

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250299

面向多利益主体的港区电能双层协调优化策略研究

季振东¹, 黄立飞¹, 虞坚阳², 樊非¹, 吴炜², 李敏², 高海力², 柴婷逸²

(1. 南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094; 2. 国网江苏省电力有限公司常州供电分公司, 江苏 常州 213003)

摘要: 为应对高比例分布式能源接入对港区能源和多主体利益结构的改变, 提出一种面向多利益主体的港区电能双层协调优化策略。首先, 介绍了港区能源系统架构, 分析了各利益主体间的协调博弈过程。其次, 建立了港区电能双层协调优化调度模型。上层主体为政府, 通过制定合理的碳税政策实现下层整体成本的最小化。下层主从博弈的主体为港口集团和船东, 港口集团为领导者, 船东为跟随者。通过调整电能供需量来实现成本最小化, 在供需平衡时达到博弈均衡。然后, 分析了主从博弈模型的均衡条件和双层协调模型的具体求解方法。最后, 通过算例对比分析了3种方案, 验证了所提方法的经济性和环保性, 为制定合理的“电能调度-碳税制定-岸电定价”策略提供了可靠建议。

关键词: 港区; 多利益主体; 主从博弈; 电能调度; 碳税; 电价

Research on a bi-level coordinated optimization strategy of port-area electric energy considering multiple stakeholders

Ji Zhendong¹, Huang Lifei¹, Yu Jianyang², Fan Fei¹, Wu Wei², Li Min², Gao Haili², Chai Tingyi²

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Changzhou Power Supply Branch of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Changzhou 213003, China)

Abstract: To address the changes in port-area energy systems and multi-stakeholder benefit structure caused by the high proportion of distributed energy access, this paper proposes a bi-level coordinated optimization strategy for port-area electric energy considering multiple stakeholders. First, the energy system architecture of the port area is introduced, and the coordination game process among various stakeholders is analyzed. Second, a bi-level coordinated optimal scheduling model for port-area electric energy is established. The upper-level decision-maker is the government, which minimizes the overall cost at the lower level by formulating appropriate carbon tax policies. At the lower level, a master-slave game is formulated between the port group and shipowners, where the port group acts as the leader and the shipowners as followers. Cost minimization is achieved by adjusting electric energy supply and demand, and a game equilibrium is reached when the supply and demand are balanced. Then, the equilibrium conditions of the master-slave game model and the specific solution method for the bi-level coordination model are analyzed. Finally, three schemes are compared and analyzed through case studies, which verify the economy and environmental protection of the proposed method, providing reliable guidance for formulating coordinated strategies of “power dispatching-carbon tax formulation-shore power pricing”.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5400-202418219A-1-1-ZN).

Key words: port area; multiple stakeholders; master-slave game; electric energy scheduling; carbon tax; electricity price

0 引言

新世纪以来, 我国以海运为主的进出口贸易发展迅速。随着我国绿色港口政策^[1-3]的推进, 风机

(wind turbine, WT)、光伏(photovoltaic, PV)、储能系统(energy storage system, ESS)等分布式新能源^[4-6]及设备接入港区配电网成为趋势, 港口电气化迎来新的机遇。在新能源技术渗透过程中, 岸电系统(shore power system, SPS)^[7-8]的推广成为重要突破口。作为供给侧的港口通过岸电向停靠的船舶^[9]提供能量, 作为需求侧的船东可以以电代油, 既可以

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目资助(5400-202418219A-1-1-ZN)

减少燃料成本和碳排放成本, 同时也可以减轻对环境的污染。但岸电系统的引入也打破了港区各主体的利益结构, 使得实际推进时面临多重挑战^[10]: 港口需要对岸电基础设施进行大量投资, 船东也会因为用电成本和碳税征收的原因, 需要在用电与用油之间抉择, 这造成了港区岸电覆盖率不高或覆盖率高但使用率低的问题, 凸显了岸电激励策略(岸电补贴、船舶排队^[11])、政府碳税政策、电价机制、各利益主体协调机制、电能调度策略的不完善。

