

基于云边协同的多微电网双层分布式能源调度

张仕鹏^{1,2}, 聂涌泉³, 胡亚平³, 刘明波¹, 黄楚鸿², 左嘉志²

(1. 华南理工大学电力学院, 广州 510640; 2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663;

3. 中国南方电网电力调度控制中心, 广州 510663)

摘要: 随着插入式电动汽车和氢燃料电池电动车的快速发展, 将混合能源补给站引入到微电网中是实现绿色低碳能源系统的重要方式。混合能源补给站是一种新型能源基础设施, 其不仅可为插入式电动车充电, 也可为氢燃料电池电动车补氢。当前对含混合能源补给站的微电网能源调度尚缺乏深入研究。由此, 重点研究了多异构设备接入场景下含混合能源补给站的多微电网与虚拟电厂分布式能源调度问题。首先, 构建混合能源补给站的精细化模型, 提出一种基于云边协同的双层分布式能源调度框架, 实现对电动车、储能设备和清洁能源等异构设备的优化调度, 其中框架的上、下层分别考虑虚拟电厂和各微电网的能源优化调度。然后, 运用基于目标级联法的分布式优化算法实现上、下层问题的解耦, 进而实现虚拟电厂和各微电网的分散自治。最后, 通过算例验证了所提出的云边协同方法在实现虚拟电厂和多微电网协同分布式层级优化的有效性。

关键词: 电动汽车; 目标级联法; 混合能源补给站; 分散自治; 云边协同

Cloud-Edge Collaboration Based Two-Level Distributed Energy Scheduling for Multi-Microgrids

ZHANG Shipeng^{1,2}, NIE Yongquan³, HU Yaping³, LIU Mingbo¹, HUANG Chuhong², ZUO Jiazhi²

(1. College of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong

Electric Power Design and Research Institute Co., Ltd., China Energy Engineering Corporation, Guangzhou 510663, China;

3. Power Dispatching and Control Center, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: With the rapid development of plug-in electric vehicles (PEVs) and hydrogen fuel vehicles (HFVs), introducing hybrid energy supply stations (HESSs) into microgrids is an important way to realize a green and low-carbon energy system. A HESS is a new type of energy infrastructure that can not only charge PEVs, but also refill HFVs. Currently, there is a lack of in-depth research on energy scheduling for microgrids with HESSs. Thus, this paper focuses on the distributed energy scheduling problem of multi-microgrids and virtual power plants with HESSs under the scenario of massive heterogeneous device integration. Firstly, a refined model of the HESS is formulated, and a cloud-edge collaboration based two-layer distributed energy scheduling framework is proposed to achieve optimal scheduling of heterogeneous devices such as electric vehicles, energy storage, and renewable energy sources. The upper and lower layers of the framework respectively consider the optimal scheduling of energy for a virtual power plant and multi-microgrids. Then, an analytical target cascading (ATC)-based distributed optimization algorithm is employed to decouple the upper- and lower-layer problems, thereby achieving the decentralized autonomy of the virtual power plant and microgrids. Finally, the effectiveness of the proposed cloud-edge collaborative method in achieving distributed optimization of the virtual power plant and microgrids is verified through case studies.

Key words: electric vehicles; analytical target cascading method; hybrid energy supply stations; decentralized autonomy; cloud-edge collaboration

0 引言

随着环境污染问题和能源短缺问题的日益严重,为保障我国能源安全,采用清洁能源替代传统的化石能源是当前迫切需要关注和研究的焦点^[1]。在此背景下,我国积极鼓励使用低排放或零排放的电动车,如插入式电动车(plug-in electric vehicle, PEV)和氢燃料电动车(hydrogen fuel vehicle, HFV)替代传统的燃油汽车^[2-5]。近年来,插入式电动车和氢燃料电动车得到大力推广。混合能源补给站(hybrid energy supply station, HESS)不仅可为插入式电动车提供充电服务、为氢燃料电动车提供充氢服务,而且可有效提升清洁能源的利用效率^[6],是一种重要的能源基础设施。混合能源补给站主要部署在城市和高速公路等交通枢纽地区。我国已建成多个混合能源补给站示范性工程,例如,2021年9月,中国石化在广西南宁建成全国首座集加油、充氢、充电于一体的混合能源补给站;2021年11月,中国石化在广东建成大湾区首座混合能源补给站。在微电网中部署混合能源补给站为电动车用户提供便利的充能服务,同时有利于电动车的广泛推广。

当前,学者们进行了大量关于插入式电动车和氢燃料电动车的相关研究,这些研究涉及到电动车的充能优化调度、与电网的能源交互以及对能源系统规划的影响等多个领域。例如,文献[6]研究插入式电动车与电网之间的电能交互,提出一种基于V2G(vehicle-to-grid)的电动车实时调度策略用以调度电动车的充、放电时间和功率。进一步地,文献[7]不仅考虑了电动车的能源调度,同时考虑其参与碳交易,构建了插入式电动车同时参与电能市场和碳市场的调度模型,并验证了电动车的碳减排性能。不同于文献[7-8]采用的集中式调度方法,文献[9-10]分别提出基于交替方向乘子法和拉格朗日松弛法的分布式调度方法,实现对插入式电动车的分布式优化调度,以保护电动车的数据隐私。针对氢燃料电动车,文献[11]研究了氢燃料电动车和氢燃料站在实时市场和日前市场的优化调度,提出一个风险约束随机调度模型,实现微电网的运行成本的最小化。文献[12]研究通过调度氢燃料站和氢燃料电动车提升配电系统的自愈能力,提出一个针对移动储能、氢燃料电动车和微电网的双层能源管理策略,以提升氢渗透配电系统的自愈能力。不同于

文献[11-12]考虑氢能调度问题,文献[13]从系统设计的角度考虑了含电、热、氢负荷的区域能源系统的最优设计,并提出一个针对区域能源供给的技术经济模型。针对混合能源补给站,文献[14]研究了含混合能源补给站的社区微电网间的分布式电能和碳配额共享,提出了一种通信删减交替方向乘子法以降低各能源实体间的通信成本。文献[15]研究了在耦合能源网络和交通网络约束下混合能源补给站的两阶段鲁棒规划问题。文献[16]重点分析了电转氢条件下电动汽车的配网优化调度。然而,现有研究未考虑含混合能源补给站的微电网与虚拟电厂间的分布式能源交互问题,由于上述各微电网与虚拟电厂具有不同的利益诉求,实现含混合能源补给站的微电网与虚拟电厂间的层级分布式能源交互,有助于维护各能源实体的经济利益,同时保护其数据隐私。

目标级联法(analytical target cascading, ATC)是一种用于层级系统的优化方法,通过协调优化层级系统的上、下层问题,实现系统运行最优化。近年来,有较多研究使用目标级联法实现能源系统的层级优化调度。例如,文献[17]提出一个基于目标级联法的区域电热综合能源系统双层分布式优化调度方法,其中上层考虑区域供热系统和配电网的优化调度,下层考虑微电网的能源管理。文献[18]研究输电网和电-气-热综合能源系统的双层能源调度,并采用目标级联法实现输配电网的解耦和分布式并行优化调度。文献[19]提出一种考虑碳交易的区域电-热综合能源系统分布式协同调度方法,采用目标级联法实现上层电、热能源系统和下层能源站的解耦。将目标级联法应用于虚拟电厂与多微电网层级能源调度问题可实现上下层问题的分布式求解,并保护虚拟电厂和各微电网的信息隐私。

云边协同是一种将云计算和边缘计算相结合的技术框架,旨在充分发挥云端和边缘端的优势,以提高系统的性能和效率。文献[20]构建了一种基于云-边-端协同的数据管理架构,实现了数据存储量和能耗的降低。文献[21]提出了基于云边协同的电力市场架构。文献[22]针对电力物联网提出了一种基于云边协同的联合控制模型。然而,现有研究未考虑基于云边协同框架的虚拟电厂和多微电网的层级能源调度,云边协同将有助于提高系统数据处理效率和优化问题求解能力。

本文考虑虚拟电厂与多个微电网间的电能交互,重点研究含混合能源补给站的多微电网能源优化调度,并提出一种在云边协同优化框架下基于目标级联法的双层分布式优化方法,实现对虚拟电厂和微电网的分布式并行优化调度,其中上层和下层分别以虚拟电厂和各微电网运行成本最小化为目标,构建虚拟电厂和微电网的能源调度模型。目标级联法可实现上、下层问题的解耦和分布式并行优化,以保护各能源实体的隐私数据,并提升分布式优化问题的求解效率。最后,通过仿真实验验证了所提层级分布式能源调度方法实现虚拟电厂和多微电网能源优化调度的有效性。

与现有文献相比,本文的不同点以及贡献主要包含如下3个方面。

1)提出虚拟电厂与多个含混合能源补给站的多微电网间的层级能源交互模型,研究了虚拟电厂与多个微电网间的分布式能源调度问题;

