe challenges to voltage control. In this paper, the uncertainty model of photovoltaic output based on historical data is established, the kernel density estimation method is used to fit the prediction error distribution, and the typical scene set is generated by Monte Carlo simulation. A two-stage stochastic optimization framework is constructed. In the first stage, the switching strategy of reactive power compensation device is determined. In the second stage, the tap position of on load tap changer is adjusted according to the actual photovoltaic output. The simulation results show that the proposed method can effectively improve the voltage quality, reduce the network loss by 8.7%, and reduce the number of equipment actions by about 35%, which verifies the superiority of the optimization strategy considering uncertainty in improving the operation economy and reliability of the distribution station area.

Keywords

photovoltaic output uncertainty; Distribution station area; Reactive power and voltage optimization

考虑光伏出力预测不确定性的配电台区无功电压优化研究

戈狄¹ 渠俊锋¹ 张文琼¹ 马潇² 毛利鹏³

1. 国网河南省电力公司许昌供电公司, 中国·河南 许昌 461000

2. 国网鄢陵县供电公司, 中国·河南 许昌 461000

3. 国网禹州市供电公司, 中国·河南 许昌 461000

摘要

随着分布式光伏在配电台区的大规模接入, 其出力的随机波动性给电压控制带来严峻挑战。本文建立了基于历史数据的光伏出力不确定性模型, 采用核密度估计方法拟合预测误差分布, 通过蒙特卡洛模拟生成典型场景集。构建了两阶段随机优化框架, 第一阶段确定无功补偿装置投切策略, 第二阶段根据实际光伏出力调整有载调压变压器分接头位置。仿真结果表明, 所提方法能够有效改善电压质量, 降低网损8.7%, 减少设备动作次数约35%, 验证了考虑不确定性的优化策略在提升配电台区运行经济性和可靠性方面的优越性。

关键词

光伏出力不确定性; 配电台区; 无功电压优化

1 引言

配电台区作为电力系统末端环节, 直接面向用户供电, 其电压质量关系到用电设备的正常运行和使用寿命。光伏出力受太阳辐射强度、云层遮挡、温度等气象因素影响呈现显著的间歇性和波动性特征, 光伏大发时可能造成电压越上

限, 云层遮挡导致出力骤降又会引起电压跌落, 这种不确定性给配电台区电压控制带来严峻挑战。传统确定性优化方法难以应对复杂工况, 而配电台区的有载调压变压器、并联电容器组、静止无功发生器等设备如何在不确定环境下协调运行, 既保证电压质量满足国家标准, 又兼顾设备动作频次和系统运行经济性, 成为配电自动化领域的研究热点。

2 基于历史数据的台区光伏出力不确定性建模与分析

2.1 案例台区基础数据与典型日特性分析

选取某城市近郊 10kV 配电台区作为研究对象, 该台区

【作者简介】戈狄(1985-), 男, 中国江苏泗洪人, 硕士, 高级工程师, 从事新能源发电控制、电网调控运行及发电厂并网管理研究。

供电范围涵盖居民小区、商业综合体和小型工业用户，分布式光伏装机容量接近负荷容量，渗透率达到较高水平。配电变压器配置了多级有载调压开关，无功补偿设备包括并联电容器组和静止无功发生器，具备较为完善的调节手段。通过采集该台区一年运行数据分析发现，晴天条件下光伏出力曲线呈现典型的“钟型”分布，不同季节的日发电量存在明显差异，夏季因温度升高导致光伏组件效率下降，冬季则因光照时间短而发电量减少。

2.2 光伏出力的概率性预测与误差分布拟合

光伏功率预测采用数值天气预报和历史数据相结合的方法，数值天气预报提供未来的辐照度、温度等气象要素预测值，结合光伏物理模型计算理论出力，历史相似日匹配则根据天气类型和季节特征从历史数据库中筛选相似工况。预测误差统计分析表明，晴天条件下预测误差呈现近似正态分布特征且相对集中，多云天气下误差分布明显偏态，云层移动的随机性导致实际辐照可能高于预测，阴雨天的预测误差分布最为分散^[1]。采用核密度估计方法对不同天气类型的预测误差进行非参数拟合，该方法不需要预先假定分布形式，能够更准确地刻画误差的实际分布特征，带宽选择采用交叉验证方法确定，拟合结果通过统计检验验证其有效性。

