

基于区块链的多虚拟电厂主从博弈优化运行

周步祥, 张越, 臧天磊, 曹强, 张远洪, 彭昊宇
(四川大学电气工程学院, 四川省成都市 610065)

摘要: 在未来以新能源为主体的新型电力系统中,多虚拟电厂的能源管理将更加复杂和具有挑战性。考虑到区块链技术信息安全、机制透明、区域共治的特点,从虚拟电厂的功能特征出发,创建由商业链、技术链和资产链组成的区块链。综合考虑多虚拟电厂形成的多决策主体利益关联与冲突的局面,建立了考虑网络安全约束的多虚拟电厂主从博弈优化运行方法。在此基础上,研究了区块链技术下的多虚拟电厂优化运行模式,从网络层级框架、交互机制、智能合约和激励机制等方面进行设计。最后,通过算例仿真验证了所提方法的有效性。

关键词: 多虚拟电厂; Stackelberg 博弈; 网络安全约束; 区块链技术; 运行模式

0 引言

在国家双碳目标下,高比例可再生能源将成为电网的新形态。风、光等可再生能源丰富,但在时间和空间分布上存在不均衡性、间歇性和波动性^[1]。虚拟电厂(VPP)可以协调控制分布式能源(DG),依托互联电力系统大范围配置,实现新能源的高效开发利用^[2]。

近年来,国内外学者从多VPP决策主体存在利益关联与冲突的角度出发,在优化调度^[3-4]、市场竞价^[5-6]等方面做了探索,然而上述研究未考虑多利益主体、多元化交易间复杂错综的博弈行为。基于此,文献[7-8]分别引入非合作动态博弈和无限重复博弈探讨市场电量交互问题,却忽略了各VPP与运营中心之间对于电价的交互竞争性行为。因此,用于分析主从递阶动态情况的主从博弈模型逐渐应用于该领域。文献[9]提出双层协调优化模型,上层建立多VPP博弈竞价模型,制定直接交易电量策略,下层考虑各VPP总成本最低得到的最优响应功率。文献[10]建立配电运营商为领导者的主从博弈模型,根据动态定价合理安排内部各DG出力。然而,这些博弈模型未充分考虑VPP内部柔性资源的特性,且仅从商业型VPP角度出发,未从技术层面考虑VPP对配电网的影响。事实上,经济优化的最优策略可能会对本地网络安全运行造成危害。因此,

如何以博弈电价为激励手段提升各VPP能源需求响应并保证系统安全运行,有待进一步研究。

主从博弈是剖析决策者与响应者之间多层次决策过程的有效模型^[11],但在多VPP中的实施面临获取全局信息不足、集中决策耗时长、决策主体信任不高等问题。区块链技术的分布式分类账、数据共享、智能决策、信息安全等特性为解决该问题提供了新思路^[12]。同时,区块链的网络结构和多VPP的DG系统高度一致,为多VPP的物理实体之间提供了新的数据交互和信息安全传输路径。目前,区块链技术在能源系统的分布式优化管理方面的应用已有部分研究^[13-15],本文在此基础上,探讨区块链技术在多VPP主从博弈优化运行模式中的应用,主要工作和贡献如下。

1)引入多VPP运营商(MVPPO)的角色设计了多区域VPP的主从博弈架构,将经济运行与削峰响应结合,并考虑各VPP本地网络的安全约束,提出了计及本地网络安全约束下的多VPP两阶段主从博弈优化运行方法。

2)设计了对应区块链不同功能的网络节点以及资产链(asset chain)、技术链(technical chain)和商业链(commercial chain)组成的区块链群。使各节点共同参与系统运行控制,并实现个体决策之间高效、准确的信息交互与共享。

3)将考虑电价机制和网络安全约束的多VPP主从博弈与区块链技术下的多VPP协调运行融合,形成多区域VPP的区块链群交互运行机制,并设计了利用共识机制、智能合约和激励机制实现区块链群参与电力市场竞争以及执行网络安全的方案。

收稿日期: 2021-03-03; 修回日期: 2021-07-07。

上网日期: 2021-09-07。

国家自然科学基金资助项目(51907097);四川省科技厅计划项目(2020JDRC0049)。

1 计及网络安全约束的多区域 VPP 主从博弈联合优化

1.1 多区域 VPP 管理架构和互动机制

本文研究的多区域 VPP 运营优化框架如图 1 所示。

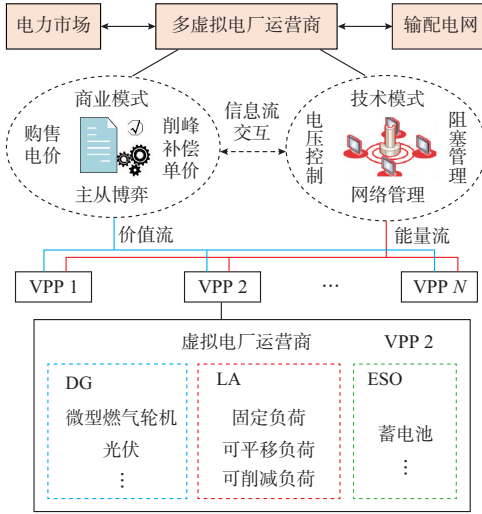


图 1 多 VPP 系统运营管理架构
Fig. 1 Operation management structure of multi-VPP system

相互协作的各 VPP 运营商 (VPPO) 负责管理 DG、负荷聚合商 (LA) 和储能运营商 (ESO), 使 VPP 作为一主体对外参与电力市场交易和安全运营, 对内聚合自身服务范围内的灵活性资源, 促进系统能量供需平衡, 并通过能源价差获得收益。考虑到多 VPP 在商业型和技术型两大功能板块所涉及的多主体主从博弈和系统网络安全问题, 本文构建 MVPPO 代替配电运营商。MVPPO 一方面通过构建与各 VPP 的主从博弈模型, 优化与 VPP 间的电量交互, 同时根据多 VPP 的能源交易平衡情况, 与电力市场进行交易, 利用两者之间的差价来获取利益; 另一方面, 为保证配电网安全稳定运行, 根据物理限制管理 VPP 系统的最佳安全运行, 确保调控计划的技术可行性。