2)针对含电动车、储能设备和清洁能源等异构设备的微电网和虚拟电厂,提出了一种云边协同优化框架,构建了面向虚拟电厂和微电网层级分布式能源交互的云边协同优化范式;

3)提出基于目标级联法的分布式能源优化算法,实现虚拟电厂和多微电网的分散自治。

1 系统优化调度模型

虚拟电厂通过协调调度多种清洁能源、储能和发电机等能源设备,在能源系统中可为其他能源实体(如微电网)提供电能^[23]。微电网是由清洁能源、储能和负荷等组成的小型能源系统,其侧重于为局部社区或用户提供电能供应。不同于微电网,虚拟电厂更侧重于整合多个分散的能源资源,通常与电力市场紧密关联,可以提供灵活的能源供应以满足市场需求。由此,虚拟电厂与微电网间常存在层级能源交互行为,即虚拟电厂可与多个微电网进行层级分布式能源交易。虚拟电厂与微电网间的电能交互有助于提高清洁能源的利用率并提升能源系统的可靠性。

图1展示了配电网中虚拟电厂与多微电网间的层级电能交互框架。其中虚拟电厂直接与配电网的节点相连接,在能源交互过程中充当能源市场中介的角色,既可作为买方从配电网购电,又可作为卖方通过电力传输线向各微电网售卖电能,从而形成

本地电能交易市场,实现虚拟电厂和微电网间的电能交互。

在虚拟电厂与微电网的日前经济调度过程中,虚拟电厂作为上层优化主体,通过优化调度清洁能源、发电机和储能,决策其从配电网的购电量、能源设备的调度计划,并与各微电网进行电能交互。各微电网作为下层优化主体,在日前接收插入式电动车和氢燃料电池电动车的能源补给需求,结合自身的电负荷和清洁能源发电的预测值,实现对混合能源补给站的日前优化调度。虚拟电厂和各微电网在电能交互过程中均追求各自运行成本的最小化,以制定能源调度计划。

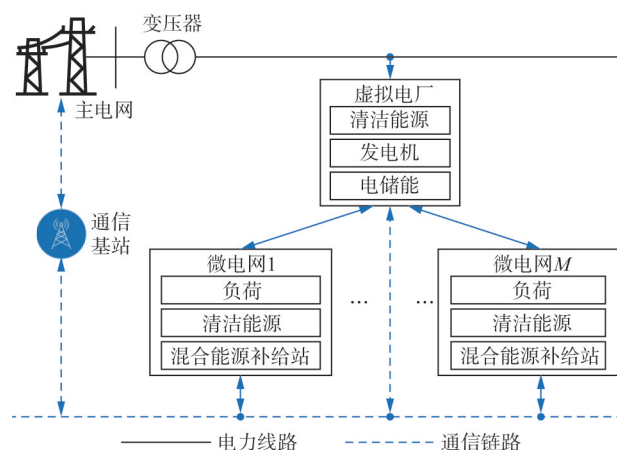


图1 配电网中虚拟电厂与多微电网间的层级电能交互框架

Fig. 1 Hierarchical electric power interaction framework between a virtual power plant and multi-microgrids in distribution network

1.1 云边协同优化框架

多异构设备(如清洁能源、发电机、电动车和电储能等)在微电网的快速部署对终端设备的数据处理能力和能源实体间的信息传输能力提出了更高的要求。云边协同优化概念的提出为提升微电网本地数据收集和大规模数据处理提供了一个新的解决思路。边缘计算设备可实现低时延信息通信和分布式数据存储,从而保证了信息完整性和数据可靠性。同时,云平台可协助能源实体进行调度和决策。由此,本文考虑了一个云边协同优化框架,充分发挥边缘端的通信优势和云平台的计算优势,以辅助实现虚拟电厂和微电网的分布式能源调度。

本文使用“多异构设备”一词意在强调在未来虚拟电厂和微电网环境中将会涵盖大量的电动车、储

能设备和清洁能源等不同类型设备的复杂场景。面对“多异构设备”的环境，主要面临的挑战包括：系统复杂度大幅提升、调度任务难度提高、隐私保护挑战加剧、系统可扩展性变差等问题。针对这些挑战，“云边协同”提供了一种有效的解决策略。本研究提出的云边协同优化框架旨在充分发挥云端的计算优势和边缘端的低延迟特性等优势，以提升系统处理数据的效率、加强对各能源实体隐私的保护、并通过分散计算负载来增强系统的可扩展性。

图2展示了本文所提出的云边协同优化框架。边缘端安装有高精度能源数据监测仪器，负责收集虚拟电厂和微电网的本地信息，经过对数据的预处理后，实时传输给云平台。云平台的动态决策单元可为虚拟电厂和各微电网的能源调度优化提供计算支持，通过分布式计算求得虚拟电厂与各微电网间的能源交互决策，然后将决策信号指令下发给边缘端，实现对实体的能源优化调度。此外，可充分利用云平台强大的数据计算能力，通过运行机器学习和深度学习等人工智能算法，实现对虚拟电厂和各微电网清洁能源发电量和电负荷的日前预测^[24-25]。

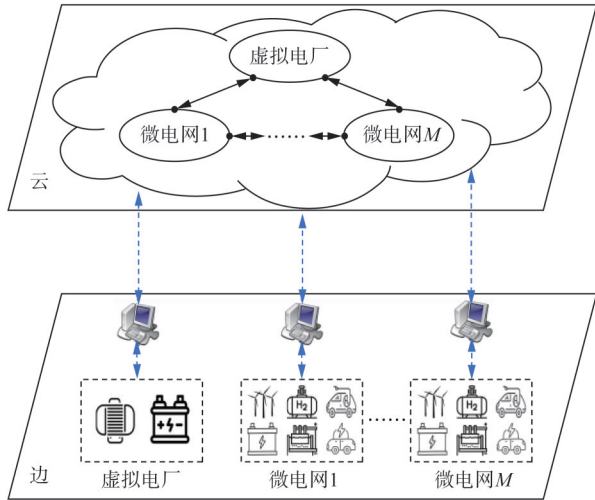


图2 云边协同优化框架

Fig. 2 Cloud-edge collaborative optimization framework

1.2 虚拟电厂

1.2.1 虚拟电厂目标函数

虚拟电厂装备有发电机、风机和电储能，其通过决策能源设备的调度结果和电能的交易结果，实现总运行成本最小化。虚拟电厂的目标函数表述为：

$$\min_{\Theta^{\text{VP}}} F^{\text{VP}} = F^{\text{DN}} + F^{\text{G}} + F^{\text{OPE}} - F^{\text{MG}} \quad (1)$$

$$F^{\text{DN}} = \sum_{t \in T} \delta_{i,t}^{\text{DN}} P_t^{\text{DN}} \quad (2)$$

$$F^{\text{G}} = \sum_{t \in T} [a^{\text{G}} (P_t^{\text{G}})^2 + b^{\text{G}} P_t^{\text{G}} + c^{\text{G}}] \quad (3)$$

$$F^{\text{OPE}} = \sum_{t \in T} [\rho^{\text{G}} P_t^{\text{G}} + \rho^{\text{VPES}} (P_t^{\text{VPES},c} + P_t^{\text{VPES},d})] \quad (4)$$

$$F^{\text{MG}} = \sum_{i \in \mathcal{M}} \sum_{t \in T} \delta_{i,t}^{\text{MG}} P_{i,t}^{\text{MG}} \quad (5)$$

式中：决策变量集合 $\Theta^{\text{VP}} = \{P_t^{\text{DN}}, P_t^{\text{G}}, P_t^{\text{VPES},c}, P_t^{\text{VPES},d}, P_{i,t}^{\text{MG}} | i \in \mathcal{M}, t \in T\}$ ； F^{VP} 为虚拟电厂的总运行成本； F^{DN} 为虚拟电厂从配电网购买电能的购电成本； F^{G} 为发电机的发电成本； F^{OPE} 为能源设备的运行成本； F^{MG} 为虚拟电厂售电给微电网的收益； $\mathcal{M} = \{1, \dots, M\}$ 和 $T = \{1, \dots, T\}$ 分别为微电网和调度时隙的集合， M 和 T 分别为微电网和调度时隙的数量； i 和 t 分别为第 i 个微电网和第 t 个调度时段； P_t^{DN} 和 $\delta_{i,t}^{\text{DN}}$ 分别为虚拟电厂从配电网的购电量和购电价格； P_t^{G} 为发电机的发电功率； a^{G} 、 b^{G} 和 c^{G} 为发电机的发电成本系数； $P_t^{\text{VPES},c}$ 和 $P_t^{\text{VPES},d}$ 分别为虚拟电厂中电储能的充、放电功率； ρ^{G} 和 ρ^{VPES} 分别为发电机和电储能的单位运行成本； $P_{i,t}^{\text{MG}}$ 和 $\delta_{i,t}^{\text{MG}}$ 分别为虚拟电厂与微电网 i 的电能交互功率及其向微电网 i 售电的单位收益。

