

DOI:10.11784/tdxbz202409011

## 考虑多主体博弈的数据中心微网优化调度

肖 迁<sup>1,2</sup>, 田 森<sup>1</sup>, 李天翔<sup>1</sup>, 贾宏杰<sup>1</sup>, 乔 骥<sup>3</sup>, 蒲天骄<sup>3</sup>

- 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072;
- 新型电力系统运行与控制全国重点实验室(清华大学), 北京 100084;
- 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192

**摘要:** 数据中心(IDC)微网作为处理数据负荷的重要单元, 其内部海量市场主体间呈现复杂博弈关系, 获取 IDC 微网内不同主体的均衡策略已成为开展优化调度的关键。为此, 文中提出了一种考虑多主体博弈的 IDC 微网优化调度方法。首先, 构建 IDC 微网拓扑结构, 计及 IDC 电热耦合特性与数据负荷差异化特性, 建立其内部 IDC 及各类能量转换设备的数学模型。其次, 充分分析 IDC 微网内供应商、服务商、用户利益诉求, 建立了兼顾各主体运行收益的 IDC 微网优化调度模型。在此基础上, 为提升多主体博弈计算的精度和速度, 基于 Nash 均衡原理重构各主体的目标函数, 并将多主体目标函数整合为单目标函数, 从而提出一种分级式博弈求解算法。然后, 为量化所提算法的计算精度, 构建了基于 1-范数的算法精度评估指标。最后, 通过仿真验证得出以下结论: 与传统无博弈模型相比, 所提优化调度模型考虑了 IDC 微网内供应商、服务商、用户间的博弈互动, 提升了各主体的运行收益; 与传统多主体博弈求解算法相比, 所提算法重构并整合各主体目标函数, 减少了 IDC 微网 62.1%以上的计算误差, 缩短了 9.8%以上的计算时间。

**关键词:** 数据中心微网; 优化调度; 多主体博弈; 博弈求解算法

中图分类号: TM73 文献标志码: A 文章编号: 0493-2137(2025)07-0663-11

## Optimization Scheduling of Internet Data Center Microgrids Considering Multi-Agent Game

Xiao Qian<sup>1,2</sup>, Tian Sen<sup>1</sup>, Li Tianxiang<sup>1</sup>, Jia Hongjie<sup>1</sup>, Qiao Ji<sup>3</sup>, Pu Tianjiao<sup>3</sup>

- Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
- State Key Laboratory of Power System Operation and Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
- China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** The internet data center (IDC) microgrid, as a crucial component for managing data loads, exhibits complex competitive dynamics among various market participants. Understanding the equilibrium strategies of different entities within the IDC microgrid has become essential for optimizing its scheduling. To address this issue, this paper proposes an optimization scheduling method for IDC microgrids that considers multi-agent game theory. First, we construct the topology of the IDC microgrid, considering the electrical-thermal coupling characteristics and differentiated data load profiles. We establish mathematical models for the IDC itself and various energy conversion devices within it. Next, we analyze the interests of suppliers, service providers, and users in the IDC microgrid, leading to the development of an optimization scheduling model that balances the operational returns of all parties involved. Building on this foundation, we enhance the accuracy and speed of multi-agent game calculations by reconstructing

收稿日期: 2024-09-11; 修回日期: 2024-10-30.

作者简介: 肖 迁 (1988—), 男, 博士, 副教授, xiaoqian@tju.edu.cn.

通信作者: 李天翔, txl@tju.edu.cn.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFB2407300); 国家自然科学基金资助项目(52107121, 52477117, 52407135, U24B6008, U2066213); 天津市科技计划资助项目(23YDTPJC00090).

Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFB2407300), the National Natural Science Foundation of China (No. 52107121, No. 52477117, No. 52407135, No. U24B6008, No. U2066213), the Science and Technology Plan Program of Tianjin, China (No. 23YDTPJC00090).

each participant's objective function using Nash equilibrium principles, integrating these multi-agent objective functions into a single objective function. This leads to the proposal of a hierarchical game-solving algorithm. To quantify the computational accuracy of the proposed algorithm, we develop an assessment metric based on the L1 norm. Finally, simulation results demonstrate that, compared to traditional non-game models, our optimization scheduling model incorporates the competitive interactions among suppliers, service providers, and users within the IDC microgrid, thereby improving operational returns for all parties involved. Compared to traditional multi-agent game-solving algorithms, our proposed method reduces computational error in the IDC microgrid by over 62.1% and shortens computation time by more than 9.8%.

**Keywords:** internet data center microgrid; optimization scheduling; multi-agent game; game-solving algorithm

近年来,伴随数据计算需求的日益增长,数据中心(internet data center, IDC)用电比例显著增大. 据统计, IDC 年用电量平均增长率为 12% ~ 14%, 预期 2025 年 IDC 用电量将达到世界总用电量的 1/5<sup>[1]</sup>. IDC 微网是一种以 IDC 优质供电为核心, 兼顾多类型能源高效供应的能源系统, 其已成为处理数据负荷的重要方式<sup>[2-5]</sup>. 然而, IDC 微网内海量市场主体呈现复杂博弈关系, 如何获取其均衡策略成为降低系统用能成本的关键<sup>[6-9]</sup>. 目前, 在 IDC 微网建模及多主体优化调度方面, 众多学者已开展大量研究工作.

在 IDC 微网建模方面, 当前研究主要关注如何建立 IDC 数学模型<sup>[1,10-12]</sup>. 文献[10]建立了考虑数据计算量的 IDC 功耗模型, 并在不同场景开展仿真验证了该模型的准确性; 文献[11]提出了一种以可再生能源为主的 IDC 数学模型, 并设计了一种面向 IDC 最大化供能的可再生能源运行控制器, 保证了其较高的计算功率; 文献[12]建立了一种考虑数据需求响应的 IDC 数学模型, 从而充分挖掘数据负荷调节潜力, 降低了全系统的运行成本; 文献[1]考虑 IDC 产热特性, 提出了一种同时作为电能消费者和热能生产者的 IDC 数学模型, 提升了能源系统用能效率. 上述文献充分考虑了 IDC 用能特性, 建立了准确的 IDC 数学模型, 但尚未挖掘 IDC 灵活调节潜力.

