

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.06.014

新型电力系统中的虚拟电厂研究综述

高明¹, 曾平良², 冯永朝¹

(1. 广州储能集团有限公司, 广东广州 510623; 2. 杭州电子科技大学自动化学院, 浙江杭州 310018)

摘要:随着传统化石能源的日益枯竭,以风能、太阳能为主的新能源发电资源已成为构建新型电力系统的主要能源形式。风能、太阳能等分布式能源具有较强的随机性、波动性、间歇性特征,大规模并网对电网稳定运行带来诸多挑战。虚拟电厂(virtual power plant, VPP)凭借其较强聚合调节各类型资源的能力,参与电网运行调度,促进清洁能源消纳。文中首先梳理VPP的基本概念,综述国内外VPP研究现状,并总结国内能源发展现状及趋势;然后归纳VPP的控制方式及架构,将目前VPP模型划分为4类,即VPP优化调度模型、VPP参与竞标竞价模型、VPP参与需求侧响应模型、考虑系统风险的VPP模型,同时系统总结VPP模型的各类算法;最后展望VPP在未来电力系统中的发展趋势,尤其是VPP参与电力市场提升经济效益的潜力。文中对现阶段VPP的相关研究进行归纳和总结,为该领域的后续研究提供借鉴。

关键词:可再生能源;分布式能源;虚拟电厂(VPP);需求侧响应;机组组合;VPP模型

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2025)06-0143-12

0 引言

传统化石能源的过度开发导致资源不足,同时引发显著的气候变化,对社会以及自然环境产生破坏性影响。能源是推动人类社会进步发展的关键资源,加快推进风电、光伏等清洁能源替代传统化石能源,已成为当前能源转型阶段的主要任务。2024年7月25日,国家发改委、国家能源局、国家数据局联合发布《加快构建新型电力系统行动方案(2024年—2027年)》,提出9项专项行动,旨在加快构建新型电力系统。在此背景下,政府出台相关政策,激励企业参与虚拟电厂(virtual power plant, VPP)示范项目的建设与运营,引导助推VPP发展^[1-4]。与此同时,全国统一电力市场体系正在加速构建,跨省跨区电力市场与省/区域电力市场机制不断完善,为VPP参与电力交易市场提供效益,政策引导与机制完善也可以使得VPP行业健康发展^[5-8]。

风电、光伏等清洁能源不仅出力呈现随机性、波动性,而且此类新能源场站地理位置具有分布式特点,导致电力系统的源侧出力不稳定,从而使得供电稳定性、可靠性难以得到保证。VPP利用软件系统及新一代双向通信技术,结合天气数据对风电、光伏出力进行预测。当电网调节能力不足时,可向新型电力系统中的灵活性资源(新型储能、可控负荷)发送调节指令,实现快速响应并获取收益,从而提高供电可靠性。随着电力市场机制的逐步

完善,在电能量市场中,VPP通过优化运营策略,参与电力现货市场的日前、日内及实时交易以获取收益。在电力辅助服务市场中,VPP可参与一次调频、调峰、无功调节、备用等服务,通过跟踪电力调度指令实时调节出力,获得调频收益,同时可以预留备用容量获得收益。此外,传统电力系统为“源随荷动”模式,而未来清洁能源占比不断增大,新型电力系统将呈现“源荷互动”的特征,即供给发电侧与用户需求侧实现动态平衡。VPP技术利用数智化手段整合“源、网、荷、储”资源,参与电网优化调度,有效应对清洁能源不确定性以及电力系统供需匹配问题。

VPP作为先进技术,一方面增加了以新能源为主体的新型电力系统在用户需求侧的调节能力,提升了系统应对波动性的韧性;另一方面,为可靠消纳新能源提供市场化的技术手段和路径。其不仅有助于解决分布式能源并网问题,还可以通过参与电力市场为发电单元和电网带来经济效益。未来,发电侧将以大规模可再生能源发电机组为主,而用户需求侧也表现出高度不确定性。目前需求侧响应的研究主要分为两类:基于价格的需求响应(price-based demand response, PBDR)和基于激励的需求响应(incentive-based demand response, IBDR)。其中,PBDR的分时电价(time of use, TOU)策略和IBDR的可中断负荷(interruptible load, IL)策略,是VPP系统运行中常见的参与方式。电力系统的相关学者将传统能源、新能源发电技术以及储能系统相结合,探索多能源互补的运行模式。风电、光伏

收稿日期:2025-05-02;修回日期:2025-07-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U21662083)

清洁能源作为未来电网的主要构成形式,有望实现能源的可持续发展。

VPP 作为整合分布式能源参与电网运行的新技术,通过协调供给发电侧和用户需求侧进行优化调度,其带来的经济效益和环境效益不可估量,在新型电力系统发展中具有广阔前景。文中系统梳理 VPP 的定义;综述国内外 VPP 研究现状及我国能源发展趋势;归纳 VPP 的控制方式及架构体系;分类整理现有 VPP 模型及其求解算法;展望 VPP 在新型电力系统的发展方向。

1 VPP 概述

1.1 VPP 的概念

VPP 的概念最早由 AWERBUCH S 博士在其著作《The virtual utility: accounting, technology & competitive aspects of the emerging industry》^[9]中提出:由无需拥有实际资产的独立实体通过灵活协作,在市场驱动下提供高效能源服务的虚拟公共设施。“十四五”以来,国家大力推进风电、光伏等清洁能源,其在新型电力系统中所占比重持续上升,VPP 作为新兴的聚合型资源调控技术,通过合理调配资源,有效应对能源供需矛盾。文献[10]指出 VPP 通过通信技术、互联网技术、数据处理技术和智能决策技术,构建电力系统中发电与用电之间的桥梁,为分布式可再生能源和可控负荷提供接入平台;文献[11]将 VPP 定义为由分散的发电单元、灵活性负荷和存储系统组成的单一运行实体;文献[12]认为 VPP 是一系列分布式能源的聚合体,其出现有助于提升可再生能源的管理效率,促进电力系统的高效运行。国外对 VPP 的定义主要是通过软件系统与通信技术,聚合分布式可再生能源、可控负荷以及储能系统,形成统一调度单元,参与电网运行,并通过智能决策提升能源管理效率。

近年来,我国各省份逐步出台相关政策支持 VPP 的发展。2024 年 4 月,江苏省发展改革委发布《江苏省电力需求响应实施细则》,明确 VPP 依托售电公司、储能运营商等机构,对可调节负荷、新型储能、电动汽车等资源进行聚合协调,参与需求响应;2024 年 8 月,浙江省能源监管办发布《虚拟电厂参与浙江电力辅助服务市场试点工作方案》,将 VPP 定义为依托负荷聚合商、售电公司等机构,通过信息技术实现需求侧资源等聚合,形成规模化调节能力,作为“特殊机组”参与电力运行调节;2024 年 10 月,甘肃省工信厅发布《甘肃省虚拟电厂建设

与运营管理实施方案(试行)》,提出 VPP 应利用数智化技术对区域内的可调负荷、分布式电源、储能等资源进行聚合,并具备响应电网运行调节的能力;2024 年 11 月,广东省能源局联合国家能源局南方监管局印发《广东省虚拟电厂参与电力市场交易实施方案》,明确 VPP 可依托负荷聚合商、售电公司等机构,通过数字化信息技术聚合需求侧资源,作为独立经营主体参与电力市场交易。

综上所述, VPP 是通过数智化技术手段,聚合用户侧的分布式新能源、储能系统和可调节负荷,依托能量管理平台,借助双向通信技术实现数据传输,由软件系统实时监测,并利用人工智能算法对新能源出力、可控负荷、新型储能运行情况进行分析,进而对发电侧和用户需求侧进行优化调配,增强电网调节能力。同时, VPP 可适时参与电力市场交易,促进清洁能源优先消纳,提高新型电力系统的供电可靠性、稳定性与经济性。