1.2.2 虚拟电厂运行约束

虚拟电厂的运行约束如下。

1) 功率平衡约束

$$P_t^{\text{DN}} + P_t^{\text{G}} + P_t^{\text{VPWT}} + P_t^{\text{VPES},d} = P_t^{\text{VP,load}} + P_t^{\text{VPES},c} + \sum_{i \in \mathcal{M}} P_{i,t}^{\text{MG}} \quad (6)$$

式中： P_t^{VPWT} 为虚拟电厂在 t 时段的风电出力； $P_t^{\text{VP,load}}$ 为虚拟电厂的电负荷需求。

2) 发电机运行约束

$$P^{\text{G},\min} \leq P_t^{\text{G}} \leq P^{\text{G},\max} \quad (7)$$

$$\Delta P^{\text{G},\min} \leq P_t^{\text{G}} - P_{t-1}^{\text{G}} \leq \Delta P^{\text{G},\max} \quad (8)$$

式中： $P^{\text{G},\max}$ 和 $P^{\text{G},\min}$ 分别为发电机的最大和最小发电功率； $\Delta P^{\text{G},\max}$ 和 $\Delta P^{\text{G},\min}$ 分别为发电机的最大和最小爬坡功率限值。式(7)、(8)分别表示虚拟电厂中发电机的出力约束和爬坡功率约束。

3) 电储能运行约束

定义 $\Lambda^{\text{ES}} = \{V_{\text{VPES}}, M_{\text{MGES},1}, \dots, M_{\text{MGES},M}\}$ 为虚拟电厂和各微电网中电储能的集合，定义 $E \in \Lambda^{\text{ES}}$ 表示电储能的索引。电储能的运行约束如下。

$$E_{t+1}^E = E_t^E + \left(\eta^{E,c} P_t^{E,c} - \frac{P_t^{E,d}}{\eta^{E,d}} \right) \Delta t \quad (9)$$

$$u_t^{E,c} P_t^{E,c, \min} \leq P_t^{E,c} \leq u_t^{E,c} P_t^{E,c, \max} \quad (10)$$

$$u_t^{E,d} P_t^{E,d, \min} \leq P_t^{E,d} \leq u_t^{E,d} P_t^{E,d, \max} \quad (11)$$

$$C^E S_{\text{SOC}}^{E, \min} \leq E_t^E \leq C^E S_{\text{SOC}}^{E, \max} \quad (12)$$

$$u_t^{E,c} + u_t^{E,d} \leq 1, u_t^{E,c}, u_t^{E,d} \in \{0, 1\} \quad (13)$$

$$E_0^E = E_T^E \quad (14)$$

式(9)表示电储能的动态变化;式(10)~(12)分别表示电储能充、放电功率和储能能量的上、下限;式(13)表示在 t 时段电储能不能同时进行充放电;式(14)表示在调度时域的开始和终止时隙,电储能的储能能量相同,由此解耦不同的调度时域。式中: E_t^E 为电储能的储能能量; $\eta^{E,c}$ 和 $\eta^{E,d}$ 分别为电储能的充、放电效率; Δt 为单位时隙长度; $P_t^{E,c}$ 、 $P_t^{E,d}$ 分别为电储能的充、放电功率; $u_t^{E,c}$ 和 $u_t^{E,d}$ 均为0-1变量,分别用于指示电储能的充、放电状态; $P_t^{E,c, \max}$ 、 $P_t^{E,c, \min}$ 分别为电储能的充、放电功率的最大和最小值; $P_t^{E,d, \max}$ 、 $P_t^{E,d, \min}$ 分别为电储能的放电功率的最大和最小值; C^E 为电储能的容量; $S_{\text{SOC}}^{E, \max}$ 和 $S_{\text{SOC}}^{E, \min}$ 分别为电储能的容量最大和最小值; E_0^E 和 E_T^E 分别为电储能在调度时域初始时隙和终止时隙的储能能量。

4) 从配电网购电约束

为保证配电网安全运行,虚拟电厂从配电网的购电功率需满足如下约束。

$$P^{\text{DN}, \min} \leq P_t^{\text{DN}} \leq P^{\text{DN}, \max} \quad (15)$$

式中 $P^{\text{DN}, \max}$ 和 $P^{\text{DN}, \min}$ 分别为虚拟电厂从配电网购电功率的上、下限。

5) 与微电网的电能交互约束

由于电能传输容量限制,虚拟电厂与微电网间的电能交互需满足如下约束。

$$P_i^{\text{MG}, \min} \leq P_i^{\text{MG}} \leq P_i^{\text{MG}, \max} \quad (16)$$

式中 $P_i^{\text{MG}, \max}$ 和 $P_i^{\text{MG}, \min}$ 分别为在 t 时段,虚拟电厂向微电网 i 传输电能的上、下限。

6) 风电调度约束

定义 $\Lambda^{\text{WT}} = \{V_{\text{PWT}}, M_{\text{MGWT}, 1}, \dots, M_{\text{MGWT}, M}\}$ 为虚拟电厂和各微电网的风机集合,定义 $W \in \Lambda^{\text{WT}}$ 为风机的索引。虚拟电厂调用的风电满足如下约束。

$$0 \leq P_t^W \leq P_t^{W, \text{gen}} \quad (17)$$

式中: P_t^W 为在 t 时段风机实际发电功率; $P_t^{W, \text{gen}}$ 为在 t 时段风机最基于当前风速和机组状态等条件下大

发电功率。

1.3 微电网

1.3.1 微电网目标函数

微电网主要包含混合能源补给站、风机和电负荷,通过对微电网的优化调度满足微电网内电动车和电负荷需求,并制定与虚拟电厂的交互功率,实现微电网运行成本最小化。微电网 i 的目标函数为:

$$\min_{\Theta^{\text{MG}_i}} F_i^{\text{MG}} = F_i^{\text{OPE}} + F_i^{\text{DR}} + F_i^{\text{PCC}} \quad (18)$$

$$F_i^{\text{OPE}} = \sum_{t \in T} \left[\rho^{\text{MGES}} (P_{i,t}^{\text{MGES},c} + P_{i,t}^{\text{MGES},d}) + \rho^{\text{HS}} (P_{i,t}^{\text{HS},c} + P_{i,t}^{\text{HS},d}) + \rho^{\text{WE}} P_{i,t}^{\text{WE}} + \rho^{\text{HFV}} \sum_{h \in \mathcal{H}_{i,t}} G_{i,h,t}^{\text{HFV},c} + \rho^{\text{PEV}} \sum_{v \in \mathcal{V}_{i,t}} P_{i,v,t}^{\text{PEV},c} \right] \quad (19)$$

$$F_i^{\text{DR}} = \sum_{t \in T} \delta_{i,t}^{\text{DR}} \Delta P_{i,t}^{\text{MG}, \text{load}} \quad (20)$$

$$F_i^{\text{PCC}} = \sum_{t \in T} \delta_{i,t}^{\text{PCC}} P_{i,t}^{\text{PCC}} \quad (21)$$

式中:决策变量 $\Theta^{\text{MG}_i} = \{P_{i,t}^{\text{MGES},c}, P_{i,t}^{\text{MGES},d}, P_{i,t}^{\text{HS},c}, P_{i,t}^{\text{HS},d}, P_{i,t}^{\text{WE}}, G_{i,h,t}^{\text{HFV},c}, P_{i,v,t}^{\text{PEV},c}, \Delta P_{i,t}^{\text{MG}, \text{load}}, P_{i,t}^{\text{PCC}} | i \in \mathcal{M}, t \in T, h \in \mathcal{H}_{i,t}, v \in \mathcal{V}_{i,t}\}$; F_i^{MG} 为微电网 i 的总运行成本; F_i^{OPE} 、 F_i^{DR} 和 F_i^{PCC} 分别为微电网 i 的能源设备运行成本、需求响应成本以及虚拟电厂的能源交互成本; $\mathcal{H}_{i,t}$ 和 $\mathcal{V}_{i,t}$ 分别为微电网 i 在 t 时段氢燃料电池电动车和插入式电动车的集合; $P_{i,t}^{\text{MGES},c}$ 和 $P_{i,t}^{\text{MGES},d}$ 分别为微电网 i 中电储能的充、放电功率; $P_{i,t}^{\text{HS},c}$ 和 $P_{i,t}^{\text{HS},d}$ 分别为氢储能的充、放电功率; $P_{i,t}^{\text{WE}}$ 为水电解器(water electrolyzer, WE)的耗电功率; $G_{i,h,t}^{\text{HFV},c}$ 和 $P_{i,v,t}^{\text{PEV},c}$ 分别为微电网 i 中氢燃料电池电动车 h 和插入式电动车 v 的充能功率; $\Delta P_{i,t}^{\text{MG}, \text{load}}$ 为微电网 i 的电负荷调节量; $P_{i,t}^{\text{PCC}}$ 为微电网 i 从虚拟电厂的购电功率; ρ^{MGES} 、 ρ^{HS} 、 ρ^{WE} 、 ρ^{HFV} 和 ρ^{PEV} 分别为微电网中电储能、氢储能、水电解器、氢燃料电池电动车和插入式电动车的单位运行成本; $\delta_{i,t}^{\text{DR}}$ 为微电网 i 的单位需求响应成本; $\delta_{i,t}^{\text{PCC}}$ 为微电网 i 从虚拟电厂购电的单位成本。