在多主体优化调度方面, 由于 IDC 微网内部能源供应主体、服务主体、用能主体利益诉求不同, 如何计算不同主体的均衡策略是当前研究的重点问题<sup>[13-24]</sup>. 文献[13]基于 Nash 均衡原理构建了一种多微网多主体博弈模型, 并利用边缘服务器开展边缘侧优化调度, 提升了系统的收益; 文献[14-16]构建了面向电力系统的多主体博弈框架及市场运行机制, 为 IDC 微网多主体优化调度奠定基础; 文献[17]将能源系统内多元主体划分为能源供应商、园区服务商和用户, 依据各主体利益诉求制定其优化目标, 提出了一种考虑供需双侧博弈的优化调度方法; 文献[18]综合考虑系统期望年化总成本和系统期望焓效率, 提出了

一种基于谈判博弈的多主体博弈算法, 令系统工作于兼顾经济性和焓效率的运行点; 文献[19]立足于多主体博弈定义, 建立了一种适用于离散优化策略的多主体博弈划线求解方法; 文献[20]提出一种适用于非合作博弈场景的收缩时域分解模型, 获取了多主体博弈均衡解, 降低了各类能源的用能成本; 文献[21]考虑到博弈参与者积累知识差异, 引入局部不完全博弈理论, 提出一种适用于微电网的多主体博弈计算模型, 并分析了该方法的稳定性; 文献[22]针对一种并网型能源系统提出多主体博弈模型, 并通过仿真验证了该方法的有效性和优越性; 文献[23]在非完全信息博弈环境下, 提出一种基于多智能体 Nash-Q 强化学习的能源市场优化决策方法, 获取了多主体均衡策略; 文献[24]提出一种不完全信息下的多边演化博弈计算方法, 提升了能源系统优化计算收益. 上述文献建立了多元主体利益互动优化模型, 但尚未建立以 IDC 服务为获利手段的利益主体模型.

为提升 IDC 微网内不同主体的运行收益, 文中提出了一种考虑多主体博弈的数据中心微网优化调度方法. 文中建立了 IDC 微网拓扑结构, 并从多类型数据负荷需求的角度出发构建了 IDC 信息模型与能量模型. 在此基础上, 考虑 IDC 微网内供应商、服务商、用户的利益诉求, 建立考虑多主体博弈的 IDC 微网优化调度模型, 并提出一种分级式博弈求解算法, 从而提升了多主体博弈模型求解的精度和速度.

## 1 IDC 微网

文中将构建 IDC 微网拓扑结构, 并建立其内部 IDC 及各类能量转换设备数学模型.

### 1.1 IDC 微网拓扑

构建 IDC 微网拓扑如图 1 所示. 其中, 微网供应商分为电、热、气 3 类, 可向微网供应此类能源, 此外, 微网可直接向电网公司、天然气网公司购买能源; IDC 运营主体为服务商, 其拥有光伏发电机

(photovoltaic generator, PG) 组、风力发电机 (wind turbine generator, WTG)、电转气 (power to gas, P2G) 设备、燃气式热电联产机组 (combined heat and power generation, CHP)、燃气锅炉 (gas boiler, GB) 和 IDC; 用户包括电、热、气、数据 4 种负荷。

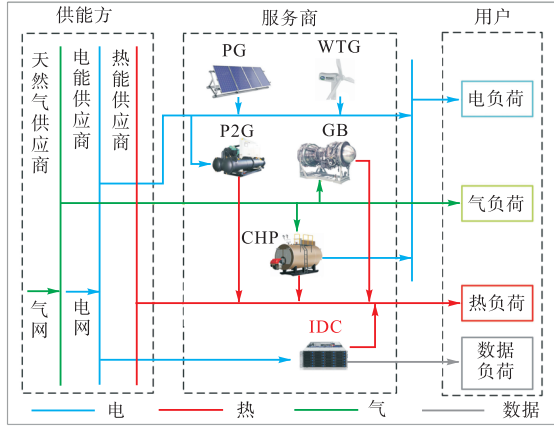


图 1 IDC 微网拓扑

Fig.1 IDC microgrid topology

## 1.2 IDC 数学模型

文中将构建含数据处理系统、辅助系统、冷却系统的 IDC 基本结构, 并分别建立其信息模型与能量模型。

### 1.2.1 IDC 基本结构

构建 IDC 基本结构如图 2 所示。

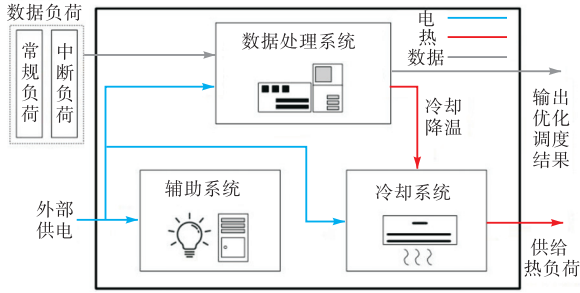


图 2 IDC 基本结构

Fig.2 IDC basic architecture

该 IDC 由数据处理系统、辅助系统、冷却系统 3 部分组成。其中, 数据处理系统用于处理微网数据负荷, 通常包括服务器、通讯终端等设备; 辅助系统用于支撑 IDC 的正常运行, 通常包括照明、配电等辅助设备; 冷却系统用于降低 IDC 运行温度, 通常包括风扇、空调等制冷设备。

### 1.2.2 IDC 信息模型

#### 1) 数据负荷模型

文中所考虑的数据负荷包括常规数据负荷及中断数据负荷<sup>[1]</sup>。

(1) 常规数据负荷  $\varphi_t$ 。常规数据负荷指微网非

紧急数据负荷, 其优先级低于中断数据负荷。文中常规数据负荷包括外部数据负荷和用户数据负荷两类, 建立其数学模型为

$$\varphi_t = \phi_t + \delta_t \quad (1)$$

式中:  $\varphi_t$  表示  $t$  时刻微网常规数据负荷;  $\phi_t$  表示  $t$  时刻外部数据负荷, 通常此类数据负荷仅出现在 IDC 空闲时期, 此时 IDC 运营主体将承接外界计算任务以获取收益;  $\delta_t$  表示  $t$  时刻微网用户数据负荷。

(2) 中断数据负荷  $\kappa_t$ 。中断数据负荷指微网内需立即处理的紧急数据负荷, 通常此类数据负荷将直接影响微网运行的经济性、安全性。文中所考虑的中断数据负荷包括故障数据负荷、设备工况数据负荷和优化调度数据负荷 3 类, 建立其数学模型为

$$\kappa_t = \lambda_t + \chi_t + \Omega_t \quad (2)$$

式中:  $\kappa_t$  表示  $t$  时刻微网中断数据负荷;  $\lambda_t$  表示  $t$  时刻微网故障数据负荷, 此类负荷通常在微网故障时产生;  $\chi_t$  表示  $t$  时刻微网设备工况数据负荷, 当设备工况 (如负载率、设备温度等) 发生变化时, 设备优化调度参数将发生变化, 此时需立即更新优化模型, 以提升微网的收益<sup>[25-26]</sup>;  $\Omega_t$  表示  $t$  时刻优化调度数据负荷。

#### 2) 数据处理模型

(1) 数据队列。假设 IDC 单位时间最大数据负荷处理量为  $D_{\max}^{\text{IDC}}$ , 建立 IDC 数据队列为

$$D_t^{\text{IDC}} = \max[D_{t-1}^{\text{IDC}} - D_{\max}^{\text{IDC}}, 0] + \varphi_t + \kappa_t \quad (3)$$

式中  $D_t^{\text{IDC}}$  表示 IDC 在  $t$  时刻的数据处理队列, 则 IDC 在  $t-1$  时刻未处理完成的数据负荷可用  $\max[D_{t-1}^{\text{IDC}} - D_{\max}^{\text{IDC}}, 0]$  表示。