1.2 国外 VPP 研究现状

德国。Next-Kraftwerke 公司运营的 VPP 聚合电力负荷、应急发电机、水力发电、光伏发电、风力发电、生物质能等多种资源。其主要收益来源于电力交易服务、灵活性资源出力以及参与电网调频服务。该 VPP 以 Next Box 为核心技术根据电价变化动态调整运行策略。

澳大利亚。其 VPP 主要以聚合用户侧资源为主,包括屋顶光伏、小型储能系统、可控负荷设备,应用于电网调峰、清洁能源消纳和市场交易。收益模式包括与售电公司签订合同参与交易,或作为独立主体参与辅助服务市场。

美国。作为较早开始实行需求侧管理的国家,其 VPP 侧重于聚合可控负荷开展需求侧响应,整合分布式光伏与储能设施,依据不同响应类型获得收益。例如,特斯拉研发的能源交易管理系统,聚合电动汽车、光伏和储能设备,提供快速调度响应能力以获取市场收益。

总体来说,国外 VPP 发展较早,在政府新能源发展、电力市场交易和需求侧管理政策的推动下,已形成以分布式能源聚合参与电力市场或以可调节负荷参与需求侧响应为主的成熟模式。

1.3 国内 VPP 研究现状

深圳市。深圳 VPP 管理中心成立于 2022 年,是国内首个 VPP 管理机构。截至 2024 年 10 月,该中心已接入资源容量达 330 万 kW,最大调节能力约 80 万 kW。预计到 2025 年底,将建成具备 100 万 kW 可调资源、最大负荷调节能力达 5% 的稳定 VPP

系统。

上海市。上海市在 VPP 调节能力建设方面处于全国前列。2024 年 8 月, 上海电网负荷达到 4 000 万 kW, 国网上海电力公司成功利用 VPP 技术完成迎峰度夏期间的快速削峰验证, 最大响应负荷达 70.43 万 kW, 创下历史新高, 有效缓解了用电高峰期的供电压力。

浙江省。截至 2024 年 9 月, 国网浙江省级 VPP 管理平台已聚合空调负荷用户、新型储能、充电桩等多种分布式资源。并于 8 月组织 VPP 参与电网调度运行, 最大响应负荷 132.3 万 kW, 平均响应负荷 100.3 万 kW。

江苏省。2024 年 8 月, 常州市 VPP 平台正式投入运行, 整合光伏、储能系统、充电桩、5G 基站等灵活资源, 总聚合规模达 45.45 万 kW, 形成超 12 万 kW 的动态可调节能力。

当前, 我国处于构建新型电力系统的关键阶段, VPP 主要以聚合负荷、分布式能源、新型储能、充电桩等方式形成规模化调节能力。深圳、上海、浙江、江苏等多个 VPP 示范项目已投入运行, 主要以需求侧响应模式为主, 但在应用场景拓展与商业模式创新方面仍须进一步探索。

1.4 国内能源行业发展现状

未来电网的能源结构将以大规模清洁能源发电为主, 特别是风力发电和光伏发电。近年来, 我国风力发电与光伏发电装机容量逐年上升^[13], 如图 1 和图 2 所示。2023 年全国发电装机容量为 2 919.65 GW, 其中可再生能源装机容量占比 50.43%, 超出火电装机容量比例 2.81 个百分点, 可再生能源装机容量首次超过火电装机容量。从发电量看, 如图 3 和图 4 所示, 2023 年全国总发电量为 9.288 7 万亿 kW·h, 火电仍占主导地位, 但风电和光伏发电量占比已接近 20%, 较 2022 年增加 19% 左右。在“双碳”战略持续推进的背景下, 随着可再生能源装机比例不断提高, 其发电量占比也将稳步提升。

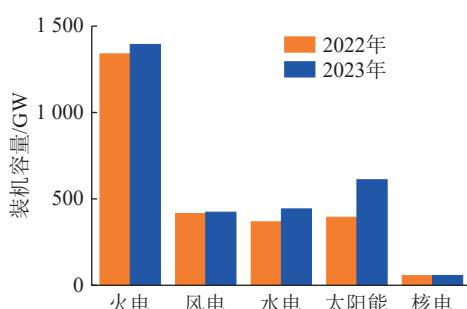


图 1 2022 年—2023 年各类型能源装机容量
Fig.1 Installed capacity of different energy sources from 2022 to 2023

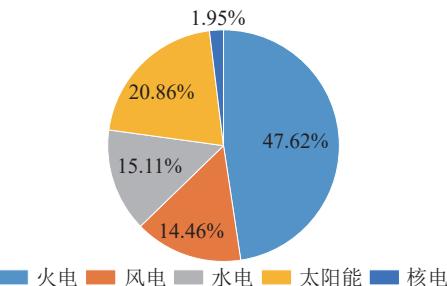


图 2 2023 年各类型能源装机容量占比
Fig.2 Installed capacity proportion of different energy sources in 2023

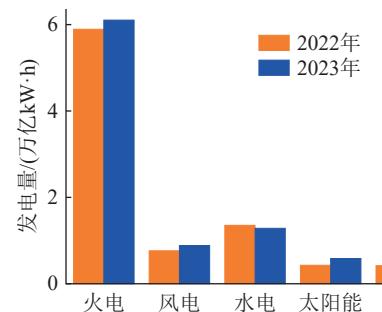


图 3 2022 年—2023 年各类型能源发电量
Fig.3 Power generation of different energy sources from 2022 to 2023

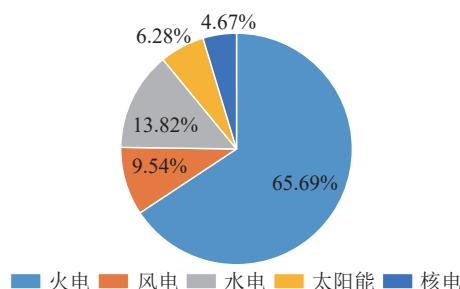


图 4 2023 年各类型能源发电量占比
Fig.4 Power generation proportion of different energy sources in 2023

构建新型电力系统需要清洁能源的大力支撑。风电、光伏装机与发电量逐年攀升, 对系统灵活性提出更高要求。新型储能与可控负荷作为关键调节资源, 其出力特性各异, 需要通过信息化手段实现统一整合与协调调度。VPP 正是实现这一目标的重要技术路径, 其可实现对分布式能源的灵活调度与规范管理, 促进发电侧有序发电、需求侧合理用电, 全面提升电力系统的可靠性与经济性。

2 VPP 控制方式及交易架构

2.1 VPP 控制方式

目前, 关于 VPP 控制方式研究主要分为 3 种模式: 集中控制方式、分散控制方式、集中+分散的协调控制模式。集中控制方式是指由 VPP 控制中心全面掌握各分布式发电单元的运行信息, 并基于全