DG 作为源侧, 通过分布式风电、微型燃气轮机等微源设备为 VPP 内外提供稳定可靠的电力。LA 包括固定负荷、可平移负荷以及可削减负荷等, 通过有偿调节用能行为参与互动响应, 充分调动了可控负荷的积极性。ESO 是 VPP 内的存储系统, 一般包括常规分布式储能、抽水蓄能和电动汽车等, 通过充放电来补偿分布式发电出力波动性和不可控性, 增强系统接纳分布式能源发电的能力和提高了能源利用效率^[15], 本文则以蓄电池为例进行一般化建模。

1.2 多区域 VPP 的两阶段主从博弈决策过程

多区域 VPP 系统的主从博弈决策机制可分为 ESO 滚动优化和多区域 VPP 主从博弈两个阶段, 两者存在顺序衔接关系, 交互迭代。

阶段 1: 根据未来 24 h 的内部购售电价、负荷需求、新能源出力预测, 以未来 $K\Delta t$ (K 为滚动优化长度, Δt 为优化步长) 时段内各 VPP 的净效益最大为优化目标, 滚动优化 ESO 的充放电行为并初步确定各 VPP 在下一阶段里参与能量交互的角色。

阶段 2: 基于阶段 1 所确定的 VPP 参与电能交易的角色、ESO 的充放电计划, 调整各新能源出力预测、负荷范围, 构建多主体主从博弈模型^[16], 根据优化的内部购售电价和削峰填谷单价调整系统内部需求响应与能源设备出力, 达到促进群内能源交易、提升各 VPP 经济效益的目的。

1.2.1 ESO 滚动优化模型

选取风电预测值作为基准场景, 以未来 $K\Delta t$ 时段内各 VPP 的净效益最大为优化目标, 优化目标函数为:

$$\begin{cases} Z_{k,t} = C_{k,t}^F - C_{k,t}^{ES} + f_{k,t} \\ \max Z_{k,t} = \sum_{t=R}^{t+K\Delta t} Z_{k,t} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} C_{k,t}^F = \lambda_t^{vb} P_{k,t}^s - \lambda_t^{vs} P_{k,t}^b \\ C_{k,t}^{ES} = c_e^{ch} P_{k,t}^{ch} - c_e^{dis} P_{k,t}^{dis} \\ f_{k,t} = \nu_e P_{k,t}^1 - \frac{\alpha_e}{2} (P_{k,t}^1)^2 + \sum_{h \in H} \lambda_e (\Delta P_{k,h}^s + \Delta P_{k,h}^c) \Delta h \end{cases} \quad (2)$$

式中: $Z_{k,t}$ 为第 k 个 VPP 在 t 时段的净运行效益; $C_{k,t}^F$ 和 $C_{k,t}^{ES}$ 分别为 t 时段第 k 个 VPP 的电能交易效益和储能系统的充放电成本; $f_{k,t}$ 为 t 时段第 k 个 VPP 的用户的效用函数, 用来描述用户购电获得的满意程度, 有二次型函数和对数型函数等形式^[17], 本文采用二次型函数来表示; λ_t^{vb} 和 λ_t^{vs} 分别为 t 时段多 VPP 的内部预测购、售电价; $P_{k,t}^s$ 和 $P_{k,t}^b$ 分别为 t 时段第 k 个 VPP 的售电量、购电量; c_e^{ch} 和 c_e^{dis} 分别为 t 时段 ESO 充、放电成本系数; $P_{k,t}^{ch}$ 和 $P_{k,t}^{dis}$ 分别为 t 时段第 k 个 VPP 的 ESO 的充、放电功率; ν_e 为用户消费电能所获得的满意度系数; α_e 为一个给定的正参数, 反映用户对消费电能的偏好程度; H 和 λ_e 分别为 t 时段响应时间的集合和削峰填谷单价; $P_{k,t}^1$ 为 t 时段第 k 个 VPP 的预测电负荷需求量; R 为任意时刻; Δh 为响应的时间长度; $\Delta P_{k,h}^s$ 和 $\Delta P_{k,h}^c$ 分别为在 h 时刻上报的可平移电负荷和可削减电负荷。

第 1 阶段目标函数需要满足的等式、不等式约束条件主要包括电功率平衡约束、VPP 与 MVPPO

之间交互功率约束、ESO约束等,具体见附录A式(A1)。

1.2.2 多区域VPP主从博弈优化模型

MVPPO和VPPO的目标函数是使各自效益最大化,MVPPO是设定内部购售电价的领导者,而VPPO则是作为跟随者接收价格信号进而决策需求响应以及设备出力。

1) MVPPO效益模型

阶段2时,MVPPO在考虑供电VPP($D_{k,t}^s=1$)多余的能量和用电VPP($D_{k,t}^b=1$)额外负荷需求的基础上制定多VPP内部的购售电价,目标函数表示为:

$$\begin{aligned} \max Z_{\text{MVPPO},t} &= C_t^{\text{sell}} - C_t^{\text{buy}} - C_t^{\text{grid}} - C_t^{\text{b}} \quad (3) \\ \begin{cases} C_t^{\text{sell}} = \lambda_t^{\text{vs}} \sum P_{k,t}^{\text{b}} \\ C_t^{\text{buy}} = \lambda_t^{\text{vb}} \sum P_{k,t}^{\text{s}} \\ C_t^{\text{grid}} = \max(\sum P_{k,t}^{\text{b}} - \sum P_{k,t}^{\text{s}}, 0) \lambda_t^{\text{gs}} + \\ \quad \min(\sum P_{k,t}^{\text{b}} - \sum P_{k,t}^{\text{s}}, 0) \lambda_t^{\text{gb}} \\ C_t^{\text{b}} = \sum_{k=1}^N \sum_{h \in H} \lambda_e (\Delta P_{k,h}^{\text{s}} + \Delta P_{k,h}^{\text{c}}) \Delta h \end{cases} \quad (4) \end{aligned}$$

