

电力调度与新能源消纳的协同优化策略研究

邱文贤 王 然

内蒙古电力(集团)有限责任公司阿拉善供电分公司 内蒙古阿拉善 750300

摘要: 本文聚焦电力调度与新能源消纳的协同优化问题,构建多时间尺度协调机制、源网荷储协同控制架构及市场化激励机制。通过超短期实时平衡、短期计划修正与中期资源配置的时序衔接,结合状态转移方程实现跨尺度协同;提出源网荷储各环节的技术改造与协调运行策略,强化系统灵活性;创新差异化补偿机制与绿色证书交易,形成市场主导的参与格局。研究高精度预测、虚拟电厂聚合及动态最优潮流等关键技术,建立标准规范、创新平台与人才培养保障体系,从技术经济性、系统可靠性及社会效益三维度开展综合评估,为高比例新能源接入下的电力系统优化提供理论支撑与实践路径。

关键词: 电力调度; 新能源消纳; 协同优化策略

随着能源结构向清洁低碳转型,新能源大规模并网引发电力系统运行模式深刻变革。传统确定性调度难以应对风光出力的间歇性与随机性,导致弃风弃光现象频发与系统调节压力剧增。本研究立足电力系统形态演进特征,以破解新能源消纳瓶颈为核心目标,提出多时间尺度协同、源网荷储联动、市场机制驱动的三维优化框架。通过理论建模与技术创新相结合,探索适应高比例新能源接入的新型调度范式,旨在构建安全高效、经济环保的现代电力系统,为能源转型背景下电力工业可持续发展提供科学解决方案。

一、协同优化策略的总体框架设计

1. 多时间尺度协调机制构建

为实现电力调度与新能源消纳的高效协同,需构建覆盖超短期、短期和中期等多时间尺度的协调机制。超短期调度侧重于分钟级的实时平衡,依托高精度传感设备和快速通信网络,实时捕捉新能源出力的瞬态波动,并采用滚动优化算法进行动态响应,以有效应对风电和光伏的间歇性与随机性。短期调度聚焦于小时级的计划修正,引入概率密度函数对新能源预测误差进行量化描述,生成考虑不确定性的优化调度方案,提升日前计划的适应性和鲁棒性。中期调度以日或周为周期,侧重于系统资源的整体配置,结合中长期气象预测数据,制定基理性发电计划并预留合理的调节裕量。各尺度调度模型之间通过状态转移方程实现有机衔接,前一阶段的优化结果作为后一阶段的边界条件输入,保障调度决策的时序一致性。同时,系统设立多个时间断面校验节点,

当新能源实际出力偏离预测值超过设定阈值时,自动启动跨尺度协同重调度流程,从而在全局层面保障电力系统的安全稳定与新能源的高效消纳^[1]。

2. 源网荷储协同控制架构

构建以“源、网、荷、储”为核心要素的协同控制架构,是实现电力系统灵活性和新能源高效消纳的关键路径。在电源侧,需推动传统火电机组开展深度调峰技术改造,增强其负荷响应范围与速率;优化水电机组的调度策略,发挥其快速启停和负荷调节能力;在保障安全的前提下引导核电机组参与系统调峰,提升系统整体调节能力。电网侧应加强柔性调控能力建设,广泛应用动态无功补偿装置、静止同步补偿器等先进电力电子设备,提升电网电压稳定水平与输电能力;依托广域测量系统和智能传感技术,实现故障的精确定位与隔离,增强电网自愈能力。负荷侧需建立可中断负荷的分级管理机制,发展包括需求响应在内的智能用电技术,通过价格信号和激励政策引导用户调整用电行为。储能侧应推进抽水蓄能、电化学储能等多类型储能设施协调运行,构建共享储能平台,提升系统调节资源的利用效率。通过统一信息交互协议与协同控制策略,实现多元素资源的互补整合与协调运行^[2]。

二、关键协同优化技术的实现路径

1. 高精度新能源功率预测技术

新能源功率预测技术是支撑电力系统调度决策的重要基础。需研发融合多源信息的集成预测模型,结合数值天气预报产品、卫星云图与地表辐射监测数据、以及

历史功率数据，构建覆盖不同时间尺度的预测框架。引入机器学习方法，如长短期记忆网络、卷积神经网络等，对不同地域和季节条件下气象要素与新能源出力之间的复杂非线性关系进行辨识与建模。重点发展概率预测技术，生成未来出力的多场景预测集合，为调度部门提供风险决策依据。建立预测误差的后验评估与动态校正机制，利用实时运行数据对预测曲线进行反馈优化，不断提高预测精度。此外，应构建完善的预测效果评价体系，以均方根误差、平均绝对误差等为核心指标，实现对预测性能的持续监测与改进。高精度预测有助于调度部门更加准确把握新能源出力变化趋势，为备用容量配置和系统调节策略制定提供有效依据。