局优化目标制定出力计划,统一调度各单元,实现系统的协调优化运行,如图5所示。该方式适用于规模小、资源数量有限的分布式能源聚合场景。其优点在于控制结构简单,易于实现全局优化;缺点为在需要扩容时兼容性差、拓展性差。分散控制方式适用于多区域、多VPP协同运行的场景。在此方式下,VPP总控制中心负责协调多个子VPP控制中心,各子VPP控制中心与VPP总控制中心进行相关信息交流,VPP总控制中心制定出力调度计划给子VPP控制中心,如图6所示。分散控制方式可以实现多个子VPP控制中心的聚合控制。该方式的优点在于各子VPP控制中心处理数据,并与控制中心进行信息交互;缺点在于各子VPP控制中心相互独立无法进行数据交互。集中+分散的协调控制模式则是VPP总控制中心不仅可以与每个VPP进行数据交互,各子VPP系统之间也可以进行数据交互,通过交互实时状态信息制定策略,且各子VPP系统之间、各子VPP系统与VPP总控制中心进行协调优化,如图7所示。集中+分散的协调控制模式优点是具有较好的兼容性、拓展性,VPP总控制中心通过算法数据分析制定运营策略并参与市场交易。

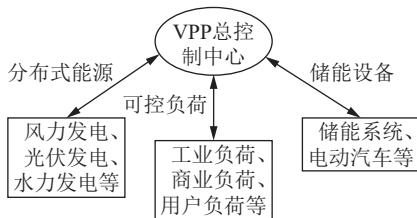


图5 VPP 集中控制方式
Fig.5 Centralized control method of VPP

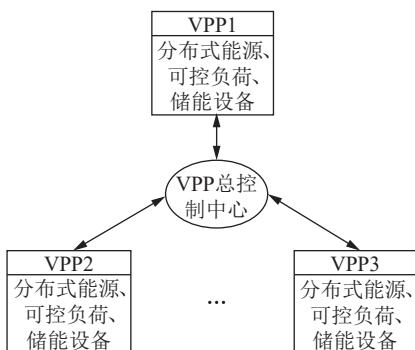


图6 VPP 分散控制方式
Fig.6 Distributed control method of VPP

2.2 VPP 参与市场化交易的架构

根据现阶段VPP模型架构的研究,所构建的VPP模型普遍采用双层优化调度结构,如图8所示。在该架构中,VPP总控制中心作为核心协调单元,整合发电侧和需求侧,参与电网及电力市场的

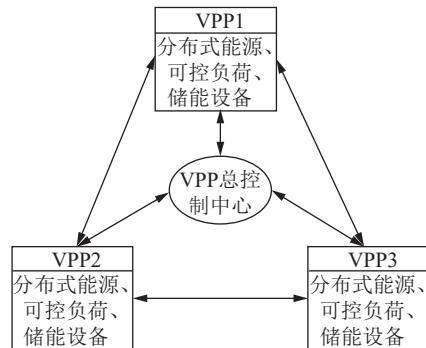


图7 VPP 集中+分散的协调控制模式

Fig.7 Centralized distributed control method of VPP

运行与交易。由上层模型电力交易中心与VPP总控制中心进行投标出清信息交互。VPP总控制中心可以参与电力现货市场、电力辅助服务市场、电力中长期市场等的交易出清,并将出清计划/结果分给各分布式能源。结合各类发电单元的运行特性,VPP制定日前出力计划。在运行工程中,下层模型负责采集风力发电、光伏发电等可再生能源的实际出力数据,并上报VPP总控制中心,用于对日前出力计划进行修正。VPP总控制中心在此基础上协调下层模型与上层模型的优化互动,通过电网调度中心的协调,形成VPP的最优运行方案。若VPP的发电单元包含电转气、燃气锅炉等设备,VPP还可以参与多种交易市场进行能量交易,实现各能源之间的协调优化调度。

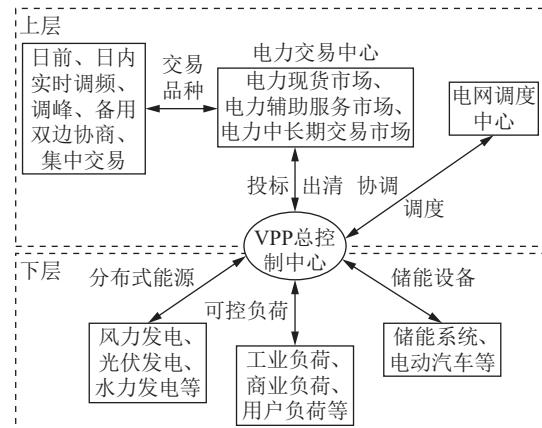


图8 VPP 参与市场化交易架构示意
Fig.8 Schematic of VPP participation in market-based transactions

文献[14]建立共享储能容量的多VPP优化调度双层模型,上层模型以储能电站投资成本最低为目标,下层模型以VPP运营成本最低为目标。该模型表明VPP可以实现合理调度,兼顾发电侧与需求侧利益,提升系统的运行效率;文献[15]提出考虑动态电价的VPP优化调度双层模型,上层在运营商供能成本中引入碳捕集装置,下层则将电动汽车纳

入负荷侧, 并以用户用能成本最小为目标。通过算例验证表明, 该方法显著降低了二氧化碳排放量, 同时动态电价机制的制定可以提高系统的经济性; 文献[16]建立 VPP 在电能量市场以及辅助服务能力市场的双层模型, 并基于条件价值理论, 采用随机优化的方法对模型进行求解。结果表明, 此方法可以规避清洁能源出力不确定性的风险, 同时提升机组的边界报价能力; 文献[17]研究由光伏、分布式温控负荷构成的 VPP 系统, 建立双层优化调度模型。上层模型对光伏出力进行日前预测, 并优化 VPP 与电网的功率交互曲线; 下层模型采用实时功率跟踪进行日内修正, 优化各分布式能源的调度任务, 提高 VPP 系统的经济性。文献[18]建立考虑不确定性的 VPP 双层优化调度模型, 上层模型利用电价调节 VPP 的出力, 下层模型由 VPP 控制中心集中控制分布式能源, 协调 VPP 和配电网之间的交互关系。当系统运营商公布电价时, VPP 做出最优响应, 以实现收益最大化。

此外,《国家能源局关于支持电力领域新型经营主体创新发展的指导意见》为 VPP 的发展提供了明确的政策支持。文中提出提升电力交易灵活性, 鼓励新型经营主体根据电力需求进行灵活调节; 并推动电力现货市场的出清节点向更低电压等级延伸, 使 VPP 能够获得更精准的电价信号; VPP 的聚合特性使其能够在时间、空间、成本三个维度上提供灵活调节能力。随着电力现货市场的不断深化, VPP 将以“报量报价”的方式参与现货市场, 提升 VPP 的收益。

3 VPP 模型描述

根据不同的机组组合方式构建的 VPP, 其在参与调控、市场交易和需求响应方面的模型主要分为以下几类: VPP 优化调度模型、VPP 参与竞标竞价模型、VPP 参与需求侧响应模型、考虑系统风险的 VPP 模型。

3.1 VPP 优化调度模型

VPP 优化调度模型主要由分布式能源发电、需求侧可控负荷、新型储能等构成。根据不同机组的组合方式, “风储”、“风光储”等结构适用于小型、地理位置分散的分布式风电与光伏系统, 结合储能设备实现能源互补。VPP 通过整合各分布式能源协调优化参与电网运行, 优先消耗可再生能源, 具有环保性、无污染、降低发电成本等优势。“风光燃储”组合方式的发电容量大, 可应用于风电场、光伏电站等场景。燃气轮机的引入会增加 VPP 碳排

放, 并对环境有一定污染, 但可提升 VPP 总运行收益。通过 VPP 对各能源进行优化调度可有效减少发电成本, 优先消纳风光可再生能源出力, 具有环保性、经济性。

