

新型电力系统分布式协同优化调度研究综述

段晓娟

国网甘肃省电力公司平凉供电公司

DOI:10.32629/btr.v8i8.4942

[摘要] 新型电力系统以高比例可再生能源接入为核心特征,调度运行面临电源波动、多主体互动复杂等挑战。本文围绕分布式协同优化调度展开综述,阐述其核心架构与空间、主体、时间三维协同内涵,梳理分布式优化算法、多源异构数据融合、多主体协同控制三大关键技术体系,剖析多层次调度、多主体利益协调两类机制及典型场景适配策略。研究表明,该调度模式依托层级化决策与多元主体互动,可有效提升可再生能源消纳能力与系统运行稳定性,为新型电力系统高效运行提供重要支撑。

[关键词] 新型电力系统; 分布式协同; 优化调度; 关键技术

中图分类号: TM73 文献标识码: A

A Review of Distributed Collaborative Optimization Dispatch for New Power Systems

Xiaojuan Duan

Pingliang Power Supply Company, State Grid Gansu Electric Power Co., Ltd.

[Abstract] With the core characteristic of high-proportion renewable energy integration, the dispatch operation of new power systems faces challenges such as power source volatility and complex multi-stakeholder interactions. This paper presents a review of distributed collaborative optimization dispatch, elaborating on its core architecture and the three-dimensional collaborative connotations of spatial, stakeholder, and temporal dimensions. It systematically reviews three key technology systems: distributed optimization algorithms, multi-source heterogeneous data fusion, and multi-stakeholder collaborative control. Two types of mechanisms are analyzed: multi-level dispatch and multi-stakeholder interest coordination, along with adaptation strategies for typical scenarios. Research shows that this dispatch model, relying on hierarchical decision-making and multi-stakeholder interaction, can effectively improve renewable energy accommodation capacity and system operational stability, providing important support for the efficient operation of new power systems.

[Key words] new power system; distributed collaboration; optimization dispatch; key technologies

引言

传统电力系统集中式调度模式难以适应新型电力系统高比例可再生能源接入、分布式电源广泛分布的特点。新型电力系统分布式协同优化调度依托多元主体分布式特性,通过层级化协同机制实现电力资源全域优化配置,打破传统单向管控模式,形成多层次协同体系与源网荷储深度互动格局,对保障系统安全稳定运行、提升可再生能源消纳能力意义重大,成为当前研究重点。

1 新型电力系统分布式协同优化调度核心架构与内涵

新型电力系统分布式协同优化调度依托分布式电源、负荷、储能等多元主体的分布式特性,通过层级化协同机制实现电力资源的全域优化配置。其核心架构打破传统集中式调度的单向

管控模式,构建“主网-配网-微网-分布式主体”的多层级协同体系,形成源网荷储各环节深度互动、信息与能量双向流动的运行格局^[1]。该架构以分布式决策为核心,各层级调度主体在自主优化的基础上实现全局协同,兼顾局部运行效率与整体系统安全,为高比例可再生能源接入提供适配性支撑。分布式协同优化调度的核心内涵体现为三个维度的协同统一。在空间维度上,实现大电网与配电网、微网之间的协同,统筹跨区域输电与本地供电资源,解决分布式电源就地消纳与跨区域调节的平衡问题。在主体维度上,整合分布式电源、储能系统、可调节负荷、虚拟电厂等多元主体,形成“源-荷-储”协同互动的有机整体,挖掘各主体调节潜力。在时间维度上,覆盖日前、日内、实时等多时间尺度调度环节,通过不同时间尺度的衔接与互补,应对可再生能源出力的波动性与负荷的随机性,保障系统运行的动态平衡。

2 新型电力系统分布式协同优化调度关键技术体系

2.1 分布式优化算法与求解技术

分布式优化算法是协同调度的核心技术支撑,核心目标为无中心节点全面管控情境下,通过各主体间信息交互达成全局优化目标。当前多种主流算法应用于分布式协同优化调度。交替方向乘法及其改进算法为常用算法。将全局优化问题拆解为各主体局部子问题,通过拉格朗日乘子交替更新,实现子问题求解与全局协同,适用于源网荷储多主体协同场景。改进型通过优化乘子更新步长与收敛判定条件,加快收敛速度,适配实时调度场景时间要求。分布式一致性算法通过各主体与相邻主体信息交互,逐步达成全局一致,无需中心节点协调,适用于大规模分布式主体协同调度。对偶分解算法将全局优化问题的对偶变量在各主体间分配,实现子问题分布式求解,适用于含耦合约束的优化问题。分布式梯度下降算法通过各主体本地梯度计算与信息交互,逐步逼近全局优化目标,算法复杂度低,适用于资源受限的分布式主体。求解技术优化方向集中于提升算法效率与适配性。针对多目标优化问题,引入理想点法、加权求和法等技术,实现经济性、安全性、环保性等多目标协调优化。结合智能优化算法与分布式优化框架,提升算法对复杂约束条件的适配能力与求解速度。融入边缘计算技术实现算法求解本地化处理,减少数据传输延迟,提升实时调度场景响应效率,为工程化应用提供技术保障。多目标优化技术通过构建分层目标函数,明确各目标优先级,实现有序优化。智能优化算法与分布式框架结合,借助神经网络、强化学习等技术优化算法参数,增强对动态变化的适应能力。提升边缘节点本地求解能力,降低对中心服务器依赖,减少数据传输冗余与延迟,保障实时调度指令快速生成与执行。