1.3.2 混合能源补给站模型

图3展示了混合能源补给站的典型结构图。混合能源补给站通过调度能源转换设备、储能设备等能源设备,以满足插入式电动车和氢燃料电池电动车的能源需求。本文对混合能源补给站进行精细化建模,主要对其包含的能源设备,如水电解器、氢储能、氢燃料电池电动车、插入式电动车等,进行了详细

建模, 并给出其具体变量和详细运行约束。

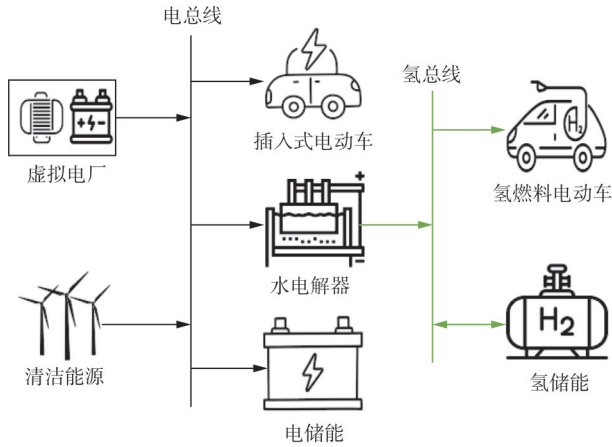


图3 混合能源补给站的系统结构图

Fig. 3 System structure of HESSs

1) 水电解器运行约束

水电解器可通过消耗电能电解水产出氢气, 其满足如下运行约束。

$$G_{i,t}^{\text{WE}} = P_{i,t}^{\text{WE}} E_i^{\text{P2H}} \eta_i^{\text{WE}} \quad (22)$$

$$P_i^{\text{WE}, \min} \leq P_{i,t}^{\text{WE}} \leq P_i^{\text{WE}, \max} \quad (23)$$

式中: $G_{i,t}^{\text{WE}}$ 和 η_i^{WE} 分别为水电解器的产氢量和运行效率; E_i^{P2H} 为水电解器的电转氢系数; $P_i^{\text{WE}, \max}$ 和 $P_i^{\text{WE}, \min}$ 分别为水电解器消耗电能的上、下限。

2) 氢储能运行约束

$$G_{i,t}^{\text{HS}} = G_{i,t-1}^{\text{HS}} + (G_{i,t}^{\text{HS}, \text{c}} - G_{i,t}^{\text{HS}, \text{d}}) \Delta t \quad (24)$$

$$G_i^{\text{HS}, \min} \leq G_{i,t}^{\text{HS}} \leq G_i^{\text{HS}, \max} \quad (25)$$

$$G_i^{\text{HS}, \text{c}, \min} \leq G_{i,t}^{\text{HS}, \text{c}} \leq G_i^{\text{HS}, \text{c}, \max} \quad (26)$$

$$G_i^{\text{HS}, \text{d}, \min} \leq G_{i,t}^{\text{HS}, \text{d}} \leq G_i^{\text{HS}, \text{d}, \max} \quad (27)$$

$$G_{i,0}^{\text{HS}} = G_{i,T}^{\text{HS}} \quad (28)$$

式(24)表示氢储能储氢量的动态变化, 式(25)一(27)分别表示氢储能储氢量、充氢速率和放氢速率的上、下限约束, 式(28)表示氢储能在调度时域的初始时隙和终止时隙的储氢量相等。式中: $G_{i,t}^{\text{HS}}$ 为在微电网 i 中氢储能的储氢量; $G_i^{\text{HS}, \max}$ 和 $G_i^{\text{HS}, \min}$ 分别为氢储能储氢量的上、下限; $G_i^{\text{HS}, \text{c}, \max}$ 和 $G_i^{\text{HS}, \text{c}, \min}$ 分别为氢储能充氢速率的上、下限; $G_i^{\text{HS}, \text{d}, \max}$ 和 $G_i^{\text{HS}, \text{d}, \min}$ 分别为氢储能放氢速率的上、下限; $G_{i,0}^{\text{HS}}$ 和 $G_{i,T}^{\text{HS}}$ 分别为氢储能在初始时隙和终止时隙的储氢量。

3) 氢燃料电池运行约束

定义 $\mathcal{T}_{i,h}$ 表示在微电网 i 中氢燃料电池电动车 h 停放在混合能源补给站的时段集合。氢燃料电池电动车满足如下约束。

$$\sum_{t \in \mathcal{T}_{i,h}} G_{i,h,t}^{\text{HFV}, \text{c}} \Delta t = G_{i,h}^{\text{HFV}, \text{exp}} - G_{i,h}^{\text{HFV}, \text{ini}} \quad (29)$$

$$0 \leq G_{i,h,t}^{\text{HFV}, \text{c}} \leq G_{i,h}^{\text{HFV}, \text{c}, \max} \quad (30)$$

$$G_{i,h,t}^{\text{HFV}, \text{c}} = 0, \forall t \notin \mathcal{T}_{i,h}, h \in \mathcal{H}_{i,t} \quad (31)$$

式(29)表示氢燃料电池电动车储氢量的动态变化, 左侧表示氢燃料电池电动车在停放时域内的总充氢量, 右侧部分表示其充氢需求; 式(30)表示氢燃料电池电动车的充氢速率约束; 式(31)表示氢燃料电池电动车未停放在混合能源补给站时, 其充氢速率为零。式中: $G_{i,h}^{\text{HFV}, \text{exp}}$ 和 $G_{i,h}^{\text{HFV}, \text{ini}}$ 分别为氢燃料电池电动车的期望储氢量和初始储氢量; $G_{i,h}^{\text{HFV}, \text{c}, \max}$ 为氢燃料电池电动车的最大充氢速率。

4) 插入式电动车运行约束

定义 $\mathcal{T}_{i,v}$ 表示在微电网 i 中插入式电动车 v 停放在混合能源补给站的时段集合。插入式电动车满足如下约束。

$$\sum_{t \in \mathcal{T}_{i,v}} \eta_{i,v}^{\text{PEV}, \text{c}} P_{i,v,t}^{\text{PEV}, \text{c}} \Delta t = C_{i,v}^{\text{PEV}} S_{i,v}^{\text{exp}} - C_{i,v}^{\text{PEV}} S_{i,v}^{\min} \quad (32)$$

$$0 \leq P_{i,v,t}^{\text{PEV}, \text{c}} \leq P_{i,v}^{\text{PEV}, \text{c}, \max} \quad (33)$$

$$P_{i,v,t}^{\text{PEV}, \text{c}} = 0, \forall t \notin \mathcal{T}_{i,v}, v \in \mathcal{V}_{i,t} \quad (34)$$

式(32)表示插入式电动车储能的动态变化; 式(33)表示插入式电动车的充电功率约束; 式(34)表示当插入式电动车未停放在混合能源补给站时, 其充电功率为0。式中: $S_{i,v}^{\text{exp}}$ 和 $S_{i,v}^{\min}$ 分别为插入式电动车电池的期望和最小荷电状态; $C_{i,v}^{\text{PEV}}$ 和 $\eta_{i,v}^{\text{PEV}, \text{c}}$ 分别为插入式电动车电池的容量和充电效率; $P_{i,v}^{\text{PEV}, \text{c}, \max}$ 为插入式电动车的最大充电功率。

1.3.3 微电网运行约束

1) 微电网与虚拟电厂的电能交互约束

定义 $P_{i,t}^{\text{PCC}}$ 表示微电网 i 在 t 时段从虚拟电厂的购电量, 其满足如下约束。

$$P_i^{\text{PCC}, \min} \leq P_{i,t}^{\text{PCC}} \leq P_i^{\text{PCC}, \max} \quad (35)$$

式中 $P_i^{\text{PCC}, \max}$ 和 $P_i^{\text{PCC}, \min}$ 分别为微电网 i 可从虚拟电厂购电的上、下限约束。

2) 需求响应约束

定义 $\Delta P_{i,t}^{\text{MG}, \text{load}}$ 表示微电网 i 在 t 时段参与需求响应的负荷调节量, 其满足如下约束。

$$0 \leq \Delta P_{i,t}^{\text{MG}, \text{load}} \leq \sigma_i^{\text{MG}, \text{load}} P_{i,t}^{\text{MG}, \text{load}} \quad (36)$$

