

电力系统电力市场环境下调度策略优化研究

吴翔

江西省恒通供用电工程有限公司 江西南昌 330000

摘要: 随着电力市场化改革的不断深入,传统以安全稳定为核心的电力系统调度模式正面临向市场化、经济化、智能化转型的挑战。本文针对电力市场环境下电力系统调度的新特点与新需求,深入研究了调度策略优化问题。首先,分析了电力市场环境对调度目标、约束条件及市场主体行为带来的影响,明确了市场机制下调度优化的复杂性与多目标性。其次,构建了考虑市场力、交易规则、风险规避及可再生能源不确定性的多目标调度优化模型,重点探讨了日前市场、日内市场与实时平衡市场的协同优化框架。再次,研究了基于深度学习、强化学习等智能算法在处理高维、动态、不确定调度问题中的应用,并结合算例验证了所提模型与算法的有效性。最后,展望了电力市场环境下调度策略优化未来的发展方向,包括多能互补协同调度、用户侧灵活资源参与、区块链技术应用及隐私保护等关键问题,为电力市场的高效运行与电力系统的经济可靠调度提供理论参考与技术支持。

关键词: 电力市场; 调度策略; 优化模型; 智能算法

引言

电力工业是国民经济的基石,其市场化改革是打破垄断、引入竞争、提高效率的必然趋势。在电力市场环境下,发电侧、售电侧逐步放开,市场主体多元化,交易品种日益丰富,传统的“计划调度”模式已难以适应市场竞争机制的要求。调度作为电力系统运行的核心环节,其策略的优化直接关系到电力市场的公平性、效率性以及电力系统的安全稳定运行。因此,研究电力市场环境下的调度策略优化,对于平衡市场各方利益、促进可再生能源消纳、降低用电成本、保障电力系统安全经济运行具有重要的理论与现实意义。

一、电力市场环境对调度的影响及优化要素分析

(一) 电力市场运营模式与调度特点

电力市场通常包含中长期交易市场、日前市场、日内市场和实时平衡市场等多时间尺度交易品种。不同市场的交易周期、参与主体、价格形成机制各异,导致调度需在多时间尺度上进行协同^[1]。其主要特点包括:调度目标从单一的安全经济向“安全、经济、公平、高效”多目标转变;调度约束不仅包含传统的系统安全约束,还需考虑市场交易结果、市场规则约束;调度对象从传统机组扩展到包括储能、需求响应资源、微电网等在内的多元化灵活资源。

(二) 市场环境对调度目标的影响

传统调度以最小化发电成本或网损为主要目标。在

市场环境下,调度目标呈现多元化:(1)经济目标:追求社会福利最大化、市场交易总费用最小化或调度成本最小化;(2)效率目标:促进市场公平竞争,提高资源配置效率,抑制市场力滥用;(3)安全目标:保障系统频率稳定、电压合格、输电线路不超载,满足N-1安全准则;(4)环保目标:优先消纳可再生能源,减少化石能源消耗和污染物排放。这些目标之间可能存在冲突,需要进行多目标协调优化。

(三) 市场环境下调度的关键约束条件

市场环境下的调度约束更为复杂,主要包括:(1)物理约束:机组出力上下限、爬坡速率约束、最小启停时间约束、输电容量约束、节点功率平衡约束等;(2)市场规则约束:市场交易电量约束、市场力监管约束(如价格帽、报价曲线约束)、市场结算规则约束等;(3)不确定性约束:可再生能源发电出力预测误差、负荷预测误差、市场主体报价不确定性等带来的备用容量约束和风险约束;(4)政策约束:可再生能源消纳配额、碳排放限额、优先购电权等政策要求。

(四) 市场主体行为对调度优化的影响

市场主体(发电商、售电商、用户)的策略性行为会对调度结果产生显著影响。发电商可能通过持留容量、抬高报价等方式行使市场力;用户侧资源可能通过策略性报价参与需求响应^[2]。调度优化需考虑市场主体的理性决策行为,通过设计合理的激励机制或在优化模型中

嵌入主体行为预测，引导市场主体行为符合系统整体利益，提升调度策略的可行性和鲁棒性。

二、电力市场环境调度策略优化模型构建

(一) 多时间尺度协同调度框架

构建“日前-日内-实时”三级协同调度框架：(1) 日前调度：基于日前负荷预测和可再生能源出力预测，结合日前市场出清结果，确定机组组合计划和初步发电计划，为日内调度提供基础；(2) 日内调度：根据超短期预测信息，滚动调整发电计划，组织日内市场交易，平抑日前预测误差，优化资源配置；(3) 实时调度：针对实时运行中的微小波动和突发情况，通过实时平衡市场或备用辅助服务，进行精确的功率平衡控制，保障系统实时安全稳定运行。三级调度之间通过信息交互和计划衔接，实现整体最优。