2.2 多源异构数据融合与感知技术

多源异构数据融合技术为分布式协同优化调度提供了全面的数据支撑。数据来源广泛,涵盖发电侧、输电侧、配电侧、用电侧、储能系统以及气象、市场等多个维度,数据类型包括结构化运行数据和非结构化监测数据等。在数据接入环节,物联网、5G通信、光纤专网等技术发挥着关键作用。物联网技术实现了分布式电源、负荷、储能设备等终端的全面互联,通过传感器网络采集设备运行参数、环境参数等实时数据^[2]。5G通信技术凭借高带宽、低延迟、广连接的特性,保障了海量数据的实时传输,满足了实时调度场景的通信需求。光纤专网则提供了高可靠性、高安全性的数据传输通道,支撑核心调度数据的传输。同时,通过标准化协议转换与接口适配,解决了不同数据源之间的协议差异与接口不兼容问题,打破了数据孤岛。数据融合与感知技术的核心在于提升数据质量与价值挖掘能力。数据清洗技术通过异常值检测、缺失值填充等方法,剔除无效数据,保障了数据的完整性与准确性。归一化处理实现了不同量级、不同单位数据的标准化,为后续融合分析奠定了基础。时空对齐技术将不同时间、不同位置采集的数据进行统一校准,确保了数据的时空一致性。借助机器学习、深度学习等智能算法,实现了结构化与非结

构化数据的深度融合,挖掘了数据间的时空关联与逻辑关系。构建全域感知网络,实现了对分布式电源出力、负荷变化、电网运行状态等的实时监测,为调度决策提供了精准的状态感知支撑,提升了调度优化的科学性与实时性。

2.3 多主体协同控制与互动技术

在新型电力系统中,多主体协同控制与互动技术是实现源网荷储高效运行、保障电网稳定平衡的核心要素,涵盖储能调控、需求侧响应、虚拟电厂及主配网协同等多个方面。储能系统是平抑分布式电源波动性的关键。它实时监测分布式电源出力与负荷变化,动态调整充放电功率。结合多时间尺度调度策略,日前调度制定整体计划,日内调度依据实时数据灵活调整,实时调度应对突发状况,极大优化了分布式电源与储能系统的配合,确保电力供应的稳定性。需求侧响应技术借助价格信号与激励机制,充分调动可调节负荷参与调度。分时电价、尖峰电价等引导用户合理调整用电时间与负荷,实现负荷曲线的优化,有效提升了系统的灵活性与适应性,增强了电网应对不同运行工况的能力。虚拟电厂技术将分散的分布式资源聚合,形成统一调控单元,实现对分布式资源的集中管控与协同调度。它整合分布式光伏、风电、储能等资源,具备功率调节、备用容量提供等多种功能,能够积极参与电网调度,提升了分布式资源在电网中的调节能力与价值。主配网协同控制技术是保障分布式协同优化调度全局平衡的重中之重^[3]。通过建立核心业务统筹协调机制,实现大电网与配电网的高效协同运行与资源统一调配。主配网信息交互与共享,优化潮流分布,降低网损,增强配电网就地平衡与对主网的支撑能力。针对微网等局部系统,构建的平滑切换机制保障了其与大电网协同运行的稳定性与可靠性。明确的调度权责、常态化信息交互通道以及潮流优化等措施,共同确保了微网内负荷持续供电,避免对大电网运行造成冲击,推动新型电力系统安全、稳定、高效运行。