式中: $Z_{\text{MVPPO},t}$ 为MVPPO在第 t 时段内的总效益; C_t^{sell} 为第 t 时段向用电VPP的售电收入; C_t^{buy} 为第 t 时段向供电VPP的购电成本; C_t^{grid} 为电力市场的交互成本,当其大于0时表示向电力市场购电,否则表示向电力市场售电; λ_t^{gb} 和 λ_t^{gs} 分别为 t 时段电力市场的购、售电价; C_t^{b} 为支付给VPP的削峰补偿; N 为VPP数量。

此外,MVPPO模型还需满足内部博弈价格与市场交易价格的约束关系,具体见附录A式(A2)。

2) VPPO模型

根据式(1)和式(3),VPPO在MVPPO给定内部购售电价基础上,优化VPP内微型燃气轮机的出力 and 需求响应,其效用函数为:

$$\begin{aligned} \max Z_{k,t} &= C_{k,t}^{\text{F}} - C_{k,t}^{\text{ES}} - C_{k,t}^{\text{B}} + f_{k,t} \quad (5) \\ \begin{cases} C_{k,t}^{\text{F}} = \lambda_t^{\text{vb}} P_{k,t}^{\text{s}} - \lambda_t^{\text{vs}} P_{k,t}^{\text{b}} \\ C_{k,t}^{\text{ES}} = c_e^{\text{ch}} P_{k,t}^{\text{ch}} - c_e^{\text{dis}} P_{k,t}^{\text{dis}} \\ C_{k,t}^{\text{B}} = a_e (P_{k,t}^{\text{mt}})^2 + b_e P_{k,t}^{\text{mt}} + c_e \\ f_{k,t} = \nu_e P_{k,t}^1 - \frac{\alpha_e}{2} (P_{k,t}^1)^2 + \sum_{h \in H} \lambda_e (\Delta P_{k,h}^{\text{s}} + \Delta P_{k,h}^{\text{c}}) \Delta h \end{cases} \quad (6) \end{aligned}$$

式中: $C_{k,t}^{\text{B}}$ 为燃气机组的燃料成本; a_e 、 b_e 、 c_e 为燃气机组的成本系数; $P_{k,t}^{\text{mt}}$ 为 t 时段第 k 个VPP的微型燃气轮机输出功率。MVPPO在 t 时刻需满足的约束条件见附录A式(A3)。

1.3 本地网络安全约束下的多VPP优化运行

基于两阶段主从博弈决策模型,得出了多VPP在经济效益上的最优竞价以及能量管理方案。为保证电网的安全运行,还须以各地网络的安全条件为基础进行安全验证。为此,本节从技术型VPP模式出发,结合本地网络约束条件,建立多VPP优化运行方法。

VPP的技术型运行方式需要考虑内部各节点之间的线路功率传输约束,其支路的潮流形式^[6]为:

$$P_{l,i,t} = \sum_{j \in N(i)} [g_{ij} V_{i,t}^2 - V_{i,t} V_{j,t} (g_{ij} \cos \theta_{ij,t} + b_{ij} \sin \theta_{ij,t})] = P_{\text{DG},i,t} - P_{\text{D},i,t} \quad (7)$$

$$Q_{l,i,t} = \sum_{j \in N(i)} [-b_{ij} V_{i,t}^2 + V_{i,t} V_{j,t} (b_{ij} \cos \theta_{ij,t} - g_{ij} \sin \theta_{ij,t})] = Q_{\text{DG},i,t} - Q_{\text{D},i,t} \quad (8)$$

式中: $P_{l,i,t}$ 和 $Q_{l,i,t}$ 分别为 t 时刻支路 l 节点 i 的注入有功和无功功率; g_{ij} 和 b_{ij} 分别为支路 ij 的电导和电纳; $\theta_{ij,t}$ 为 t 时刻节点 i 和节点 j 电压间的相角差; $N(i)$ 为所有与节点 i 相连的节点集合; $V_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的电压幅值; $P_{\text{DG},i,t}$ 和 $Q_{\text{DG},i,t}$ 分别为 t 时刻节点 i 接入的分布式电源的有功、无功出力; $P_{\text{D},i,t}$ 和 $Q_{\text{D},i,t}$ 分别为 t 时刻节点 i 所接负荷的有功、无功功率。

此外,还需要考虑网络有功功率的损耗 $P_{\text{Loss},t}$ 以及电压偏差量 $P_{\text{Dev},t}$ 。

$$P_{\text{Loss},t} = \frac{1}{2} \sum_{j \in N(i)} \frac{(V_{i,t} - V_{j,t})^2}{R_{ij}} \quad (9)$$

$$P_{\text{Dev},t} = \sqrt{\sum_{i=1}^{M_1} \frac{(V_{i,t} - V_o)^2}{M_1}} \quad (10)$$

式中: $V_{i,t} - V_{j,t}$ 为支路电压差; R_{ij} 为支路阻抗; V_o 为参考节点的电压; M_1 为VPP的节点总数。

网络安全运行的功率传输需满足的约束如下。

$$-P_{l,\max,t} < P_{l,i,t} < P_{l,\max,t} \quad I=1,2,\dots,M_2 \quad (11)$$

式中: $P_{l,\max,t}$ 为 t 时刻支路 l 节点 i 的最大注入有功功率; M_2 为VPP中支路总数。若通过支路 l 的潮流满足式(11)的约束,则完成网络安全验证,并执行经济最优策略计划;若不满足,则需要进行阻塞管理措施。首先,计算支路 l 上的潮流变化灵敏度 $a_{P,l,i}$ 和 $a_{Q,l,i}$,灵敏度的求解过程见文献[18]。其次,计算所需的修正值 $\Delta P_{l,t}$ 。

$$\Delta P_{l,t} = P_{l,\max,t} - P_{l,i,t} \quad (12)$$

根据上述计算,在考虑以下约束的情况下进一步对资源进行调整,即在节点 i 处调整其有功功率 ΔP_i 和无功功率 ΔQ_i 使式(13)成立。

$$\sum_{i=1}^{M_1} (a_{P,l,i} \Delta P_i + a_{Q,l,i} \Delta Q_i) = \Delta P_{l,t} \quad (13)$$

