

Interactive operation control method of distributed energy and distribution network based on multi-Smart Actor system

Zhengdong Deng Xuannian Lei

Chuxiong Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Chuxiong, Yunnan, 675000, China

Abstract

With the rapid development of distributed energy, the operation structure and control mode of distribution networks have undergone profound changes. The high proportion of distributed energy access has endowed the distribution network with new characteristics of multi-source heterogeneity and dynamic interaction. The problems of the traditional centralized control system, such as lagging response, low collaborative efficiency and poor flexibility, have become prominent. The multi-Smart Actor system, as an innovative application of distributed intelligent agent technology, endows each energy unit in the distribution network with the attribute of “intelligent actor”, achieving autonomous, collaborative and elastic interactive control. This paper first elaborates on its structure, principle and collaborative strategy in the interaction between distributed energy and distribution networks, then analyzes key technologies such as information interaction, and proposes a hierarchical distributed control architecture and multi-scenario optimization schemes. Verified by typical simulations and engineering cases, this method has obvious advantages such as enhancing system flexibility. Finally, it looks forward to its prospects in fields such as the smart energy Internet and puts forward suggestions for optimization and promotion.

Keywords

Distributed energy; distribution network; Smart Actor system; interactive operation; distributed control

基于多 Smart Actor 系统的分布式能源与配电网互动运行控制方法

邓正东 雷宣念

云南电网有限责任公司楚雄供电局, 中国·云南 楚雄 675000

摘要

随着分布式能源迅猛发展, 配电网运行结构与控制模式发生深刻改变。高比例分布式能源接入, 让配电网呈现多源异构、动态交互新特点, 传统集中式控制体系响应滞后、协同效率低、灵活性差等问题凸显。多 Smart Actor 系统作为分布式智能体技术创新应用, 赋予配电网各能源单元等“智能行为体”属性, 达成自治、协同、弹性互动控制。本文先阐述其在分布式能源与配电网互动中的结构、原理及协同策略, 再分析信息交互等关键技术, 提出分层分布式控制架构与多场景优化方案。经典型仿真和工程案例验证, 该方法提升系统灵活性等优势明显。最后展望其在智慧能源互联网等领域前景, 并提出优化推广建议。

关键词

分布式能源; 配电网; Smart Actor 系统; 互动运行; 分布式控制

1 引言

在能源转型与“双碳”目标推进下, 分布式光伏等新型电力资源在配电网中占比提升, 促使电网从“集中一元”向“多元协同”转变。此时, 配电网面临电力等多流多维交互, 还要应对新能源接入带来的复杂特性, 传统调度与响应机制难适高效、安全、灵活运行需求, 亟需构建互动控制新范式。多 Smart Actor 系统作为重要技术路径应运而生,

它以 Agent 建模为基础, 赋予配电网各单元智能能力, 实现源—网—荷—储协同自治, 潜力巨大。本文将系统梳理其核心理论、结构体系与关键技术, 探讨在分布式能源与配电网互动运行控制中的实践路径与优化策略, 并结合工程应用及趋势, 为配电网智能化转型提出创新方向与工程建议。

2 多 Smart Actor 系统的理论基础与体系结构

2.1 多 Smart Actor 系统的基本原理与建模方法

多 Smart Actor 系统起源于多 Agent 系统 (MAS) 理论, 将配电网中的分布式能源、可控负荷、储能、柔性装置等物理单元, 抽象为具有感知、判断、决策与执行能力的“智能

【作者简介】邓正东 (1983–), 男, 湖北省广水人, 硕士, 工程师, 从事电网调度与控制研究。

行为体”，即 Smart Actor。每个 Smart Actor 不仅能够自主完成本地优化控制，还能通过通信网络与其他行为体实现信息共享与决策协同。这种自治与协同并重的智能体模型，打破了传统“自上而下”调控的壁垒，使得配电网具备高度灵活、弹性的自适应运行能力。其建模过程包括状态变量定义、行为规则设定、通信协议制定、交互机制约束等环节，确保不同类型 Smart Actor 之间既可独立行动，也能动态协作，兼顾本地目标和全局最优。

2.2 体系结构与层次分布

多 Smart Actor 系统通常采用分层分布式结构，划分为本地智能层、区域协同层和全局优化层。本地智能层以单元级 Smart Actor 为核心，独立实现本地感知、数据采集、即时决策和动作执行，保障自身设备安全与经济运行；区域协同层则由若干 Smart Actor 组成的子系统（如微电网、园区能源管理等）承担局部优化与资源协调，实现多单元能量互补与负荷平衡；全局优化层通过云平台或主控中心，实现对各区域的统筹调度和全网目标优化，引导各 Smart Actor 协同响应外部扰动与复杂工况。分层结构不仅提升了系统的响应速度和可扩展性，也降低了单点故障和通信瓶颈的风险，增强了系统的鲁棒性和自愈能力。