3 新型电力系统分布式协同优化调度的协同机制与适配策略

3.1 多层次协同调度机制

多层次协同调度机制依据电网层级划分,构建主网层、配网层、微网层、分布式主体层四级协同体系。主网层负责跨区域电力平衡与全局资源统筹,制定全网层面的调度目标与约束条件;配网层承接主网调度指令,统筹区域内分布式资源,实现区域电力平衡;微网层负责微网内部资源的优化配置,保障微网稳定运行;分布式主体层依据上级调度指令与本地运行状态,执行局部优化决策。各层级间通过信息交互接口实现调度指令、运行状态等数据的双向传输。主网层向配网层下发功率平衡指令、电压约束等要求;配网层结合区域内资源状况,将调度指令分解至微网层与分布式主体层;微网层与分布式主体层将运行状态反馈至配网层,配网层汇总后上报主网层^[4]。通过层级化指令传递与状态反馈,实现全局目标与局部优化的协同统一。协同机制的运行保障依赖于标准化的调度流程与信息共享规范。制定各层级调度主体的权责清单,明确调度决策的范围与边界。建立统

一的信息共享平台,实现调度数据、运行数据、设备数据等的集中管理与共享。通过流程标准化与信息规范化,降低层级间协同成本,提升协同效率。

3.2多主体利益协调机制

多主体利益协调机制以均衡分布式电源业主、负荷用户、电网企业、储能运营商等各方利益为目标,构建基于收益共享的协调框架。通过界定各主体在协同调度中的贡献度,建立合理的收益分配模型,保障各方合法权益。收益分配模型综合考虑主体的资源投入、调节贡献、风险承担等因素,采用量化评估方法确定各主体的收益份额。针对分布式电源业主,通过上网电价优惠、辅助服务收益分成等方式,激励其参与协同调度,提升分布式电源出力的可控性。对于负荷用户,通过需求响应补贴、电价优惠等激励措施,鼓励其调整用电行为,参与系统平衡。电网企业通过网损降低、供电可靠性提升等获得收益,同时承担调度协调的组织成本。储能运营商通过充放电套利、辅助服务提供等实现收益,保障储能系统投资回报。利益协调机制的落地需要建立公平透明的评估体系与争议解决机制。评估体系通过量化指标评估各主体的贡献度与收益情况,确保收益分配的公正性。争议解决机制通过协商、仲裁等方式,处理主体间的利益纠纷,保障协调机制的顺利运行。

3.3多场景适配调度策略

基于不同的电网运行场景,制定差异化的分布式协同优化调度策略。针对高比例可再生能源接入场景,强化储能系统的充放电调度与需求侧响应的协同配合,提升系统对可再生能源波动的接纳能力。通过实时监测可再生能源出力变化,动态调整储能充放电功率,引导负荷灵活调整用电时间,实现可再生能源就地消纳。针对电网故障场景,制定分布式资源的应急调度策略。故障发生时,微网切换至独立运行模式,保障关键负荷供电;分布式电源与储能系统依据故障隔离区域的负荷需求,调整出力状态,维持局部电力平衡。故障恢复阶段,通过主配网协同调度,

逐步恢复微网并网运行,优化潮流分布,避免故障扩大。针对峰谷电价场景,优化储能系统的充放电调度策略。谷时段储能系统充电,储存低价电能;峰时段储能系统放电,缓解电网供电压力,同时获取峰谷电价差收益^[5]。结合分布式电源出力特性,协调储能充放电与分布式电源出力的配合,提升整体经济效益。不同场景下的调度策略通过场景识别模型自动匹配,提升调度的智能化水平。场景识别模型基于实时监测的电网运行参数、气象数据、负荷数据等,通过机器学习算法识别当前运行场景,自动调用对应的调度策略。

4 结语

新型电力系统分布式协同优化调度在核心架构、关键技术、协同机制与适配策略等方面取得一定成果。多层次协同体系、多元关键技术、合理的协同机制与适配策略为系统安全稳定运行和可再生能源高效消纳提供支撑。然而,随着新型电力系统发展,仍面临诸多挑战,如复杂场景下算法性能提升、多主体利益协调的深度优化等。未来需持续深入研究,不断完善相关理论与技术,推动新型电力系统分布式协同优化调度向更高水平发展。

[参考文献]

- [1]马大中,邢茗淇,胡旭光.新型电力系统分布式协同优化调度研究综述[J].控制与决策,2025,40(8):2337-2360.
- [2]陈郑平,李文忠,陈飞雄.分布式资源助力新型电力系统灵活性提升研究综述[J].电力工程技术,2025,44(2):145-159.
- [3]丁涛,张宁,高红均.“新型电力系统优化调度关键技术”专刊特约主编寄语[J].南方电网技术,2025,19(3):1-3.
- [4]李更丰,孙少华,别朝红.面向新型电力系统弹性提升的储能优化配置与灵活调度研究综述[J].高电压技术,2023,49(10):4084-4095.
- [5]杨珺,侯俊浩,刘亚威.分布式协同控制方法及在电力系统中的应用综述[J].电工技术学报,2021,36(19):4035-4049.