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} \Delta P_{i,t}^{\text{MG}, \text{load}} = 0 \quad (37)$$

式(36)表示微电网 i 负荷调节量的上、下限; 式(37)表示在调度时段内微电网的负荷调节量之和为0, 即微电网的总负荷需求恒定。式中: $P_{i,t}^{\text{MG}, \text{load}}$

为微电网 i 在 t 时段的电负荷需求; $\sigma_i^{\text{MG, load}}$ 为微电网 i 参与需求响应的负荷比率。

3) 电能平衡约束

微电网 i 的电能平衡约束可表示为:

$$P_{i,t}^{\text{PCC}} + P_{i,t}^{\text{MGWT}} + P_{i,t}^{\text{MGES, d}} = P_{i,t}^{\text{MG, load}} + \Delta P_{i,t}^{\text{MG, load}} + \sum_{v \in V_{i,t}} P_{i,v,t}^{\text{PEV, c}} + P_{i,t}^{\text{MGES, c}} + P_{i,t}^{\text{WE}} \quad (38)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{PCC}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{MGWT}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{MGES, d}}$ 分别为微电网 i 从虚拟电厂的购电量、调用的风电、电储能放电功率; $P_{i,t}^{\text{MG, load}}$ 、 $\Delta P_{i,t}^{\text{MG, load}}$ 、 $\sum_{v \in V_{i,t}} P_{i,v,t}^{\text{PEV, c}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{MGES, c}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{WE}}$ 分别为微电网 i 的负荷需求、负荷调节量、电动车充电功率、电储能充电功率、水电解器耗电功率。

4) 氢能平衡约束

微电网 i 的氢能平衡约束可表示为:

$$G_{i,t}^{\text{WE}} + G_{i,t}^{\text{HS, d}} = \sum_{h \in H_{i,t}} G_{i,h,t}^{\text{HFV, c}} + G_{i,t}^{\text{HS, c}} \quad (39)$$

式中: $G_{i,t}^{\text{WE}}$ 、 $G_{i,t}^{\text{HS, d}}$ 分别为水电解器产生的氢气量、氢储能的放氢量; $\sum_{h \in H_{i,t}} G_{i,h,t}^{\text{HFV, c}}$ 、 $G_{i,t}^{\text{HS, c}}$ 分别为氢燃料电池车的充氢量、氢储能的充氢量。

2 基于目标级联法的双层分布式调度方法

本文采用目标级联法将虚拟电厂与各微电网间的多智能体联合优化问题, 分解成针对虚拟电厂和微电网的双层分布式调度问题。

2.1 算法流程

如图4所示, 在虚拟电厂与微电网双层分布式调度问题中, 上层为虚拟电厂运行成本最小化问题, 下层为各微电网的运行成本最小化问题。

上、下层问题的耦合变量为虚拟电厂与各微电网间的交互功率, 为了实现上、下层问题的解耦, 引入解耦变量 $\hat{P}_i^{\text{PCC}}$ 和 $\hat{P}_i^{\text{MG}}$ 分别表示上层问题向下层问题传输的耦合变量, 以及下层问题向上层问题传输的耦合变量。通过上、下层问题间的交替求解以及耦合变量的相互传递, 实现虚拟电厂和各微电网的分布式优化调度, 并保护各智能体的数据隐私。

引入增广拉格朗日函数实现对上、下层问题的解耦, 虚拟电厂的目标函数可改写为:

$$\min_{\theta^{\text{VP}}} F^{\text{VP}} + \sum_{i \in \mathcal{M}, t \in T} \left[\omega_{i,t} \left(P_{i,t}^{\text{MG}} - \hat{P}_i^{\text{PCC}} \right) - \gamma_{i,t} \left(P_{i,t}^{\text{MG}} - \hat{P}_i^{\text{PCC}} \right)^2 \right] \quad (40)$$

各微电网的目标函数可改写为:

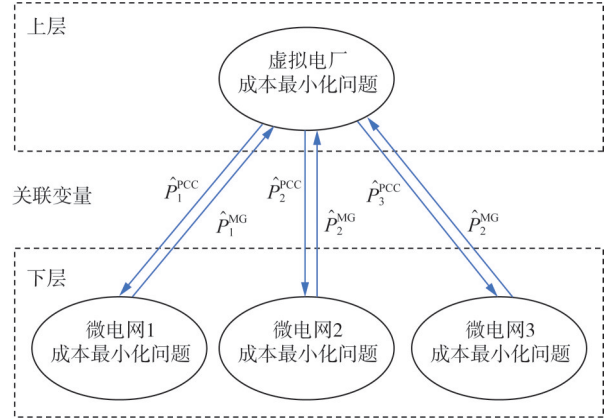


图4 虚拟电厂与微电网的双层分布式能源调度框架

Fig. 4 Two-layer distributed energy scheduling framework for a virtual power plant and multi-microgrids

$$\min_{\theta^{\text{MG}_i}} F_i^{\text{MG}} + \sum_{t \in T} \left[\omega_{i,t} \left(P_{i,t}^{\text{PCC}} - \hat{P}_i^{\text{MG}} \right) - \gamma_{i,t} \left(P_{i,t}^{\text{PCC}} - \hat{P}_i^{\text{MG}} \right)^2 \right] \quad (41)$$

式中: $\omega_{i,t}$ 和 $\gamma_{i,t}$ 分别为拉格朗日罚函数的一、二次项乘子; $\hat{P}_i^{\text{PCC}}$ 、 $\hat{P}_i^{\text{MG}}$ 分别为 t 时段表示上层问题向下层问题传输的耦合变量, 以及下层问题向上层问题传输的耦合变量。通过引入拉格朗日罚函数, 在迭代过程中使得耦合变量 $\hat{P}_i^{\text{PCC}}$ 和 $\hat{P}_i^{\text{MG}}$ 相互靠近, 至算法收敛。

2.2 具体步骤

基于目标级联法的虚拟电厂与微电网双层分布式调度的具体步骤如下。

1) 设置虚拟电厂和各微电网能源设备的基本参数, 并为目标级联法中的拉格朗日乘子和耦合变量赋初值, 令迭代次数 $k = 1$ 。

2) 虚拟电厂求解上层优化问题, 即虚拟电厂运行成本最小化问题式(1)–(17), 将求得的虚拟电厂对微电网的售电功率值赋给 $\hat{P}_i^{\text{MG}}$ 并传递给各微电网。

3) 各微电网求解下层优化问题, 即微电网运行成本最小化问题分别为式(9)–(14)、式(16)–(39), 将求得的各微电网从虚拟电厂的购电功率值赋给 $\hat{P}_i^{\text{PCC}}$ 并传递给虚拟电厂。

4) 判断是否满足收敛判据式(42), 若满足则输出虚拟电厂和各微电网的调度结果, 否则根据式(43)更新拉格朗日罚函数乘子, 返回步骤2), 并令 $k = k + 1$ 。

$$\begin{cases} |P_{i,t}^{\text{MG},k} - P_{i,t}^{\text{PCC},k}| \leq \varepsilon_1 \\ \left| \frac{F^{\text{VP},k} + \sum_{i \in \mathcal{M}} F_i^{\text{MG},k} - \left(F^{\text{VP},k-1} + \sum_{i \in \mathcal{M}} F_i^{\text{MG},k-1} \right)}{F^{\text{VP},k} + \sum_{i \in \mathcal{M}} F_i^{\text{MG},k}} \right| \leq \varepsilon_2 \end{cases} \quad (42)$$

$$\begin{cases} \omega_{i,t}^{k+1} = \omega_{i,t}^k + 2(\gamma_{i,t}^k)^2 (P_{i,t}^{\text{MG},k} - P_{i,t}^{\text{PCC},k}) \\ \gamma_{i,t}^{k+1} = \beta \gamma_{i,t}^k \end{cases} \quad (43)$$

式中： $P_{i,t}^{\text{MG},k}$ 和 $P_{i,t}^{\text{PCC},k}$ 分别为第 k 次迭代虚拟电厂与微电网间交互功率的值； $F^{\text{VP},k}$ 和 $F_i^{\text{MG},k}$ 分别为第 k 次迭代虚拟电厂与微电网的目标函数值； ε_1 和 ε_2 分别为交互功率和系统运行成本的收敛精度。式(42)的第一个子式表示虚拟电厂与微电网间交互功率的收敛判据，第二个子式表示虚拟电厂与微电网目标函数值的收敛判据。式(43)中， β 为正常数； $\omega_{i,t}^k$ 和 $\gamma_{i,t}^k$ 分别为第 k 次迭代拉格朗日罚函数式(40)和(41)中的一、二次项乘子；式(43)的第一、二个子式分别对这两个乘子进行更新。

