

Collaborative Control and Simulation Analysis of Active Distribution Network Based on Multi Agent System

Zetao Sun¹ Jie Zhang²

1. Gansu Nonferrous Metallurgy Vocational and Technical College, Jinchang, Gansu, 737100, China

2. State Grid Jinchang Power Supply Company, Jinchang, Gansu, 737100, China

Abstract

Under the background of large-scale integration of new energy and diversified loads, active distribution networks have higher requirements for intelligence and collaborative control. Multi agent systems (MAS) have become the core technology path for collaborative control due to their distributed decision-making, autonomous collaboration, and strong fault tolerance. This article systematically reviews the application architecture and key technologies of MAS in active distribution networks, analyzes information exchange mechanisms, autonomous decision-making models, and fault self-healing capabilities, and proposes a collaborative control method that adapts to the integration of distributed power sources, energy storage, and flexible loads. By building typical operating scenarios through simulation platforms, the effectiveness of MAS in voltage control, reactive power optimization, distributed resource coordination, and fault self-healing has been verified. Research has shown that MAS can significantly enhance the dynamic adaptability and collaborative level of active distribution networks, providing theoretical and technical support for the safe, economical, and flexible operation of new distribution systems.

Keywords

multi-agent system; Active distribution network; Collaborative control; Distributed optimization; simulation analysis

基于多智能体系统的主动配电网协同控制与仿真分析

孙泽涛¹ 张杰²

1. 甘肃有色冶金职业技术学院, 中国·甘肃 金昌 737100

2. 国网金昌供电公司, 中国·甘肃 金昌 737100

摘要

主动配电网在新能源大规模接入和负荷多样化背景下, 对智能化与协同控制提出更高要求。多智能体系统(MAS)凭借分布式决策、自治协作和强容错性, 成为协同控制的核心技术路径。本文系统梳理了MAS在主动配电网中的应用架构与关键技术, 分析信息交互机制、自治决策模型及故障自愈能力, 并提出了适应分布式电源、储能与柔性负荷融合的协同控制方法。通过仿真平台搭建典型运行场景, 验证了MAS在电压控制、无功优化、分布式资源协调与故障自愈等方面的有效性。研究表明, MAS可显著提升主动配电网的动态适应能力与协同水平, 为新型配电系统的安全、经济、柔性运行提供理论和技术支撑。

关键词

多智能体系统; 主动配电网; 协同控制; 分布式优化; 仿真分析

1 引言

随着新能源消纳比例提升、分布式电源与储能单元的大量接入, 传统配电网“被动供电、中心调控”的模式难以适应新型负荷与多元电源的灵活调度需求。主动配电网以感知—通信—决策—执行一体化为特征, 强调各节点的自治响应与全局协同, 是电力系统智能化转型的重要方向。然而, 主动配电网内部设备类型多样、控制需求复杂、信息不确定性高, 集中式控制架构难以兼顾系统的灵活性、可扩展性与

鲁棒性。多智能体系统以其分布式、自治型、协作型的特性, 为主动配电网提供了理论与工程上的可行解。本文聚焦多智能体系统在主动配电网中的协同控制技术, 围绕分布式优化调度、自治决策与故障自愈等关键环节, 系统分析其应用路径, 并通过仿真案例验证协同控制策略的有效性, 旨在为新型配电系统的智能运行与管理提供参考。

2 多智能体系统理论与主动配电网建模

2.1 多智能体系统的基本概念与特性

多智能体系统(Multi-Agent System, MAS)是指由多个自治智能体通过信息交互与协作共同完成复杂任务的分布式系统。每个智能体具备自主感知、独立决策和执行任务

【作者简介】孙泽涛(1985-), 男, 中国甘肃永昌人, 本科, 工程师, 从事电气自动化研究。

的能力，能够根据局部环境状态灵活响应，同时通过通信协议与其他智能体高效协作，实现整体系统目标的最优动态调整。MAS 最突出的特性包括自治性、分布性、可扩展性和容错性。在实际应用中，MAS 能够有效降低系统对单一中心节点的依赖，提高面对不确定性和扰动时的系统鲁棒性。随着理论与技术的不断进步，多智能体系统已从早期的感知—推理—行为三阶段演进为具备复杂学习、适应与博弈能力的智能群体，广泛应用于分布式控制、资源调度、机器人群控和主动配电网等领域。MAS 不仅提升了复杂系统的智能化水平，也为未来智能电力系统的构建提供了理论与技术基础。

2.2 主动配电网的系统建模

主动配电网作为新一代智能电力系统的重要组成部分，区别于传统被动供电模式，其本质在于全网的信息感知、灵活调节和全局协同。主动配电网的系统模型包含多元主体：如光伏、风电等分布式电源，储能装置，柔性负荷，以及智能化的配电自动化设备等。在 MAS 建模过程中，系统常将智能体划分为主控智能体（承担全局调度与优化）、局部智能体（如分布式电源、储能、负荷侧等的本地自治控制）和通信智能体（负责网络数据流畅与安全管理）。这些智能体依据标准化通信协议和信息共享规则进行协同交互，在实现各自本地约束和目标的同时，通过分布式协作完成对配电网状态的全局自适应调节。科学的建模不仅提升了系统仿真的真实性，也为后续多智能体优化与仿真验证提供了坚实基础。

