

配网调度中分布式电源接入的 协同控制策略研究

刘颖萱, 杨卓

(国网陕西省电力有限公司延安供电公司)

【摘要】针对高渗透率分布式电源接入带来的配电网调度复杂性问题, 本研究构建一种融合模型预测、不确定性建模与多时间尺度控制的协同控制策略。研究从物理层、控制层与信息层三方面搭建分布式电源友好型调度框架, 提出基于模型预测的出力优化模型, 构建考虑源荷随机性的动态调节机制, 并设计覆盖长期计划至秒级响应的多时间尺度有功—无功协同控制算法。采用改进的IEEE 33节点系统开展仿真验证, 评估策略在电压稳定性、响应时效性与控制资源效率方面的表现。结果表明, 所提方法具备良好的适应性与鲁棒性。

【关键词】分布式电源接入; 协同控制; 多时间尺度; 配电网调度

中图分类号: TM73

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2025.S2.141

Research on the Collaborative Control Strategy of Distributed Power Access in Distribution Network Scheduling

LIU Ying-xuan, YANG Zhuo

(State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Yan'an Power Supply Company)

【Abstract】Aiming at the complexity of distribution network scheduling caused by high permeability distributed power access, this study builds a collaborative control strategy for fusion model prediction, uncertainty modeling and multi-time scale control. This paper studies the construction of a distributed power supply-friendly scheduling framework from three aspects: the physical layer, the control layer and the information layer, puts forward an output optimization model based on model prediction, builds a dynamic adjustment mechanism that takes into account the randomness of the source charge, and designs a multi-time-scale active-reactive power collaborative control algorithm covering long-term planned to second-level response. The improved IEEE 33 node system is used for simulation verification to evaluate the performance of the strategy in terms of voltage stability, response timeliness and control resource efficiency. The results show that the proposed method has good adaptability and robustness.

【Keywords】distributed power access; collaborative control; multi-time scale; distribution network scheduling

1 引言

随着“双碳”目标的持续推进和可再生能源技术的快速发展, 光伏、风电等分布式电源在中低压配电系统中的渗透率不断提高, 传统以集中供电、单向潮流为核心特征的配电网运行模式正经历深刻变革。分布式电源接入提升了电能清洁性与供应弹性, 但其出力波动性强、预测误差大等固有特性给配电网的实时调度与安全运行带来挑战。现有研究多聚焦于单一控制层级或时间尺度, 难以实现全局层面的多源协同与时序协调。为此, 亟需构建面向多源异构、多尺度动态特性的分布式电源接入的调度框架, 融合模型预测、分布式优化与边缘响应机制, 实现调度策略的时空耦合与多层联动, 提升配电系统的运行安全性。

2 分布式电源接入框架构成

分布式电源接入配电网的调度框架设计需兼顾物理结构适配性、控制策略协同性及信息交互实时性, 其核心在于构建“物理—控制—信息”三层深度融合的架构体系^[1]。物理层框架中动态网络重构模型是支撑DG灵活接入的关键。模型以多目标混合整数规划为核心, 目标函数涵盖网损最小化、电压偏差抑制及开关动作成本优化, 约束条件包括辐射状拓扑、设备容量限值及N-1安全准则并保证在有限时间内获得可行解^[2]。柔性互联装置作为物理层与控制层的接口, 其容量配置依据相邻馈线功率交互极值, 控制模式设计需兼容稳态功率调节与暂态电压支撑功能。

控制层框架采用多代理系统实现分层协同。主站代理基于模型预测控制(MPC)滚动优化全网DG

出力计划,以15分钟为周期更新调度指令;区域代理部署于各供电分区边缘计算节点,运行分布式优化算法协调区内DG、储能与负荷,求解周期缩短至1-5分钟;设备代理集成于DG逆变器,借助改进下垂控制实现秒级自主调节,抑制电压频率瞬时波动。各层级代理间借助信息层建立的轻量化通信协议(如DDS或MQTT)实现数据交互,主站—区域层通信时延控制在50ms以内,区域—设备层时延低于10ms。信息层框架依托数字孪生技术实现物理电网的虚拟映射。基于CIM/GIS融合建模构建高精度拓扑模型,DG接入点被定义为动态节点类型,属性包含出力特性、调节范围及通信接口参数。实时数据借助PMU与智能电表采集,经边缘节点预处理后上传至数字孪生平台,平台内置状态估计模块校正量测误差,生成全网一致性的运行状态画像。