2. 虚拟电厂聚合控制技术

虚拟电厂（VPP）技术是实现海量分布式资源协同调控的关键载体。其核心在于通过先进的信息通信技术和智能控制算法，将地理位置分散的分布式电源、可控负荷、储能系统等异质资源进行聚合与协调管理，使其能够作为单一可控实体参与电网调度运行。需研究多智能体系统架构，实现资源的标准化接入与信息交互，并设计分布式协同控制算法，保障VPP内部资源的优化分配与协同响应。制定VPP与电网调度中心之间的接口规范与通信协议，明确其参与调频、调峰、备用等辅助服务市场的技术要求与商业模式。通过虚拟电厂技术的广泛应用，可将原本无序、分散的灵活性资源有效整合，形成规模化的调节能力，显著增强电力系统对新能源波动性的适应能力，提升系统的运行可靠性与经济性^[3]。

3. 动态最优潮流计算方法

为适应高比例新能源接入后电力系统运行方式的复杂变化，需对传统最优潮流模型进行改进和发展。动态最优潮流算法应突破直流潮流的简化假设，计入交流系统的电压幅值变化、无功功率及线路充电效应等影响因素，以更精确地描述系统运行状态。针对新能源出力的不确定性，需引入鲁棒优化、随机规划或机会约束规划等先进方法，将预测误差以集合或概率形式嵌入优化模型，实现在满足系统安全约束的前提下最大化新能源消纳能力。重点研究包含N-1安全准则、电压稳定裕度、短路电流限制等多重约束的优化模型，并发展高效求解算法。构建实时运行与未来预想方式相结合的联合优化框架，在保障当前系统安全运行的同时，前瞻性地优化后续时段的新能源接入与消纳策略，为调度人员提供兼具安全性、经济性和清洁性的系统运行方案。

三、协同优化策略的实施保障机制

1. 标准规范体系建设

完善的标准规范体系是协同优化策略有效实施的制度基础。应系统修订现有电力系统安全稳定导则，增补高比例新能源并网情况下系统稳定性分析的新要求与新判据，明确新能源场站在系统扰动下的响应特性与保持联网运行的能力。制定专门的新能源场站并网技术规定，细化其在有功控制、无功调节、故障穿越、电网适应性等方面的性能指标，提升新能源接入的友好性。针对新兴的虚拟电厂、分布式聚合等业务形态，需及时出台并网运行管理与市场监管规则，明确聚合商的技术资质、责任权利和运营监管要求。此外，需建立覆盖源、网、荷、储各环节的统一通信协议与数据交互标准，解决不同厂家设备之间的互联互通难题，为多环节协同调控提供技术基础。通过构建全面、开放、协调的标准体系，引导行业健康发展，保障协同优化模式的规范推广^[4]。

2. 技术创新支撑平台

建设高水平的技术创新平台是推动协同优化策略从理论走向工程应用的关键支撑。应依托云计算、大数据和数字孪生技术，构建省级乃至区域级的新能源消纳能力数字化仿真平台，实现对高比例新能源电力系统运行特性的精准模拟与策略验证。开发新一代调度决策支持系统，嵌入智能优化算法和人工智能推理引擎，实现调度方案的自动生成与评估。建设源网荷储协同控制实验验证环境，开展多类型资源联合调控的测试与示范，加速技术成果的孵化与转化。同时，成立由行业专家、学者组成的顾问委员会，定期对技术应用成效开展系统性评估，提出发展建议与技术改进方向。通过持续加强科研投入与平台建设，形成技术研发、成果转化、应用推广的创新链条，为协同优化策略的落地实施提供坚实支撑。

3. 人才队伍培养机制

人才是实施协同优化策略的核心智力资源。面对能源转型与电力系统形态变革的新要求，需加强跨学科复合型人才的系统化培养。在高等教育阶段，应在电气工程、自动化等相关学科中设立“新能源电力系统”“智能电网与调度”等专业方向，开设能源政策、电力市场、人工智能应用等交叉课程，构建适应新型电力系统需求的知识体系。电力企业需制定专项人才培养计划，重点加强对调度运行人员的新能源技术、预测算法、市场规则等方面的培训，提升其业务转型能力。推动企业与高校、科研机构建立产学研合作基地，联合开展关键技术