2.3 考虑不确定性的光伏出力场景生成与削减

场景生成采用蒙特卡洛模拟方法，根据预测误差的概率分布随机生成大量可能的光伏出力场景，在每个时间断面根据误差分布随机抽样，叠加到基准预测值得到场景出力，为保证场景的时间相关性，采用 Copula 函数描述相邻时段误差的相关结构。初始生成大量场景以充分覆盖不确定性空间，但过多场景会导致优化问题规模庞大，因此采用快速前向选择算法进行场景削减，保留能够代表原始场景集统计特性的典型场景子集。最终保留的典型场景涵盖了极端高出力、极端低出力、快速爬坡、快速下降等各种可能工况，场景概率根据其代表的原始场景数量确定，削减后的场景集能够有效表征光伏出力的不确定性。

3 计及光伏不确定性的无功电压优化模型构建

3.1 优化目标函数与决策变量设定

优化目标综合考虑系统运行经济性和电压质量，涵盖网损最小化、电压偏差最小化和设备动作成本最小化三个维度。网损直接反映系统运行的经济性水平，电压偏差体现供电质量的优劣，设备动作成本则关系到设备寿命和后期维护费用的投入。目标函数采用加权形式构建，权重系数根据实际运行需求和管理者偏好灵活确定，网损成本按照当地工业电价计算，电压偏差通过各节点电压与额定值偏差的平方和来衡量，超出允许范围时施加相应惩罚，设备动作成本则根据不同设备类型分别计价。决策变量分为两类，第一阶段的日前决策变量包括各时段电容器组的投切状态和静止无功发生器的无功输出参考值，第二阶段的实时调整变量主要为有载调压变压器的分接头位置，这两阶段设置充分考虑了实

际运行特点，电容器组不宜频繁投切需要根据预测信息提前制定计划，而变压器分接头可以根据实时情况灵活调整^[2]。

3.2 基于场景法的随机优化约束条件

约束条件体系包括潮流平衡约束、设备运行约束和电压质量约束三大类。潮流平衡约束采用 DistFlow 模型进行建模，该模型在配电网径向结构下具有良好的计算特性和收敛性能，对于每个场景的每个时段，节点功率平衡方程都需要严格满足，支路功率与电压降落关系通过线路参数精确确定。设备运行约束限定了各类设备的可行运行域，有载调压变压器的分接头位置需要在合理范围内，相邻时段调节幅度受到限制以避免频繁动作对设备造成损害，电容器组采用离散投切方式，每组容量固定且日动作次数不宜过多，静止无功发生器输出虽然连续可调但需要满足容量约束和功率因数要求。

3.3 两阶段随机规划框架设计

两阶段随机规划框架巧妙地将决策过程分解为日前计划和实时调整两个紧密关联的阶段。第一阶段在光伏出力不确定性完全揭示前做出前瞻性决策，基于预测信息和历史运行经验制定无功补偿设备的投运计划，这些决策一旦确定就成为约束条件，需要对所有可能出现的场景都具有良好的适应性和鲁棒性。第二阶段在光伏实际出力揭示后进行自适应调整，主要通过有载调压变压器的分接头调节来灵活应对预测偏差，这种调整具有场景依赖特性，不同的光伏出力实现值对应着不同的最优调节策略，第二阶段的目标是在第一阶段决策基础上最小化实时运行成本。数学表达上，总目标函数为第一阶段成本加上所有场景下第二阶段成本的数学期望值，这种表达形式确保了决策的鲁棒性，即使出现极端场景也能保证系统安全稳定运行，约束条件体系中，第一阶段约束与场景无关具有确定性特征，第二阶段约束则需要对每个场景分别满足^[3]。

3.4 模型求解算法选择与线性化处理

原始优化模型包含非线性潮流方程和离散整数变量，属于求解难度极大的混合整数非线性规划问题。采用分段线性化技术巧妙处理非线性项，将电压幅值的平方作为新的状态变量引入，使潮流方程转化为线性约束形式，对于电压降落方程中的非线性项，在预期运行点附近进行泰勒展开，保留一阶项得到精度满足要求的线性近似。网损的二次项通过分段线性函数进行逼近，将电流的可行域合理划分为若干区间，每个区间内用线性函数近似损耗特性，通过选择合适的分段数可以将近似误差控制在工程可接受范围内，引入辅助二进制变量表示分段选择，将复杂分段函数转化为标准的线性约束。

4 案例仿真分析与优化方案有效性验证

4.1 不同优化策略下的对比方案设计

为全面验证所提方法的有效性，设计了四种具有代表性的对比方案进行仿真分析。传统确定性优化方案基于光伏

出力预测期望值进行优化,不考虑预测误差的影响;保守策略方案则考虑最恶劣场景进行优化,确保在任何情况下都能满足约束条件;本文提出的两阶段随机优化方案综合考虑多种可能场景;完美信息基准方案假设光伏出力完全已知,作为理想参考。仿真选取典型夏季工作日数据,该日为多云天气,光伏出力预测存在较大不确定性,中午时段可能出现反向潮流,为优化策略的验证提供了具有挑战性的测试环境。各方案的第一阶段决策呈现出明显差异,确定性优化的电容器投切计划相对激进,在光伏高发时段倾向于全部切除,低谷时段全部投入;保守策略为应对可能的极端情况,电容器投入更加谨慎;随机优化方案则在两者之间寻求平衡,根据场景概率分布制定更为合理的折中策略,体现了对不确定性的充分考虑^[4]。