2 区块链技术下多区域 VPP 主从博弈优化管理模式设计

2.1 区块链技术在多区域 VPP 主从博弈优化运行中的应用功能与优势

上文从博弈论和安全约束的视角给出了集群化 VPP 的优化管理方案。博弈过程进行的前提是参与者需要获取其他参与者的信息和最新的设备资产信息(DG、LA、ESO等)。面对日渐增加的资产系统,区块链技术中低成本、高效率、扩展性强的数据存储管理功能,可为多 VPP 主从博弈过程和安全运行提供数据支持和去中心化管理。

考虑本地网络安全约束的管理将出现频繁的分散式双向电力和数据通信,区块链通信链路技术的去中心化、加密传输可以实现个体之间高效、准确、全局的信息交互与共享^[19]。同时,区块链分布式拓扑结构与多 VPP 分散式发展趋势一致,有助于解决集中系统可扩展性不强和兼容性差的问题。

博弈均衡和网络约束管理是所有 VPP 通过与 MVPPO 多次迭代后达成的最优策略组合,对应于区块链网络各节点通过分布式计算确保最优方案成链,该转化一定程度上实现了弱中心化的“共治”思想^[20]。其中,区块链技术利用共识机制进行分布式决策,利用智能合约安全、自动地完成多 VPP 的优化运行,利用激励机制促进各 VPP 单元积极参与系统调控响应的技术特征,可实现网络中各 VPP 节点进行自主管理。

综上所述,在计及网络安全约束的多 VPP 主从博弈优化运行中应用区块链技术,是相互补充的有益尝试。

2.2 基于区块链的多 VPP 网络架构

区块链与多 VPP 具有相似的拓扑形态,可从两者的技术融合角度出发,将区块链架构和节点映射到多 VPP 的运行模式和功能实体,构建了如图 2 所示的多 VPP 系统的区块链体系架构。构建节点 MVPPO(物理实体为 MVPPO)作为区块链网络中的虚拟节点,将 VPP 1 至 VPP N 作为区块链网络主节点,主节点包含了 VPP 以及分布式能源等设备。VPP 内的物理实体单元如 DG、LA、ESO 等,则以分节点的身份分散在区块链网络空间中。针对网络中虚拟节点、物理节点的功能分类如下。

1) 虚拟节点(MVPPO):全面监控多区域 VPP 系统的网络状态。

2) 网络主节点(VPP N):连接网络中其他主节点,拥有完整的边缘计算、读取能力,具有计费 and 结算、查询和验证等区块链功能^[21]。

3) 网络分节点(物理实体如 DG、LA 等各类资产):在计算和读取能力上与主节点类似,可以处理相关实体的测量和控制数据,并将其提供给系统进行共享。

如图 2 所示,区块链架构的感知层里,分散式节点通过不同类型的传感器、智能电表等收集和预处理基础数据;感知层所获得的数据,将通过固件层、合约层、应用层所提供的加密技术、分布式计算、共识机制等区块链技术组成资产链、商业链和技术链的区块链群。资产链将各 VPP 的分布式资产信息、可调配资源容量、调配时间段、所处地域等信息进行能源认证后写入区块链,为商业链和技术链的实现提供数据存储和运算基础;商业链完成交易价格的制定,编制交易合同,进而参与电力市场交易;技术链则提供网络状态估计,确保多区域 VPP 中能量的稳定传输与调度。

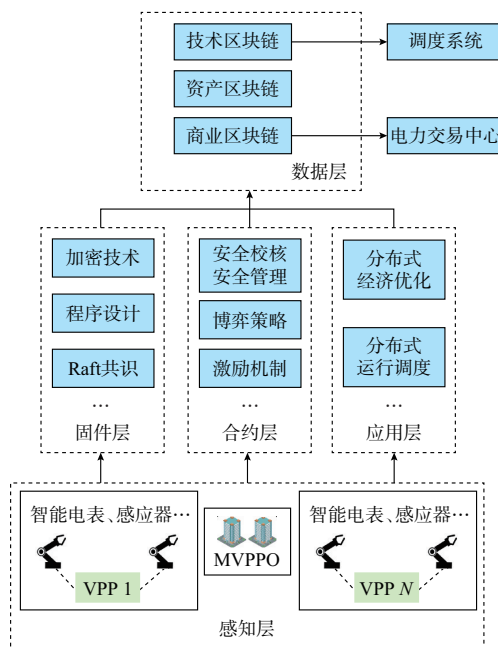


图 2 多 VPP 系统的区块链体系架构
Fig. 2 Blockchain architecture of multi-VPP system

2.3 多区域 VPP 的区块链群交互运行机制

为了高效整合网络中 VPP 节点数据,提高分布式能源系统的数据同步和共享能力,满足高并发交易以及技术验证业务的快速操作,本文设计资产链进行能源认证以及商业链进行证书交易。首先各 VPP 基于阶段 1 确定 VPP 属于“少电”还是“多电”状态。决定参与多 VPP 主从博弈优化的不平衡 VPP 将其电力信息、所处地域以及效用价值提交给 MVPPO,通过筛选验证后加入多区域 VPP 的区块链网络成为 VPP N。

MVPPO 通过与各 VPP 节点之间的博弈,形成

各自经济利益最大的动态定价和能量管理方案,达到 Stackelberg 均衡,详见 1.2 节。由多 VPP 的区块链架构组成可知,节点数有限且具有一定的可信度,故可采用 Raft 共识机制选取出主记账节点。主记账节点将 Stackelberg 均衡打包生成区块,在收到超过半数节点回复后,主记账点发送确认信息给跟随节点,并将该区块作为资产链上的下一个区块,跟随者节点随即完成日志复制过程。同时,借助 MVPPO 的天然优势,引入其作为监督节点,解决 Raft 共识不能对抗拜占庭恶意行为的问题。

然后,各节点开启对均衡策略的技术验证与管理。结合网络状态、约束等,通过安全分析的潮流计算以验证策略是否违反系统安全约束,若满足则启动电力交易流程,若不满足则进行阻塞缓解服务,详见 1.3 节。各 VPP 节点发出的本地验证情况还需经过 MVPPO 节点的认证及协调,故技术链采用权威证明 (proof of authority) 共识机制,由 MVPPO 发布调整区块信息。