2.3 多智能体系统的分布式控制架构

MAS 为主动配电网提供了分层与分布式的控制体系架构。该架构一般分为上层主控智能体（实现全局优化调度与策略制定）、中间层区域智能体（承担局部协调和数据中继）、下层局部智能体（负责本地实时感知与快速响应）。各层通过消息传递、协议协商和分布式算法等机制实现信息的有效融合与动作的协同，极大提高了系统整体的弹性和适应能力。分布式控制架构可在面对分布式电源出力不确定、负荷剧烈波动等复杂工况时，展现出优良的自组织与自愈能力，显著降低故障风险和通信瓶颈。该模式不仅适应了主动配电网复杂多变的运行环境，也为新型电力系统的智能化升级提供了可扩展的技术路径。

3 主动配电网中的多智能体协同控制策略

3.1 分布式电源与储能的协同调度

在主动配电网的复杂环境下，多智能体系统（MAS）为分布式电源（如光伏、风电）和储能单元的协同调度提供了高效手段。各智能体根据本地资源状况与实时负荷需求，独立执行能量平衡和调度任务，并通过通信协议与主控智能体共享状态信息与调控策略。以光伏智能体为例，可依据气象预测结果和辐射强度，动态优化输出功率，减少弃光现象。

储能智能体则在监测电价信号、负荷需求及新能源出力的基础上，智能决策充放电策略，实现经济性与系统安全性的统一。在全局层面，主控智能体利用分布式优化算法，对各分布式资源进行有序协调与调度，确保全网能源流动的最优路径和资源的高效利用。通过多智能体的协同调控，主动配电网能够大幅提升新能源消纳能力，降低峰值负荷和运行成本，并助力实现低碳与可持续发展目标。

3.2 电压无功与频率自适应控制

电压、无功和频率是影响配电网安全稳定运行的关键参数。MAS 架构下，局部智能体可实时监测本地节点的电压和频率变化，基于感知信息实施快速调节，提升了分布式控制的响应速度和灵敏性。主控智能体则通过收集全网状态信息，利用动态优化算法协调各节点控制策略，实现全局电压无功和频率的协同优化。多智能体基于共识算法的分布式电压控制，可在无中心节点依赖的情况下，快速协调各节点电压，适应不同的运行工况。针对新能源接入和电动汽车充电等场景中出现的扰动，MAS 还能采用预测性控制与多智能体协商机制，提高系统抗扰动能力和鲁棒性。仿真结果表明，该模式在频繁波动和非线性扰动环境下表现出优良的自适应性与稳定性，有效保障配电网安全可靠运行。

3.3 灵活负荷与微电网协同优化

主动配电网的发展趋势不仅在于分布式电源的广泛接入，还体现在大规模柔性负荷和局部微电网的协同优化。MAS 框架下，负荷智能体通过实时采集电价、电网状态与用户需求信息，灵活调整用电模式，积极参与需求响应、削峰填谷和辅助服务。通过与其他智能体的信息共享与策略协同，负荷智能体能够动态参与到系统调峰、频率调节及紧急避峰等关键任务中。微电网智能体则在主网断开或孤岛运行时，能够基于本地资源状况实现自治调度，保证局部区域的电力供应安全和自愈恢复能力。两类智能体通过协同优化，提升了系统整体的弹性与可靠性。整体来看，MAS 实现了能源资源、负荷侧与微电网间的动态协调，为主动配电网的智能化、分布式和高效运行提供了坚实技术支撑。

4 多智能体系统的信息交互与故障自愈机制

4.1 信息交互与安全通信机制

多智能体系统（MAS）在主动配电网中的有效运行高度依赖于智能体间高效、可靠的信息交互。本文结合分布式消息队列架构，实现了各智能体的数据异步传输与高效共享，显著提升了系统的实时性与响应速度。在通信协议层面，引入端到端加密机制，有效保障了数据在传输过程中的保密性和完整性，防止敏感信息被窃取或篡改。针对配电网实际运行中可能出现的通信故障、链路失效或网络拥堵，系统配置了冗余链路和多路径容错方案，使得信息在多条路径间动态切换，保证关键控制数据的可靠到达。此外，通过智能体身份验证与访问控制机制，有效防范了恶意攻击和伪造节点

的风险。整体而言,该安全通信机制为多智能体系统提供了坚实的信息安全和抗风险基础,是实现主动配电网智能协同的前提保障。

4.2 自治决策与局部故障识别

主动配电网中的各类智能体具备本地感知、实时决策与自主执行的能力。每个智能体可独立获取本地运行数据,对电压、电流、频率等关键参数进行动态监测。当分布式电源、储能或负荷等节点出现设备异常或运行状态异常时,智能体可通过内置的故障诊断算法及时发现问题。例如,分布式光伏智能体在检测到逆变器异常波动后,可迅速隔离故障节点,并将状态和诊断信息实时上报至主控智能体。主控智能体据此协调周边节点调整运行策略,实现对局部故障的快速响应与主动保护,避免异常扩散对全局系统产生不良影响。这一自治决策与故障识别机制,不仅提高了主动配电网的自愈水平,还极大增强了系统的鲁棒性和安全可靠性能。