若 IDC 无法满足  $t$  时刻所有数据负荷, 则 IDC 数据处理优先级为

$$\kappa_t > \max[D_{t-1}^{\text{IDC}} - D_{\max}^{\text{IDC}}, 0] > \varphi_t \quad (4)$$

为保证最终所有数据负荷均被处理, 需满足

$$|D_{t_{\max}}^{\text{IDC}}| \leq D_{\max}^{\text{IDC}} \quad (5)$$

(2) 能量设备参数修正约束。当  $\chi_t \neq 0$  时, IDC 需根据设备工况数据更新能量设备优化参数。文中所考虑的设备优化参数为设备效率, 所考虑的设备工况数据为负载率<sup>[25-26]</sup>, 建立优化参数更新模型为

$$\begin{cases} \Gamma = \left(\frac{L^a}{L^c}\right) \times 100\% \\ \eta_t = f(\chi_t) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\Gamma$  表示设备负载率;  $L^a$  表示设备的实际功率;  $L^c$  表示设备的额定功率;  $\eta_t$  表示  $t$  时刻微网内所有设备的效率矩阵, 其数值根据  $\chi_t$  确认; 文中构建  $f(\chi_t)$

的方法为利用深度智能体学习设备历史数据。

(3) 延时约束为

$$\frac{D_{\max}^{\text{IDC}}}{k^{\text{IDC}}} + t^c \leq t_{\max}^{\text{IDC}} \quad (7)$$

式中:  $k^{\text{IDC}}$  表示 IDC 数据处理速度;  $t^c$  表示 IDC 通讯时间;  $t_{\max}^{\text{IDC}}$  表示 IDC 最大允许延时。

(4) IDC 容量约束为

$$D_{\max}^{\text{IDC}} \geq \partial |\kappa_{\max}| \quad (8)$$

式中:  $\partial$  表示 IDC 裕度系数, 其数值通常取大于 1 的常数;  $\kappa_{\max}$  表示该 IDC 装设区域可能出现的中断数据负荷最大值。

### 1.2.3 IDC 能量模型

IDC 将同时作为 IDC 微网的电力负荷和热源, 建立其数学模型如下。

1) 电能消耗

$$P_{e,t}^{\text{IDC}} = P_e^{\text{AS}} + P_{e,t}^{\text{CL}} + P_{e,t}^{\text{AC}} \quad (9)$$

式中:  $P_{e,t}^{\text{IDC}}$  表示  $t$  时刻 IDC 消耗的电功率;  $P_e^{\text{AS}}$  表示辅助系统消耗的电功率, 其数值通常仅与 IDC 建设容量及建设方式有关, 针对已建好的 IDC,  $P_e^{\text{AS}}$  通常为定值;  $P_{e,t}^{\text{CL}}$  表示  $t$  时刻数据处理系统消耗的电功率;  $P_{e,t}^{\text{AC}}$  表示  $t$  时刻冷却系统消耗的电功率。

其中

$$P_e^{\text{AS}} = \beta D_{\max}^{\text{IDC}} \quad (10)$$

式中  $\beta$  表示辅助系统的功率折算系数, 其数值表征支撑 IDC 处理单位数据负荷所消耗的电功率。

$$P_{e,t}^{\text{CL}} = P_{e,\max}^{\text{IDC}} \frac{|D_t^{\text{IDC}}|}{D_{\max}^{\text{IDC}}} \quad (11)$$

式中  $P_{e,\max}^{\text{IDC}}$  表示数据处理系统处理最大数据负荷时所消耗的电功率。

$$P_{e,t}^{\text{AC}} = \min \left[ \frac{T_t - T^{\text{aim}}}{c \Delta t} - P_{e,t}^{\text{N}}, 0 \right] \quad (12)$$

式中:  $T_t$  表示  $t$  时刻 IDC 完成数据处理后的实际温度;  $T^{\text{aim}}$  表示 IDC 设定的目标温度;  $c$  表示 IDC 等效比热容;  $\Delta t$  表示优化调度单位时间间隔;  $P_{e,t}^{\text{N}}$  表示  $t$  时刻 IDC 自然散热折算的电功率, 其数值表征 IDC 的自然散热能力。

$P_{e,t}^{\text{AC}}$  需满足

$$0 \leq P_{e,t}^{\text{AC}} \leq P_{\max}^{\text{AC}} \quad (13)$$

式中  $P_{\max}^{\text{AC}}$  表示冷却系统最大电功率。

2) 热能产生

文中冷却系统抽离出的热量将通过热泵供给热负荷<sup>[1]</sup>, 其功率计算式为

$$P_{h,t}^{\text{IDC}} = \eta^w \eta_{\text{tr}}^{\text{AC}} P_{e,t}^{\text{AC}} \quad (14)$$

式中:  $P_{h,t}^{\text{IDC}}$  表示 IDC 供给热力系统的热功率;  $\eta^w$  表示热泵能量转换效率;  $\eta_{\text{tr}}^{\text{AC}}$  表示冷却系统热能转换效率。

### 1.3 IDC 微网能量转化设备数学模型

所构建的 IDC 微网中还包含多种能量转化设备, 即 P2G<sup>[13]</sup>、GB<sup>[13]</sup>、CHP<sup>[13]</sup>、PG<sup>[17]</sup>和 WTG<sup>[17]</sup>, 其数学模型与引用文献相同, 不再赘述。

## 2 IDC 微网多主体优化调度模型

由于 IDC 微网服务商、供应商、用户利益目标各不相同, 需分别建立其优化目标函数。

### 2.1 目标函数

#### 2.1.1 服务商

服务商通过提供微网数据服务、优化微网能源供给两种方式获利, 其可调节策略为售能价格、IDC 数据处理及供能方案<sup>[27-31]</sup>。构造其目标函数如下。

$$f_1 = \max \sum_{t=1}^{t_{\max}} (I_t^{\text{IDC}} + I_t^{\text{OP}}) \quad (15)$$

式中:  $I_t^{\text{IDC}}$  表示  $t$  时刻服务商数据服务收益;  $I_t^{\text{OP}}$  表示  $t$  时刻服务商能源收益。

(1) 数据服务收益  $I_t^{\text{IDC}}$  为

$$I_t^{\text{IDC}} = k_t^{\text{OUT}} |\phi_t| + k_t^{\text{IN}} |\delta_t| \quad (16)$$

式中:  $k_t^{\text{OUT}}$  表示  $t$  时刻服务商处理外部数据负荷的单价;  $k_t^{\text{IN}}$  表示  $t$  时刻服务商处理用户数据负荷的单价。值得注意的是, 处理微网故障数据负荷  $\lambda_t$  为 IDC 基本任务, 不会为服务商带来收益; 处理设备工况数据负荷  $\chi_t$ 、优化调度负荷  $\Omega_t$  不会为服务商带来直接收益, 但此举将优化微网能源供应方案, 从而提升服务商能源收益。

(2) 能源收益  $I_t^{\text{OP}}$  为

$$I_t^{\text{OP}} = I_t^{\text{S}} - C_t^{\text{S}} - Z_t^{\text{S}} - G_t^{\text{S}} \quad (17)$$