经过技术链系统的验证及调整,资产链的方案将会重新调整成块,完成能源认证。各 VPP 开始确定交易计划,确定实时市场交易后,最终将参与交易的 VPP 所需记录的数据行为作为商业链单次区块记录的内容,仅仅维护 VPP 是否发生过该次交易的行为。按照此思想,本文设计了基于商业链和资产链的证书交易模式,交易行为 (VPP 的证书条目索引) 根据规则生成 Hash 值,Hash 值及其所处列表索引通过 Raft 共识机制存储到商业链中,其证书条目索引则锚定到资产链中对应的位置。该模式有助于提高多 VPP 数据验证及单位时间所能处理交易的上限。

2.4 基于联合二次规划的遗传算法 (GA-QP) 的区块链边缘计算的改进算法

1.2 节所述的 Stackelberg 纳什均衡存在的证明过程详见附录 B,考虑到两阶段中的决策问题均属于大规模非线性优化问题,采用遗传算法可以实现结果准确的前提下的算法简化。鉴于跟随者的优化目标是二次函数,可以采用二次规划的方法求解。因此本文采用 GA-QP^[22]来搜索 Stackelberg 最优均衡策略,具体求解步骤见附录 C。

通过上述计算可以得出经济最优策略,然后利用各 VPP 的潮流计算进一步验证最优策略的可行性,再根据约束进行调整。在 Stackelberg 均衡迭代以及潮流计算过程中,由于涉及主-从-主这样的递阶关系,供电网络拓扑结构复杂,使得集中式计算占用了大部分计算资源,影响了求解效率。因此,利用区块链节点的边缘计算能力^[23],各 VPP 节点进行分

布式并行计算,进而在文中搭建的基于联盟链的区块链群中通过相应的共识机制成链。

2.5 智能合约及激励机制设计

区块链技术中的智能合约,可以按规则在线上执行简单的逻辑代码,实现实时决策响应的效果^[24]。为实现区块链群参与多 VPP 主从博弈节点的高效自动协同运行,将资产链、商业链和技术链的交互过程编写成智能合约。上一阶段结束后, MVPPO 聚集报名参与下一阶段的 VPP 并触发智能合约的执行代码。基于智能合约的多 VPP 主从博弈优化实现流程包括 Stackelberg 博弈过程、本地网络状态估计、证书交易过程以及激励分配这四个环节。

该智能合约流程:1)数据上传阶段,各 VPP 上报下一时段 DG 预测、ESO 调度计划、交易角色及 LA 波动范围;2)博弈优化决策阶段,生成优化目标函数,多次迭代优化运算,输出全局最优策略;3)网络安全优化,VPP 节点对博弈均衡解根据网络安全约束进行验证及调整,得到调整后的决策方案;4)能源认证阶段,每个 VPP 供电或用电信息,所处地址及博弈电价等信息将以证书索引的形式记录在资产链中;5)证书交易阶段,各 VPP 以证书索引的形式参与市场,交易达成后,交易行为写入商业链;6)激励结算分配,利用智能合约自动指导激励分配,各 VPP 节点通过竞争博弈效用最大化以及削峰填谷经济补偿获取高效用奖励,该奖励可获得在 VPP 报名区块链网络时的优先权。

3 仿真算例

3.1 算例系统数据

为验证上述模型,搭建了包含 3 个 VPP 的应用场景,风电机组出力 and 负荷预测的相关数据见文献 [10]。储能系统的额定容量为 4 MW·h,最大允许充放电功率为 2 MW,充电费用系数和放电收益系数均为 518 元/(MW·h),充放电效率分别为 0.85 和 0.90。微型燃气轮机的参数特性见附录 D,阶段 1 的多区域 VPP 内部购电价取电力市场分时电价为参考,具体见文献 [25]。需求侧的满意度系数 v_e 、 α_e 分别为 6.0、1.5。算例优化周期为 1 d,以 1 h 为优化步长,将滚动优化长度设置为 4 h。

3.2 阶段 1 的 ESO 滚动优化结果

阶段 1 优化 ESO 的充放电行为如图 3 所示。由于风电的反调峰特性,风电出力与负荷需求往往存在较大偏差,00:00—08:00、11:00—16:00 时段内风电出力相对较大时,储能系统处于充电状态,有效消纳部分可再生能源,并在负荷需求量的时候释

放能量,降低该时段的用电成本;而在16:00—24:00、08:00—16:00时段,荷电状态达到了极限,风电出力抑或需求侧用电仍存在盈余或者短缺的情况,储能系统已经不能再进一步进行调节。

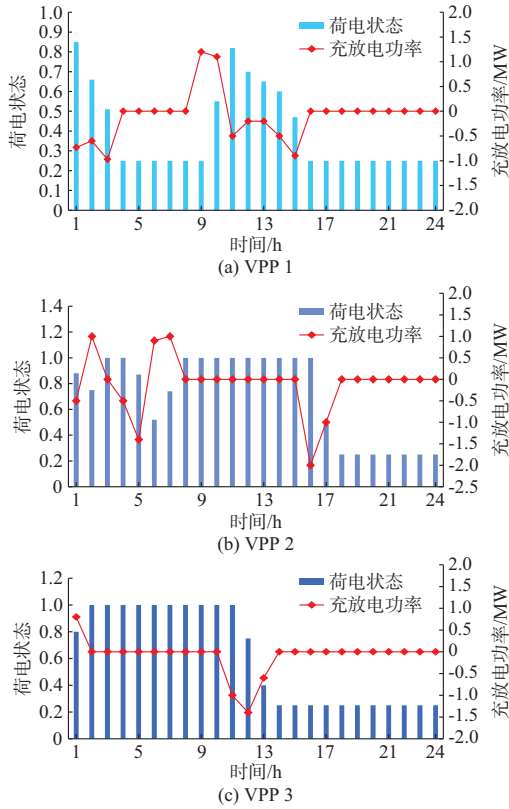


图3 储能系统滚动优化调度
Fig. 3 Rolling optimal scheduling of energy storage system

3.3 区块链技术下多VPP优化运行结果

选用4台配置为Intel i7-9700 CPU、32 G内存、1 TB固态硬盘、CentOS 7.3操作系统的台式机为实验载体,利用Docker容器作为Hyperledger Fabric的运行环境,启动4个Docker容器作为虚拟机运行基础环境,其中有3个运行节点(VPP)和一个监督节点(MVPPO),采用fabric-chaincode-java编写智能合约。