在港区能源与物流耦合调度综述方面, 文献[12]系统地对港口多能微网中能源与交通的协同优化进行了研究, 指出了港口需在多利益主体协调方面和不确定性分析^[13-16]方面进行研究。在多利益主体研究方面, 文献[17]提出了多利益主体参与的主动配电网双层联合优化调度策略, 提高电压质量的同时, 平衡了各主体的利益。文献[18]针对配电网与微电网分属不同利益主体的场景, 构建了双层优化模型, 提高了配电网电压稳定性。上述文献都是对多利益主体进行集中式的调节, 但各利益主体往往是各自独立、相互制约的关系, 不仅要从中角度的角度进行协调, 还要对各主体之间的矛盾进行研究。多利益主体博弈策略以协调各主体利益达到博弈均衡为最终目的。常用的博弈方法为主从博弈、合作博弈与非合作博弈。在主从博弈方面, 文献[19]提出一种基于多主体碳交易成本分摊机制的低碳经济调度策略, 构建以能源销售商为领导者、能源供应商和负荷聚合商为跟随者的主从博弈低碳经济调度模型, 促进各主体在碳减排方面的合作, 实现经济和环境效益双赢。文献[20]提出了一种考虑奖惩机制和碳排放限制的多主体主从博弈方法, 以能源管理者为领导者, 运营商和用户为跟随者, 建立了碳交易和博弈协同的低碳交互机制, 兼顾了经济性和环保性。文献[21]基于主从博弈和电价的需求侧响应, 提出了负荷聚合商、电动汽车、空调以及分布式能源运营商之间的协调模型, 降低了负荷峰谷并提高了新能源利用率。在合作博弈与非合作博弈方面, 文献[22]提出了峰谷电价和出力惩罚机制的非合作博弈模型, 通过纳什均衡平衡电网、新能源、储能三方的利益, 不仅提高了对新能源的消纳、投资者的积极性以及系统的鲁棒性, 同时也降低了成本。文献[23]通过合作博弈理论, 将新能源电站结合起来, 通过共享储能系统的资源和协调运营, 不仅增加了全站总收入, 同时个体电站也因此降低了成本, 实现了各站之间的互利共赢。

除了上述配网方面的研究, 博弈论也在在港口方面有所应用, 如: 政府补贴、交易定价、能源调

度。文献[24]研究了政府补贴通过优化机制、差异化设计及碳交易提升岸电推广效益。文献[25]基于博弈论构建了港口公路运输服务整合与定价模型, 通过合作定价可实现利润最大化。文献[26]构建了基于主从博弈理论的港区综合能源服务商与用户的博弈模型, 港区综合能源服务商作为领导者制定电、热、冷多能源的动态定价策略, 而其用户作为跟随者, 可以通过需求响应来调整负荷需求, 同时兼顾了低碳性和经济性。文献[27]针对港口与船舶能源协调优化及交易问题, 基于主从博弈构建了港口与船东间的双层优化模型, 港口作为领导者动态调整岸电价格与能源调度策略, 船舶作为跟随者优化用电成本与辅机发电量, 实现双方效益最大化并减少碳排放。

分析上述港口调度文献可以发现它们博弈过程都是港口与港口利益相关体之间的博弈, 这样只能保证在达到纳什均衡^[28]时个体利益达到相对最优, 并没有考虑如何通过外部协调使多利益主体的整体效益最大化。且没有考虑如岸电补贴、电船充电调度^[29]等诸多因素。

基于上述分析, 本文提出了一种面向多利益主体的港区电能双层协调优化日前调度策略。首先, 介绍了港区能源系统架构和协调优化过程。其次, 建立了港区电能协调优化调度模型, 政府凭借对碳税的调控, 对以港口集团为领导者、船东为跟随者的主从博弈进行协调。然后, 分析港口集团与船东之间博弈均衡的条件和多利益主体双层协调优化模型的求解方法。最后, 分3种方案进行了仿真对比, 验证了本文双层协调优化策略的有效性。