文献[19]研究含风电、光伏与储能系统的多 VPP 经济运行调度问题, 构建非线性混合整数规划模型, 并采用 McCormick 线性化方法将其转化为线性模型。仿真结果表明, 该方法可使运行成本降低约 10%, 有效提升配电网的经济性。文献[20]提出一种基于数据驱动的 VPP 聚合调度方法, 考虑不同 VPP 集群的调度特性, 利用负荷数据、VPP 集群历史调度数据进行分析, 算例结果表明该方法具有较高的准确性, 为复杂多 VPP 优化调度问题提供新思路。文献[21]建立日前日内多时间尺度的 VPP 调度模型, 由于日前预测与日内实时出力的偏差在目标函数中加入惩罚机制, 并采用滚动优化迭代更新方法生成日内调度结果。该模型结合实际 VPP 案例, 增强了现实应用的可行性。文献[22]提出一种综合能源型 VPP, 包含风电单元、电转气单元、碳捕集单元和气电单元。联合运行模式下, 该系统可以减少二氧化碳排放, 同时提升风电的清洁能源消纳水平。文献[23]将风电、碳捕集系统、充换电站组合构建 VPP 系统, 以总成本最小为目标进行低碳调度优化。该方法在降低系统碳排放能力的同时, 保障了风电的高效消纳。文献[24]建立风光储荷的 VPP 优化调度模型, 考虑风电不确定性对 VPP 调度的影响, 分阶段制定出力方案并进行重要性决策, 实现了经济性与运营风险的平衡。文献[25]研究并网型储能和用户侧储能对 VPP 中的运行特点对收益的影响, 并网型储能有助于提升 VPP 收益, 而用户侧储能的增加可能会减少 VPP 的收益。文献[26]研究多种能源作为 VPP 发电单元, 建立优化调度模型。在谷时段储能设备从电网购电储能, 而在峰时段则配合负荷管理与储能放电, 保证风光能源的平稳出力, 表明多种能源可以协调支持 VPP 参与电网调度。

VPP 优化调度理论还被用于构建稳健调度模型, 采用参数区间表征不确定性, 减少对精确概率模型的依赖。通过实现实体间的均衡约束, 优化出力及利益分配, 从而提高 VPP 协同运行的效率和稳定性。

3.2 VPP 参与竞标竞价模型

VPP 参与电力市场交易一般流程如下: 首先, 在合同市场中, VPP 与市场运营机构签订双边合同, 各单元运营商向调度中心提交竞价投标信息,

VPP 控制中心根据负荷预测结果,将发电量分配给各运营商,制定日前市场竞标策略,完成日前市场价格出清;其次,在实时市场开启后,系统更新各时段可再生能源出力预测,据此调整实时市场竞标策略并进行实时市场价格出清;最后,在平衡市场阶段,VPP 协调各单元调度运行以完成电能交易。此阶段计算实时出力与计划出力的偏差,若实际出力大于计划出力,则按照低于出清价格进行售电;若小于计划出力,则按高于出清价格进行购电。

文献[27]基于光伏、储能、电动汽车构建 VPP 模型,提出一种日前竞价策略,采用高斯回归方法挖掘历史数据,并将竞价空间作为约束条件。在标准配电系统上的仿真结果表明,所提竞价方法可以提升预测精度,减少电量以及电价偏差,增加 VPP 的经济性。文献[28]考虑碳交易机制对 VPP 的影响,构建 VPP 双层竞价模型。上层模型以最大化预期收益为竞价策略,下层模型以日前发电与备用成本最小为目标,通过风险规避与机会成本策略,结合卡罗需-库恩-塔克最优条件和数学规划方法对所提模型进行求解,得出最优竞价策略。文献[29]针对新型市场主体数量过多的情况,构建 VPP 参与电能量市场以及电力辅助服务市场的竞价模型,采用多代理算法求解,实现 VPP 内部的多个新型主体的合理利益化分配,提高所有参与者的收益。文献[30]建立基于分布式能源的区块链 VPP 模型,引入交易与评价函数,仿真结果表明该模型可以在保障各单元利益和数据安全性的前提下,完善市场机制,为 VPP 在市场背景下的最优控制策略提供理论支撑。文献[31]在电力现货市场背景下,研究售电公司作为 VPP 聚合商控制分布式能源参与电力市场交易的模式,通过合理调配能源,增加自身经济效益,为售电公司未来的资源整合能力提供技术参考。文献[32]设计一种 VPP 两级竞价机制,一级为 VPP 自身的竞价机制,另一级为参与多类型市场的外部机制。模拟结果表明,该竞价机制可以使 VPP 的运行成本与偏差惩罚降低,实现 VPP 的资源协调调度能力。文献[33]针对“风光储荷”型 VPP 参与日前市场和实时市场,建立双层竞价博弈模型,依据日前价格制定投标策略,并通过实时价格调节实现日前市场和实时市场偏差修正。文献[34]将“风燃储”型 VPP 参与中期合同市场、日前市场、平衡市场的运营模式,其中日前市场按照统一出清价格结算,平衡市场则以高于出清价格购电或低于出清价格售电,进而建立以 VPP 运行收益最大化的电价随机规划模型。文献[35]基于随机规划理论,研究 VPP

参与日前能量市场、日内需求响应市场、实时能量市场。VPP 在日内市场调节日前市场投标出力和日内实际出力的偏差,并通过购买需求侧响应的负荷削减量解决供需不平衡问题。

相空间重构的高斯过程通过挖掘历史数据能够提升竞价空间预测的准确性,具有高精度、高效率的特点,有助于减少电量偏差、提升 VPP 收益。然而,可再生能源出力的不确定性对 VPP 效益影响显著。运营商若采用激进策略虽然收益增加,但所承担风险增大。VPP 在竞价决策过程中,新能源出力、负荷需求和电力价格等是优化问题的首要数据,其预测准确性至关重要,直接影响市场竞价策略的制定。

3.3 VPP 参与需求侧响应模型

需求侧响应是组成 VPP 的主要资源之一。电力公司通过需求侧响应措施引导用户调整用电方式,实现削峰填谷,参与电力市场交易并获得收益。需求侧响应分为两类: PBDR、IBDR。PBDR 包括 TOU、尖峰电价、实时电价 3 种形式。IBDR 包括直接负荷控制、IL、需求侧竞价 3 种形式。现有研究一般主要为 PBDR 的 TOU 策略、IBDR 的 IL 策略,前者用户根据不同时段电价的变化进行响应,后者通过激励政策进行负荷的转移或削减,二者具有明显的削峰填谷作用。

文献[36]综合考虑多种柔性负荷的用电特性与碳交易机制,建立 VPP 运行调度模型,涵盖可平移负荷、可转移负荷、可削减负荷,并引入改进的碳交易机制指标。仿真结果表明,该方法可降低 VPP 运行成本,验证了聚合多类型需求侧响应资源的可行性。文献[37]提出柔性负荷的需求侧响应模型,并将其嵌入 VPP 优化调度模型中,参与电能量市场以及调峰市场交易。所提的需求侧响应模型可以挖掘负荷侧的响应能力,提升 VPP 收益。文献[38]针对热电联产机组出力调节能力不足的问题,考虑将峰谷 TOU 建立需求侧响应模型引入至 VPP 模型中。仿真结果表明,该模型可以实现用户错峰用电,促进热能和电能的灵活性转化,提高系统运行效益。文献[39]对外部需求响应和内部需求响应进行数学建模,考虑外部需求侧响应参与 VPP 运行,通过参与日前市场与外部调节市场,降低不平衡惩罚成本,并分析不同需求侧响应服务比例对 VPP 运行经济性的影响。文献[40]提出多种需求侧资源参与 VPP 优化调度的策略,以最大化 VPP 预期收益为目标函数制定需求侧响应策略,算例仿真结果验证了模型的有效性。文献[41]考虑