3.3.1 多区域VPP主从博弈优化结果

基于阶段1的优化结果,不平衡的VPP加入区块链网络,参与到多区域VPP的主从博弈优化运行中,博弈结果分析如下。

合约算法中设置群体规模为60,经过100次迭代后,结果达到收敛。图4为输出的博弈最优定价策略,由预测数据可知,各VPP的新能源出力与负荷需求在不同时段差异较大,MVPPO可以通过调整内部的购售电价策略,为VPP提供与电网相比更优的价格,促进VPP之间的能源互动。

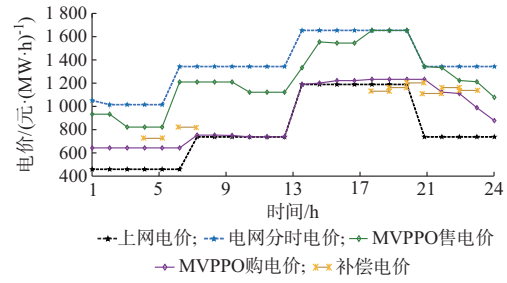


图4 博弈电价优化结果
Fig. 4 Optimization results of game electricity price

在00:00—09:00、13:00—16:00、20:00—24:00时段存在多种状态下的VPP,此时,MVPPO将售电给电力市场或从电力市场购电以满足负荷需求,此时降低MVPPO售电价,同时适当上调MVPPO购电价,供电VPP可以通过调整负荷需求、燃气机组出力,出售更多的电能,创造更多的收益。由图4可以看出,电负荷的极限在04:00—06:00、17:00—23:00时段。

在10:00—13:00时段,所有VPP都处于供电状态,此时MVPPO购电价等于上网电价,以求保证收益;当处于16:00—20:00时,所有VPP都处于用电状态,此时MVPPO售电价等于电网分时电价,同时上调内部购电价,为了激励燃气机组发电,减少从电力市场的购电量。

3.3.2 主从博弈模式下能量管理分析

为了说明本文所提方法在出力上的有效性,设置两种方案用以比较:1)多VPP优化中引入需求响应和主从博弈机制;2)多VPP仅以合作模式参与优化,不考虑需求响应和主从博弈。

VPP的分布式能量管理响应如图5所示。方案1和方案2下,VPP 1至VPP 3的负荷结果对比见图5,两者优化方式均能达到波动放缓,但本文所述策略的削峰填谷效果更明显,同时,在必要的时段内进行负荷削减,避免了给用户带来过多的计划调整。

进一步分析VPP内部各聚合单元的出力情况,新能源出力会优先供给所在区域的VPP。通过调整内部购售电价,将00:00—08:00这一期间VPP 3盈余的新能源出力出售给处于缺电下的VPP 1与VPP 2。在需求响应后的14:00—20:00时段,受内部购电价激励,燃气机组出力较多,出售更多的剩余电量以增加收益;燃气机组在17:00—24:00时段内作为补充,弥补新能源的缺失,减少从电网的购电量。

从表1可以看出在多VPP系统增加需求响应和主从博弈机制可在原先的基础上促进VPP的运行经济性,由于内部购售电价处于电网电价之间,为

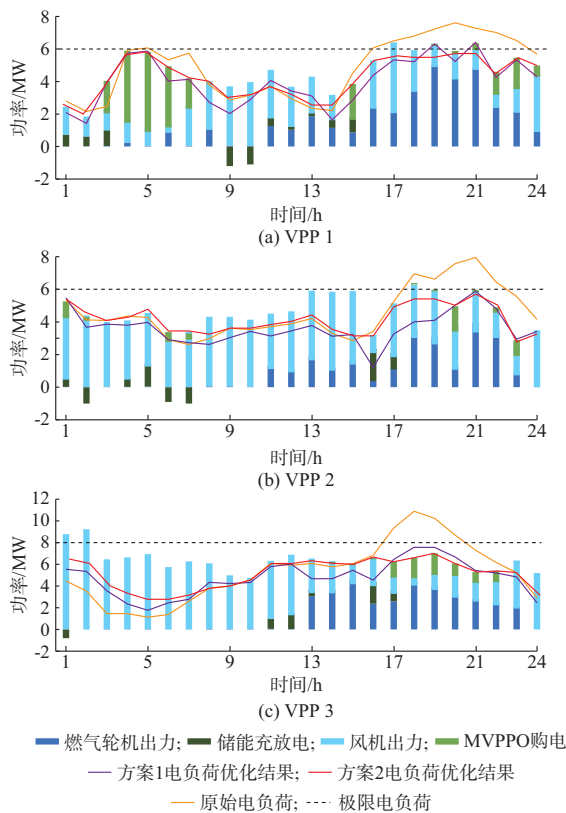


图5 VPP电功率优化情况
Fig. 5 Optimization of VPP electric power

了弥补新能源缺失以及提高自身收益,燃气轮机出力较多,从而成本相比较增大。

表1 不同方案下的效益和成本
Table 1 Profit and cost with different schemes

VPP	负荷效用值/元		燃气轮机成本/元		总效益/元	
	方案1	方案2	方案1	方案2	方案1	方案2
VPP 1	205 380	235 540	62 780	69 920	167 340	185 480
VPP 2	250 140	269 130	45 460	44 650	222 320	245 200
VPP 3	163 130	203 980	50 680	55 070	166 650	171 510

