

Research on optimal control strategy of reactive power and voltage in distribution station based on photovoltaic prediction

Di Ge Junfeng Qu Xiao Ma Lipeng Mao

Xuchang power supply company of State Grid Henan electric power company, Xuchang, Henan, 461000, China

Abstract

with a large number of distributed photovoltaic connected in the distribution station area, the fluctuation characteristics of output make the reactive power balance and voltage stability in the station area face severe challenges, and the traditional control strategy is difficult to meet the actual needs. This paper first expounds the basic theory of photovoltaic grid connection and reactive voltage regulation in the distribution station area, and then analyzes the influence principle of photovoltaic output fluctuation on the voltage in the station area, the effect on reactive power distribution and the limitations of traditional strategies; Then, the key technologies based on photovoltaic prediction are studied, including the mechanism of the integration of prediction and regulation decision, the target system and constraints, the optimization model and its solving algorithm, and the classification of typical regulation strategies. Finally, the actual effect of regulation is verified by case analysis, aiming to provide support for the precise optimization of reactive power and voltage regulation in the distribution area.

Keywords

photovoltaic prediction; Distribution station area; Reactive voltage; Optimizing control strategy

光伏预测的配电台区无功电压优化调控策略研究

戈狄 渠俊锋 马潇 毛利鹏

国网河南省电力公司许昌供电公司, 中国·河南 许昌 461000

摘要

伴随分布式光伏在配电台区大量接入, 出力的波动特性让台区无功功率平衡与电压稳定面临严峻挑战, 传统调控策略难以贴合实际需求。本文先阐述配电台区光伏并网与无功电压调控基础理论, 再分析光伏出力波动对台区电压的影响原理、对无功功率分布的作用情况及传统策略的局限之处; 继而对基于光伏预测的关键技术进行研究, 涵盖预测与调控决策相融合的机制、目标体系与约束条件、优化模型及其求解算法, 以及典型调控策略分类, 最后依靠案例分析来验证调控的实际效果, 旨在为配电台区无功电压精准优化调节给予支撑。

关键词

光伏预测; 配电台区; 无功电压; 优化调控策略

1 引言

受“双碳”目标的推动, 分布式光伏凭借灵活、清洁的优势迅速渗透进配电台区, 成为配电网消纳新能源的关键载体。但配电台区属于配电网的末端环节, 线路阻抗相对较大、电压调节资源有局限, 因光照、温度等因素影响, 光伏出力呈现强波动性, 较易引发台区电压超出限定值、无功功率流动失序等问题, 直接给居民与工商业用户的供电可靠性造成威胁。传统无功电压的调控大多依赖人工操作或固定阈值把控, 没有顾及光伏出力的动态方面变化, 难以契合高比例光伏接入情况下的台区调控需求。基于此, 探索整合光伏

预测的无功电压优化调控手段, 有助于提高台区电压控制精度、降低无功损耗、保障配电网安全经济运行。

2 配电台区光伏并网与无功电压调控基础理论

配电台区作为配电网末端的辐射型网络, 其电压和无功调节依赖“源-网-荷”共同协作: 台区变压器借助分接头切换(OLTC)对高压侧电压加以调节, 并联电容器组拿出基础容性无功, 而负荷的无功消耗随用电特性呈现动态变化, 三者一同使台区电压维持在额定范围。光伏并网主要核心是逆变器的功率转换特性: 逆变器可一边输出有功功率一边, 采用调节功率因数灵活输出或吸收无功, 成为实现台区无功调节的动态资源, 其调控应按照配电网无功功率“分层分区、就地平衡”原则, 防止无功长距离传输引发线路损耗增加与电压降落, 属于光伏参与台区无功电压调控的理论前提。节点电压方程($U=U_0-IR\cos\phi-Ix\sin\phi$)说明: 光伏出

【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。

力的波动引起的电流变化,会经由线路电阻(R)与电抗(x)影响到节点电压,无功功率($Q=UI\sin\phi$)调节后可直接改变电压偏差值,这为后续剖析光伏对台区电压的影响以及制定调控策略提供了数学基础^[1]。

3 光伏并网下配电台区无功电压问题分析

3.1 光伏出力波动对台区电压的影响机制

配电台区作为配电网的末梢,线路阻抗较大,电压调节可操作的裕度不多,光伏出力若出现波动,会通过功率流的变化直接影响台区电压。自然因素如光照强度、温度、云层遮挡等影响着光伏出力,呈现出日内短时大幅升降与日间周期性改变两种特征。当光伏出力瞬间出现大幅增长时,台区之内有功功率注入量忽然上扬,若本地负荷无法快速消纳,过剩的有功功率会沿线路传送,依照电压降落公式 $\Delta U=(PR+QX)/U$,线路有功损耗若改变会引发节点电压的抬升,尤其在台区末端,用户的电压容易超出10kV配网电压允许偏差范围;当光伏出力急剧下降时,有功注入量迅速下降,若上级配电网的功率未能及时补上,台区电压会随有功缺额猛然下降,可能会低于电压下限。若光伏出力的波动与用户负荷波动(如居民用电早、晚高峰)叠加,会进一步拉高电压波动的幅度,好比午间光伏出力达到峰值水平,和负荷谷值产生叠加,较易引发电压超过上限的问题,到了傍晚光伏出力大幅骤降与负荷晚高峰叠加,极易引起电压越下限现象。

