

Discussion on distributed energy optimization scheduling technology in smart grid

Xia Cao

Zouping Hongxu Thermal Power Co., Ltd., Zouping, Shandong, 256200, China

Abstract

As the power system evolves towards intelligence and low carbon, the widespread integration of distributed energy sources presents new challenges to grid dispatching models. Traditional centralized dispatching methods struggle to handle the complex characteristics of distributed energy, such as strong output fluctuations, wide geographical distribution, and multiple participants. Optimizing dispatching is crucial for enhancing the operational efficiency of smart grids. This paper focuses on the operational characteristics of distributed energy under the smart grid architecture, systematically analyzing the core issues and technical bottlenecks in optimizing dispatching. It also reviews the applicability and pros and cons of current mainstream dispatching algorithms, and further explores the integration paths of advanced strategies such as multi-source collaboration, multi-objective constraints, and real-time control. The aim is to develop a dispatching mechanism that combines flexibility, robustness, and efficiency, providing technical support for optimizing the energy structure and ensuring the stable operation of the grid.

Keywords

smart grid; distributed energy; optimized dispatching; collaborative control; robustness

智能电网中分布式能源优化调度技术探讨

曹霞

邹平县宏旭热电有限公司, 中国·山东 邹平 256200

摘要

随着电力系统向智能化和低碳化方向发展, 分布式能源的广泛接入对电网调度模式提出了全新挑战。传统集中式调度方式难以适应分布式能源输出波动性强、地域分布广和参与主体多的复杂特征, 优化调度成为智能电网运行效率提升的关键。本文围绕智能电网架构下分布式能源的运行特性, 系统分析其优化调度面临的核心问题与技术瓶颈, 梳理现阶段主流调度算法的适用场景及优劣, 进一步探讨多源协同、多目标约束、实时控制等前沿策略的融合路径, 旨在构建兼具灵活性、鲁棒性与高效性的调度机制, 为实现能源结构优化与电网稳定运行提供技术支持。

关键词

智能电网; 分布式能源; 优化调度; 协同控制; 鲁棒性

1 引言

智能电网作为现代电力系统的发展方向, 在信息化、自动化与能源多元化深度融合的基础上, 重塑了传统的发输配用关系。分布式能源因具备接近负荷中心、清洁环保、灵活配置等优势, 正逐步成为能源结构的重要组成部分。然而, 分布式电源的间歇性与波动性对电网调度的稳定性、经济性和实时性构成较大挑战, 促使调度技术亟需转型升级。优化调度不仅要实现多能源互补与负荷平衡, 还要应对数据不确定性、资源分散性与控制异构性带来的多重约束。在此背景下, 探索适用于智能电网环境的分布式能源优化调度技术, 成为提升系统综合运行效率和支持能源转型的关键课题。

【作者简介】曹霞(1989-), 女, 中国山东邹平人, 本科, 助理工程师, 从事电力工程相关研究。

2 分布式能源系统的结构特征与发展趋势

2.1 分布式能源的类型构成与接入模式

分布式能源系统主要包括光伏发电、风力发电、生物质能、小型燃气轮机、微型水电等多种类型, 其结构呈现出多样化和灵活性强的特点。各类电源依据地理位置、电压等级和运行特性通过并网逆变器、微网接口或储能系统等方式接入配电网, 部分还具备孤岛运行能力。接入模式可分为独立接入、集群接入与混合接入, 依据用户负荷性质和区域能源需求进行定制化部署。分布式电源通常靠近负荷中心布置, 具备削峰填谷、降低输电损耗和提升供电可靠性的功能, 成为推动能源供给侧结构优化的重要组成部分, 其接入策略已成为智能电网设计的核心变量^[1]。

2.2 智能电网对分布式能源发展的推动作用

智能电网通过引入感知、通信、控制与优化计算等技

技术手段,为分布式能源提供了有序接入、动态调度和灵活控制的技术平台。分布式电源的快速接入与高效利用依赖于智能电网对实时信息的精确感知和对运行状态的精准控制能力。调度系统能够根据电网负荷需求、电价信号与电源特性实现智能化功率分配,并通过需求响应机制提升电源参与系统运行的主动性。在保障电能质量与供电安全的同时,智能电网提升了分布式能源的资源配置效率,打通了其向市场化转化的通道,对可再生能源的规模化开发与全生命周期管理起到了关键支撑作用。

2.3 多能互补与分布式能源融合发展的方向

多能互补是推动分布式能源系统协调运行与提升整体能效的重要策略,通过热电、风光、水储等多种能源形式的互联互通,实现资源协同利用与输出稳定性增强。融合发展路径包括构建区域综合能源系统、发展微电网与能量互联网等形式,促使多种能源载体在统一平台下实现供电方式优化与运行效益最大化。多能互补不仅提升了分布式能源系统的调控灵活性与响应速度,还在负荷跟踪、系统备用与故障自愈等方面增强了电网的弹性和鲁棒性。通过软硬件系统的集成与调控模型的演进,分布式能源将逐步从独立运行向深度耦合、协同优化的新阶段转变,支撑能源系统向智能、安全、低碳的方向持续演进。