VPP 中的不确定性因素和需求侧响应参与的影响, 用户对负荷削减指令的响应存在不确定性。因此, 对确定性 PBDR-VPP、不确定性 PBDR-VPP、确定性 IBDR-VPP、不确定性 IBDR-VPP 分别建模型分析。经算例验证需求侧响应参与 VPP 系统优化调度可以缓解用电高峰期发电机组出力不足情况, 提高系统可靠性。文献[42]提出差异化激励策略, 对用电量大的用户在高峰时段给予较低补偿、用电量小的用户则给予较高补偿, 不同时间段的激励价格也不同。通过聚类分析与分层分析对负荷进行分类, VPP 运营商可根据用户报价和批发电价自适应确定最优激励策略, 提高用户收益。文献[43]提出用于分析 PBDR 和分布式光伏功率损耗关系的适用性评估方法, 并分析大规模分布式能源模型下的需求和能耗特征。案例基于 IEEE 8500 节点试验馈线, 用户数据由巴西管理机构 ANEEL 提供。

VPP 聚合用户侧资源参与需求侧响应, 通过电力市场价格引导用户调整用电行为, 有助于平滑负荷曲线, 减轻电力系统在高负荷时期的压力, 从而提高整体能源利用效率。同时, 通过电价优惠和激励补偿减少用户的经济负担, 提升用户满意度与参与积极性。

3.4 考虑系统风险的 VPP 模型

传统 VPP 优化模型通常以最大化运营收益或最小化成本为目标。然而, 清洁能源出力波动与电力市场交易的不确定性给 VPP 带来显著风险。因此, 相关研究引入风险量化指标, 结合经济学中的条件价值方法进行分析。根据决策者的风险偏好程度, 选取合适的置信度与风险系数, 有利于 VPP 效益的增加。利用条件风险价值方法衡量系统风险, 可以让决策者更好地权衡系统收益、运营成本与风险之间的关系。

文献[44]针对风光出力不确定性、电力市场电价不确定性以及电动汽车集群特性, 建立 VPP 参与电力市场的日前及实时市场优化模型。文中在目前市场中构建电能量市场及电力辅助服务市场的投标策略, 在实时市场中建立调频响应模型, 并引入条件风险价值分析来评估不确定性对收益的影响, 最后结合实际电力市场规则进行仿真验证。文献[45]建立含风光燃储及 IL 的 VPP 优化运行模型, 采用条件风险价值理论量化不确定性, 并结合改进 shapley 法根据 VPP 各单元的贡献度、风险情况进行收益分配, 提升利益分配的公平性与合理性。文献[46]采用双重随机规划方法分析 VPP 出力的不确定性, 通过算例得出 VPP 最优运行策略, 同时得

出运行成本与风险的关联性, 为决策者提供理论依据。文献[47]建立考虑多重风险的“风光燃储”碳捕集 VPP 模型, 采用场景分析法对清洁能源日前出力进行随机优化, 交易风险由条件价值理论评估。结果表明所提方法可以降低 VPP 的碳排放。文献[48]提出基于成本效益的备用风险决策方法, 利用条件风险价值度量风电出力不确定性导致的失负荷与弃风风险, 建立以调度成本与风险损失之和最小为优化目标的 VPP 模型。算例表明, 多能源联合备用协调优化可获得考虑风险的最优备用容量。

VPP 的运营风险主要来源于可再生能源出力预测、电力市场电价曲线、用户负荷反应行为等因素, 这些因素可能导致 VPP 的运营策略与计划调度方案存在偏差, 进而增加 VPP 的运营风险。目前常用的风险处理方法包括随机优化、鲁棒优化和条件风险值, 各有优劣。近年来, 部分研究尝试将多种方法融合, 以提升 VPP 收益。而利用随机规划或鲁棒方法挖掘历史数据, 是应对不确定性的有效途径。

4 VPP 模型求解

4.1 VPP 系统不确定性因素

针对 VPP 系统中的不确定性因素, VPP 可有效提升电网对新能源的消纳能力。综合现有文献, 对 VPP 中不确定性因素的研究主要集中在风电出力不确定性、光伏发电出力不确定性以及市场电价的不确定性 3 个方面。处理这些不确定性因素的方法主要有场景缩减法、随机规划法和鲁棒优化法。场景缩减法根据历史数据采用蒙特卡洛仿真等方法生成场景, 并将场景缩减为典型场景; 随机规划法适用于不确定性建模, 尤其在市场电价预测误差较小而风电预测与实际出力偏差较大的情况, 但该方法须考虑较多方案和历史样本, 计算量较大; 鲁棒优化法则在不确定性因素较强时表现更好。

(1) 风电出力不确定性。受自然界中风速随机性的影响, 风力发电机组的出力具有不确定性。目前多数文献采用 Weibull 概率分布函数描述风速的不确定性^[49], 并基于此进行风电机组出力预测。

(2) 光伏发电不确定性。光伏出力与太阳辐射强度有关, 太阳辐射强度可以由 Beta 概率分布函数^[49]进行建模。

(3) 市场电价不确定性。VPP 通过协调多种随机性能源的优化调度参与电力市场, 而市场电价受能源出力随机性和相关政策影响不断波动。

文献[50]针对风电、市场电价和电动汽车的不确定性, 提出基于轮盘旋转机制(roulette wheeling

mechanism, RWM)的方法。该方法假定预测值固定,误差服从某一概率分布,并通过对误差分布进行离散化分层分析来处理不确定性。文献[51]则采用场景缩减法处理风电出力和市场电价的不确定性,利用蒙特卡洛法从历史数据中生成多个场景,再通过聚类算法将其缩减为若干典型场景。

4.2 VPP 模型算法求解

VPP 模型的求解方法主要有 2 类,即采用智能算法和使用 Cplex/Yalmip 商业求解器。

智能算法包括遗传算法、粒子群算法及其改进的算法(量子遗传算法、非支配排序遗传算法和二进制粒子群算法等)。改进的遗传算法保留了精英机制和惩罚函数,在避免局部最优、提高收敛速度和准确度等方面表现良好;改进的粒子群算法则具有计算简单、处理方便、收敛速度快、存储量小等优点。文献[52]提出一种基于顺序的微分进化算法,该方法首先基于序列信息进行确定性初始化,生成高质量初始解,然后在进化过程中引入突变、交叉机制及自适应控制参数调节策略。在多个基准函数上的测试结果表明,相较于粒子群算法、蝙蝠算法和萤火虫算法,所提算法在种群质量、收敛速度和迭代效率方面均表现更优。文献[53]提出基于一致性交替方向乘子法(alternating direction method of multiplier, ADMM)的完全分布式调度算法,用于求解 2 种典型的 VPP 模型。对比分析表明,改进算法保证了全局收敛且具有较快的收敛速度,提高了计算效率。文献[54]对传统加增乘减(additive increase multiplicative decrease, AIMD)算法进行改进,提出一种基于线性规划的 2 阶段优化算法。第 1 阶段根据目标函数的优先级对发电资源进行排序与初步分配;第 2 阶段采用改进 AIMD 算法优化发电调度。仿真结果表明,该方法可有效降低总发电成本,在无功功率管理、储能装置、节能减排等方面具有良好的应用潜力。

商业求解器具有高性能、灵活性强、扩展性好和适用范围广等优点,可快速求解线性规划、二次规划、二阶锥规划等问题,并提供灵活的应用技术接口,允许用户根据需求定制模型与算法。

在 MATLAB 软件平台中, Yalmip 优化工具箱为凸优化和非凸优化问题提供高级建模语言。Yalmip 工具箱不仅包含基本的线性规划求解算法,如线性规划、二值线性规划、分支定界等,而且还提供求解工具,如 Cplex、Gurobi、Glpk、Lpsolve 等求解器。使用 Yalmip 工具箱建模编程包括以下步骤:创建决策变量、设置约束条件、配置参数、求解