式中:  $I_t^{\text{S}}$  表示  $t$  时刻服务商售能收益;  $C_t^{\text{S}}$  表示  $t$  时刻服务商维护成本, 具体包括污水处理、设备检修等;  $Z_t^{\text{S}}$  表示  $t$  时刻用户满意度成本;  $G_t^{\text{S}}$  表示  $t$  时刻服务商能源生产成本。

$$I_t^{\text{S}} = \sum_{r \in K} k_{r,t}^{\text{S, sell}} P_{r,t}^{\text{S}} \Delta t \quad (18)$$

式中:  $r$  表示微网能源种类;  $K = \{e, h, s\}$ , 其中, e、h、s 分别代表电、热、气;  $k_{r,t}^{\text{S, sell}}$  表示  $t$  时刻服务商  $r$  类能源的售卖单价;  $P_{r,t}^{\text{S}}$  表示  $t$  时刻服务商售卖给用户的  $r$  类能源功率。

$$Z_t^{\text{S}} = \sum_{r \in K} a \left[ \left( \frac{k_{r,t}^{\text{S, sell}}}{\rho_r} \right)^b - 1 \right] \quad (19)$$

式中:  $a$  为乘积系数,  $b$  为指数系数, 均为正常数;  $\rho_r$  为  $r$  类能源的市场历史价格均值<sup>[13]</sup>.

$$G_t^S = G_t^{\text{dv}} + k_{e,t}^{\text{IDC}} P_{e,t}^{\text{IDC}} \Delta t \quad (20)$$

式中:  $G_t^{\text{dv}}$  为  $t$  时刻能量转换设备输入能源购能成本;  $k_{e,t}^{\text{IDC}}$  为  $t$  时刻 IDC 专供电能单价, 由于 IDC 对电能质量要求较高, 因此其电能由供应商专供, 且单价略高于市场价格.

### 2.1.2 供应商

供应商通过售卖能源获利, 其可调节策略为售能价格, 构造其目标函数如下.

$$f_2 = \max \sum_{t=1}^T (I_t^E - G_t^E - Z_t^E) \quad (21)$$

式中:  $I_t^E$  表示  $t$  时刻供应商售能收益;  $G_t^E$  表示  $t$  时刻供应商能源生产成本, 通常包括燃煤费用等;  $Z_t^E$  表示  $t$  时刻供应商满意度成本.

$$I_t^E = \sum_{r \in K} k_{r,t}^{\text{E, sell}} P_{r,t}^E \Delta t + k_{e,t}^{\text{IDC}} P_{e,t}^{\text{IDC}} \Delta t \quad (22)$$

式中:  $k_{r,t}^{\text{E, sell}}$  表示  $t$  时刻供应商  $r$  类能源售卖单价;  $P_{r,t}^E$  表示  $t$  时刻供应商售卖的  $r$  类能源功率.

$$Z_t^E = \sum_{r \in K} a \left[ \left( \frac{k_{r,t}^{\text{E, sell}}}{\rho_r} \right)^b - 1 \right] \quad (23)$$

### 2.1.3 用户

用户为能源的使用者, 其可调节策略为购能方案, 构造其目标函数如下.

$$f_3 = \min \sum_{t=1}^T (C_t^U + G_t^U + D_t) \quad (24)$$

式中:  $C_t^U$  表示  $t$  时刻用户购能成本;  $G_t^U$  表示  $t$  时刻用户购买 IDC 服务的成本;  $D_t$  表示  $t$  时刻用户舒适度成本.

$$G_t^U = k_t^{\text{IN}} |\delta_t| \quad (25)$$

$$D_t = \sum_{r \in K} D_{r,t} + \sigma t^d \quad (26)$$

式中:  $D_{r,t}$  表示  $t$  时刻用户  $r$  类能源的满意度成本;  $\sigma$  为用户延时舒适度系数;  $t^d$  表示用户全时段享受 IDC 服务的平均延迟.

$$D_{r,t} = \frac{y_k}{2L_{r,t}} (P_{r,t}^U)^2 - y_k P_{r,t}^U + \frac{y_k}{2} L_{r,t} \quad (27)$$

式中:  $P_{r,t}^U$  表示  $t$  时刻用户需求响应后的  $r$  类能源功率;  $y_k$  为舒适度系数;  $L_{r,t}$  表示  $t$  时刻用户初始  $r$  类能源用能需求.

## 2.2 约束条件

### 2.2.1 能量平衡约束

#### (1) 电能平衡约束为

$$P_{e,t}^U = P_{e,t}^{\text{BUY}} + P_{e,t}^E + P_{e,t}^S - P_{e,t}^{\text{IDC}} \quad (28)$$

式中  $P_{e,t}^{\text{BUY}}$  表示  $t$  时刻自电网购买的电功率.

#### (2) 热能平衡约束为

$$P_{h,t}^U = P_{h,t}^{\text{BUY}} + P_{h,t}^E + P_{h,t}^S + P_{h,t}^{\text{IDC}} \quad (29)$$

式中  $P_{h,t}^{\text{BUY}}$  表示  $t$  时刻自热网购买的热功率.

#### (3) 天然气平衡约束为

$$P_{s,t}^U = P_{s,t}^E + P_{s,t}^S \quad (30)$$

### 2.2.2 设备运行约束

#### 1) 考虑动态效率的能量转换设备约束

当微网工况发生变化时, 为保证优化计算准确度, IDC 将通过式 (6) 实时更新能量转换设备优化参数. 建立能量转换设备通用模型如下.

$$\begin{cases} P_{i,t}^{\text{OUT}} = \eta(\chi_t) P_{i,t}^{\text{IN}} \\ P_{i,t}^{\text{IN}} \leq \underline{P}_i^{\text{IN}} \leq \overline{P}_i^{\text{IN}} \end{cases} \quad (31)$$

式中:  $P_{i,t}^{\text{OUT}}$  表示  $t$  时刻能量转换设备  $i$  的输出功率;  $\eta(\chi_t)$  表示能量转换设备动态效率;  $P_{i,t}^{\text{IN}}$  表示  $t$  时刻能量转换设备  $i$  的输入功率;  $\underline{P}_i^{\text{IN}}$  和  $\overline{P}_i^{\text{IN}}$  分别表示能量转换设备  $i$  的输入功率上、下限.

#### 2) PG、WTG 约束

$$0 \leq P_{i,t} \leq P_{i,t}^{\text{max}} \quad (32)$$

式中:  $P_{i,t}$  表示 PG 或 WTG 设备  $i$  的输出功率;  $P_{i,t}^{\text{max}}$  表示该设备在  $t$  时刻的最大输出功率.

## 3 分级式博弈求解算法

为提升 IDC 微网多主体优化计算的精度和速度, 进而提升系统的优化调度效果, 文中将基于 Nash 均衡原理重构目标函数, 并将多主体目标函数整合为一, 从而提出一种分级式博弈求解算法.