3 分布式电源接入的协同控制策略

3.1 基于模型预测的分布式电源出力优化模型

在配网调度体系中,高渗透率分布式电源接入导致源端出力波动性增强、负荷边界模糊、调度可控性下降,建立基于模型预测的出力优化模型,成为调度层面提升系统可观测性与可调性的关键措施^[3]。

在模型结构设计中,需结合配电系统运行特性引入状态变量间的物理约束,典型约束包括节点电压限值、馈线潮流方向、线路热稳定裕度及分布式储能荷电状态边界等,共同构成调度优化问题的约束集合。预测模型与优化模块间的时序耦合关系需保持闭环一致性,预测数据更新周期应覆盖控制周期的滚动窗口,保障调度决策的时效性与响应性。针对高维度预测误差对调度结果鲁棒性的影响,需在模型中引入场景集合优化机制:采用分位值概率模型生成代表性典型场景,通过加权求解或鲁棒优化确定最优策略,降低极端波动下的调度偏移风险。

优化目标需结合实际配网运行特性构建多目标函数结构,以运行经济性、电压稳定性与功率平衡性为核心,部分场景下兼顾网损最小与储能寿命最大化的联合优化。在求解层面,为克服模型非线性与大规模变量带来的计算负担,采用启发式智能算法与线性松弛技术并行构建求解路径:借助粒子群算法形成动态搜索策略,快速获取次优解并校验其在实际系统中的可行性,公式如下

$$x^* = x + v, \text{若 } x^* \in X \text{ 可行,则为可接受次优解} \quad (1)$$

式(1)中: x 为当前解, v 为搜索增量(由粒子群策略给出), x^* 为更新后的解, X 为满足系统运行约束的可行解空间。

在调度流程中,模型预测模块需与系统数据采集平台保持高频数据交互,动态更新输入特征参数,保障模型预测能力的时效性与适应性。模型部署需支持边缘计算能力,实现本地化快速响应与分布式计算,缓解中心调度平台的数据处理压力,增强系统灵活性与可扩展性。设备层面预测模型应具备设备级输出特征提取能力,结合状态感知与运行历史构建设备健康度评估指标,在调度优化中引入设备运行风险约束,避免设备过载与异常运行状态被误判为正常调度路径。

3.2 考虑源—荷不确定性的动态协同调节策略

在配电网调度系统中,分布式电源出力与用户负荷行为具有高度随机性与时变性^[4]。源—荷不确定性共同作用,导致系统运行状态持续偏离预测轨迹;常规调度方式在应对突发扰动时响应滞后、调节能力受限,需构建兼具实时感知能力与响应灵活性的动态协同调节策略。

调节策略的核心在于建立统一的源荷不确定性描述框架:将光伏、风电等可再生能源的气象驱动特性与用户侧负荷的行为响应模型统一嵌入调控逻辑,借助场景生成技术形成动态运行边界。在具体运行中,引入多时间尺度动态分解机制,将长期趋势与短时扰动分别处理,采用滚动时域优化模型实现状态追踪,公式如下:

$$J = \alpha J_n + \beta J_m \quad (2)$$

式(2)中: J 为多时间尺度下的总调度目标函数, J_n 为长期调度目标(如全周期能耗、计划出力), J_m 为短期调节目标, α, β 为时间尺度权重因子(通常满足 $\alpha + \beta = 1$),用于权衡长期与短期目标的优先级。

在调节路径选择中,需综合评估多元调节资源的边际调节成本、响应速度与可用持续时间,构建调节优先级队列。分布式储能系统作为关键缓冲装置,在系统出现短时功率失衡或电压波动时提供快速支撑,需在调节策略中显式刻画其状态转移过程与能量容量边界。柔性负荷作为负荷侧主动参与的重要载体,需结合用户侧响应模型,定义可中断负荷的启停阈值、调节时长与用户接受度约束,实现与源端的协同补偿。

3.3 多时间尺度下的有功—无功协同控制算法

配电网中分布式电源高比例接入,导致电网运行状态在时序维度上呈现显著的多尺度动态特征,单一时间尺度的控制算法难以实现系统整体有功—无功的协调匹配。多时间尺度有功—无功协同控制算法应根据调度周期、电气量变化速率与控制目标响应时限,构建层次分明、逻辑一致的控制架构。

