

新型电力系统下虚拟电厂的优化调度策略研究

刘亚光

内蒙古鲁电蒙源电力工程有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010020

DOI:10.61369/WCEST.2024090002

摘 要： 随着新型电力系统建设的推进，可再生能源大规模接入、分布式能源广泛分布以及电力市场改革的深化，虚拟电厂作为一种整合分布式能源资源、实现灵活高效电力调度的创新模式，受到广泛关注。本文聚焦于新型电力系统背景下虚拟电厂的优化调度策略。首先阐述新型电力系统的特征及其对虚拟电厂调度提出的新要求，分析虚拟电厂的组成与运行机制。接着深入探讨影响虚拟电厂优化调度的关键因素，包括可再生能源出力不确定性、电力市场价格波动、用户需求响应特性等。在此基础上，提出综合考虑经济性、可靠性和环保性的多目标优化调度模型，并介绍相应的求解算法。最后对虚拟电厂优化调度策略的未来发展方向进行展望，旨在为提升虚拟电厂在新型电力系统中的运行效能提供理论支持和实践参考。

关 键 词： 新型电力系统；虚拟电厂；优化调度策略

Study on Optimal Scheduling Strategy of Virtual Power Plant under New Power System

Liu Yaguang

Inner Mongolia Lude Mengyuan Electric Power Engineering Co., LTD., Hohhot, Inner Mongolia 010020

Abstract： With the advancement of new power system construction, large-scale integration of renewable energy, widespread distribution of distributed energy, and deepening reforms in the electricity market, virtual power plants have gained significant attention as an innovative model for integrating distributed energy resources and achieving flexible and efficient power dispatching. This paper focuses on the optimization scheduling strategies of virtual power plants under the context of new power systems. It first outlines the characteristics of new power systems and the new requirements they impose on virtual power plant scheduling, and analyzes the composition and operational mechanisms of virtual power plants. Next, it delves into the key factors influencing the optimal scheduling of virtual power plants, including the uncertainty of renewable energy output, fluctuations in electricity market prices, and user demand response characteristics. Based on this, it proposes a multi-objective optimization scheduling model that comprehensively considers economic efficiency, reliability, and environmental protection, and introduces corresponding solution algorithms. Finally, it looks ahead to the future development directions of virtual power plant optimization scheduling strategies, aiming to provide theoretical support and practical references for enhancing the operational performance of virtual power plants in new power systems.

Keywords： new power system; virtual power plant; optimal scheduling strategy

新型电力系统以新能源为主体，具有高比例可再生能源接入、高比例电力电子设备应用、源网荷储互动等显著特征。这一转变在推动能源清洁低碳转型的同时，也给电力系统的安全稳定运行和高效调度带来了诸多挑战。分布式能源如太阳能光伏、风力发电等具有间歇性、波动性和随机性的特点，导致电力供应的不确定性增加；电力负荷侧的多样化和智能化发展，使得需求侧管理的重要性日益凸显。虚拟电厂（Virtual Power Plant, VPP）通过先进的通信、控制和信息技术，将分布式电源、储能装置、可控负荷等分散的能源资源进行聚合和协调优化，作为一个整体参与电力系统的运行和市场交易。它能够有效整合分布式能源，提高能源利用效率，增强电力系统的灵活性和可靠性，是解决新型电力系统调度难题的重要手段。因此，深入研究新型电力系统下虚拟电厂的优化调度策略具有重要的现实意义。

一、新型电力系统特征及对虚拟电厂调度的要求

（一）新型电力系统特征

新型电力系统在能源供给层面，高比例可再生能源接入态势显著，风能、太阳能等在能源结构中的占比逐步攀升。在设备应用方面，大量电力电子设备接入电网，这一趋势改变了电力系统原有的动态特性。伴随而来的是系统谐波、电压波动等问题的增多。此外，源网荷储互动愈发紧密频繁，电源侧、电网侧、负荷侧和储能侧借助信息通信技术实现协同运行^[1]。这种互动模式有效提升了电力系统的整体效率与灵活性，有助于更好地适应能源转型和负荷变化。