### 3.1 目标函数重构

Nash 均衡原理认为: 若任意主体不能仅通过改变自身策略提升收益, 则此时各主体策略组合为当前状态下的一组 Nash 均衡解<sup>[19]</sup>. 因此, 多主体博弈求解时, 其收敛条件并非某主体获取最大收益. 为方便求解, 文中提出目标函数重构方法如下.

$$I_j^{\text{WC}} = \frac{|I_j^{\text{N}} - I_j^{\text{max}}|}{I^*} \quad (33)$$

式中:  $I_j^{\text{WC}}$  表示重构后主体  $j$  的博弈目标函数;  $I_j^{\text{N}}$  表示当前解下主体  $j$  的实际收益;  $I_j^{\text{max}}$  表示其余主体策略不变的情况下, 仅优化主体  $j$  策略时主体  $j$  的最大收益;  $I^*$  为基准值, 需为正数.

上述博弈目标函数内含最优值, 每次计算其值时的步骤如下.

**步骤 1** 确认 IDC 微网所有利益主体类型, 对各主体进行编号处理, 确定各主体策略维度及可用策略

空间.

步骤 2 令  $j=1$ , 获取主体数量  $m$ .

步骤 3 选定主体  $j$ , 计算主体  $j$  当前解下收益  $I_j^N$ .

步骤 4 将除选定主体  $j$  以外的其余主体策略均固定不变, 仅优化选定主体  $j$  的策略, 获取其最大收益  $I_j^{\text{MAX}}$ .

步骤 5 判断  $j$  是否等于  $m$ , 若否, 令  $j=j+1$ , 并跳转至步骤 3; 若是, 跳转至步骤 6.

步骤 6 统计当前解下各主体收益  $I_j^N$  及仅优化该主体策略时各主体的最大收益  $I_j^{\text{max}}$ , 利用式 (33) 计算各主体博弈目标函数.

显然, 当主体  $j$  博弈目标函数  $I_j^{\text{WC}} = 0$  时, 主体  $j$  不能仅通过改变自身策略提升收益, 即对于主体  $j$  而言, 当前解为 Nash 均衡解.

至此, 主体  $j$  是否运行于 Nash 均衡点可通过式 (33) 是否为 0 判断. 博弈目标函数计算流程如图 3 所示.

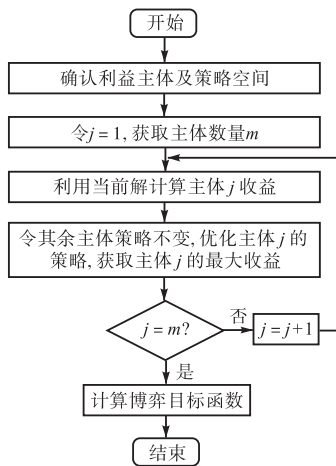


图 3 博弈目标函数计算流程

Fig.3 Flow chart of game objective function calculation

### 3.2 多主体目标函数整合

基于第 3.1 节所重构博弈目标函数, 将 IDC 微网内各主体博弈目标函数整合为一个目标函数, 即

$$I = \begin{cases} \sum_{j=1}^m \delta_1 & \varepsilon_2 \leq I_j^{\text{WC}} < \varepsilon_1 \\ \sum_{j=1}^m \delta_2 & \varepsilon_3 \leq I_j^{\text{WC}} < \varepsilon_2 \\ \vdots & \vdots \\ \sum_{j=1}^m \delta_i & \varepsilon_{i+1} \leq I_j^{\text{WC}} < \varepsilon_i \\ \vdots & \vdots \\ \sum_{j=1}^m \delta_n & I_j^{\text{WC}} < \varepsilon_n \end{cases} \quad (34)$$

式中:  $I$  表示分级式博弈求解算法目标函数;  $m$  表示主体数量;  $n$  为分级式优化方法的级数, 需依据具体场景设置为合适的正整数;  $\delta_i (i=1, 2, \dots, n)$  表示分级奖励值, 对于任意  $i (i=1, 2, \dots, n-1)$  需满足  $\delta_i < \delta_{i+1}$ , 通常将  $\delta_n$  设置为 1, 此时收敛曲线能够直观展示该微网达到 Nash 均衡的主体数量;  $\varepsilon_i (i=1, 2, \dots, n)$  表示分级误差限, 对于任意  $i (i=1, 2, \dots, n-1)$  需满足  $\varepsilon_i > \varepsilon_{i+1}$ . 在微网博弈求解中,  $I$  为全系统需最大化的目标函数, 每次计算  $I$  的数值时, 均需通过第 3.1 节的方法计算微网全部主体的博弈目标函数  $I_j^{\text{WC}}$ .

分级式博弈求解算法流程如图 4 所示, 具体步骤如下.

步骤 1 设定多主体博弈目标精度及最大迭代次数  $k'$ .

步骤 2 在各主体策略空间内选取初始解.

步骤 3 计算当前分级式迭代目标函数  $I$ , 并令当前迭代步数  $\tau=1$ .

步骤 4 优化目标函数  $I$ , 求其最大值.

步骤 5 判断迭代步数  $\tau$  是否达到最大步数  $k'$  或当前解下目标函数  $I$  是否等于  $m\delta_n$ , 若否, 令  $\tau = \tau + 1$ , 并转入步骤 4; 若是, 转入步骤 6.

步骤 6 输出博弈结果.

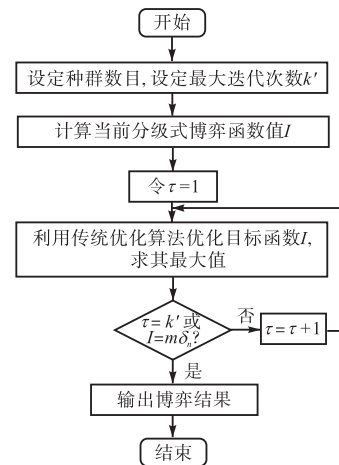


图 4 分级式博弈求解算法流程

Fig.4 Flow chart of hierarchical game-solving algorithm

至此, 微网内所有主体的多主体博弈问题转化为式 (34) 的最大化问题.