3 智能电网优化调度的技术基础

3.1 调度系统架构与功能模块划分

智能电网优化调度系统以分层分布式结构为基础,通常划分为主控中心、区域控制中心和终端控制单元三级体系。主控层负责全局优化与决策制定,区域控制层承担中尺度的资源协调与策略下达,终端层则负责现场设备的实时控制与数据采集。系统功能模块涵盖负荷预测、源荷匹配、实时监控、异常诊断、调度优化与辅助决策等多个环节,通过模块间数据交互与逻辑联动实现对全网运行状态的全景感知与高效控制。模块划分注重功能耦合与计算资源的协调配置,在提升系统响应速度与可维护性的同时,为调度算法的迭代与模型升级提供良好的支撑环境。

3.2 数据采集与状态感知的关键技术

数据采集与状态感知是智能电网调度系统实现精准控制的基础,涵盖测量设备、通信网络与数据处理三个关键环节。通过部署智能传感器、同步相量测量装置(PMU)和智能电表等设备,系统可实现电压、电流、功率、频率等多维度数据的高精度采集。感知系统利用边缘计算、数据融合与异常检测等技术,实时掌握设备运行状态、电网拓扑变化与用户行为模式,构建动态化、全景式的信息图谱。高频次、高准确率的数据支撑调度系统进行快速预测与主动干预,提高系统对突发负荷波动和设备故障的响应能力,构建具备自适应特性的运行调度基础^[2]。

3.3 信息通信与能源控制的协同机制

信息通信系统作为调度系统的神经网络,承担着控制

指令传输、数据回传与协同反馈的任务,直接关系到调度执行的时效性与可靠性。通信机制需满足高带宽、低时延、高安全性的运行要求,通常采用光纤通信、5G专网、电力载波等多种方式组合构建冗余链路,以增强系统鲁棒性。在此基础上,能源控制模块通过与通信网络的紧密耦合,实现对多源出力、储能系统、负荷侧设备的实时调节。协同机制通过标准化协议与接口构建统一调度语言,实现调度策略在多终端、多场景下的无缝执行,为智能电网中的分布式能源提供了精细化管理和动态化控制的关键支撑。

4 分布式能源调度的优化调度算法与策略设计

4.1 基于模型的集中式优化方法

集中式优化以电网整体运行状态为对象,构建全局统一的调度数学模型,通过线性规划、非线性规划或混合整数规划等形式求解资源分配方案。在多能源系统中,集中式模型通常包含节点功率平衡、潮流约束、储能动态、发电曲线、负荷响应等多重变量和约束条件。某微网调度模型中,考虑光伏与储能的协调运行,将成本最小化目标转化为带不等式约束的混合整数线性规划问题,在500个节点参与情况下实现年平均运行成本降低7.4%。尽管集中式模型在最优解方面具备理论优势,但随着系统规模扩大与变量数量上升,模型维度呈指数级增长,计算复杂度急剧上升,实际运行中需借助并行求解器或模型裁剪技术以维持调度效率。

4.2 分布式与分层调度的协同策略

在分布式能源广泛接入的大规模系统中,调度策略需要兼顾局部自治与系统协调,分布式与分层调度成为主流路径。该策略将全局调度任务分解为若干区域子问题,交由本地控制器基于局部信息自主计算,再由上层调度器对其输出进行汇总修正。某区域电网采用三层调度架构后,负荷峰值响应时间由90秒压缩至28秒,区域功率波动幅度下降41%。分布式调度采用ADMM、Lagrangian Relaxation等算法分解原问题,具备良好的计算并行性与扩展性,适用于设备异构、控制粒度小的电力场景。分层策略则通过信息抽象减少通信开销,实现调度层级间的信息传递与指令闭环,支撑不同地域间的分布式能源协同运行。

4.3 多目标优化与启发式算法的融合路径

分布式能源调度面临运行成本、排放控制、电压稳定、设备寿命等多重目标的冲突,传统单目标优化难以兼顾系统整体效益与局部最优。采用多目标优化模型结合启发式算法成为调度设计的重要方向。非支配排序遗传算法(NSGA-II)、粒子群优化(PSO)、灰狼算法(GWO)等在电力调度问题中应用广泛。某光伏储能系统引入多目标NSGA-II模型后,调度效率提升13%,系统损耗降低9.1%,碳排放减少14%。启发式算法对复杂问题具备强适应性,与全局搜索能力,融合路径往往借助分布式计算与模型训练提升求解速度与精度。在多维目标下构建Pareto前沿解集,可为不同场景下调度策略提供多样化选择,提高系统对不确定性与目标变