3.3.3 区块链技术下多VPP运行性能分析

分别对引入区块链(仿真1, Hyperledger Fabric)和无区块链(仿真2, MATLAB R2020a)方法下的优化运行情形进行仿真实验,实验结果如表2所示。由表2可见,分布式区块链方法的运营成本相较于集中式常规方法有所下降,一方面是因为在集中式方法中,聚合单元需要向运营商支付额外的费用,以在多VPP内进行有效的功率分配,另一方面得益于区块链网络有效的分布式运行模式;削峰负荷参与量有所上升,说明各VPP积极响应激励机制,吸引到更多可调负荷参与削峰;通过调节负荷的用能有效促进了VPP之间进行可再生能源消纳,进而减少了线路上的有功功率损耗。

表2 有无区块链的多VPP仿真结果比较
Table 2 Comparison of multi-VPP simulation results with or without blockchain

VPP	运营成本/元		削峰负荷参与量/MW		有功损耗/(MW·h)	
	仿真1	仿真2	仿真1	仿真2	仿真1	仿真2
VPP 1	18 540	19 320	63.53	60.44	0.534	0.613
VPP 2	12 750	14 420	52.65	46.12	0.118	0.163
VPP 3	14 210	15 110	65.74	55.45	0.324	0.375

在计算效率方面,仿真1中分布式优化决策的计算时间为132.4 s,其中潮流算法计算时间为112.2 s,与仿真2中集中式决策计算时间331.3 s相比(其中潮流算法计算时间为316.1 s),其决策时间更短。由此可见,采用区块链技术下的分布式计算提高了计算效率。

在Hyperledger Fabric的运行环境下,分别部署单条联盟链和由资产链、商业链以及技术链组成的区块链群式架构的区块链,进行网络性能测试。

由于单条联盟链时,完成一次交易需要经过优化决策、网络安全约束、数据计量认证及交易结算这一系列流程,从数据上传,到证书交易结束创建区块,需要15 min左右,仅仅支持每秒4笔的交易速度;而本文所创建的区块链群,则将交易结果、交易时间、参与主体等信息储存在资产链,将交易行为成链在商业链,将网络安全验证调整在技术链确认,使不同时段各环节可以同时进行。由此,区块链群网络中完成多链的一次交互运行用时需要6 min左右,同时每秒处理的交易量为9笔。在交易速度和共识时延上,多VPP区块链群的运行场景更具有优势。

4 结语

区块链离散模式的拓扑结构与多VPP的组织结构有高度一致性,并且可以满足集中控制下难以达到的可扩展性和兼容性要求。因此,本文从VPP作为一个整体参与能源交易以及系统运行的层面出发进行了分析研究。构建了考虑多虚拟电厂运营商、虚拟电厂运营商、分布式能源和负荷聚合商主体利益以及计及本地网络约束的多VPP系统主从博弈优化运行模型,结合区块链技术在多VPP主从博弈运行中的优势,建立了多VPP的区块链体系架构,并提出了区块链群的运行机制。利用区块链节点具有强大的边缘计算和自我调节能力,本文设计了基于GA-QP算法的区块链边缘计算的计算方法,提高了计算速度。使用区块链来存储大量数据,各VPP节点共享Stackelberg最优策略并不断改进自身策略,促进效益最大化,通过智能合约和激励机制

实现智能决策功能,体现了区块链技术下运行管理的“分布控制,协同优化”的特点。

本文工作表明,基于区块链的各VPP通过博弈竞价的优化,调整各自的需求响应及出力,以最大程度发挥自己效用;提出的区块链群运行机制可以有效提高VPP之间交易处理效率、性能以及计算效率。

后续将进一步分析电热耦合下的多VPP主从博弈优化以及进一步考虑新型储能(如电动汽车、抽水蓄能电站)如何参与博弈机制下的区块链优化运行模式。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 刘振亚. 建设我国能源互联网,推进绿色低碳转型[EB/OL]. [2020-07-29]. <http://www.chinapower.com.cn/zk/zjgd/20200729/26456.html>.
LIU Zhenya. Build an Energy Internet in China and promote green and low-carbon transformation [EB/OL]. [2020-07-29]. <http://www.chinapower.com.cn/zk/zjgd/20200729/26456.html>.
- [2] 方燕琼,甘霖,艾芊,等.基于主从博弈的虚拟电厂双层竞标策略[J].电力系统自动化,2017,41(14):61-69.
FANG Yanqiong, GAN Lin, AI Qian, et al. Stackelberg game based bi-level bidding strategy for virtual power plant [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 61-69.
- [3] KARDAKOS E G, SIMOGLU C K, BAKIRTZIS A G. Optimal offering strategy of a virtual power plant: a stochastic bi-level approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 794-806.
- [4] 周亦洲,孙国强,黄文进,等.多区域虚拟电厂综合能源协调调度优化模型[J].中国电机工程学报,2017,37(23):6780-6790.
ZHOU Yizhou, SUN Guoqiang, HUANG Wenjin, et al. Optimized multi-regional integrated energy coordinated scheduling of a virtual power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6780-6790.
- [5] 孙惠娟,蒙锦辉,彭春华.风-光-水-碳捕集多区域虚拟电厂协调优化调度[J].电网技术,2019,43(11):4040-4051.
SUN Huijuan, MENG Jinhui, PENG Chunhua. Coordinated optimization scheduling of multi-region virtual power plant with wind-power/photovoltaic/hydropower/carbon-capture units [J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 4040-4051.
- [6] 陈好,卫志农,胥峥,等.电力体制改革下的多虚拟电厂联合优化调度策略[J].电力系统自动化,2019,43(7):42-49.
CHEN Yu, WEI Zhinong, XU Zheng, et al. Architecture and key technologies of lightweight human-machine interaction system for power grid dispatching and control system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 42-49.
- [7] 周博,吕林,高红均,等.多虚拟电厂日前鲁棒交易策略研究[J].电网技术,2018,42(8):2694-2703.
ZHOU Bo, LÜ Lin, GAO Hongjun, et al. Robust day-ahead trading strategy for multiple virtual power plants [J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2694-2703.
- [8] WANG Y, AI X, TAN Z F, et al. Interactive dispatch modes and bidding strategy of multiple virtual power plants based on demand response and game theory [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 510-519.
- [9] 刘思源,艾芊,郑建平,等.多时间尺度的多虚拟电厂双层协调机制与运行策略[J].中国电机工程学报,2018,38(3):753-761.
LIU Siyuan, AI Qian, ZHENG Jianping, et al. Bi-level coordination mechanism and operation strategy of multi-time scale multiple virtual power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 753-761.
- [10] 董雷,涂淑琴,李烨,等.基于元模型优化算法的主从博弈多虚拟电厂动态定价和能量管理[J].电网技术,2020,44(3):973-981.
DONG Lei, TU Shuqin, LI Ye, et al. A Stackelberg game model for dynamic pricing and energy management of multiple virtual power plants using metamodel-based optimization method [J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 973-981.
- [11] LIU N, TAN L, ZHOU L, et al. Multi-party energy management of energy hub: a hybrid approach with Stackelberg game and blockchain [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(5): 919-928.
- [12] 王胜寒,郭创新,冯斌,等.区块链技术在电力系统中的应用:前景与思路[J].电力系统自动化,2020,44(11):10-24.
WANG Shenghan, GUO Chuangxin, FENG Bin, et al. Application of blockchain technology in power systems: prospects and ideas [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 10-24.
- [13] MÜNSING E, MATHER J, MOURA S. Blockchains for decentralized optimization of energy resources in microgrid networks [C]// 2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications, October 9, 2017, Maui, USA: 2164-2171.
- [14] DANZI P, ANGJELICHINOSKI M, STEFANOVIĆ Č, et al. Distributed proportional-fairness control in microgrids via blockchain smart contracts [C]// 2017 IEEE International Conference on Smart Grid Communications, October 23-27, 2017, Dresden, Germany: 45-51.
- [15] 艾芊.虚拟电厂:能源互联网的终极组态[M].北京:科学出版社,2018.
AI Qian. Virtual power plants: the ultimate configuration of the energy internet [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [16] 李军祥,王宇倩,何建佳,等.基于区块链的微电网电力市场电价与电量动态博弈[J/OL].电力系统自动化[2021-06-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20210617.1441.006.html>.
LI Junxiang, WANG Yuqian, HE Jianjia, et al. Blockchain-based dynamic game of electricity price and power for microgrid electricity market [J/OL]. Automation of Electric Power Systems [2021-06-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20210617.1441.006.html>.
- [17] 陈岑,武传涛,林湘宁,等.计及上下游市场的园区综合能源商购售能策略[J/OL].电工技术学报[2021-03-03].<https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.201400>.
CHEN Cen, WU Chuantao, LIN Xiangning, et al. Purchase