1 港区多利益主体分析

1.1 港区能源系统架构分析

本文提出的港区多利益主体协调博弈模型集成政府、港口集团的源荷储以及船东的可调节负荷于一体, 以政府协调为辅, 港口集团和船东之间的主从博弈为基础, 通过协调调度以实现港区经济、高效的合理供能, 其具体的架构如图1所示。

从图1可见, 政府向港口集团和船东发放碳税信息, 并接受港口集团的供电成本和船东的成本, 通过调节碳税大小来最小化港区和船东整体成本。港口集团中包括调度中心、风电和光伏发电装置、储能装置、岸电系统以及其他港区负荷, 其中, 调度中心是整个港区调度的核心, 其主要负责获得电网的实时电价、监测风电和光伏发电装置的发电信息。岸电系统作为船东和港口集团间的纽带, 港口不仅通过其向船东供能, 且也会根据岸电大小从政

府获得相应的补偿。同时,为满足场桥、岸桥等港区负荷和岸电系统,调度中心需要制定合适的港区电能调度以及岸电价格策略来最小化供电成本。此外,船东包括配备辅助发动机的电动船舶(简称带辅机电船)和纯电船。对于带辅机电船,船东基于碳税信息,在岸电使用和辅助发动机发电之间进行选择,同时考虑政府碳排放限制。对于纯电船,船东则需优化充电策略,优先在岸电价格较低时充电,以避免高峰期电价。综合以上两类船舶的特性,船东可制定相应策略以最小化自身成本。

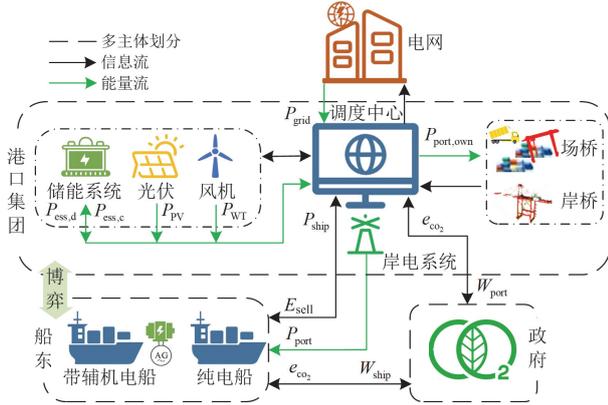


图1 港区架构示意图

Fig. 1 Port architecture diagram

1.2 港区多利益主体双层协调博弈过程

基于上述港区系统架构的分析,本文将整体的协调分为两层,在上层中,主体为政府,通过接收下层港口集团和船东上传的成本对碳税进行调节并下发,以实现整体成本最小化为目标。

在下层中,港口集团和船东各为主体,且由于港口集团在市场中占据主导,使得港口集团和船东形成了一主一从的博弈关系,港口集团为领导者,船东为跟随者。具体而言,当港口集团获得碳税信息后,港区电能调度中心将依据岸电价格决策储能系统的充放电计划及网购电量规模,结合风电与光伏实时发电量确定总供电量,随后将更新的岸电价格信息传递至船东;船东则基于岸电价格与碳税政策,对纯电船实施充电负荷时段平移调度,同时针对带辅机电船制定岸电使用与燃料发电的最优组合策略,通过成本最小化计算确定岸电需求量并回传至港口调度中心。港口调度中心根据船东岸电需求量重新制定岸电价格和供电策略,再次将岸电价格信息传至船东,以此循环,直至博弈达到均衡。在博弈均衡时,再将港口的供电成本和船东成本上传至政府,政府以此调节新的碳税并下发,直至整体成本达到最小不再变化。