本文所提的双层分布式调度流程如图5所示。

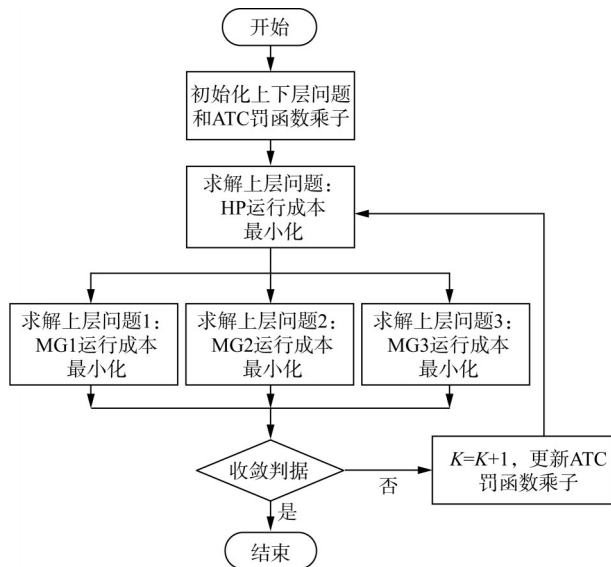


图5 程序流程图

Fig. 5 Algorithm flowchart

2.3 云边协同

本文提出云边协同优化框架旨在解决在虚拟电厂和多微电网能源交互环境下的能源调度问题。通过云边协同，充分利用云端的强大计算能力和边缘端的低延迟特性，实现虚拟电厂和多微电网的层级

分布式能源交互。在该框架中，云端负责大规模数据分析和复杂优化问题求解，边缘端负责实时数据收集和快速决策响应。调度模型中，本文设计基于目标级联法的分布式能源调度策略实现虚拟电厂和微电网能源调度。具体地，虚拟电厂和各微电网能源优化调度问题的求解可在云平台完成，并在边缘端执行云平台发出的调度指令。虚拟电厂与微电网间的信息传输以及边缘端与云端的信息传输可通过边缘侧的通信设备实现。同时，利用云平台对虚拟电厂和各微电网的清洁能源发电量和电负荷进行日前预测。因此，本文提出的“云边协同”优化框架的主要贡献包含：1)提出策略以应对多异构设备在微电网中部署所带来的挑战；2)利用边缘端和云端的优势实现了虚拟电厂和多微电网间的层级能源调度；3)提高系统处理数据效率和隐私保护能力。该框架的具体执行步骤如下。

1)数据收集与预处理：边缘端负责实时收集虚拟电厂和各微电网的运行数据，包括清洁能源发电量、电能消耗量等，并进行数据清洗和预处理。

2)数据分析与优化计算：清洗后的数据被发送到云端，云端运用高性能的计算资源进行清洁能源发电量和能源需求预测以及优化问题求解。这一过程中，本文采用目标级联法来分析和求解层级能源优化调度问题。

3)策略下发与执行：云端计算得出的能源优化调度策略通过边缘通信设备迅速下发至各微电网和虚拟电厂，边缘端负责执行并实时反馈执行信息。

3 算例分析

本文基于图1所示的配电网中虚拟电厂和微电网的交互模型进行算例分析，上层虚拟电厂充当能源中介，从配电网购电，并可售电给下层各微电网。

3.1 基本参数

本文设定能源调度周期为1 d，微电网与虚拟电厂间的交互电价如图6所示，此交互电价即为虚拟电厂向微电网 i 售电的单位收益 $\delta_{i,t}^{\text{MG}}$ 以及微电网 i 从虚拟电厂购电的单位成本 $\delta_{i,t}^{\text{PCC}}$ ，二者相等。设定虚拟电厂从配电网的购电价格为交互电价的1.2倍，微电网的单位需求响应成本为交互电价的0.4倍^[26]。在调度周期内，虚拟电厂和各微电网的风机出力 and 电负荷需求分别如图7—8所示。混合能

源补给站模型的详细仿真参数选取如下,其中选取特斯拉Model 3作为插入式电动车、现代Nexo作为氢燃料电池电动车进行算例分析。插入式电动车和氢燃料电池电动车停放在混合能源补给站的时域参考文献[27]。设定氢燃料电池电动车和插入式电动车在停放时域内将储能充满^[25]。混合能源补给站、虚拟电厂和微电网的详细参数如表1所示。设置拉格朗日罚函数乘子 $\omega_{i,t}$ 和 $\gamma_{i,t}$ 的初值均为0.005,收敛精度 ε_1 和 ε_2 的初值均为0.001。本文在MATLAB R2018 a运行环境下进行算例仿真,并调用Gurobi求解器对优化问题进行求解。

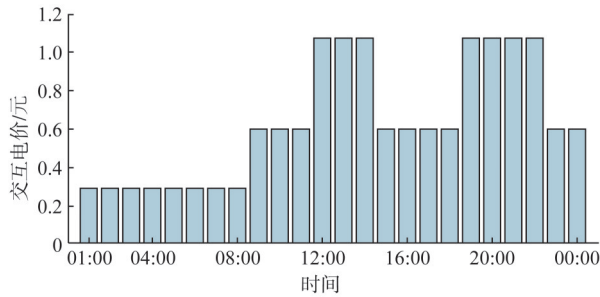


图6 微电网与虚拟电厂间交互电价

Fig. 6 Interaction prices between virtual power plant and microgrids

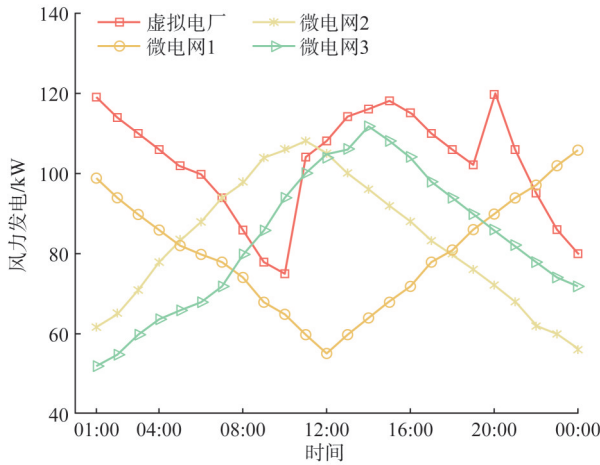


图7 风机出力

Fig. 7 Wind power generation

3.2 目标级联法收敛性分析

图9展示了在所提出的基于目标级联法的分布式优化算法下虚拟电厂与各微电网交互功率误差的收敛过程。

图9表明,所提出的分布式优化算法可有效求解微电网与虚拟电厂分布式能源调度问题。此外,

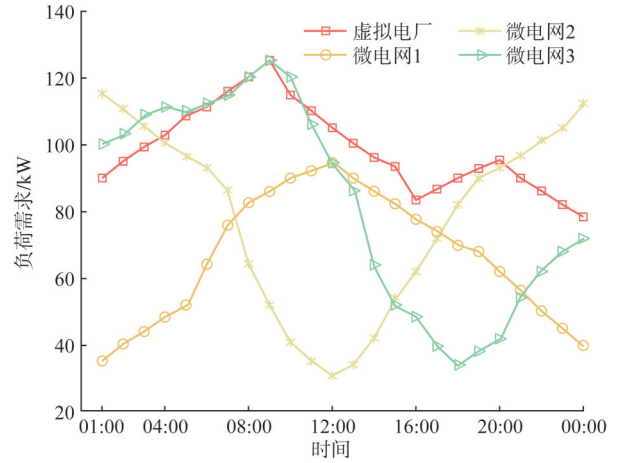


图8 负荷需求

Fig. 8 Load demand

表1 虚拟电厂和微电网参数

Tab. 1 Parameters of the virtual power plant and microgrids

参数	数值	参数	数值
$\rho^G/(\text{kW} \cdot \text{元}^{-1})$	0.001	$P^{\text{ES}, \text{d}, \text{max}}/\text{kW}$	50
$\rho^{\text{ES}}/(\text{kW} \cdot \text{元}^{-1})$	0.001	$E_i^{\text{P2H}}/(\text{kW} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.025 4
$P^{\text{G}, \text{max}}/\text{kW}$	150	$G_i^{\text{HS}, \text{max}}/\text{kg}$	30
$\Delta P^{\text{G}, \text{max}}/(\text{kWh}^{-1})$	50	$G_{i,h}^{\text{HFV}, \text{max}}/\text{kg}$	6.3
$P^{\text{ES}, \text{c}, \text{max}}/\text{kW}$	50	$C_{i,v}^{\text{PEV}}/\text{kWh}$	55

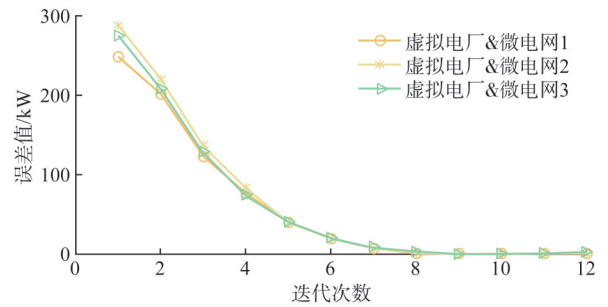


图9 虚拟电厂与微电网交互功率误差的收敛过程

Fig. 9 Convergence processes of the interaction power errors between the virtual power plant and microgrids