- and sale strategies of park integrated energy suppliers in wholesale and retail markets [J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society [2021-03-03]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.10006753.tces.201400>.
- [18] KORAKI D, STRUNZ K. Wind and solar power integration in electricity markets and distribution networks through service-centric virtual power plants[J]. IEEE Transactions on Power System, 2018, 33(1): 473-485.
- [19] LI Z Y, SHAHIDEHPOUR M, LIU X. Cyber-secure decentralized energy management for IoT-enabled active distribution networks[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(5): 900-917.
- [20] DONG Z Y, LUO F J, LIANG G Q. Blockchain: a secure, decentralized, trusted cyber infrastructure solution for future energy systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(5): 958-967.
- [21] 龚钢军,王慧娟,杨晟,等.区块链技术下的综合能源服务[J].中国电机工程学报,2020,40(5):1397-1408.
GONG Gangjun, WANG Huijuan, YANG Sheng, et al. Research on integrated energy service based on blockchain technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1397-1408.
- [22] 熊宇峰,司杨,郑天文,等.基于主从博弈的工业园区综合能源系统氢储能优化配置[J].电工技术学报,2021,36(3):507-516.
XIONG Yufeng, SI Yang, ZHENG Tianwen, et al. Optimal configuration of hydrogen storage in industrial park integrated energy system based on Stackelberg game[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 507-516.
- [23] 沈翔宇,陈思捷,严正,等.区块链在能源领域的价值、应用场景与适用性分析[J].电力系统自动化,2021,45(5):18-29.
SHEN Xiangyu, CHEN Sijie, YAN Zheng, et al. Analysis of the value application scenarios and applicability of blockchain in the energy field [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 18-29.
- [24] 马春光,安婧,毕伟,等.区块链中的智能合约[J].信息安全,2018(11):8-17.
MA Chunguang, AN Jing, BI Wei, et al. Smart contract in blockchain[J]. Netinfo Security, 2018(11): 8-17.
- [25] LIU N, CHENG M, YU X, et al. Energy-sharing provider for PV prosumer clusters: a hybrid approach using stochastic programming and Stackelberg game[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(8): 6740-6750.
- 周步祥(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统调度自动化及计算机信息处理。E-mail: hiaway_scu@126.com
- 张 越(1997—),女,硕士研究生,主要研究方向:综合能源系统运行优化与控制、虚拟电厂及区块链。E-mail: 3329752946@qq.com
- 臧天磊(1986—),男,通信作者,博士,特聘副研究员,主要研究方向:综合能源系统运行优化与控制。E-mail: zangtianlei@126.com

(编辑 王梦岩)

Blockchain-based Stackelberg Game Optimal Operation of Multiple Virtual Power Plants

ZHOU Buxiang, ZHANG Yue, ZANG Tianlei, CAO Qiang, ZHANG Yuanhong, PENG Haoyu
(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In the future power system where renewable energy is predominant, the energy management of multiple virtual power plants (VPPs) will be more complicated and challenging. Considering the characteristics of blockchain technology including information security, transparent mechanism, and regional co-governance, a blockchain consisting of commercial chain, technical chain and asset chain is designed inspired by the functional characteristics of VPPs. Then, comprehensively considering the association and conflict of the interest of the multiple decision-making entities formed by multiple VPPs, a Stackelberg game based optimal operation method is introduced with the network security constraints. On this basis, the optimal operation mode of multiple VPPs based on the blockchain technology is analyzed and designed from the aspects including the network level framework, interaction mechanism, smart contracts, and incentive mechanism. Finally, case studies are conducted to verify the effectiveness of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51907097) and Science and Technology Planning Project of Sichuan Province of China (No. 2020JDRC0049).

Key words: multiple virtual power plants; Stackelberg game; network security constraint; blockchain technology; operation mode