2 港区多利益主体双层优化调度模型

2.1 上层调度数学模型

1) 目标函数:政府以港区和船东整体成本之和 W_{up} 最小为目标函数,其组成为港区成本和船东成本之和,其中,港区成本和船东成本由下层上传得到。

$$\min W_{up} = W_{port} + W_{ship} \quad (1)$$

式中: W_{port} 为港区供电成本; W_{ship} 为船东成本。

2) 优化变量:上层控制的优化变量为碳税 e_{co_2} 。

3) 约束函数:碳税需要保持在一定的范围内,如式(2)所示。

$$e_{co_2, \min} \leq e_{co_2} \leq e_{co_2, \max} \quad (2)$$

式中: $e_{co_2, \max}$ 、 $e_{co_2, \min}$ 分别为碳税的上、下限。

2.2 下层调度数学模型

在下层调度中,港区的电能来源包括光伏、风机、储能以及电网购电,负荷主要包括岸电负荷和自身用电负荷,船东的负荷包括带辅机电船和纯电船。

2.2.1 港区数学模型

1) 港区目标函数:港区以供电成本最小为目标函数,其组成包括岸电收益、分布式电源与储能的运行和维护成本、外部购电成本以及行为收益,可表示为

$$\min W_{port} = W_{grid} + W_{ess} + W_{om} - W_{sell} - W_{sub} - W_{con} \quad (3)$$

式中: W_{grid} 为外部购电成本; W_{ess} 为储能系统损耗; W_{om} 为设备运行维护成本; W_{sell} 为岸电售电收益; W_{sub} 为补贴收益; W_{con} 为行为收益。

(1) 外部购电成本:当港区自身光伏、风机以及储能不能满足其发电需求时,其需要向外部电网购电,购电产生的成本可表示为

$$W_{grid} = \sum_{t=1}^{24} E_{fs}(t) P_{grid}(t) \cdot \Delta t \quad (4)$$

式中: $E_{fs}(t)$ 为 t 时刻的分时电价; $P_{grid}(t)$ 为 t 时刻外部购电量; Δt 为一个调度周期。

(2) 储能系统损耗:为了增加港区系统在负荷高峰或者低谷时的调度灵活性,利用储能系统充放电也被考虑在内,其随时间的能量损失可以表示为

$$W_{ess} = \sum_{t=1}^{24} \mu_{ess} [P_{ess,d}(t) + P_{ess,c}(t)] \cdot \Delta t \quad (5)$$

式中: μ_{ess} 为储能损耗系数; $P_{ess,c}(t)$ 、 $P_{ess,d}(t)$ 分别为 t 时刻充、放电功率。

(3) 设备运行维护成本:光伏和风机运行中和维护时产生的费用,可表示为

$$W_{\text{om}} = \sum_{t=1}^{24} [P_{\text{PV}}(t)\mu_{\text{PV}} + P_{\text{WT}}(t)\mu_{\text{WT}}] \cdot \Delta t \quad (6)$$

式中: $P_{\text{PV}}(t)$ 、 $P_{\text{WT}}(t)$ 分别为光伏、风机 t 时刻的出力功率; μ_{PV} 、 μ_{WT} 分别为光伏、风机的运行维护系数。

(4) 岸电售电收益:

$$W_{\text{sell}} = \sum_{t=1}^{24} E_{\text{sell}}(t)P_{\text{port}}(t) \quad (7)$$

式中: $E_{\text{sell}}(t)$ 和 $P_{\text{port}}(t)$ 分别为迭代至收敛时, t 时刻的综合岸电售电电价以及港区对船东的电能供应量。

(5) 补贴收益: 政府会根据碳税的设定对港区供应岸电进行一定的补贴政策, 补贴量与岸电供应量存在一定的关系。

$$W_{\text{sub}} = \sum_{t=1}^{24} [\lambda_2 e_{\text{CO}_2}^2 + \lambda_1 e_{\text{CO}_2}] \cdot P_{\text{port}}(t) \quad (8)$$

式中: λ_2 、 λ_1 为补贴系数。

(6) 行为收益: 限制港区为谋取利益在低电价时过度减小发电的行为。

$$W_{\text{con}} = \sum_{t=1}^{24} [\sigma_2 P_{\text{port}}(t)^2 + \sigma_1 P_{\text{port}}(t)] \quad (9)$$