目标函数。

5 结语与展望

文中对 VPP 进行了系统总结与归纳。未来新型电力系统将呈现高比例可再生能源为主导的发电供给侧能源结构。我国西北、东北地区的风光可再生能源资源丰富。VPP 作为整合分布式发电资源与需求侧可调节负荷的新型载体,能够有效参与电网的需求响应和电力市场交易。在提升电网调节能力、促进新能源消纳方面发挥关键作用,具有显著的经济效益和环境效益。关于 VPP 在未来新型电力系统中的发展趋势展望如下。

(1) 实现多类资源的最优协调控制。VPP 聚合分布式光伏、分散式风电、新型储能、电动汽车、可控负荷等多种能源资源,通过优化调度控制与灵活性调节,推动“源网荷储”一体化应用。

(2) 提高电网应对新能源出力波动性和不确定性的能力。随着风电、光伏作为新型电力系统主要能源形式,清洁能源渗透率持续增加,其出力不确定性也增大。VPP 具有调节新型储能和可控负荷的能力,可有效应对新能源出力随机性波动,起到“补短板”的作用。

(3) 通过参与电力市场提升经济效益。当前全国统一电力市场体系建设正有序推进,VPP 作为新兴市场主体已逐步纳入各省市电力市场政策之中。未来随着全国统一电力市场的形成,VPP 可通过优化调度实现经济效益与社会效益的最大化。

随着信息数字化技术的不断发展和电力市场体系的日益完善,VPP 将在电力系统发挥越来越重要的作用。通过整合不同类型能源资源参与电力市场交易,保障电力系统稳定运行,推动电力系统清洁、低碳、灵活发展,进一步加快实现“能源互联网”以及“双碳”目标。

参考文献:

- [1] 彭超逸,徐苏越,顾慧杰,等.基于主从博弈的虚拟电厂参与多元竞争市场投标策略研究[J].电力系统保护与控制,2024,52(7): 125-137.
PENG Chaoyi, XU Suyue, GU Huijie, et al. Bidding strategy for a virtual power plant participating in a multiple competitive market based on the Stackelberg game[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(7): 125-137.
- [2] 杨丰任,王鸿,王致杰.基于碳排放生产优先级的综合能源虚拟电厂优化运行策略[J].电力科学与技术学报,2024,39(5): 192-202.
YANG Fengren, WANG Hong, WANG Zhijie. Optimal operation strategy of integrated energy virtual power plant based on production priority of carbon emission[J]. Journal of Electric

- Power Science and Technology, 2024, 39(5): 192-202.
- [3] 张钧钊, 姜欣, 段世杰, 等. 虚拟电厂参与电-碳联合市场运行的竞价策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 108-118.
ZHANG Junzhao, JIANG Xin, DUAN Shijie, et al. Bidding strategy for a virtual power plant to participate in the power-carbon joint market[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 108-118.
- [4] 刘蔚, 张野, 吴应双, 等. 基于改进价值分解网络的集成虚拟电厂的互联电网动态最优协作控制[J]. 供用电, 2024, 41(12): 62-71.
LIU Wei, ZHANG Ye, WU Yingshuang, et al. Dynamic optimal collaborative control of interconnected power grids for integrated virtual power plants based on improved value decomposition networks[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(12): 62-71.
- [5] 朱靖恺, 崔勇, 杜洋, 等. 采用改进量子粒子群优化算法的虚拟电厂参与二次调频两阶段优化[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(4): 112-120.
ZHU Jingkai, CUI Yong, DU Yang, et al. Two-stage optimization of virtual power plant participating in secondary frequency regulation using improved quantum particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 112-120.
- [6] 程远林, 张舒, 张毅, 等. 计及价格敏感区间下惩罚型碳价的CCS-P2G虚拟电厂鲁棒优化[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(6): 251-259.
CHENG Yuanlin, ZHANG Shu, ZHANG Yi, et al. Robust optimization of CCS-P2G virtual power plants considering penalized carbon prices in price-sensitive intervals[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 251-259.
- [7] 李孟阳, 李国杰, 汪可友, 等. 考虑需求响应及调频性能变化的虚拟电厂日前投标策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 13-25.
LI Mengyang, LI Guojie, WANG Keyou, et al. Day-ahead bidding strategy for virtual power plant considering demand response and frequency regulation performance variation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 13-25.
- [8] 张林垚, 廖锦霖, 吴桂联, 等. 基于主从博弈的虚拟电厂与配电网双层协同规划模型[J]. 供用电, 2024, 41(6): 21-27.
ZHANG Linyao, LIAO Jinlin, WU Guilian, et al. Two-level collaborative planning model of virtual power plant and distribution network based on Stackelberg game[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(6): 21-27.
- [9] AWERBUCH S, PRESTON A. The virtual utility: accounting, technology & competitive aspects of the emerging industry[M]. Springer Science & Business Media, 2012.
- [10] YANG D C, HE S W, CHEN Q Y, et al. Bidding strategy of a virtual power plant considering carbon-electricity trading[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(3): 306-314.
- [11] MAANAVI M, NAJAFI A, GODINA R, et al. Energy management of virtual power plant considering distributed generation sizing and pricing[J]. Applied Sciences, 2019, 9(14): 2817.
- [12] KO R, KANG D, JOO S K. Mixed integer quadratic programming based scheduling methods for day-ahead bidding and intra-day operation of virtual power plant[J]. Energies, 2019, 12(8): 1410.
- [13] 国家能源局. 国家能源局关于可再生能源发展“十三五”规划实施的指导意见[J]. 太阳能, 2017(9): 5-10.
The National Energy Administration. Guiding opinions of the national energy administration on the implementation of the 13th five-year plan for renewable energy development[J]. Solar Energy, 2017(9): 5-10.
- [14] 赵宇轩, 宋伟峰, 李伟康, 等. 考虑共享储能容量配置的多虚拟电厂优化运行方法[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(1): 92-101.
ZHAO Yuxuan, SONG Weifeng, LI Weikang, et al. Optimal operation method of multiple virtual power plants considering shared energy storage capacity allocation[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(1): 92-101.
- [15] 潘婷, 董厚琦, 王雨晴, 等. 基于动态分时电价的虚拟电厂双层优化调度研究[J]. 系统科学与数学, 2024, 44(2): 304-325.
PAN Ting, DONG Houqi, WANG Yuqing, et al. Research on two-layer optimal scheduling of virtual power plant based on dynamic time-of-use electricity price[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2024, 44(2): 304-325.
- [16] 王俊, 徐箭, 王晶晶, 等. 基于条件风险价值的虚拟电厂参与能量及备用市场的双层随机优化[J]. 电网技术, 2024, 48(6): 2502-2510.
WANG Jun, XU Jian, WANG Jingjing, et al. Bi-level stochastic optimization for a virtual power plant participating in energy and reserve market based on conditional value at risk[J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2502-2510.
- [17] WEI C Y, XU J, LIAO S Y, et al. A bi-level scheduling model for virtual power plants with aggregated thermostatically controlled loads and renewable energy[J]. Applied Energy, 2018, 224: 659-670.
- [18] ZHU J Q, DUAN P, LIU M B, et al. Bi-level real-time economic dispatch of VPP considering uncertainty[J]. IEEE Access, 2019, 7: 15282-15291.
- [19] 张丽娟, 保富. 含分布式新能源的多虚拟电厂协同运行[J]. 电测与仪表, 2025, 62(9): 134-141.
ZHANG Lijuan, BAO Fu. Coordinated operation of multiple virtual power plants integrated with distributed renewable energy[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(9): 134-141.
- [20] BAI X Y, FAN Y F, HAO R X, et al. Data-driven virtual power plant aggregation method[J]. Electrical Engineering, 2025, 107(1): 569-578.
- [21] 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(1): 91-100.
ZHANG Chao, ZHAO Dongmei, JI Yu, et al. Real time optimal dispatch of virtual power plant based on improved deep Q