### 3.3 算法评估指标

为检验上述分级式博弈求解算法的计算精度, 文中采用 1-范数作为算法评估指标, 则有

$$D = \frac{\|X - X^*\|_1}{D^*} \quad (35)$$

式中:  $D$  表示算法误差;  $X$  表示待评估算法计算所得

的 Nash 均衡解向量； $X^*$ 表示基于博弈定义通过遍历、试凑方法获取的真实 Nash 均衡解向量； $D^*$ 表示算法误差基准值，为正常数。

### 4 算例分析

为验证所提方法的有效性和优越性，文中在图 1 所示场景进行仿真。其中，IDC 微网一天内的电负荷初始值、热负荷初始值、气负荷初始值、风机预测值及光伏预测值分别如表 1 所示；设备固定参数如表 2 所示；考虑 CHP、GB、P2G 3 类设备受负载率的影响，其数据如图 5 所示<sup>[26]</sup>；设立服务商各类能源价格最小值为 85 \$/MW，最大值为 90 \$/MW；设置仿真时长为 24 h；IDC 一天内各类数据负荷量如图 6 所示。

表 1 24 h IDC 微网运行数据

Tab.1 24 h IDC microgrid operation data

仿真时段/h	电负荷初始值/MW	热负荷初始值/MW	气负荷初始值/MW	风机预测值/MW	光伏预测值/MW
1	1.31	3.00	0.55	3.40	0
2	1.36	2.75	0.62	3.25	0
3	1.44	2.75	0.74	3.50	0
4	1.52	2.50	0.95	3.10	0
5	1.69	2.50	0.90	2.60	0
6	1.71	2.25	1.00	2.40	0
7	2.22	2.50	0.95	1.90	0.10
8	2.43	2.40	0.92	1.40	0.60
9	2.54	2.30	1.05	1.30	0.50
10	2.60	1.80	0.99	0.50	0.50
11	2.58	2.00	0.85	0.55	0.70
12	2.47	2.10	0.83	0.70	0.70
13	2.49	2.15	0.78	0.55	0.70
14	2.33	2.00	0.82	0.50	0.70
15	2.26	1.94	0.67	0.55	0.50
16	2.24	2.50	0.58	0.75	0.40
17	2.35	2.20	0.65	1.00	0.30
18	2.23	2.40	0.99	1.00	0.20
19	2.49	2.30	1.02	1.00	0
20	2.60	2.01	1.20	1.10	0
21	2.50	1.95	0.73	1.20	0
22	2.03	2.38	0.69	2.50	0
23	1.85	2.97	0.66	3.10	0
24	1.69	2.25	0.59	3.50	0

表 2 IDC 微网设备固定参数

Tab.2 IDC microgrid device fixed parameters

设备名称	效率
P2G	0.70
GB	0.90
CHP(热)	0.65
CHP(电)	0.25

#### 4.1 模型对比分析

为验证文中所提考虑多主体博弈的 IDC 微网优

化调度模型的优势，设定表 3 中 4 种模型对比场景。

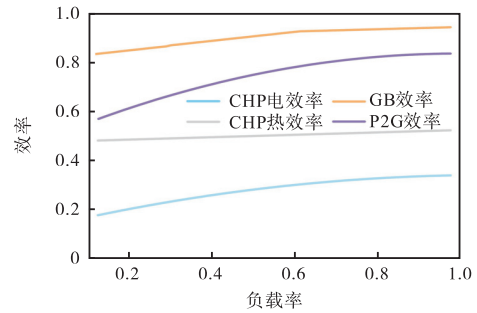


图 5 设备效率数据

Fig.5 Device efficiency data

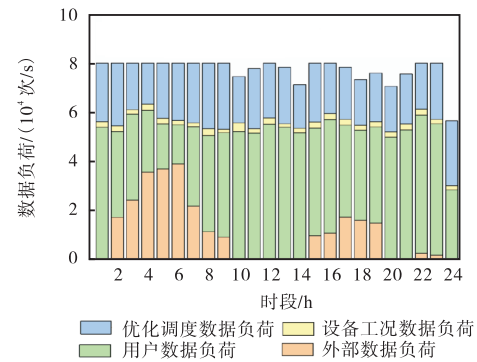


图 6 IDC 数据负荷

Fig.6 IDC data load

表 3 模型对比场景

Tab.3 Comparison of model scene

场景	场景描述
1	微网内不装设 IDC，数据负荷由微网外部数据服务商处理，不考虑多主体博弈
2	微网内装设 IDC，不考虑多主体博弈
3	微网内不装设 IDC，数据负荷由微网外部数据服务商处理，考虑多主体博弈
4	微网内装设 IDC，考虑多主体博弈(本文方法)

场景对比结果如表 4 所示，由表 4 可得：与场景 2 相比，场景 4 考虑了供应商、服务商、用户间复杂博弈关系，使各主体收益显著上升，其中服务商收益上升约 20.41%；与场景 3 相比，场景 4 使用内部 IDC 开展数据服务，其收益显著上升。

表 4 场景对比结果

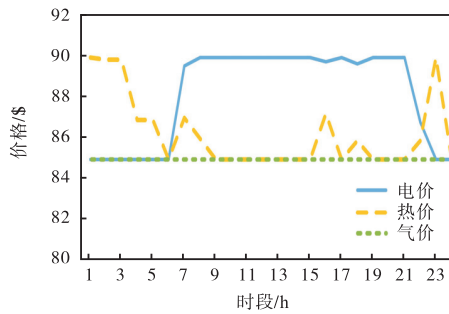
Tab.4 Comparison of results under scenes

场景	供应商收益/\$	服务商收益/\$
1	-174.099 5	-3 338.71
2	-174.099 5	15 778.80
3	307.494 3	856.78
4	307.494 3	18 999.50

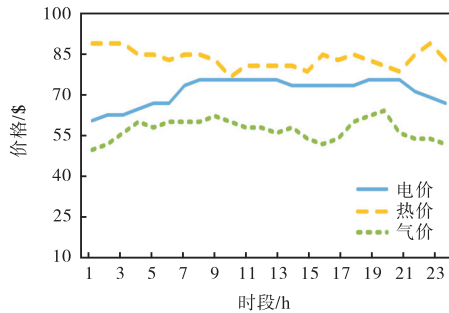
#### 4.2 博弈结果分析

为展示服务商、供应商、用户能源价格及能源用量博弈结果，绘制服务商能源价格曲线、供应商能源价格曲线及用户能源用量曲线如图 7 所示。

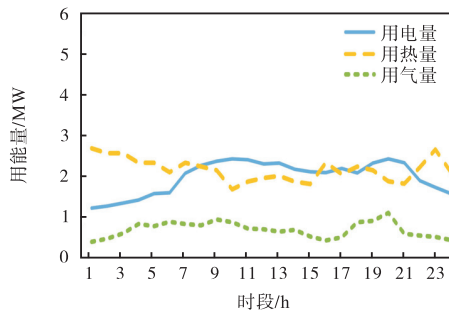
由图 7 分析可得:为提升自身收益、降低售能满意度成本,服务商、供应商趋向于在用户初始负荷较高时提升能源价格,在用户初始负荷较低时降低能源价格,因此其价格曲线与用户初始负荷曲线趋势基本相同;由于部分时刻用户初始负荷较低或较高,服务商能源价格达到下限或上限,此时其价格分别取 85 \$/MW 或 90 \$/MW;为降低自身用能成本、提升用能舒适度,用户趋于在价格较高时降低用能量,并在价格较低时提升用能量。