(二) 考虑市场力与风险规避的日前调度优化模型

1. 目标函数

以社会福利最大化为主要目标，同时考虑市场力抑制和风险规避。社会福利最大化表示为用户支付意愿与发电商发电成本之差的最大化。为抑制市场力，引入发电商报价与边际成本偏差惩罚项；为规避可再生能源不确定性风险，引入条件风险价值(CVaR)作为风险度量指标，并将其纳入目标函数。目标函数表达式如下：

$$\text{Maximize } SW - \lambda \cdot \text{Penalty_market_power} - \gamma \cdot \text{CVaR}$$

其中，SW为社会福利， λ 为市场力惩罚系数， γ 为风险厌恶系数。

2. 约束条件

包括系统功率平衡约束、机组运行约束、输电容量约束、市场交易电量约束、可再生能源消纳约束以及CVaR风险约束等。

(三) 计及可再生能源不确定性的日内滚动调度模型

1. 场景生成与削减

采用基于拉丁超立方抽样(LHS)和K-means聚类的方法生成可再生能源出力和负荷的多场景集合，以表征其不确定性。通过场景削减技术，保留具有代表性的典型场景，降低模型求解复杂度^[3]。

2. 两阶段随机优化模型

将日内调度建模为两阶段随机优化问题：第一阶段(此处指日内调度决策时刻)确定基态发电计划和市场出清价格；第二阶段(未来时段)针对每个不确定性场景，决策调整计划(如调用备用、启停机组)及其成本。目标函数为第一阶段成本与第二阶段期望调整成本之和

最小化，同时满足各场景下的系统安全约束和运行约束。

(四) 含需求响应与储能的实时平衡调度模型

1. 需求响应资源建模

将需求响应资源分为可平移负荷、可削减负荷和可转移负荷，根据其价格弹性特性建立响应模型，量化其不同电价信号下的负荷调整量。

2. 储能系统建模

考虑储能系统的充放电功率约束、容量约束、充放电效率和循环寿命等特性，建立其在实时调度中的出力模型，实现平抑实时功率波动、跟踪计划曲线的功能。

3. 实时平衡调度目标与约束

以实时调度阶段的总调整成本(包括机组爬坡成本、储能充放电成本、需求响应补偿成本等)最小化为目标，约束条件主要包括实时功率平衡、机组快速调节能力约束、储能运行约束和需求响应资源约束等。

三、基于智能算法的调度策略优化求解方法

(一) 传统优化算法的局限性

传统优化算法如线性规划、二次规划等在处理凸优化问题时具有较高效率，但对于电力市场环境调度优化中普遍存在的高维、非线性、非凸、多目标、不确定性等复杂特性问题，往往存在求解效率低、易陷入局部最优或无法有效求解等局限性。

(二) 深度学习在不确定性预测中的应用

利用深度学习模型(如长短期记忆网络LSTM、门控循环单元GRU、卷积神经网络CNN)对可再生能源出力和负荷进行高精度预测。通过处理历史气象数据、负荷数据、经济数据等多源信息，捕捉数据中的非线性特征和长期依赖关系，为日前、日内调度提供更可靠的预测信息，减少不确定性带来的调度风险^[4]。

(三) 强化学习在动态调度决策中的应用

将实时调度过程建模为马尔可夫决策过程(MDP)，利用深度强化学习(DRL)算法(如DQN、PPO、SAC)训练智能调度决策agent。agent通过与动态变化的电力市场环境和物理系统进行交互，学习在不同状态下(如负荷水平、可再生能源出力、机组状态)的最优调度动作(如机组出力调整、储能充放电控制、需求响应调用)，以实现长期累积奖励(如总调度成本最小化、系统稳定性最高)的最大化。强化学习能够自适应处理系统动态变化和不确定性，具有较强的在线决策能力。

(四) 多目标智能优化算法(MOEA/D、NSGA-III等)