3.2 光伏并网对台区无功功率分布的影响

传统配电台区的无功功率大多是从上级配电网向下级用户单向输送的,利用投切并联电容器、调节配电变压器分接头等途径维持无功平衡。光伏实现并网后,分布式光伏逆变器存有一定的无功调节能力,但调节范围因逆变器容量、控制模式而受限,打破了台区过去的无功功率分布格局。当光伏出力处于较高水平时,若本地负荷的电量消纳比例较低,多余有功功率逆向传送到上级配电网,逆变器为维持并网电压的稳定状态,可能主动发出无功功率,造成台区内部分节点的无功功率超出正常量,引起局部无功功率环流,线路无功损耗增大;若光伏出力处在较低阶段时,逆变器调节无功的本领下降,台区的无功需求需借助上级配电网补给,若上级配电网的无功供给量不足,靠近台区末端的用户会因无功功率的缺额出现电压偏低现象。不同光伏接入位置在影响无功分布上存在差异:若光伏接入到台区的首端,无功调节作用可笼罩整个台区,但若调节不当易引发全局无功不平衡;光伏接入到台区末端时,主要影响局部区域范围内的无功分布,或许会造成末端和首端无功功率分配不均,造成电压差异进一步加剧^[2]。

3.3 传统无功电压调控策略的局限性

传统配电台区的无功电压调控策略依据“被动响应、单一设备、固定模式”设计而成,难以契合光伏并网后的动

态变化需求。调控响应滞后,传统策略多数采用“电压超出限制后再调节”的被动模式,依赖配电变压器分接头实施机械调节、并联电容器组实施投切,而光伏出力波动具备分钟级乃至秒级的特点,传统设备的调节速度跟不上波动的节奏,易出现电压超标持续时间过长的难题。调控在预测方面存在缺失,传统策略未将光伏出力预测的相关信息结合,仅按照实时电压、无功数据拟定调控方案,无法预先应对光伏出力的变化走势,如无法提前判断午间光伏出力峰值引发的电压抬升风险,只有等电压超出限制后才被动进行调整,调控效果欠佳。设备协同的表现欠佳,传统策略一般针对单一设备做独立调控,像单独调节电容器组或分接头,没有统筹分布式光伏逆变器、静止无功发生器(SVG)等新型设备的调节潜力,造成台区内各类无功调节资源无法凝聚合力,电容器组投切和逆变器无功调节存在动作冲突,进一步加剧了电压波动。

4 基于光伏预测的配电台区无功电压优化调控关键技术

4.1 光伏预测与调控决策的融合机制

该机制把“预测先导、动态适配”作为核心内容,搭建光伏预测数据与调控决策的衔接渠道。首先要明确光伏预测在时间尺度方面的匹配性:短期预测(时间范围24-72小时)用于制定日调控安排,如提前规划配电变压器分接头的基础档位以及并联电容器组日间投切的时段;超短期预测(15分钟-1小时)用来进行实时调控修正,如根据分钟级出力预测状况调整逆变器无功出力。融合进程当中需解决预测误差,凭借历史数据训练误差修正的模型,把预测偏差限定在5%-8%以内,防止误差造成决策的失准,构建“预测-决策-执行”闭环反馈回路:把经过修正处理的光伏预测数据输入调控决策系统,结合实时负荷数据、设备的实际状态生成初步调控方案,随后借助实时监测电压、无功功率的数据动态调节方案,例如超短期预测显示,10分钟之后光伏出力将激增15%,预先要求逆变器吸收部分无功,防止电压抬升,实现从“被动回应”到“主动预判”的转变。

4.2 无功电压优化调控的目标体系与约束条件

目标体系需兼顾经济性、技术性以及安全相关方面,造就多维度的优化目标。经济性目标把降低台区综合损耗作为核心,包括线路有功损耗、设备运转时的损耗;技术性目标聚焦在电压质量提升上,如将台区全部节点电压偏差控制到 $\pm 3\%$ 以内、减小电压的波动幅度;安全性目标需达到设备安全运行要求,防止配电变压器过载、保证逆变器无功调节在额定容量的30%范围之内。约束条件需把设备特性和系统规则结合起来:设备约束方面,逆变器无功出力需满足 $Q_{inv} \in [-0.3S_{inv}, 0.3S_{inv}]$ (S_{inv} 为逆变器额定容量),配电变压器分接头调节必须在允许的档位界限内,并联电容器组投切次数控制在每日不超10次;系统约束方面,台区