由图9可知,分布式算法经过10此迭代后可实现收敛,算法所需的求解时间为22.93 s。考虑到本文所研究的问题为日前能源调度问题,显然该分布式算法可以满足实际情景下的时间要求。图10展示了在所提出的分布式优化方法下虚拟电厂与各微电网在时隙8的交互功率值的收敛过程。

由图10可知,在迭代优化过程中上层向下层传递的交互功率 $\hat{P}_i^{\text{PCC}}$ 以及下层向上层传递的交互功率 $\hat{P}_i^{\text{MG}}$ 逐渐趋于一致,经过10次迭代后,分布式算法收敛。图10结果可进一步表明所提出的分布式

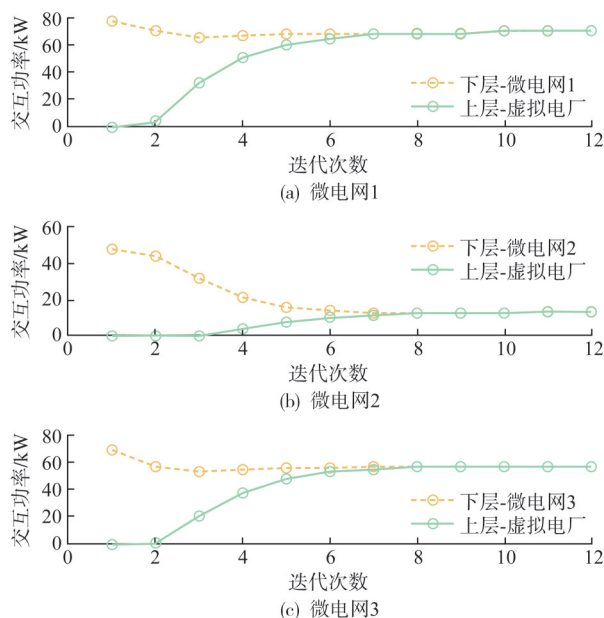


图 10 时隙 8 交互功率收敛过程

Fig. 10 Convergence processes of the interaction power in time slot 8

方法求解微电网与虚拟电厂分布式能源调度问题的有效性。

3.3 虚拟电厂和微电网能源调度结果

本节以虚拟电厂和微电网 3 为例,分析虚拟电厂和微电网的能源调度结果。图 11 展示了虚拟电厂的电能调度结果。由图 11 可知,在电价较低的 00:00—8:00 时间段,虚拟电厂从配电网购入较多的电能,以满足其自身和微电网的电能需求。在 04:00—9:00 时间段,虚拟电厂的风机发电量较低而负荷需求较高,因此电储能放电以满足负荷需求;相反地,在 11:00—16:00 时间段,虚拟电厂的风机发电量较高而负荷需求较低,因此电储能进行充电。由此,虚拟电厂可在满足负荷需求的前提下,降低其运行成本。

图 12—13 分别展示了微电网 3 在调度时域内的电能和氢能调度结果。如图 12 所示,在 00:00—08:00 时间段,微电网 3 的风机发电量较低且负荷需求较高,因此在该时段微电网 3 从虚拟电厂购入较多的电能以满足其负荷需求。电动车的充电时间段主要集中在电价较低的 00:00—08:00 时间段和清洁能源发电量较高的 14:00—20:00 时间段以降低微电网运行成本。此外,由图 13 可知,在 01:00—02:00 时间段,水电解器产出较多的氢气且氢储能可提供较多氢气,因此在该时间段氢燃料电池电动车

充氢量较多。通过上述电能和氢能调度方式,可有效降低微电网的运行成本。

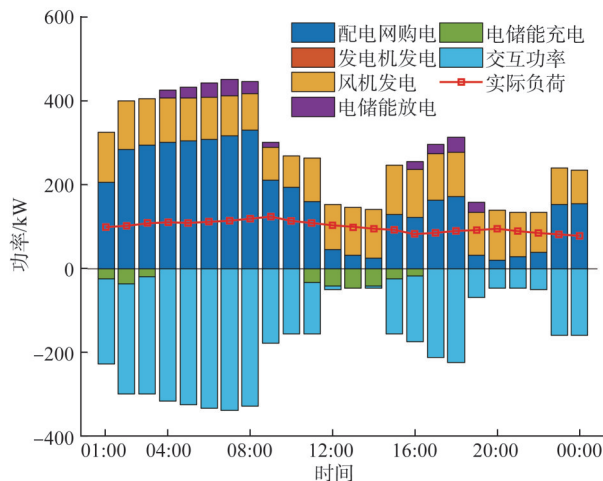


图 11 虚拟电厂电能调度结果

Fig. 11 Power scheduling results of the virtual power plant

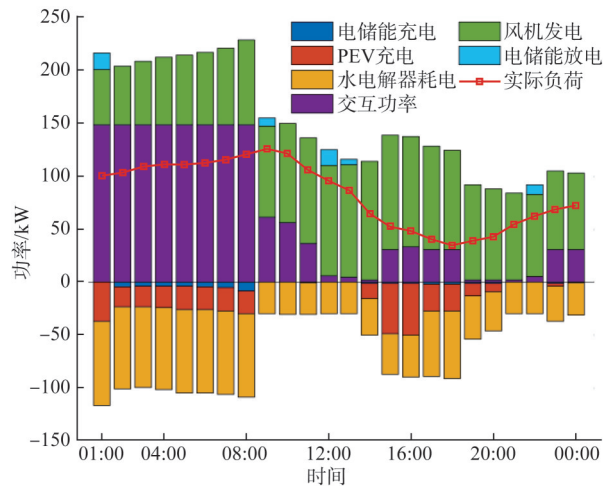


图 12 微电网 3 电能调度结果

Fig. 12 Power scheduling results of microgrid 3

3.4 集中式与分布式优化算法对比

鉴于通过集中式优化方法,可以求得虚拟电厂和各微电网的最优能源调度结果,因此在此对集中式优化方法和所提出的分布式优化方法进行对比。表 2 展示了在集中式优化调度和所提出的分布式优化调度下虚拟电厂和各微电网的运行成本对比结果。由表 2 可知,在所提出的分布式优化方法下,各智能体的运行成本与在集中式优化方法下各智能体的运行成本偏差非常小,小于 1%,这证明了本文所提出的分布式优化算法的有效性。此外,由于本文所提出的方法可以保护各智能体的数据隐私,

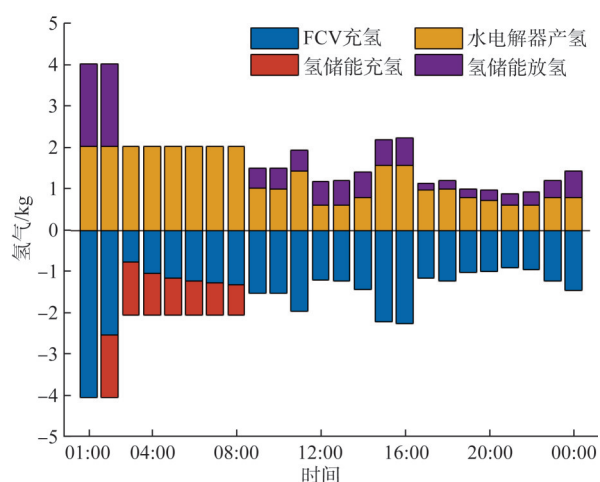


图13 微电网3氢能调度结果

Fig. 13 Hydrogen scheduling results of microgrid 3

表2 集中式与分布式调度下智能体运行成本对比

Tab. 2 Comparison of operation costs of agents under central scheduling and distributed scheduling

智能体	集中式运行成本/元	分布式运行成本/元	偏差/%
虚拟电厂	261.598 6	263.231 9	0.62
微电网1	571.325 4	569.457 2	-0.33
微电网2	726.986 2	725.742 4	-0.17
微电网3	613.256 8	609.675 4	-0.58

因此更具优越性。

4 结论

本文考虑了在配电网中虚拟电厂和含混合能源补给站的微电网间的电能交互,构建了一个基于云边协同的微电网双层分布式优化模型。同时,本文提出一个基于目标级联法的分布式优化算法实现对优化问题的分布式求解,以保护各智能体的数据隐私。根据仿真结果,所提出的分布式算法仅需10次迭代即可收敛,并且分布式求解结果与集中式求解结果偏差小于1%,结果表明算法的有效性和良好的收敛性能。此外,仿真实验还表明所提出的分布式优化算法可在保证虚拟电厂和微电网运行成本最小化的前提下实现对其电能和氢能的优化调度。

参考文献

- [1] 任大伟,肖晋宇,侯金鸣,等.双碳目标下我国新型电力系统的构建与演变研究[J].电网技术,2022,46(10):3831-3839.
REN Dawei, XIAO Jinyu, HOU Jinming, et al. Construction

and evolution of China's new power system under dual carbon goal [J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3831-3839.