(a) 服务商能源价格曲线



(b) 供应商能源价格曲线



(c) 用户能源用量曲线

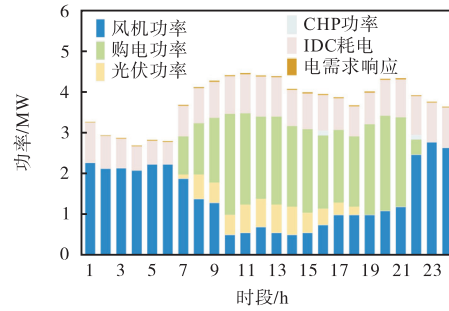
图 7 多主体博弈结果

Fig.7 Multi-agent game results

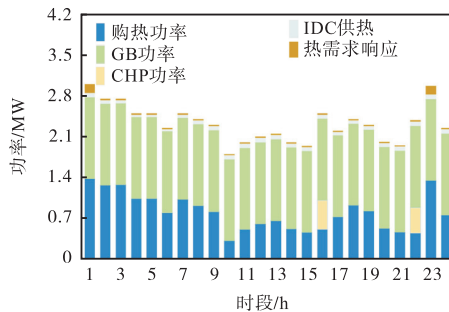
### 4.3 能量供给结果分析

为展示 IDC 微网能源调度结果,分别绘制电能供给曲线、热能供给曲线及天然气供给曲线如图 8 所示,分析可得:由于光伏、风机无购能成本,微网近乎完全消纳光伏、风机功率;文中较少调用 P2G、CHP 设备,但使用 GB 设备较多,这是由于 P2G、GB、

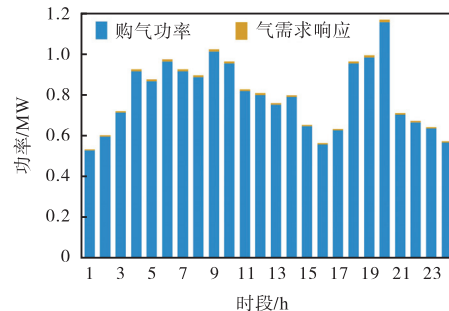
CHP 设备效率与其负载率有关(具体如图 5 所示),当某设备运行于较低负载率时,其设备效率较低, IDC 将通过式(6)修正优化调度模型,进而引导微网优先使用效率更高的能量转换设备;IDC 电能消耗、热能生产功率主要受微网数据负荷量影响,因此其变化趋势基本相同。



(a) 电能供给结果



(b) 热能供给结果



(c) 天然气供给结果

图 8 能源供给结果

Fig.8 Energy supply results

### 4.4 算法对比分析

为验证文中所提分级式博弈求解算法的优越性,应用文中算法与文献[13, 17-18]算法开展对比. 仿真采用处理器为 Intel i7-9750H、内存为 16GB 的计算机,计算误差及计算时间统计结果如图 9 所示。

由图 9 可得,相较于对比算法,在文中场景下,所提分级式博弈求解算法能够为 IDC 微网减少 62.1% 以上的计算误差,缩短 9.8% 以上的计算时间. 由于部分算法存在随机性,上述计算误差与计算

时间数据均为 10 次计算的平均值。

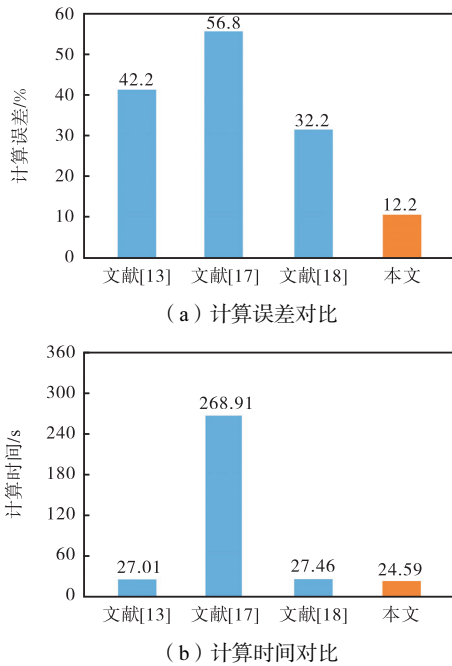


图 9 算法对比结果

Fig.9 Comparison results among algorithms

#### 4.5 算法收敛曲线

考虑到电、热、气市场交易的独立性,文中求解多主体博弈时分别将供应商、服务商、用户的电、热、气决策设置不同主体执行,因此文中场景中共计 9 个主体。同时,文中将分级式博弈求解算法的  $\delta_n$  参数设置为 1,此时目标函数  $I$  取整后得到数值即为该系统达到 Nash 均衡的主体数目。

分级式博弈求解算法收敛曲线如图 10 所示。

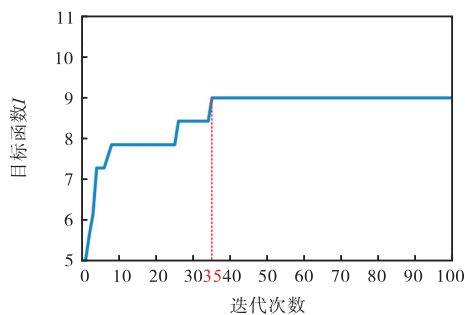


图 10 算法收敛曲线

Fig.10 Convergence curve of algorithm

由图 10 可得,文中所提算法令 IDC 微网内 9 个主体在第 35 次迭代时收敛,所有主体计算误差在设定值以内。

## 5 结论

为提升 IDC 微网内各主体运行收益,提高多主

体博弈求解的精度和速度,文中提出一种考虑多主体博弈的 IDC 微网优化调度方法。仿真结果表明,所提方案具有如下优势。

(1) 与无博弈模型相比,所提优化调度模型考虑了 IDC 微网内供应商、服务商、用户间的博弈互动,使各主体收益显著上升,其中服务商收益提升约 20.41%。

(2) 与传统优化算法相比,在文中场景下,所提分级式博弈求解算法通过重构并整合各主体目标函数,减少了 IDC 微网 62.1% 以上的计算误差,缩短了 9.8% 以上的计算时间。

本文虽然建立了详细的 IDC 微网多主体优化调度模型,但是尚未考虑多微网间的交互影响,下一阶段将对此展开详细研究。

#### 参考文献:

- [1] Yin X H, Ye C J, Ding Y, et al. Exploiting internet data centers as energy prosumers in integrated electricity-heat system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(1): 167-182.
- [2] 杨 挺, 张 剑, 蔡绍堂, 等. 计及隐私数据保护的多虚拟电厂协同调度方法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2024, 57(8): 836-846.  
Yang Ting, Zhang Jian, Cai Shaotang, et al. Collaborative scheduling method for multivirtual powerplants considering privacy data protection[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2024, 57(8): 836-846(in Chinese).
- [3] 赵倩宇, 韩照洋, 王守相, 等. 基于双智能体深度强化学习的交直流配电网经济调度方法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2024, 57(6): 624-632.  
Zhao Qianyu, Han Zhaoyang, Wang Shouxiang, et al. Method for optimal scheduling of AC/DC hybrid distribution network based on double-agent deep reinforcement learning[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2024, 57(6): 624-632(in Chinese).
- [4] 冯 成, 王 毅, 陈启鑫, 等. 能源互联网下的数据中心能量管理综述[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(7): 1-9.  
Feng Cheng, Wang Yi, Chen Qixin, et al. Review of energy management for data centers in energy internet [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 1-9(in Chinese).
- [5] Eric M, Arman S, Nuoa L, et al. Recalibrating global data center energy-use estimates[J]. Science, 2020,