- network[J]. *Electric Power*, 2024, 57(1): 91-100.
- [22] 杨力帆, 周鲲, 齐增清, 等. 基于需求响应的虚拟电厂多时间尺度优化调度[J]. *电网与清洁能源*, 2024, 40(3): 10-21.
YANG Lifan, ZHOU Kun, QI Zengqing, et al. A multi-time scale optimal scheduling strategy of virtual power plants based on demand response[J]. *Power System and Clean Energy*, 2024, 40(3): 10-21.
- [23] 陈继明, 徐乾, 李勇, 等. 计及源荷不确定性和碳捕集虚拟电厂的电-气互联系统优化调度[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(10): 9-18.
CHEN Jiming, XU Qian, LI Yong, et al. Optimal dispatch of electricity-natural gas interconnection system considering source-load uncertainty and virtual power plant with carbon capture[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2023, 44(10): 9-18.
- [24] 罗红梅, 张祥成, 李媛媛, 等. 考虑充放电策略的风电-碳捕集-充换电站虚拟电厂低碳经济调度[J]. *现代电力*, 2025, 42(1): 54-63.
LUO Hongmei, ZHANG Xiangcheng, LI Yuanyuan, et al. Low carbon economic scheduling of virtual power plants with wind power, carbon capture, charge and change station considering charge discharge strategy[J]. *Modern Electric Power*, 2025, 42(1): 54-63.
- [25] 刘吉成, 冯淑贤, 宋亚楠, 等. 计及源荷不确定性的虚拟电厂优化调度模型[J]. *现代电力*, 2025, 42(4): 799-809.
LIU Jicheng, FENG Shuxian, SONG Yanan, et al. A scheduling model of virtual power plant considering source-load uncertainty[J]. *Modern Electric Power*, 2025, 42(4): 799-809.
- [26] 王世龙, 宋双商, 林清华, 等. 计及分布式储能的虚拟电厂优化调度[J]. *可再生能源*, 2019, 37(8): 1214-1219.
WANG Shilong, SONG Shuangshang, LIN Qinghua, et al. Virtual power plant optimal scheduling considering distributed energy storage[J]. *Renewable Energy Resources*, 2019, 37(8): 1214-1219.
- [27] 郭红霞, 白浩, 刘磊, 等. 统一电能交易市场下的虚拟电厂优化调度模型[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(23): 136-145.
GUO Hongxia, BAI Hao, LIU Lei, et al. Optimal scheduling model of virtual power plant in a unified electricity trading market[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(23): 136-145.
- [28] 张国基, 贾燕冰, 韩肖清, 等. 基于竞价空间预测的虚拟电厂日前竞价策略[J]. *电网技术*, 2024, 48(9): 3724-3734.
ZHANG Guoji, JIA Yanbing, HAN Xiaoqing, et al. Day-ahead bidding strategy of virtual power plant based on bidding space prediction[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(9): 3724-3734.
- [29] 舒征宇, 朱凯翔, 王灿, 等. 考虑碳交易的虚拟电厂日前电力市场竞价策略[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(5): 58-68, 149.
SHU Zhengyu, ZHU Kaixiang, WANG Can, et al. Virtual power plants participating in day-ahead electricity market bidding strategy considering carbon trading[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(5): 58-68, 149.
- [30] 张继行, 张一, 王旭, 等. 基于多代理强化学习的多新型市场
主体虚拟电厂博弈竞价及效益分配策略[J]. *电网技术*, 2024, 48(5): 1980-1991.
ZHANG Jihang, ZHANG Yi, WANG Xu, et al. Game bidding and benefit allocation strategies for virtual power plants with multiple new market entities based on multi-agent reinforcement learning[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(5): 1980-1991.
- [31] 徐雪松, 闫月, 唐加乐, 等. 基于异构区块链的分布式能源竞价策略研究[J]. *中国管理科学*, 2024, 32(3): 60-69.
XU Xuesong, YAN Yue, TANG Jiale, et al. Research on bidding strategy of distributed energy based on heterogeneous blockchain[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2024, 32(3): 60-69.
- [32] 王千淳, 杜欣慧, 赵薇, 等. 考虑碳交易下虚拟电厂参与现货市场竞价和调度策略[J]. *现代电力*, 2024, 41(1): 152-160.
WANG Qianchun, DU Xinhui, ZHAO Wei, et al. Spot market bidding and scheduling strategies considering the participation of virtual power plants under carbon trading[J]. *Modern Electric Power*, 2024, 41(1): 152-160.
- [33] 江乐赟, 吴昊, 邱辛泰, 等. 考虑多市场的虚拟电厂两级竞价机制设计[J]. *电力需求侧管理*, 2023, 25(3): 33-40.
JIANG Leyun, WU Hao, QIU Xintai, et al. Design of two-level bidding mechanism for virtual power plants considering multi-type markets[J]. *Power Demand Side Management*, 2023, 25(3): 33-40.
- [34] TANG W J, YANG H T. Optimal operation and bidding strategy of a virtual power plant integrated with energy storage systems and elasticity demand response[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 79798-79809.
- [35] 余爽, 卫志农, 孙国强, 等. 考虑不确定性因素的虚拟电厂竞标模型[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(22): 43-49.
YU Shuang, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. A bidding model for a virtual power plant considering uncertainties[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(22): 43-49.
- [36] 李文琦, 孙伟卿, 杨文威. 考虑碳交易及需求响应的虚拟电厂运行优化策略[J]. *上海理工大学学报*, 2024, 46(5): 484-493.
LI Wenqi, SUN Weiqing, YANG Wenwei. Virtual power plant operation optimization strategy considering carbon trading and demand response[J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2024, 46(5): 484-493.
- [37] 王浩丞, 高红均, 王仁浚. 计及需求响应的虚拟电厂日前市场交易策略研究[J]. *智慧电力*, 2024, 52(7): 64-71.
WANG Haocheng, GAO Hongjun, WANG Renjun. Day-ahead market trading strategy of virtual power plant considering demand response[J]. *Smart Power*, 2024, 52(7): 64-71.
- [38] 王世杰, 冯天波, 孙宁, 等. 考虑电-气-热耦合和需求响应的虚拟电厂优化调度策略[J]. *中国电力*, 2024, 57(1): 101-114.
WANG Shijie, FENG Tianbo, SUN Ning, et al. Optimal scheduling strategy for virtual power plant considering electric-gas-heat coupling and demand response[J]. *Electric Power*, 2024, 57(1): 101-114.
- [39] 黄蔚亮, 苏志鹏, 梁欣怡, 等. 考虑可调市场和外部需求响应