- [2] MEHRJERDI H. Off-grid solar powered charging station for electric and hydrogen vehicles including fuel cell and hydrogen storage[J]. International journal of hydrogen Energy, 2019, 44(23): 11574-11583.
- [3] 蔡黎,商冰洁,高乐,等.电动汽车有序充电研究与应用综述[J].南方电网技术,2023,17(11):97-107,129.
CAI Li, SHANG Bingjie, GAO Le, et al. Review of research and application on orderly charging of electric vehicles [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(11): 97-107, 129.
- [4] 王云龙,韩璐,罗树林,等.集成电动汽车的家庭电热综合能源系统负荷调度优化[J].中国电力,2024,57(5):39-49.
WANG Yunlong, HAN Lu, LUO Shulin, et al. Load scheduling optimization of home electric heating integrated energy system with electric vehicle [J]. Electric Power, 2024, 57(5): 39-49.
- [5] 程慧琳,武剑,张晶,等.计及电动汽车充放电时空分布的输配网协同降损低碳策略研究[J].电测与仪表,2024,61(11):122-132.
CHEN Huilin, WU Jian, ZHANG Jing, et al. Research on the low-carbon strategy of coordinated loss reduction of transmission and distribution network considering the temporal-spatial distribution of EV charging and discharging [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(11): 122-132.
- [6] FANG X, WANG Y, DONG W, et al. Optimal energy management of multiple electricity-hydrogen integrated charging stations [J]. Energy, 2023(262): 1-11.
- [7] 陈凯炎,牛玉刚.基于V2G技术的电动汽车实时调度策略[J].电力系统保护与控制,2019,47(14):1-9.
CHEN Kaiyan, NIU Yugang. Real-time scheduling strategy of electric vehicle based on vehicle-to-grid application [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 1-9.
- [8] 陈中,陆舆,邢强,等.考虑电动汽车碳配额的电力系统调度分析[J].电力系统自动化,2019,43(16):44-51.
CHEN Zhong, LU Yu, XING Qiang, et al. Dispatch analysis of power system considering carbon quota for electric vehicle [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16): 44-51.
- [9] 吕仁周,白晓清,李佩杰,等.基于交替方向乘子法的电动汽车分散式充电控制[J].电力系统自动化,2016,40(16):56-63.
LÜ Renzhou, BAI Xiaoqing, LI Peijie, et al. Decentralized charging control of electric vehicles based on alternate direction method of multiplier [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 56-63.
- [10] 程杉,王贤宁,冯毅焜,等.电动汽车充电站有序充电调度的分散式优化[J].电力系统自动化,2018,42(1):39-46.
CHENG Shan, WANG Xianning, FENG Yichen, et al. Decentralized optimization of ordered charging scheduling in electric vehicle charging station [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 39-46.
- [11] MANSOURLAKOURAJ M, NIAZ H, LIU J J, et al. Optimal risk-constrained stochastic scheduling of microgrids with hydrogen vehicles in real-time and day-ahead markets [J]. Journal of Cleaner Production, 2021(318): 1-14.
- [12] ZHAO Y, LIN J, SONG Y, et al. A hierarchical strategy for

- restorative self-healing of hydrogen-penetrated distribution systems considering energy sharing via mobile resources [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 38(2): 1388 – 1404.
- [13] WILKE C, BENSMANN A, MARTIN S, et al. Optimal design of a district energy system including supply for fuel cell electric vehicles[J]. Applied Energy, 2018(226): 129 – 144.
- [14] ZHONG X, XIE K, ZHONG W, et al. Communication-efficient distributed electricity and carbon allowance management for community microgrids with hybrid energy supply stations[J]. Journal of Cleaner Production, 2023(425): 1 – 14.
- [15] GAN W, SHAHIDEPOUR M, GUO J, et al. Two-stage planning of network-constrained hybrid energy supply stations for electric and natural gas vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 12(3): 2013–2026.
- [16] 谭笑, 华栋. 源荷协同下计及电转氢和电动汽车的含风电配网日前优化调度[J]. 南方电网技术, 2023, 17(4): 144 – 155, 166.
- TAN Xiao, HUA Dong. Day-ahead optimal dispatch of wind power distribution network with P2H and EVs in consideration of source-load coordination [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(04): 144 – 155, 166.
- [17] 武梦景, 万灿, 宋永华, 等. 含多能微网群的区域电热综合能源系统分层自治优化调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(12): 20 – 29.
- WU Mengjing, WAN Can, SONG Yonghua, et al. Hierarchical autonomous optimal dispatching of district integrated heating and power system with multi-energy microgrids [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(12): 20 – 29.
- [18] 张旋, 张玉敏, 吉兴全, 等. 计及电-气-热综合能源系统的输配协同优化调度[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4256 – 4270.
- ZHANG Xuan, ZHANG Yumin, JI Xingquan, et al. Synergetic optimized scheduling of transmission and distribution network with electricity-gas-heat integrated energy system [J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4256 – 4270.
- [19] 林卓然, 王守相, 王绍敏, 等. 考虑阶梯型碳交易机制的区域电-热综合能源系统分布协同调度方法[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 217 – 229.
- LIN Zhuoran, WANG Shouxiang, WANG Shaomin, et al. Distributed coordinated dispatch method of district electric-thermal integrated energy system considering a ladder-type carbon trading mechanism [J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 217 – 229.
- [20] 张扬帆, 王珂, 李阳, 等. 基于云-边-端协同的区域级风电场大数据中心数据管理框架及优化运行方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(11): 5151 – 5163.
- ZHANG Yangfan, WANG Yu, LI Yang, et al. Data management framework and operation optimization method for regional wind farms big data center based on cloud-edge-end collaboration [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(11): 5151 – 5163.
- [21] 彭超逸, 陈文哲, 徐苏越, 等. 支持虚拟电厂提供灵活爬坡服务的云边协同市场模型[J]. 上海交通大学学报, 2025, 59(2): 186 – 199.
- PENG Chaoyi, CHEN Wenzhe, XU Suyue, et al. Modeling of cloud-edge collaborated electricity market considering inflexible ramping products provided by VPPs [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2025, 59(2): 186 – 199.
- [22] 杨定坤, 赵南, 马红双, 等. 面向电力物联网的云边协同应用研究[J]. 电气工程学报, 2022, 17(1): 192 – 198.
- YANG Dingkun, ZHAO Nan, MA Hongshuang, et al. Cloud-edge collaborative structure model for power Internet of Things [J]. Journal of Electrical Engineering, 2022, 17(1): 192 – 198.
- [23] 陈张宇, 刘东, 刘浩文, 等. 基于精细化需求响应的虚拟电厂优化调度[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2542 – 2550.
- CHEN Zhangyu, LIU Dong, LIU Haowen, et al. Optimal dispatching of virtual power plant based on refined demand response [J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2542 – 2550.
- [24] 赖昌伟, 黎静华, 陈博, 等. 光伏发电出力预测技术研究综述[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1201 – 1217.
- LAI Changwei, LI Jinghua, CHEN Bo, et al. Review of photovoltaic power output prediction technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1201 – 1217.
- [25] 梁宏涛, 刘红菊, 李静, 等. 基于机器学习的短期负荷预测算法综述[J]. 计算机系统应用, 2022, 31(10): 25 – 35.
- LIANG Hongtao, LIU Hongju, LI Jing, et al. Survey on short-term load forecasting algorithm based on machine learning [J]. Computer Systems & Applications, 2022, 31(10): 25 – 35.
- [26] 曾智基, 杨苹, 陈耀圣, 等. 基于目标级联法的微网群多主体分布式优化调度[J]. 华北电力大学学报, 2019, 46(2): 25 – 33.
- ZENG Zhiji, YANG Ping, CHEN Yaosheng, et al. Distributed optimization scheduling of multi-microgrids with multiple stakeholders based on analytical target cascading [J]. Journal of North China Electric Power University, 2019, 46(2): 25 – 33.
- [27] 魏韡, 陈玥, 刘锋, 等. 基于主从博弈的智能小区代理商定价策略及电动汽车充电管理[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 939 – 945.
- WEI Wei, CHEN Yue, LIU Feng, et al. Stackelberg game based retailer pricing scheme and EV charging management in smart residential area [J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 939 – 945.

收稿日期: 2023-09-14; 网络首发日期: 2024-07-15

作者简介:

张仕鹏(1974), 男, 高级工程师(教授级), 博士, 研究方向为电力系统调度自动化、电力监控系统网络安全, zhangshipeng@gedi.com.cn;

聂涌泉(1990), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为电力系统自动化与电力市场;

胡亚平(1986), 男, 高级工程师(教授级), 硕士, 研究方向为电力系统分析、运行与控制。