2.3 智能自治与协同决策机制

多 Smart Actor 系统最突出的技术优势在于其自治性和协同性。自治性体现在各行体能够基于本地状态和目标，自主完成调节决策，无需完全依赖中心调度指令；协同性则体现在各行体通过通信网络动态交互，实现信息同步、策略商议和任务分配，达成群体最优或平衡目标。常用的协同决策机制有：基于共识算法的分布式一致性决策、基于博弈论的多目标优化与利益均衡、基于分布式优化的全局能量管理等。这些机制共同推动配电网运行从“集中式响应”向“协同自治”转型，大幅提升了系统对复杂环境的适应性和可持续发展能力。

3 分布式能源与配电网互动运行的现实挑战与需求

3.1 分布式能源渗透下的配电网运行新特征

在分布式能源渗透率不断提升的背景下，配电网运行模式日趋复杂。首先，光伏、风电等可再生能源出力具有波动性和间歇性，造成节点功率剧烈变化和电压波动风险增加。其次，电动汽车、主动负荷等灵活用电单元的大量接入，使得负荷预测与调度难度加大。再次，多能互补、源网荷储互动成为典型应用场景，要求各能源单元具备高度自适应和协同调控能力。此外，配电网面临保护策略复杂、孤岛效应频发、潮流反送等运行安全隐患，对控制体系提出更高要求。传统依赖中心调度、静态配置的控制模式，已难以满足分布式能源灵活接入与多场景协同的实际需求，亟需新型智能化控制体系予以支撑。

3.2 互动运行对智能协同的迫切需求

分布式能源与配电网的互动运行，核心目标在于提升系统安全性、灵活性、经济性和可持续性。要实现这些目标，首先需要构建分布式自治与全局协同并重的控制结构，支持多元能源单元的实时感知、动态响应与弹性调节。其次，需提升系统的信息交互效率和决策智能化水平，促使各 Smart Actor 能在多变环境下快速达成群体一致或局部最优。第三，要增强系统自愈能力，保障在局部故障、通信中断等异常情况下的持续稳定运行。第四，需支持复杂业务场景下的能量优化路由、需求响应、峰谷平衡等多种互动业务，全面释放分布式能源的调节潜力。所有这些，都要求控制体系具备高度分布式、智能化和自适应能力，多 Smart Actor 系统正是应对这些挑战的理想技术途径。

3.3 信息通信与安全性的新难题

在多 Smart Actor 系统运行过程中，信息通信的及时性、准确性和安全性至关重要。随着接入设备规模和数据流量激增，配电网通信网络面临带宽压力、延迟敏感、攻击风险等问题。一方面，通信瓶颈或中断可能导致局部 Smart Actor 决策延误或失效，影响系统协同效率和稳定性；另一方面，Smart Actor 系统的去中心化特性，对网络攻击和恶意行为防护提出更高要求。如何构建高可靠、低延时、强安全的配电网信息基础设施，已成为智能协同控制体系可持续发展的基础。

4 基于多 Smart Actor 系统的分布式互动控制方法设计

4.1 分布式自治控制与本地优化

每个 Smart Actor 拥有独立的感知、数据处理与自主决策能力，能够根据自身目标和运行状态，灵活制定本地最优控制策略。以分布式光伏为例，Smart Actor 可根据实时辐照、负荷、储能余量等信息，动态调整出力、并网模式与功率支撑策略。储能设备的 Smart Actor 则结合电价信号、负荷预测和电网状态，实现充放电时序和容量配置的自适应调优。在电动汽车、可控负荷等参与需求响应的场景下，各 Smart Actor 还能根据价格、激励等信号自主调节用能行为，协同支撑配电网的负荷平衡与电能质量管理。本地自治控制既提升了单元级响应速度和独立性，又减轻了中心调度负担，为复杂多变环境下的灵活运行奠定基础。

4.2 分层协同与多场景优化机制

为实现系统级的协同优化，多 Smart Actor 系统采用分层协同机制。区域内 Smart Actor 通过点对点通信，实现数据同步、任务协商与能量共享，在本地约束下联合优化出力和能量流；区域之间则由上级主控平台或云中心基于全网目标（如最小化能量损耗、最大化新能源消纳等）进行任务分配和边界约束设定。多级共识算法、分布式迭代优化、分层动态调度等技术，被广泛应用于 Smart Actor 系统群体决策