式中: σ_2 、 σ_1 为行为限制系数。

2) 港区优化变量: 港区优化变量为储能充、放电功率 $P_{\text{ess,c}}$ 、 $P_{\text{ess,d}}$ 和网购电量 P_{grid} , 为方便计算, 可也通过式(4), 将变量转化为港口岸电供应量 P_{port} 和储能充、放电量 $P_{\text{ess,c}}$ 、 $P_{\text{ess,d}}$ 。

3) 港区约束函数: 港区的约束中, 功率平衡约束、购电约束、储能约束以及岸电价格约束的表达式可参考文献[24], 岸电价格是通过平衡港区和船东电能的供需平衡得到的, 价格在第 k 次迭代的更新方式为

$$E_{\text{base},k}(t) = \gamma_{\text{base}} P_{\text{ship},k}(t) + E_{\text{fs}}(t) \quad (10)$$

$$E_{\text{tk},k}(t) = E_{\text{tk},k-1}(t) + \gamma_{\text{tk}} (P_{\text{ship},k}(t) - P_{\text{port},k}(t)) \quad (11)$$

$$E_{\text{sell},k}(t) = E_{\text{base},k}(t) + E_{\text{tk},k}(t) \quad (12)$$

式中: $E_{\text{base},k}(t)$ 、 $E_{\text{tk},k}(t)$ 、 $E_{\text{sell},k}(t)$ 分别为第 k 次迭代 t 时刻的基础电价、调控电价和综合岸电售电电价; γ_{base} 为关于基础电价的正参数; γ_{tk} 为调控系数; $P_{\text{ship},k}(t)$ 、 $P_{\text{port},k}(t)$ 分别为第 k 次迭代 t 时刻船东岸电需求量和港区对船东的电能供应量。

2.2.2 船东数学模型

1) 船东目标函数: 船东的目标函数为总成本最小, 其总成本 W_{ship} 包括岸电使用成本 W_{buy} 、辅机发

电成本 W_{ac} 以及碳排放成本 W_{CO_2} , 可表示为

$$\min W_{\text{ship}} = W_{\text{buy}} + W_{\text{ac}} + W_{\text{CO}_2} \quad (13)$$

(1) 岸电支出: 购买岸电的费用, 可表示为

$$W_{\text{buy}} = \sum_{t=1}^{24} E_{\text{sell}}(t)P_{\text{ship}}(t) \quad (14)$$

式中: $P_{\text{ship}}(t)$ 为迭代至收敛时, t 时刻船东的电能需求量。

(2) 带辅机电船发电成本: 由燃料费用决定, 而燃料费用由发电功率决定, 其中, 燃料耗量和辅机发电成本可分别表示为

$$M_{\text{ac}}(t) = m_2 P_{\text{ac}}^2(t) + m_1 P_{\text{ac}}(t) + m_0 \quad (15)$$

$$W_{\text{ac}} = \rho_{\text{ac}} \sum_{t=1}^{24} M_{\text{ac}}(t) \quad (16)$$

式中: $M_{\text{ac}}(t)$ 为带辅机电船发电的燃料耗量; $P_{\text{ac}}(t)$ 为 t 时刻辅机发电功率; m_2 、 m_1 、 m_0 为功率燃料系数; ρ_{ac} 为燃料价格系数。

(3) 碳排放成本: 由燃料耗量决定碳排放成本, 如式(17)所示。

$$W_{\text{CO}_2} = C_{\text{CO}_2} \cdot e_{\text{CO}_2} = \rho_{\text{CO}_2} \sum_{t=1}^{24} M_{\text{ac}}(t) \cdot e_{\text{CO}_2} \quad (17)$$