算法结构上采用分解协调方法划分控制任务与约束空间:长期优化任务采用集中式调度方式解算全局最优控制量,以有功优化为主并附带无功配合策略;中期层面采用分布式优化方法,由各子区域基于本地预测数据和边界条件同步求解;短期控制则以局部状态为驱动信号触发即时响应动作,反向传递边界信息实现状态闭环,其公式如下:

$$u_i = f_i(x_i, x_j) \quad (3)$$

式(3)中: u_i 为区域 i 的控制动作, x_i 为本区域状态, x_j 为邻近区域边界状态, f_i 为本地控制函数,动态响应本地状态并参考相邻区域边界状态进行调节。

在具体建模时,需考虑有功调节对节点电压的影响,以及无功分布对潮流路径的反馈作用,构建精细化的电压—功率灵敏度矩阵,将设备物理特性与调节能力内嵌入解算模型。功率控制目标需兼顾网损、频率偏移、电压偏移量与储能能量平衡,形成统一目标函数在多时间域内层级传递。

4 仿真验证

在仿真验证环节,选用改进后的IEEE33节点系统作为基础模型,构建含分布式光伏、风电、储能装置及可调负荷的多元耦合配电系统。模型调整节点功率分布,强化末端节点电压稳定性挑战,借助实测气象数据驱动光伏出力,引入居民与商业负荷混合建模,提升系统动态特性拟合度。

控制策略重点验证源荷动态波动下的电压控制能力、系统响应特性及资源协同效率。仿真结果显示:各节点电压偏移最大值由0.08p.u.降至0.018p.u.,越限节点数由9个降至2个,电压稳定性显著增强;无功调节装置动作频率减少超三成,说明控制策略在资源协调方面具备合理性;有功侧频率偏移峰值控制在0.035Hz以内(原系统频率偏移超0.12Hz),储能出力与光伏波动互补区间一致性高于95%,动态调节精度高。

在源荷不确定扰动场景下,仿真引入光照骤降、

负荷冲击、通信丢包等扰动序列,系统快速启动边缘响应机制:平均响应时间由6.4s缩短至2.9s,短期稳态偏移从0.07降至0.027,有较强动态稳定性。系统在不依赖中心调度的条件下,可维持主要节点电压合规性,资源调动更合理,设备调节动作次数由62次降至39次,稳定性与资源利用率同步优化(见图1)。

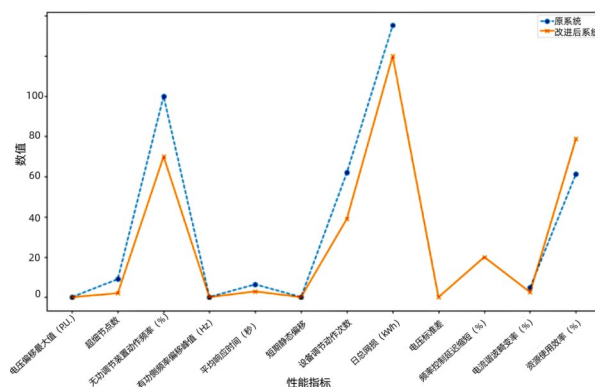


图1 系统改进前后性能对比

多时间尺度对比中,长周期策略降低日总网损约15kWh;中期策略提升区域电压稳定性,电压标准差下降至0.021p.u.;短期策略提升响应精度,频率控制延迟缩短20%以上。三类策略融合后系统综合性能最优,控制器资源调配更精细。结果表明,该控制算法可在高渗透率新能源接入背景下,实现对系统状态的精准跟踪与响应控制,适合大规模部署。

5 结语

本研究围绕配电网分布式电源接入引发的调度与控制问题,构建集成模型预测、源荷不确定性建模与多时间尺度协同控制的完整策略体系,提出多层次控制架构与动态响应机制,在改进IEEE33节点系统开展仿真验证。结果表明,该方法可提升系统电压稳定性、控制响应速度与资源协同效率。

参考文献

- [1] 魏光明, 邱东, 慕俊强, 等. 分布式电源接入对配电网网络损耗的影响研究[J]. 石河子科技, 2024 (1): 34-35.
- [2] 王玲, 朱远哲, 杜婉琳, 等. 考虑分布式电源接入的电压暂降状态估计与监测装置优化配置方法[J]. 广东电力, 2024, 37 (1): 60-67.
- [3] 曹亮, 房睿, 张怡捷. 分布式电源接入对配电网的影响分析[J]. 电力与能源, 2023, 44 (6): 622-624.
- [4] 吴玮华, 周玲, 李彪, 等. 分布式电源对配网继电保护的影响研究[J]. 低碳世界, 2023, 13 (12): 52-54.