中,实现多源协同、区域互补与全网平衡。该机制不仅增强了系统在多场景下的适应性和可扩展性,还极大提升了复杂运行环境下的协同效率和鲁棒性。

4.3 柔性自愈与智能进化功能

面对突发扰动、设备故障和环境剧变,多 Smart Actor 系统具备柔性自愈和持续进化能力。系统通过多级监测和异常检测,当出现节点失效、通信中断、能量不平衡等异常时,相关 Smart Actor 能够自主切换运行模式,局部重组网络并快速恢复控制,实现弹性自愈和持续供能。同时,通过融合大数据分析、人工智能等技术,Smart Actor 可自我学习历史运行数据和外部环境变化,持续优化行为策略,动态调整决策参数和协同机制,实现全系统的持续智能进化。这为未来复杂电力系统的智能化运行和长周期安全稳定提供了坚实保障。

5 典型应用案例与成效分析

5.1 典型配电网光伏接入场景仿真

以云南省某县光伏示范项目下的县域 10kV 配电网为例,搭建包含分布式光伏、储能、可控负荷等多类型 Smart Actor 的仿真系统。测试场景包括光照骤变、负荷突增、节点故障、网络攻击等复杂工况。结果表明,采用多 Smart Actor 系统控制后,系统能在秒级内完成节点出力重构、电压调节和负荷平衡,电能质量始终维持在标准范围内,新能源消纳率提升显著,供电可靠性和恢复速度较传统集中控制提升 30% 以上。局部异常时,受影响区域能通过自治协同机制快速实现弹性恢复,无需中心干预,极大增强了系统的鲁棒性与自适应能力。

5.2 实际园区能源互联网示范工程

在云南省内的某国家级智慧能源互联网园区,部署多 Smart Actor 系统,覆盖分布式光伏、风电、储能、电动汽车、冷热电联供等多类型能源单元。各单元 Smart Actor 基于本地感知数据,动态调度出力、参与负荷调节,园区主控中心仅进行边界条件下的全局引导。实际运行结果显示,系统具备实时感知、灵活协同、多点自治与自愈能力,能有效应对新能源波动、负荷快速变化和 network 异常,园区综合能效提升 15%,碳排放减少 20%,经济性和安全性显著增强。该案例

充分验证了多 Smart Actor 系统在分布式能源与配电网互动运行中的工程价值和推广前景。

5.3 控制方法优化成效与优势对比

综合仿真与实际应用数据,基于多 Smart Actor 系统的互动控制方法在分布式能源消纳、电网安全稳定、电能质量管理等方面均表现优异。相较传统集中控制,其在大规模场景下具备更高的实时性、弹性和可扩展性;在异常扰动下具备更强的自治自愈能力与局部恢复速度;在复杂环境下能动态调整和持续优化控制策略,有效支撑多源、多场景、多业务协同发展。为我国未来智能配电网的高比例分布式能源友好接入和高质量运行提供了坚实支撑。

6 结语

基于多 Smart Actor 系统的分布式能源与配电网互动运行控制方法,顺应了能源互联网和新型电力系统的智能化、分布式、自适应发展趋势。其通过分布式自治、层级协同和弹性自愈,实现了源—网—荷—储的多元协同和高效互动,大幅提升了系统的灵活性、韧性和新能源消纳能力。未来,需进一步深化 Smart Actor 系统的智能算法、安全防护与标准协议研究,推动其在更多能源互联网场景的规模化应用。政策层面应加大支持力度,完善信息通信基础设施和数据安全体系,为智能配电网与分布式能源的深度融合提供坚实保障。多 Smart Actor 系统将在推动我国能源绿色转型和智能电力系统建设中发挥日益重要的支撑作用,成为智慧能源社会的核心技术引擎。

参考文献

- [1] 史宇辉.智能配电网中分布式能源接入对输配电系统的影响分析[J].信息与电脑,2025,37(16):130-132.
- [2] 柴伦浩,贾博源.配网调控中的分布式能源接入与协调控制技术[J].技术与市场,2025,32(08):48-52.
- [3] 田正一.基于微网技术的电气工程分布式能源系统协同调度方法研究[J].电气技术与经济,2025,(08):58-61.
- [4] 才智龙,王丹洁,范晋卿,等.分布式能源系统储能技术应用研究[J].中国设备工程,2025,(15):201-203.
- [5] 丁璠.微电网中分布式新能源并网的稳定性控制策略[J].大众用电,2025,40(07):33-34.