

配电网自动化中的智能代理技术与分布式协调控制

张家铭, 赵怡轩

(国网商洛市商州区供电公司)

【摘要】随着能源转型和电力体制改革的推进, 配电网的规模不断扩大, 新能源接入比例持续提高, 传统的配电网控制模式已难以满足复杂运行场景的需求, 文章围绕配电网自动化中的智能代理技术与分布式协调控制展开研究, 阐述智能代理技术的原理及特性, 分析其在配电网分布式协调控制中的应用模式。探讨智能代理技术与分布式协调控制结合在提升配电网运行效率、故障处理能力、新能源消纳等方面的优势, 为推动配电网智能化发展提供理论参考与实践思路。

【关键词】配电网自动化; 智能代理技术; 分布式协调控制; 新能源消纳; 电网智能化

中图分类号: TM76

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2025.S2.163

Intelligent Agent Technology and Distributed Coordinated Control in Distribution Grid Automation

ZHANG Jia-ming, ZHAO Yi-xuan

(State Grid Shangluo City Shangzhou District Power Supply Company)

【Abstract】With the promotion of energy transformation and power system reform, the scale of the distribution grid continues to expand, and the proportion of new energy access continues to increase. The traditional distribution grid control mode is difficult to meet the needs of complex operation scenarios. This article focuses on the research of intelligent agent technology and distributed coordination control in distribution grid automation, and elaborates on the principle and characteristics of intelligent agent technology, and analyze its application mode in distributed coordinated control of the distribution grid. It explores the advantages of combining intelligent agent technology and distributed coordinated control in improving the operation efficiency of the distribution grid, fault handling ability, new energy consumption, etc., and provides theoretical reference and practical ideas for promoting the intelligent development of the distribution grid.

【Keywords】distribution grid automation; intelligent agent technology; distributed coordination control; new energy consumption; power grid intelligence

1 引言

配电网自动化已成为提升电网可靠性、灵活性与经济性的重点手段, 智能代理技术以其自主决策、交互能力强等特点, 结合分布式协调控制, 为配电网自动化提供了全新解决方案, 可实现配电网内各种设备智能协同, 并有效应对分布式电源间歇性与负荷不确定性问题。本文旨在深入探究智能代理技术与分布式协调控制应用在配电网自动化中的应用, 并剖析其应用价值和面临的挑战。

2 配电网自动化发展状况及需求分析

在经济快速发展与能源结构调整背景下, 配电网自动化水平已成为衡量一国电力供应质量的重要

标志, 我国配电自动化行业市场规模持续扩大, 从2017年的58.17亿元增长至2023年的95.05亿元, 年复合增长率达8.53%, 配电自动化覆盖率已超90%。截止2023年, 主站市场规模达49.11亿元, 子站规模为24.79亿元, 终端规模为18.48亿元, 故障指示器规模为2.67亿元; 全年市场需求量高达29.47万台套, 其中终端需求量为20.53万台套。现阶段我国配电自动化发展呈现明显区域差异^[1]: 在一线城市和经济发达省份, 配电自动化普及率高达90%, 可实现毫秒级故障隔离; 而在县级和农村地区, 覆盖率约为60%~70%, 故障处理仍以人工干预为主。技术架构方面, 主站系统正由省级集中式架构向地市级分布式架构演进; 以南瑞、许继电气等品牌为主导的终端设备, 国产化率已超过80%; 通信网络正向5G、电力载

波通信(PLC)及其他多模态融合技术方向发展。

3 智能代理技术的基本原理和特点

智能代理作为计算机科学与人工智能领域的关键研究方向,是一类特殊的自主系统,能够感知环境信息并按照内部逻辑进行决策和行动。其基本构成包括感知模块、决策模块、执行模块及学习能力:感知模块作为智能代理从外部获取信息的门户,涉及摄像头、麦克风和各种物理传感器。例如摄像头可拍摄环境视觉图像并向代理提供对象形状与位置信息,温度传感器能准确测量环境温度数据;决策模块可视为智能代理的核心“大脑”,利用机器学习分类技术、深度学习的神经网络模型等工具,对感知信息进行深入分析和推断,进而作出相应决策;执行模块承担将决策变成实际行动的任务,如控制工业机器人机械臂的动作;学习能力则使智能代理可从过往经验中学习,例如强化学习能让代理根据奖励反馈优化行为策略,同时与环境保持互动。