- 的虚拟电厂优化运行策略[J]. *中国电力*, 2023, 56(12): 156-163.
- HUANG Weiliang, SU Zhipeng, LIANG Xinyi, et al. Optimal operation strategy for virtual power plant considering regulation market and external demand response[J]. *Electric Power*, 2023, 56(12): 156-163.
- [40] 杜宏宇, 张宏宇, 陈波, 等. 计及多种需求响应资源的虚拟电厂运行机制及控制策略优化[J]. *电工电能新技术*, 2023, 42(7): 77-86.
- DU Hongyu, ZHANG Hongyu, CHEN Bo, et al. Operation mechanism and control strategy optimization of virtual power plant considering multiple DR resources[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2023, 42(7): 77-86.
- [41] 牛文娟, 李扬, 王蓓蓓. 考虑不确定性的需求响应虚拟电厂建模[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(22): 3630-3637.
- NIU Wenjuan, LI Yang, WANG Beibei. Demand response based virtual power plant modeling considering uncertainty[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(22): 3630-3637.
- [42] LUO Z, HONG S, DING Y M. A data mining-driven incentive-based demand response scheme for a virtual power plant[J]. *Applied Energy*, 2019, 239: 549-559.
- [43] VIANA M S, MANASSERO G, UDAETA M E M. Analysis of demand response and photovoltaic distributed generation as resources for power utility planning[J]. *Applied Energy*, 2018, 217: 456-466.
- [44] 李晓舟, 秦文萍, 景祥, 等. 计及不确定风险和多主体协同的虚拟电厂参与主辅市场联合优化策略[J]. *电网技术*, 2024, 48(11): 4553-4567.
- LI Xiaozhou, QIN Wenping, JING Xiang, et al. Joint optimization for virtual power plant participating in main and auxiliary markets considering uncertain risks and multi-agent coordination[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(11): 4553-4567.
- [45] 李新聪, 黄滢, 李振坤, 等. 基于条件风险价值的虚拟电厂优化运行与收益分配[J/OL]. *现代电力*, 2024: 1-12. (2024-08-26)[2025-02-10]. <https://link.cnki.net/doi/10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0263>.
- LI Xincong, HUANG Ying, LI Zhenkun, et al. Optimal operation and profit allocation of virtual power plants based on conditional value-at-risk[J/OL]. *Modern Electric Power*, 2024: 1-12. (2024-08-26)[2025-02-10]. <https://link.cnki.net/doi/10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0263>.
- [46] 包哲, 李薇, 张潇方, 等. 计及“源荷”双侧多重不确定性的虚拟电厂运行优化研究[J]. *动力工程学报*, 2023, 43(12): 1665-1674.
- BAO Zhe, LI Wei, ZHANG Xiaofang, et al. Study on operational optimization of virtual power plant considering 'source and load' uncertainties[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2023, 43(12): 1665-1674.
- [47] 张艺, 刘蕊. 考虑不确定性风险的虚拟电厂优化调度模型研究[J]. *智慧电力*, 2024, 52(8): 9-18.
- ZHANG Yi, LIU Rui. Virtual power plant optimal scheduling model considering uncertain risks[J]. *Smart Power*, 2024, 52(8): 9-18.
- [48] 吕梦璇, 娄素华, 刘建琴, 等. 含高比例风电的虚拟电厂多类型备用协调优化[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(10): 2874-2882, 3138.
- LÜ Mengxuan, LOU Suhua, LIU Jianqin, et al. Coordinated optimization of multi-type reserve in virtual power plant accommodated high shares of wind power[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(10): 2874-2882, 3138.
- [49] 余英, 王海云, 王维庆, 等. 虚拟电厂参与下含高渗透可再生能源系统的运行策略[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(1): 94-103.
- YU Ying, WANG Haiyun, WANG Weiqing, et al. Operation strategy of high permeability renewable energy with virtual power plant participation[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(1): 94-103.
- [50] ALAHYARI A, EHSAN M, MOUSAVIZADEH M. A hybrid storage-wind virtual power plant (VPP) participation in the electricity markets: a self-scheduling optimization considering price, renewable generation, and electric vehicles uncertainties[J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 25: 100812.
- [51] 周博, 吕林, 高红均, 等. 基于两阶段随机规划的虚拟电厂优化交易策略[J]. *电力建设*, 2018, 39(9): 70-77.
- ZHOU Bo, LÜ Lin, GAO Hongjun, et al. Optimal bidding strategy based on two-stage stochastic programming for virtual power plant[J]. *Electric Power Construction*, 2018, 39(9): 70-77.
- [52] YANG Y D, WEI B R, QIN Z J. Sequence-based differential evolution for solving economic dispatch considering virtual power plant[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2019, 13(15): 3202-3215.
- [53] CHEN G, LI J Y. A fully distributed ADMM-based dispatch approach for virtual power plant problems[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2018, 58: 300-312.
- [54] KUMAR K P, SARAVANAN B, SWARUP K S. A two stage increase-decrease algorithm to optimize distributed generation in a virtual power plant[J]. *Energy Procedia*, 2016, 90: 276-282.

作者简介：



高明

高明(1994), 男, 硕士, 工程师, 从事新型储能运营管理及策略分析工作(E-mail: 815670199@qq.com);

曾平良(1962), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析与规划、可再生能源并网、电动汽车接入等;

冯永朝(1982), 男, 学士, 工程师, 从事新型储能工程建设管理及运行分析工作。

Review of virtual power plant in new power system

GAO Ming¹, ZENG Pingliang², FENG Yongchao¹

(1. Guangzhou Energy Storage Group Co., Ltd., Guangzhou 510623, China; 2. Department of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: With the increasing depletion of traditional fossil fuels, new energy sources such as wind and solar power become the main energy sources for building new power systems. Distributed energy resources including wind and solar power, exhibit strong characteristics of randomness, volatility, and intermittency. Their large scale grid integration poses many challenges to the stable operation of the power grid. Virtual power plant (VPP) which possess a strong ability to aggregate and regulate various types of resources, can participate in grid operation and scheduling, thereby promoting the consumption of clean energy. This article first summarizes the definition of VPP and provides an overview of the current research status both domestically and internationally. It also reviews the current status and trends of energy development in China. Secondly, the control methods and architecture of VPP are summarized, and the current VPP models are classified into four categories: VPP optimization scheduling model, VPP participation in bidding and tendering model, VPP participation in demand-side response model, and VPP model considering system risk. Various algorithms for solving VPP models are reviewed. Finally, the future prospects of VPP are discussed, especially the economic benefits of VPP participation in the electricity market. This article provides a comprehensive summary and generalization of the current research on VPP, offering references for future research in this field.

Keywords: renewable energy resource; distributed energy resource; virtual power plant (VPP); demand-side response; unit combination; VPP model

(编辑 吴昊)

(上接第 142 页)

Effect of the arc model on electromagnetic interference caused by GIS switch operations in 3D full wave simulation

JIA Wenda¹, CAO Zhiwei², WANG Jihao², YAN Qing², HUANG Jinjun³, GUO Jun¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China; 3. HVDC Technical Center of SGCC, Beijing 100052, China)

Abstract: Transient ground potential rise (TGPR) and transient electromagnetic field generated by the switching operation of gas insulated switchgear (GIS) pose a great threat to the safety of the personnel in the station as well as the stable operation of the secondary equipment. The arc model has a great influence on the simulation calculation of TGPR and transient electromagnetic field. In this paper, a three-dimensional transient electromagnetic simulation model of GIS is established, and the effects of different arc models and model parameters on the simulation results of TGPR and spatial electric field are investigated by applying the finite integration time domain method. Through the analysis, it is found that the simulated waveform amplitude is higher under the ideal switching model and constant resistance model, and the simulated waveform amplitude is lowest under the hyperbola-like model. The simulated waveforms and pulse amplitudes under the exponential and segmented resistance models are almost the same. In the segmented resistance model, the amplitudes of TGPR and spatial electric field tend to decrease when the variable parameter of steady resistance increases. The waveform amplitudes of TGPR and spatial electric field are almost unaffected when the equivalent length and equivalent radius of the arc model change.

Keywords: gas insulated switchgear (GIS); transient ground potential rise (TGPR); three-dimensional transient electromagnetic simulation model; finite integration time domain; spatial electric field; arc model

(编辑 吴昊)