针对调度优化中的多目标冲突问题，采用多目标进

化算法如基于分解的多目标进化算法 (MOEA/D) 或第三代非支配排序遗传算法 (NSGA-III)。这些算法通过种群进化, 能够同时优化多个目标, 生成一组均匀分布的 Pareto 最优解。决策者可根据实际需求 (如不同场景下的目标偏好) 从 Pareto 最优解集中选择最终的调度方案。算法中引入自适应交叉变异算子、精英保留策略等, 可提高解的收敛性和多样性^[5]。

四、算例分析与结果讨论

(一) 算例系统设置

基于 IEEE30 节点或 118 节点系统构建含高比例可再生能源的电力市场仿真系统。设置火电机组、风电场、光伏电站、储能系统及需求响应资源等。市场结构包含日前市场和实时市场。输入数据包括: 典型日负荷曲线、风光预测出力曲线 (含预测误差)、机组参数 (成本曲线、出力上下限、爬坡速率等)、输电网络参数、市场交易规则 (如报价上限、结算方式) 等。

(二) 模型参数设置

多目标优化模型中, 社会福利、市场力惩罚、CVaR 风险的权重系数通过层次分析法 (AHP) 或专家经验确定。智能算法参数: 如 NSGA-III 的种群规模、迭代次数、交叉概率、变异概率; 深度强化学习的神经网络结构、学习率、折扣因子等, 通过试错法或网格搜索法进行优化设置。

(三) 不同场景下的调度结果对比分析

1. 有无市场力抑制的调度结果对比

对比考虑市场力抑制机制与不考虑市场力时的调度结果, 分析发电商报价行为、市场出清价格、社会福利、调度成本的变化, 验证所提模型在抑制市场力、提升市场效率方面的有效性。

2. 高比例可再生能源接入场景下的调度结果分析

模拟高风电/光伏渗透率场景, 对比本文所提含储能和需求响应的调度模型与传统调度模型在可再生能源弃电率、系统运行成本、碳排放等指标上的差异, 验证模型对可再生能源消纳的促进作用。

3. 不同优化算法的求解性能对比

比较所提智能算法 (如 NSGA-III、DRL) 与传统算法 (如混合整数线性规划 MILP) 在求解时间、解的质量 (目标函数值)、Pareto 最优解的多样性和收敛性等方面的性能, 突出智能算法在处理复杂调度问题时的优势。

(四) 结果讨论

分析结果表明: (1) 所构建的多目标调度优化模型能够有效平衡经济、安全、环保等目标, 在保障系统安全的前提下, 提高了社会福利, 促进了可再生能源消纳; (2) 引入市场力抑制机制后, 市场出清价格更加合理, 有效防止了发电商操纵市场价格; (3) 深度学习模型能够显著提高可再生能源预测精度, 为调度优化提供有力支持; (4) 强化学习等智能算法在动态实时调度中表现出良好的决策性能和适应性, 多目标进化算法能够提供多样化的 Pareto 最优调度方案供决策者选择。

结语

电力市场环境下的调度策略优化研究, 融合了多种智能算法和先进模型, 为解决复杂调度问题提供了新思路。通过构建多目标优化模型, 不仅能够协调经济、安全、环保等多重目标, 还能在高比例可再生能源接入的场景下显著提升系统运行效率。此外, 深度学习和强化学习的应用进一步增强了调度决策的精准性和适应性, 使得实时调度更加灵活高效。未来的研究可进一步探索智能算法在更大规模电力系统中的应用, 同时结合更多实际运行数据优化模型参数, 以应对不断变化的市场和技术需求。这些努力将为电力市场的可持续发展和能源转型提供更坚实的理论与技术支撑。

参考文献

- [1] 张树森, 镐俊杰, 郭源善, 等. 考虑环境条件的含风电电力系统节能优化调度策略研究 [J]. 自动化技术与应用, 2022, 41 (7): 4.
- [2] 刘美荣. 市场环境下电力系统优化调度策略研究 [J]. 中国设备工程, 2021 (4): 2.
- [3] 左晓亮, 校淑佩. 如何在区域电力市场条件下落实节能发电调度方式 [J]. 电力系统装备, 2020 (8): 2.
- [4] 李苗. 市场环境下的电力系统调度相关技术探讨 [J]. 电子元器件与信息技术, 2020. DOI: 10.19772/j.cnki.2096-4455.2020.12.045.
- [5] 潮铸, 段秦尉, 苏炳洪, 等. 现货市场下电网系统运行计划管理模式研究——以 S 省电力调度控制中心为例 [J]. 企业改革与管理, 2022 (1): 3.