- 367(6481): 984-986.
- [6] 吴刚, 高赐威, 陈宋宋, 等. 考虑需求响应的数据中心用电负荷优化研究综述[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3782-3788.  
Wu Gang, Gao Ciwei, Chen Songsong, et al. A survey on data center power load optimization considering demand response[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3782-3788(in Chinese).
- [7] 慈松, 刘前卫, 康重庆, 等. 从“信息-能量”基本关系看信息能源深度融合[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2289-2296.  
Ci Song, Liu Qianwei, Kang Chongqing, et al. Fundamental exploration into ICT-energy fusion[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2289-2296(in Chinese).
- [8] 耿圣杰, 贾燕冰, 江珂滕, 等. 电网数据中心服务器容量及其综合供能系统联合规划策略研究[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3281-3292.  
Geng Shengjie, Jia Yanbing, Jiang Keteng, et al. Joint planning strategy of grid data center server capacity and its integrated energy supply system[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3281-3292(in Chinese).
- [9] 刘成运, 孟超, 景锐, 等. A 级数据中心综合能源系统多目标优化设计和调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(14): 136-142.  
Liu Chengyun, Meng Chao, Jing Rui, et al. Multi-objective optimization design and scheduling of integrated energy system in A-level data center[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 136-142(in Chinese).
- [10] Mahdi G, Adam W, Hamed M. Energy portfolio optimization of data centers[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4): 1898-1910.
- [11] 华昊辰, 李宇童, 王同贺, 等. 一种基于混合随机  $H_2/H_\infty$  方法的能源互联网边缘计算系统控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 6875-6885.  
Hua Haochen, Li Yutong, Wang Tonghe, et al. A novel stochastic mixed  $H_2/H_\infty$  control strategy for energy internet edge computing system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6875-6885(in Chinese).
- [12] 陈敏, 高赐威, 陈宋宋, 等. 考虑数据中心用电负荷调节潜力的双层经济调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1301-1313.  
Chen Min, Gao Ciwei, Chen Songsong, et al. Bi-level economic dispatch modeling considering the load regulation potential of internet data centers[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1301-1313(in Chinese).
- [13] 肖迁, 李天翔, 贾宏杰, 等. 面向区域能源互联网的边云协同架构及其优化策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2248-2262.  
Xiao Qian, Li Tianxiang, Jia Hongjie, et al. Research on edge cloud collaboration architecture and optimization strategy for regional energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2248-2262(in Chinese).
- [14] 张衡, 张沈习, 程浩忠, 等. Stackelberg 博弈在电力市场中的应用研究综述[J]. 电工技术学报, 2022, 37(13): 3250-3262.  
Zhang Heng, Zhang Shenxi, Cheng Haozhong, et al. A state-of-the-art review on Stackelberg game and its applications in power market[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3250-3262(in Chinese).
- [15] Devika J, Kesanakurthy S. Game theoretical approach to novel reactive power ancillary service market mechanism[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 1298-1308.
- [16] Kenneth B, Hrvoje P, Helene L C, et al. On the interaction between aggregators, electricity markets and residential demand response providers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 840-853.
- [17] 向恩民, 高红均, 刘畅, 等. 基于供需双侧博弈互动的园区多能运营商能源交易优化决策[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2744-2757.  
Xiang Enmin, Gao Hongjun, Liu Chang, et al. Optimal decision of energy trading for community multi-energy operator based on game interaction with supply and demand sides[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2744-2757(in Chinese).
- [18] 李鹏, 吴迪凡, 李雨薇, 等. 基于谈判博弈的多微网综合能源系统多目标联合优化配置[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3680-3688.  
Li Peng, Wu Difan, Li Yuwei, et al. Multi-objective union optimal configuration strategy for multi-microgrid integrated energy system considering bargaining games[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3680-3688(in Chinese).
- [19] 张照贵. 经济博弈与应用[M]. 成都: 西南财经大学出版社, 2016.  
Zhang Zhaogui. Economic Game and Application[M]. Chengdu: Southwestern University of Finance and Economics Press, 2016(in Chinese).
- [20] Mrityunjay K M, Sriti S P. A game theoretic horizon

- decomposition approach for real-time demand-side management[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(5): 3532-3545.
- [21] Domenico C, Thulasi M. Distributed differential games for control of multi-agent systems[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2022, 9(2): 635-346.
- [22] 刘 洪, 李吉峰, 葛少云, 等. 基于多主体博弈与强化学习的并网型综合能源微网协调调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 40-48.  
Liu Hong, Li Jifeng, Ge Shaoyun, et al. Coordinated scheduling of grid-connected energy microgrid based on multi-agent game and reinforcement learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 40-48(in Chinese).
- [23] 孙庆凯, 王小君, 王 怡, 等. 基于多智能体 Nash-Q 强化学习的综合能源市场交易优化决策[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 124-133.  
Sun Qingkai, Wang Xiaojun, Wang Yi, et al. Optimal trading decision-making for integrated energy market based on multi-agent Nash-Q reinforcement learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 124-133(in Chinese).
- [24] 杨 楠, 李希喆, 刘 毅, 等. 电力市场环境下基于多边不完全信息演化博弈的配电网规划方法研究[J]. 电网技术, 2023, 47(11): 4658-4667.  
Yang Nan, Li Xizhe, Liu Yi, et al. Research on distribution network planning method based on multi-lateral incomplete information evolutionary game in power market[J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4658-4667(in Chinese).
- [25] 田立亭, 程 林, 李建林, 等. 考虑变工况特性的微能源系统优化规划(二)优化模型及方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(20): 17-23.  
Tian Liting, Cheng Lin, Li Jianlin, et al. Optimal planning of a micro-energy system considering off-design performance part two optimization model and method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 17-23(in Chinese).
- [26] 陈晚晴, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 考虑设备变工况特性的区域综合能源系统优化调度方法[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 951-958.  
Chen Wanqing, Mu Yunfei, Jia Hongjie, et al. Operation optimization method for regional integrated energy system considering part-load performances of devices[J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 951-958(in Chinese).
- [27] Liu S, Han S Y, Zhu S Y. Reinforcement learning-based energy trading and management of regional interconnected microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(3): 2047-2059.
- [28] Chen W, Liu L, Liu G P. Privacy-preserving distributed economic dispatch of microgrids: A dynamic quantization-based consensus scheme with homomorphic encryption[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(1): 701-713.
- [29] Tao Y C, Qiu J, Lai S Y, et al. Customer-centered pricing strategy based on privacy-preserving load disaggregation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(5): 3401-3412.
- [30] Miles A G, Chakhchoukh Y, Alam S M S. Robust distribution state estimation for reliable locational marginal pricing under cyber-attacks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(3): 4963-4974.
- [31] Xiao Q, Li T X, Jia H J, et al. Electrical circuit analogy-based maximum latency calculation method of internet data centers in power-communication network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2025, 16(1): 449-452.

(责任编辑:孙立华)