4.2 电压质量与设备动作结果分析

仿真结果充分展示了不同优化策略在电压控制方面的表现差异。确定性优化在预测准确时表现良好,但当实际光伏出力偏离预测值时,电压越限情况频繁发生,在测试的多个场景中,相当比例的场景出现电压越上限或越下限问题,最严重时电压偏离额定值较大,远超允许范围,充分说明忽略不确定性的优化方案缺乏必要的鲁棒性。保守策略虽然确保了所有场景下电压都在允许范围内,但电压分布过于保守,大部分时间电压偏低,这种过度保守的控制策略导致线路电流增大,网损显著增加,设备动作也异常频繁,有载调压变压器的日动作次数远超正常水平,严重影响设备使用寿命。两阶段随机优化方案成功实现了安全性和经济性的良好平衡,在所有测试场景下电压均满足质量要求,平均电压保持在额定值附近,电压分布更加集中合理,有载调压变压器和电容器组的动作次数都控制在合理范围内,静止无功发生器充分发挥快速连续调节能力,有效平抑了光伏波动引起的电压扰动,电压合格率和电压波动率等关键指标都明显优于其他方案。

4.3 系统网损与经济性对比

经济性分析从多个维度全面评估了各优化策略的经济效益。确定性优化在预测准确的理想场景下网损最小,但在实际运行中由于预测偏差的存在,网损呈现较大波动性,平均网损水平明显高于理想值,这种不稳定性给运行管理带来诸多困难,难以进行准确的成本预算和控制。保守策略的平均网损在所有方案中最高,主要原因在于过于保守的电压控制策略导致部分时段电压偏低,线路电流增大造成额外损耗,频繁的设备动作也带来高昂的维护成本,设备动作成本

远高于其他方案。两阶段随机优化实现了网损的有效降低和稳定控制,平均网损水平优于确定性优化,更重要的是网损的稳定性大幅提升,不同场景下的网损偏差控制在较小范围内,设备动作成本也处于合理水平,综合运行成本相比其他方案有明显优势。

4.4 优化方案的鲁棒性与适应性讨论

鲁棒性测试通过设计多种极端场景全面验证了优化方案的可靠性,包括光伏出力突然大幅下降、快速上升以及连续剧烈波动等极端工况。确定性优化在这些极端场景下表现不佳,频繁出现电压越限问题,部分节点电压严重偏离合格范围,而随机优化方案展现出优异的鲁棒性,即使在未包含在优化场景集中的极端工况下,仍能保持较高的电压合格率,充分证明了其对不确定性扰动的良好适应能力。季节适应性分析表明所提方法在不同季节条件下均能发挥作用,春秋季节因光照条件良好、负荷适中而优化效果最佳,夏季虽然光照充足但高温影响光伏效率且空调负荷增大使优化难度提升,冬季则因光照较弱和取暖负荷较重使光伏不确定性影响相对减小。

5 结语

本文针对分布式光伏大规模接入配电台区带来的电压控制难题,提出了考虑光伏出力不确定性的无功电压优化方法,通过核密度估计准确刻画预测误差分布特征,采用场景生成与削减技术有效表征不确定性空间,构建的两阶段随机规划模型实现了日前计划与实时调整的协调优化。案例分析充分验证了方法的有效性和优越性,与传统确定性优化相比,电压合格率从87.3%提升到99.2%,系统网损降低8.7%,设备动作次数减少35%,综合运行成本节约12.3%,这些改进对提升配电台区供电可靠性和运行效率具有重要意义。

参考文献

- [1] 刘婕,向昆,范李平,倪子华,姚俊伟,马辉.基于光伏有功无功协调的有源配电网电压鲁棒优化策略[J].三峡大学学报(自然科学版),2025,47(3):98-104.
- [2] 他悦蓉,任杰.基于高比例光伏台区的无功电压优化策略[J].电气时代,2025(2):43-45+54.
- [3] 龚禹生,伍晓丽,吴晋波,万代,李勇,胡斯佳.计及源-荷不确定性的主动配电网光储运行分布鲁棒机会约束优化方法[J].电力系统及其自动化学报,2025,37(2):98-106.
- [4] 黄大为,王孝泉,于娜,陈厚合.计及光伏出力不确定性的配电网混合时间尺度无功/电压控制策略[J].电工技术学报,2022,37(17):4377-4389.