（二）对虚拟电厂调度的要求

在新型电力系统背景下，对虚拟电厂调度提出了多维度要求。在应对可再生能源特性方面，鉴于风能、太阳能等分布式可再生能源出力受自然因素影响大，虚拟电厂需拥有精准的出力预测能力以及灵活的调度手段。面对电力市场改革浪潮，虚拟电厂要积极投身市场竞争。依据市场价格信号，动态优化调度策略。同时，密切关注市场规则的变化，及时调整运营模式，提升自身在市場中的竞争力。此外，随着用户需求的多样化发展，用户对电能质量、供电可靠性及用电成本等方面有了更高期待^[2]。虚拟电厂应深入分析用户需求响应特性，为用户量身定制个性化的用电服务方案，在满足用户需求的同时实现自身的可持续发展。

二、虚拟电厂的组成与运行机制

（一）虚拟电厂的组成

虚拟电厂是一个复杂且高效的系统，主要由分布式电源、储能装置、可控负荷以及能量管理系统这几大关键部分构成。分布式电源是虚拟电厂的能量基石，涵盖了太阳能光伏、风力发电、小型燃气轮机和生物质能发电等多种形式。储能装置在虚拟电厂中扮演着“能量调节器”的角色，能有效实现削峰填谷与功率平衡。可控负荷则包括工业可中断负荷、商业空调负荷、居民电动汽车充电负荷等，借助需求响应技术，可依据电力系统运行状况和调度指令灵活调整用电行为^[3]。而能量管理系统作为虚拟电厂的核心，负责收集各部分运行信息、分析处理数据，并制定优化调度策略，以协调控制虚拟电厂内的各类能源资源。

（二）虚拟电厂的运行机制

虚拟电厂的运行机制涵盖信息交互、优化调度与协同控制三个紧密相连的环节。在信息交互环节，借助先进的通信技术，虚拟电厂内的分布式电源、储能装置、可控负荷等各组成部分与能量管理系统之间能够达成实时信息传输。优化调度环节中，能量管理系统基于收集到的信息，综合考虑电力系统在经济性、可靠性、环保性等方面的运行目标，构建优化调度模型。通过特定的算法求解模型，进而得出各组成部分的最优运行计划，以实现整体效益的最大化^[4]。协同控制环节则是将优化调度结果精准下发至各组成部分，利用相应的控制设备，对分布式电源的发电功率、储能装置的充放电行为以及可控负荷的用电量进行实时调

控，确保虚拟电厂严格依照预定计划稳定运行。

三、影响虚拟电厂优化调度的关键因素

（一）可再生能源出力不确定性

可再生能源出力深受自然因素制约，呈现出显著的不确定性。天气状况和季节更替等对其影响极大，像太阳能光伏发电，其出力直接与光照强度挂钩，光照不足时发电量锐减；风力发电的出力则由风速大小与方向决定，风速不稳定或风向改变都会使发电出力产生波动^[5]。这种不确定性为虚拟电厂优化调度增添了难题，需借助科学的预测方法和适宜的调度策略来削弱其带来的不利影响。

（二）电力市场价格波动

电力市场价格受诸多因素左右，供需关系的变化会直接反映在价格上，当电力供应紧张或需求旺盛时，价格往往上扬；燃料成本的波动也会传导至电价，燃料价格上涨会推高发电成本，进而影响电价；政策法规的调整同样不可忽视，相关政策变动可能改变市场格局与成本结构。在此背景下，电力市场价格波动较大^[6]。虚拟电厂参与交易时，需依价格信号调整计划，但价格的不确定性也加大了调度策略制定的难度。