4 配电网自动化中的智能代理技术与分布式协调控制的方法

4.1 多智能体的分层分布式控制

多智能体的分层分布式控制系统采用“主站—区域控制器—终端设备”的三层结构,以实现配电网资源的整体协同优化,顶层主站系统采用分布式实时数据库部署,具备20万/秒的实时数据处理能力,数据更新周期缩短至120ms内;中间层区域控制器配备多核异构处理器,支持4000+节点并行计算,复杂拓扑分析响应时间控制在350ms以内;底层智能终端将边缘计算单元整合到本地,决策时延压缩至60ms。各级智能体之间采用基于5G-URLLC(超高可靠、低时延的通信)技术的通信网络,该网络确保端到端传输时延始终保持在8ms以下,数据丢包率低于0.1%,从而保障控制指令的高效与可靠。从控制策略层面,系统采用改进一致性算法进行全局优化,收敛速度较传统集中式控制提高了四倍多^[2]。通过对分布式电源和负荷进行协同调度,可有效将电压波动控制在 $\pm 2\%$ 范围内,频率偏差控制在 $\pm 0.1\text{Hz}$ 区间内。实测数据显示,当配电网分布式电源渗透率达到40%时,该控制策略能使网络的损耗减少18.6%,整体运行效率提升25%,显著提高了配电网的供电稳定性和经济效益(见图1)。

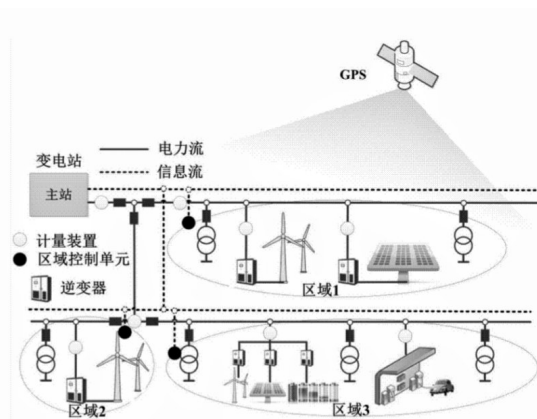


图1 分层分布式控制

4.2 分布式电源的自适应配合

基于模型预测控制(MPC)技术,分布式电源的自适应协调控制构建了涵盖光伏、风电和储能等多种电源类型的协同工作框架:光伏电站智能代理系统采用优化后的粒子群优化(PSO)算法中的最大功率点跟踪(MPPT)方法,使光伏阵列发电效率提升至99.3%,同时电压波动控制在 $\pm 2.5\%$ 范围内;风电智能代理集成长短时记忆网络(LSTM)预测模型,可在15min内将功率预测误差率控制在4%以下,且当风速变化率超过 2.5m/s^2 时,能在180ms内完成功率调整响应;储能系统采用自适应下垂控制策略,在分布式电源功率波动时,系统可在120ms内快速响应,并提供 $\pm 20\%$ 额定容量功率调节能力^[3]。该系统能够对500台以上分布式电源设备进行集群控制,通过源—储协同优化,成功将新能源整体使用率从80%增加至92%,弃风弃光率降至2.5%及以下,显著增强了配电网对可再生能源的消纳能力(见图2)。