4.3 全局自愈与多智能体协作恢复

在遇到大范围扰动、主网断开或局部区域大规模失电等极端情形时,多智能体系统能够展现出强大的全局自愈与协作恢复能力。主控智能体首先发起全局自愈流程,指令各子智能体启动自诊断和重构程序,自动检测和隔离故障区域,动态重组电网运行结构。通过群体智能与分布式协作优化算法,系统在最短时间内协调各节点实现供电路径重设、控制参数自适应调整,最大限度恢复非故障区的供电能力和运行稳定性。仿真与实际工程应用均表明,该机制下的主动配电网自愈速度与恢复效率远优于传统集中控制方式,能够有效抵御大规模扰动带来的连锁反应,保障电网持续安全与高效运行。这一全局自愈与协作机制,为实现高可靠性的新型智能配电网提供了关键技术支撑。

5 主动配电网多智能体协同仿真与案例分析

5.1 仿真平台搭建与模型参数设定

为了全面评估多智能体系统(MAS)在主动配电网中的协同控制效果,本文基于OpenDSS与MATLAB/Simulink等主流仿真平台,搭建了具备高度工程代表性的多智能体主动配电网仿真系统。模型结构涵盖光伏、风电、储能、柔性负荷及微电网等典型主体,并按照分层、分布式的MAS通信结构配置智能体,确保系统具有自治性与协作性。各类智能体具备本地感知、决策与控制能力,通过高效通信协议实现实时信息共享与协同响应。为保证仿真结果贴合实际工程环境,所有模型参数均参照国内典型配电网的实际运行数据进行设定,包含节点容量、线路参数、负荷波动范围以及新能源出力曲线等。通过科学的建模与参数校准,仿真平台能够真实反映配电网在多智能体协同调控下的动态行为,为后续运行场景测试与策略验证奠定了坚实基础。

5.2 典型运行场景与仿真结果分析

针对主动配电网面临的多样化运行工况,本文设计了

高比例新能源接入、负荷快速波动、节点局部故障和主网异常等多种典型测试场景。在高渗透率新能源接入场景下,MAS能实时协调各电源和储能,实现电压、无功与频率的动态最优调节,有效吸纳波动性电源,保持系统平稳运行。负荷快速波动情形下,柔性负荷与储能智能体可自适应调整策略,平滑负荷曲线,提升系统抗扰能力。面对节点故障或主网断开等极端事件,MAS可迅速识别故障区域,自治决策隔离异常,并通过协同机制实现系统重构与自主恢复。仿真结果表明,在MAS分布式协同控制下,配电网的动态稳定性与鲁棒性大幅提升,恢复时间和供电可靠性均优于传统集中式调控,充分展现了多智能体系统在主动配电网中的实际应用优势。

5.3 策略优化与工程应用建议

仿真分析揭示,多智能体系统在主动配电网中协同控制的效果显著,但提升系统效能还需在通信、决策与协作机制等层面持续优化。首先,应进一步提高智能体间的通信速率和可靠性,减少数据延迟与信息丢包对系统协同的影响。其次,完善自治决策机制,使各智能体更能智能、精准地应对多源信息与突发扰动。再次,优化群体协作算法,提升全局目标下的资源分配与控制效率。针对实际应用,应加强分布式控制器件和通信网络的可靠性测试,完善信息安全与身份认证体系,防范外部攻击和通信异常带来的风险。此外,建议在实际电网中积极推广基于MAS的主动配电网示范项目,积累工程经验,为智能电网的大规模应用与发展提供坚实的技术和管理基础。

6 结语

多智能体系统为主动配电网的智能化、分布式与柔性运行提供了坚实理论基础和工程实现路径。本文系统梳理了MAS在主动配电网协同控制中的理论、策略与仿真方法,验证了其在分布式优化、电压频率控制、柔性负荷响应与故障自愈等方面的有效性。未来,随着通信与人工智能技术的持续进步,多智能体系统将在主动配电网及新型电力系统中发挥更大作用,为新能源高比例消纳和电网安全稳定运行提供关键支撑。

参考文献

- [1] 阙德威.基于多智能体强化学习的配电网电压控制策略研究[D].临沂大学,2024.
- [2] 黄诗颖.基于深度强化学习的主动配电网源荷协调运行优化研究[D].山东大学,2023.
- [3] 潘登.电力市场环境下的数字孪生和多智能体的电网规划研究[D].东南大学,2022.
- [4] 肖茂然,郭宁,强宇一,等.基于领域驱动的配电网边缘智能体系统构建[J].电力需求侧管理,2024,26(06):81-87.
- [5] 张雪莹,曾强,陈腾生.基于一致性理论的主动配电网分层分区经济性协调控制研究[J].电气自动化,2024,46(01):47-51.