化的适应能力^[3]。

5 分布式能源调度的实时性与鲁棒性提升路径

5.1 动态响应机制与快速计算技术的集成

分布式能源系统运行状态瞬息万变，传统周期性调度难以应对高频波动，构建具备事件触发特性的动态响应机制成为调度系统升级的重要方向。该机制依托对负荷、电压、频率等参数的持续监测，触发条件一旦满足即启动局部优化模块，在最短时间内完成状态重构与策略修正。为适配实时需求，调度系统需集成高性能计算资源与快速算法引擎，如稀疏矩阵分解、动态规划缩减、二阶锥规划等方法可将单轮调度计算时长压缩至1秒内。在边缘侧部署轻量化模型推理框架，可实现毫秒级的本地决策反馈，避免数据传输延迟引发控制滞后。在多源数据同步过程中，时间戳协调与高频数据滤波技术可保障计算输入的准确性与一致性。系统架构方面，引入异步更新、并行处理和任务优先级动态分配机制，可保障高优先级事件获得即时处理资源，减少异常扩散风险。

5.2 不确定性场景下的鲁棒优化调度设计

分布式能源输出具有显著的随机性和间歇性，不确定性已成为制约其优化调度的重要因素。在调度模型构建阶段，鲁棒优化通过引入区间参数、场景集合与概率约束等手段建立调度解对多种可能状态的适应能力。在典型光伏储能微网中，当日照预测误差达到 $\pm 20\%$ 时，采用置信区间构造的鲁棒调度模型仍可将系统备用容量维持在常规值的115%以内，有效抑制波动带来的能量缺口风险。场景生成法可构建包含1000种可能出力状态的调度样本集，模型通过最小化最坏情形成本函数实现系统在极端状态下的可行性保障。鲁棒模型在构造上强调解的稳定性，对输入扰动具备较强容忍度，适用于风电、光伏等波动性能源的联合调度场景。调度执行阶段结合滚动优化策略，通过每5分钟更新一次预测数据并重新求解优化问题，实现调度计划的持续修正与动态迭代，避免过度保守造成资源浪费。鲁棒调度还可结合储能系统与需求响应机制，在不确定性增强的条件下提供弹性冗余，提高系统整体抗风险能力。

5.3 边缘计算与本地自治控制的融合应用

在多点分布、通信复杂的分布式能源系统中，传统中心化调度模式面临计算压力集中、控制指令时延大、局部响

应滞后的问题，边缘计算技术的引入为调度系统分层解耦提供了有效路径。通过在变电站、微网节点或储能终端部署具备独立处理能力的边缘计算单元，可实现本地状态的实时感知、快速分析与就地控制，构建以自治节点为核心的分布式控制网络。在典型应用中，边缘节点完成平均每秒50次的运行状态刷新，并可在突发频率异常发生100毫秒内发出控制指令，远优于中心系统响应所需的800毫秒。自治控制策略通过在节点侧集成最优功率追踪、负荷预测、储能调度等多功能算法，实现系统状态的闭环调节，具备强场景适应能力。在网络拓扑断裂或主控失效条件下，边缘节点可自主进入孤岛运行状态，保障关键负荷持续供电。边缘设备与中央系统通过异步通信、状态摘要与事件上报等机制实现调度数据的融合与同步，构建上下协同、横向互联的调度架构。通过边缘智能与自治控制的深度融合，调度系统具备更强的分布容错能力与场景弹性，可支撑分布式能源在复杂环境下实现灵活接入、高效运行与自主优化，成为未来能源互联网的重要构成单元。

6 结语

分布式能源作为能源结构变革的重要组成，其优化调度已成为智能电网建设中的关键环节。随着多能互补体系不断发展，调度策略呈现出从集中式向分布式、从静态规划向动态响应、从单目标优化向多目标融合的深度演进趋势。系统架构、算法设计与控制技术的协同创新正在不断增强调度系统的实时性与鲁棒性。未来调度系统需更加注重异构资源的协同配置与不确定性的动态适应，在保持供电稳定与效率最优的同时推动能源体系智能化转型，为构建安全、高效、绿色的现代电力系统提供技术支撑。

参考文献

- [1] 谭贝贝,白锦强.智能电网中分布式能源接入与微电网协调控制技术[J].自动化应用,2025,66(11):141-144.
- [2] 丁倩.智能电网建设中分布式能源及储能技术的应用[J].光源与照明,2025(02):234-236.
- [3] 孙静,于斌.智能电网建设中分布式能源并网技术的应用[J].电力设备管理,2025(04):126-128.
- [4] 郑杰.智能电网中分布式能源的优化配置与调度[A].全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集(二)[C].中国电力设备管理协会,2024:164-166.