（三）用户需求响应特性

用户需求响应特性体现为用户依据电价波动信号或相关激励举措，调整自身用电行为的能力与意愿。不同用户因生活习惯、用电目的等因素，用电习惯大相径庭，需求弹性也各不相同。并且，用户需求响应行为并非完全可预测，存在一定的随机性。鉴于此，虚拟电厂在制定优化调度策略时，必须将用户需求响应特性纳入重要考量范畴，以此提升需求响应成效与调度策略的可行性。

（四）储能装置的充放电特性

储能装置的充放电特性受多重因素制约。其容量大小决定了可储存与释放的能量规模；充放电效率影响能量在充放电过程中的损耗；充放电功率限制则划定了储能装置充放电的速率范围。制定合理的充放电策略，有助于提升虚拟电厂运行效率与经济效益。然而，在此过程中，还需兼顾储能装置的寿命和成本因素，这无疑为虚拟电厂的优化调度增添了复杂程度。

四、虚拟电厂优化调度模型与求解算法

（一）多目标优化调度模型

为全面考量虚拟电厂运行中的经济性、可靠性与环保性，本文构建了多目标优化调度模型。该模型包含目标函数与约束条件两部分。在目标函数方面，设有经济性、可靠性和环保性三个目标。经济性目标旨在最小化虚拟电厂的运行成本，涵盖分布式电源发电所产生的燃料、维护等成本。可靠性目标聚焦于最大化虚拟电厂的供电可靠性，通常采用缺电概率（LOLP）或期望缺供电量（EENS）等指标来量化评估，以确保电力供应的稳定。环保性目标则致力于最小化虚拟电厂的污染物排放量，重点关注分布

式电源发电过程中产生的二氧化碳、二氧化硫等污染物，推动绿色低碳发展。约束条件方面，功率平衡约束要求虚拟电厂在任意时刻，其发电功率、储能装置充放电功率与可控负荷用电功率之和必须等于总负荷需求。分布式电源出力约束规定各分布式电源的出力需在其最小和最大出力范围内。储能装置约束涉及容量限制、充放电功率限制以及充放电状态转换限制等。可控负荷约束则确保可控负荷的调节量处于允许的调节范围内，保障系统安全稳定运行。

（二）求解算法

为求解前文所构建的虚拟电厂多目标优化调度模型，本文选用多目标进化算法。该算法具备同时处理多个目标函数的能力，通过模拟生物进化过程中的选择、交叉和变异等关键操作，在解空间内广泛搜索，最终得到一组非支配解。算法的具体流程如下：首先进行初始化种群操作，随机生成一组满足约束条件的初始调度方案，以此构成初始种群。接着开展适应度评估，依据目标函数计算每个个体的适应度值，以此衡量个体的优劣程度。随后进入选择操作阶段，采用轮盘赌选择、锦标赛选择等经典方法，从当前种群中筛选出适应度较高的个体，使其进入下一代种群。之后进行交叉操作，对选中的个体进行两两配对并交换部分基因，从而产生新的个体，增加种群的多样性。紧接着开展变异操作，对新个体进行随机扰动，进一步探索解空间。之后对新生成的种群进行非支配排序，并计算每个个体的拥挤度，以此保持种群的多样性。最后进行终止条件判断，当达到最大迭代次数或满足其他预设的终止条件时，算法停止运行，输出非支配解集；若未满足终止条件，则返回适应度评估步骤继续迭代。

五、虚拟电厂优化调度策略的未来发展方向

（一）人工智能与大数据技术的应用

随着人工智能和大数据技术的不断发展，将其应用于虚拟电厂的优化调度中将成为未来的研究热点^[7]。例如，利用深度学习算法提高可再生能源出力的预测精度，通过强化学习算法实现虚拟电厂的自主优化调度，借助大数据分析挖掘用户需求响应的潜在规律，为调度策略的制定提供更准确的依据。