总有功、无功功率要跟上级配电网开展协调,避免反向输送的功率超过上级电网的接纳能力上限,确保台区电压不超出10kV配网的运行范围界限。

4.3 优化调控模型与求解算法

优化调控模型采用“多目标、多变量”方式构建,主要是在符合约束条件的基础上实现目标体系最优。模型变量包括连续变量与离散变量:例如逆变器无功出力(Q_{inv})、上级配电网无功补给量(Q_{up})属于连续变量;离散变量如配电变压器分接头档位(T_{tap})、并联电容器组投切状态(C_{switch} , 1为投入, 0为切除)。目标函数采用加权求和途径,把经济性和技术性目标转换为统一的量化指标,如 $\min F = \omega_1 P_{loss} + \omega_2 \Delta U_{max} + \omega_3 N_{switch}$ (ω_1 、 ω_2 、 ω_3 为权重系数, P_{loss} 为线路有功损耗, ΔU_{max} 为最大电压偏差, N_{switch} 为电容器投切次数)。求解算法需平衡精度与效率:小规模台区可采用精准算法,如混合整数二次规划法,可快速算出全局最优解,计算时间维持在10秒以内;大规模台区应采用启发式算法,如改进的粒子群优化算法,采用引入自适应惯性权重的方式调整搜索速度,在20-30秒中获取近似最优解,适应实时调控的要求。算法需具备鲁棒性,可应对光伏预测误差、负荷波动等相关的不确定性,如利用区间优化把不确定性参数化为区间范围,保障求解结果在波动范围中依然有效^[3]。

4.4 基于光伏预测的典型调控策略分类

就调控时间维度而言,可分为三类典型策略,均把光伏预测数据作为核心依据。日前规划策略,依托24小时光伏短期预测及负荷预测,编制全天设备基础运行预案:若预计次日中午12-14时光伏输出功率达最大值,事先把配电变压器分接头调到低档位,再计划11时把1组并联电容器投入;预计次日傍晚18-20时光伏的发电能力大幅下降,事先指示逆变器预留20%的无功调节容量,处理负荷晚峰阶段的无功需求。日内滚动调控策略,依托15分钟到1小时的超短期预测,调控方案每5到10分钟更新一次:若超短期预测显示未来10分钟光伏出力将下降12%,实时把逆变器无功出力增加8%,同时要求上级配电网给予5%的无功电量补给,预防电压急剧降低;若预测显示光伏出力波动幅度不超过5%,则继续采用当前调控方案,防止设备频繁动作。应急调控策略,针对光伏预测偏差超10%的突发事件,触发快速应急响应机制:优先调用逆变器的无功备用量,若仍无法稳定电压,再紧急投切并联电容器组,向上级配电网传送

无功支援请求,保障电压在1分钟内恢复至许可范围,弥补传统策略应对突发波动能力的不足。

5 调控策略的案例分析与效果评估

选取某城郊10kV配电台区选例,该城郊的台区接入3台分布式光伏,采用传统调控方式,因光伏出力发生波动,电压合格的占比仅85%,线路平均月有功损耗为1.8万kWh。案例采用基于光伏预测的优化调控手段:利用LSTM模型来进行光伏超短期预测,把日前规划以及日内滚动调控结合,统筹逆变器、电容器与配电变压器协同动作。评估结果显示,调控后台区电压合格率提升至98.5%,日均电压超出正常范围的时长从45分钟降到3分钟以内;线路月均的有功损耗降低到了1.53万kWh,与传统策略相比降低15%;并联电容器的投切次数从日均8次降低至3次,配电变压器分接头日均调节次数从5次降到1次,降低设备的机械损耗,在光伏出力急促下降20%的突发状况中,优化策略在1分钟时段内把电压恢复至允许范围,证明了策略的动态适应及应急响应能力^[4]。

6 结语

综上所述,本文围绕高比例光伏接入状态下配电台区无功电压调控难题,全面剖析光伏出力波动的作用机制与传统策略的局限,搭建了融入光伏预测的优化调控技术体系,含有决策融合机制、目标约束体系与典型策略,经案例验证,策略在提升电压精度、降低无功损耗方面的有效性得到证实。研究为配电台区处理新能源波动、保证供电可靠性给出了理论支撑与实践途径。未来可进一步挖掘多源不确定性下策略的适配属性,也可借助智能算法优化调控响应的速度,助力配电网实现新能源消纳能力升级。

参考文献

- [1] 李帅虎,邹谈,李汉典,等.基于云边协同的低压配电台区DG分阶段电压控制策略[J].电力科学与技术学报,2025,40(03):52-60+122.
- [2] 刘阳,宗瑾,陈璨,等.考虑分布式光伏逆变器的低压配电台区过电压自动化治理[J].自动化与仪表,2025,40(01):23-27.
- [3] 孙硕恺,张妍婷,戚星宇.考虑源荷不确定性的交直流配电台区日前优化调度[J].供用电,2023,40(01):25-32.
- [4] 宁昕,王同勋,陈涵,等.基于目标规划法的配电台区无功电压优化[J].电力电容器与无功补偿,2022,43(03):1-7.