攻关，并在合作中培养具有实践能力的科技人才。完善专业技术人员的继续教育体系，通过定期组织专题培训、技术交流、行业研讨会等形式，帮助从业人员更新知识储备、跟踪技术前沿。通过多层次、多渠道的人才培养机制，为电力调度与新能源消纳的协同优化提供坚实的人才保障^[5]。

四、协同优化策略的效益评估维度

1. 技术经济性分析

对协同优化策略进行全面、科学的技术经济性评价，是衡量其实际应用价值的重要依据。需构建系统全寿命周期内的成本-效益分析模型，全面考虑策略实施所需的初始投资成本、系统运行维护成本、以及因新能源未能及时消纳而产生的弃电损失等。重点量化评估因优化调度所带来的化石能源节约量、污染物与碳排放减少带来的环境收益，以及因系统调节能力提升而延缓或减少的输配电设施升级改造投资。采用费用效益分析法，计算不同协同优化方案的投入产出比，综合比较其经济合理性。在分析过程中，应特别关注储能系统的利用率、需求响应资源的补偿成本、以及系统灵活调节资源的调用效率等关键参数，通过灵敏度分析揭示影响经济性的主要因素，从而为进一步优化资源配置、提升整体经济效益提供决策参考。

2. 系统可靠性提升

协同优化策略的实施效果需从系统可靠性维度进行科学评估。应建立涵盖电源充裕性、电网输送能力、负荷供应可靠性等多维度的评价指标体系，包括但不限于新能源渗透率、系统备用率、失负荷概率、期望缺供电量等关键指标。采用概率性评估方法如蒙特卡洛模拟，分析在极端天气、设备故障等扰动情况下系统的响应性能，验证协同优化策略对增强系统韧性和可靠性的作用。同时，需评估不同节点电压稳定性、短路容量裕度及关键设备负载率，判断系统是否具备接纳更多新能源的能力。特别要关注新能源高渗透区域在并网点的电压合格率、频率稳定水平等电能质量指标的变化，确保协同优化过程不会引入新的运行风险，切实提升电力系统的综合供电可靠性。

3. 社会效益体现

协同优化策略的推行不仅具有技术与经济价值，更会产生显著的社会效益。应系统评估策略实施对推动能源结构优化和新能源产业健康发展的促进作用，分析其

对上游装备制造、技术创新、下游运维服务等全产业链的带动效应。重点考察因弃风弃光率降低而带来的能源资源节约效果，以及减少化石能源消费对环境保护和气候变化应对的积极贡献。还需关注策略实施对社会就业结构的影响，包括在新能源、储能、智能管控等领域创造的新就业机会。通过社会调查、专家访谈等方式，了解公众对绿色电力消费的认可程度的变化，评估电价机制调整等配套政策的社会接受度。最终，通过构建多维度社会效益评价框架，全面反映协同优化策略对促进经济社会可持续发展、推动能源领域低碳转型的综合价值^[6]。

结语

本研究形成的协同优化策略体系，通过多时间尺度协调机制化解新能源时空不确定性矛盾，依托源网荷储协同架构提升系统整体弹性，借助市场化机制激发多元主体参与潜力。技术层面突破传统调度边界，管理层面重构新型运营模式，市场层面培育良性发展生态。研究成果既为电力系统规划运行提供方法论指导，也为能源政策制定提供决策参考。未来需持续深化数字技术与能源系统的融合创新，完善市场机制设计，加强跨领域协同治理，推动电力系统在更高比例新能源渗透场景下实现安全、绿色、经济的高质量发展，助力“双碳”目标实现。

参考文献

- [1] 谭昊瑞. 考虑多种分布式资源的虚拟电厂与配电网协同优化调度研究[D]. 杭州电子科技大学, 2025.
- [2] 周超阳, 赵丽雅, 李琳琳, 等. 基于阶梯式碳价格的风-光-火协同优化调度建模与仿真[J/OL]. 南通大学学报(自然科学版), 1-15[2025-08-28].
- [3] 杨明. 促消纳与保供电相协调的高比例新能源电网协同调度技术及应用. 新疆维吾尔自治区, 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 2023-08-15.
- [4] 麻恒远, 马恒瑞. 考虑新能源消纳的网-站-车协同优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(3): 103-108.
- [5] 王东升, 杜鹃, 张国彦, 等. 促进风电消纳的电热综合能源系统优化调度研究综述[J]. 煤炭经济研究, 2024, 44(11): 113-121.
- [6] 郑李西. 水电与新能源互补调度配置一体化模型研究[D]. 西安理工大学, 2024.