（二）跨区域虚拟电厂的协同调度

未来，随着电力系统的区域互联和能源互联网的发展，跨区域虚拟电厂的协同调度将成为必然趋势。不同区域的虚拟电厂具有不同的能源资源和负荷特性，通过建立跨区域的协同调度机制，可以实现能源资源的优化配置和互补利用，提高整个电力系统的运行效率和可靠性^[8]。

（三）与电动汽车等新兴负荷的深度融合

电动汽车等新兴负荷的快速发展为虚拟电厂的优化调度带来了新的机遇和挑战。将电动汽车纳入虚拟电厂的调度范围，通过合理引导电动汽车的充电和放电行为，不仅可以实现电动汽车与电网的互动，还可以为虚拟电厂提供灵活的调节资源，进一步提高虚拟电厂的运行效能^[9]。

（四）考虑碳交易机制的优化调度

鉴于全球对气候变化问题关注度持续提升，碳交易机制在电力系统中的应用将愈发广泛。在虚拟电厂开展优化调度工作时，把碳交易成本纳入考量范畴十分必要。这一举措能够发挥引导作用，促使虚拟电厂在发电方式选择上倾向于低碳模式，进而推动可再生能源得到更充分的消纳^[10]。如此一来，不仅有助于降低碳排放，还能实现电力系统朝着低碳方向稳步发展。

六、结论

新型电力系统的发展对虚拟电厂的优化调度提出了更高的要求。本文在分析新型电力系统特征及对虚拟电厂调度要求的基础上，阐述了虚拟电厂的组成与运行机制，探讨了影响虚拟电厂优化调度的关键因素，构建了综合考虑经济性、可靠性和环保性的多目标优化调度模型，并介绍了相应的求解算法。同时，对虚拟电厂优化调度策略的未来发展方向进行了展望。未来的研究应进一步深入探索人工智能、大数据等新技术在虚拟电厂优化调度中的应用，加强跨区域虚拟电厂的协同调度研究，推动虚拟电厂与电动汽车等新兴负荷的深度融合，并考虑碳交易机制的影响，以不断提升虚拟电厂在新型电力系统中的运行效能，为能源的清洁低碳转型和电力系统的安全稳定运行提供有力支持。

参考文献

[1] 楼家树, 李继红, 薛必克, 等. 储能型虚拟电厂参与国外电力市场的报价收益方式及对中国的启示思考 [J]. 供用电, 2023, 40(12): 7-15+31. DOI: 10.19421/j.cnki.1006-6357.2023.12.002.

[2] 张超, 赵冬梅, 季宇, 等. 基于改进深度 Q 网络的虚拟电厂实时优化调度 [J]. 中国电力, 2024, 57(01): 91-100.

[3] 彭道刚, 税纪钧, 王丹豪, 等. “双碳”背景下虚拟电厂研究综述 [J]. 发电技术, 2023, 44(05): 602-615.

[4] 闫冬. 新型电力系统中的虚拟电厂关键技术分析 [J]. 仪器仪表用户, 2024, 31 (05): 101-103.

[5] 李平. 基于新型电力系统战略背景下水电企业基层人才培养的绩效管理优化路径 [J]. 云南电力, 2024, (07): 45-52.

[6] 郭松, 张玥劼. 新型电力系统中的虚拟电厂模式与关键技术分析 [J]. 电子技术, 2023, 52 (11): 56-57.

[7] 梁作放, 孔令勃, 潘华. 新型电力系统面临的挑战及关键技术 [J]. 电力与能源, 2024, 45(02): 154-159.

[8] 程环宇, 许相敏, 郭凤凤, 等. 新型电力系统下虚拟电厂常态化运营研究 [J]. 煤炭经济研究, 2024, 44 (08): 38-43.

[9] 宋天琦, 刘惠萍. 新型电力系统中虚拟电厂技术发展现状与趋势 [J]. 中国国情国力, 2024, (06): 37-40.

[10] 谭忠富, 王冠然. 新型电力系统下虚拟电厂技术应用与发展建议 [J]. 华北电力大学学报 (社会科学版), 2023, (04): 29-39.