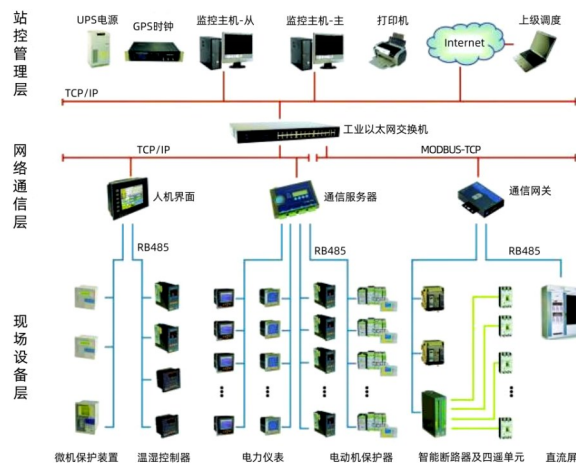


图2 分布式电源自适应

4.3 加强学习负荷的动态协同

利用双深度Q网络(DDQN)算法可构建基于深度强化学习的负荷动态协同控制智能决策模型,通过与配电网运行环境的持续互动学习,实现对多种负荷的智能调整。该系统能够同时处理工业、商业和居民等多类型负荷,对可控负荷的识别精度高达98%以上,且1小时时间范围内的负荷预测误差可控制在3.5%之内。实际操作中,智能代理会根据电价信号和电网运行状况等多维度信息,每5分钟制定一次优化控制策略,响应速度比传统方法提升三倍。针对电动汽车充电负荷,通过实施有序充电控制策略,可将配变负载率峰谷差减少28%,变压器过载时间减少65%;在空调负荷集群控制场景中,通过动态调整温度设定值,可挖掘15%的负荷调节潜能,同时确保用户侧体感温度变化不超过 $\pm 1^{\circ}\text{C}$,既保障了供电可靠性,又提升了用户用电体验。

4.4 故障迅速定位隔离配合

基于多智能体信息交互和贝叶斯推理算法的故障快速定位隔离协调系统,实现了配电网故障快速诊断和处理。该系统采集FTU、DTU和其他终端设备上传的故障电流和电压突变信息,并于故障后50ms内完成故障特征提取;通过贝叶斯网络推断故障区域,定位准确性高达99.2%,故障定位时间缩短至150ms之内。故障隔离环节采用智能分布式FA(馈线自动化)技术,相邻终端通过光纤以太网实现快速通信,跳闸指令传输时延不超过10ms。实测的数据显示,从故障发生到完全隔离的全过程耗时不超过300ms,与传统集中式处理方法相比,效率提高了70%。在包含分布式电源的复杂配电网络中,该系统能有效避免故障电流的反送问题,确保非故障区域能够迅速恢复供电,将平均恢复时间从原先的15分钟缩短到不超过2分钟,大幅提升配电网供电可靠性指标(SAIFI的频率降至0.5次/户·年,而SAIDI则缩减至12分钟/户·年)。

4.5 新能源储能的协同控制

新能源储能协同控制通过搭建“来源—储存—网络”多主体协同框架,实现储能系统与光伏、风电等新能源的深度融合。在控制结构设计中,采用“集中决策加分散实施”策略,其中顶层能量管理系统(EMS)具备每秒处理10万条实时数据的能力,数据更新的周期不超过100ms;底层储能变流器(PCS)搭

载了高速采样芯片,采样频率可达10kHz,响应时间不超过5ms。在协同控制策略的应用中,采用了基于模型预测控制(MPC)的算法,并与风光功率预测数据相结合,以实现储能系统功率的精确调整。对于光伏电站而言,当光照强度变化率大于 $150\text{W}/\text{m}^2$ 后,储能系统能够在200ms之内完成充放电切换以平滑光伏功率波动,并将输出功率的波动率限制在 $\pm 1\%$ 以内;在风电场中,当风速的变化率超出 $3\text{m}/\text{s}^2$ 时,储能系统在300ms之内作出反应,从而将风电功率的预测误差从15%减少到不超过6%。

在储能的容量配置和优化操作中,采用遗传算法对储能配置进行了优化,确保在达到削峰填谷、调频调压等多个目标的同时,储能的使用效率能够超过85%。实际运行数据显示,在新能源的渗透率达到50%的配电网络中,采用这种协同控制方法后,弃风和弃光的比率下降至2.2%,而系统的频率偏移被限制在 $\pm 0.08\text{Hz}$ 范围内,电压的合格率达到99.99%,大幅提高了配电网络对高比例新能源的接纳和调节能力。

5 结语

智能代理技术与分布式协调控制的融合为配电网的自动化进程开辟了新的道路,在提升电网的运行效率、推动新能源的吸纳方面展现了明显的优越性。尽管在实际应用中仍面临诸多挑战,但随着技术的不断进步与完善,二者的深度融合将持续推动配电网向更加智能化、高效化、可靠化发展,为新型电力系统建设和能源转型提供有力支撑。

参考文献

- [1] 高崇, 陈沛东, 曹华珍, 等. 中压配电网分布式智能后备保护方案[J]. 南方电网技术, 2023, 17(8): 77-84.
- [2] 武晓朦, 李冲, 苏成果, 等. 基于数据驱动的主动配电网分布鲁棒有功无功协调优化[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2023, 38(1): 50-57.
- [3] 叶圣永, 刘旭娜, 李海波, 等. 考虑“水光充储”协调运行的电动汽车充电站规划[J]. 太阳能学报, 2025, 46(2): 262-271.