式中: C_{CO_2} 为碳排放量; ρ_{CO_2} 为燃料与碳排放的换算系数。

2) 优化变量: 带辅机电船的岸电需求量和纯电船的负荷平移量。

3) 约束函数: 包括带辅机电船发电约束、碳排放约束以及纯电船负荷平移约束, 其中, 带辅机电船发电约束和碳排放约束可参考文献[27]。

纯电船负荷平移约束为

$$P_{\text{ship}}(t) = P_{\text{ship,fj}}(t) + P_{\text{ship,cd}}(t) \quad (18)$$

$$\sum_{t=1}^{24} \Delta P_{\text{ship,cd}}(t) = 0 \quad (19)$$

$$P_{\text{ship,cd,min}} - P_{\text{ship,cd}} \leq \Delta P_{\text{ship,cd}} \leq P_{\text{ship,cd,max}} - P_{\text{ship,cd}} \quad (20)$$

式中: $P_{\text{ship,fj}}(t)$ 为带辅机电船的岸电需求; $P_{\text{ship,cd}}(t)$ 为纯电船负荷; $\Delta P_{\text{ship,cd}}(t)$ 为纯电船负荷平移量; $P_{\text{ship,cd,max}}$ 、 $P_{\text{ship,cd,min}}$ 分别为纯电船负荷量的最大值和最小值。

3 港区多利益主体双层优化调度模型求解

3.1 基本概念

根据上述分析, 由于港口集团在港区掌握主动权, 将港口集团作为领导者, 船东作为跟随者, 建立一主一从的主从博弈模型, 如式(21)所示。

$$G = \{M; \psi_{\text{port}}; \psi_{\text{ship}}; W_{\text{port}}; W_{\text{ship}}\} \quad (21)$$

上述博弈模型包含 3 个元素：参与者、策略、效用函数。

1) 参与者：港口集团和船东为博弈的参与者，其集合 $M = \{\text{port}, \text{ship}\}$ ；

2) 策略：领导者港口集团的策略为 24 h 港口岸电供应量和储能充放电量，以向量的形式可表示为 $\psi_{\text{port}} = (P_{\text{port}}, P_{\text{ess,c}}, P_{\text{ess,d}})$ ；船东的策略为岸电需求量和纯电船的负荷平移量，以向量形式可表示为 $\psi_{\text{ship}} = (P_{\text{ship}}, \Delta P_{\text{ship,cd}})$ 。

3) 效用函数：参与者的效益可用式(3)、式(13)表示。

主从博弈也叫斯塔克伯格博弈(Stackelberg)，当港口集团和船东的电能供需关系达到平衡，此时博弈也刚好达到了 Stackelberg 均衡^[30]。若 $(\psi_{\text{port}}^*, \psi_{\text{ship}}^*)$ 为上述主从博弈的均衡解，那么其应满足式(22)。

$$\begin{cases} W_{\text{port}}(\psi_{\text{port}}^*, \psi_{\text{ship}}^*) \leq W_{\text{port}}(\psi_{\text{port}}, \psi_{\text{ship}}^*) \\ W_{\text{ship}}(\psi_{\text{port}}^*, \psi_{\text{ship}}^*) \leq W_{\text{ship}}(\psi_{\text{port}}^*, \psi_{\text{ship}}) \end{cases} \quad (22)$$

3.2 多利益主体双层优化调度模型求解方法

基于双层协调优化模型，本节将在上述基础上利用淘金优化算法^[31]和 CPLEX 求解器对上下层模型进行求解，双层协调策略和流程如图 2、表 1 和表 2 所示。

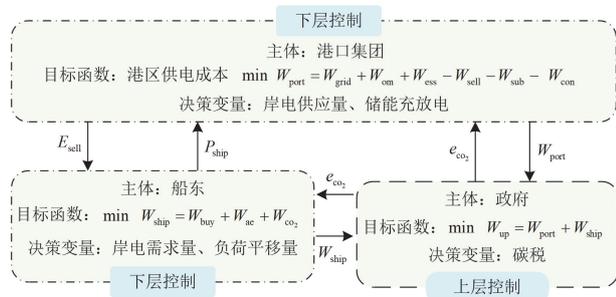


图 2 双层协调求解策略

Fig. 2 Two-level coordination solution strategy

表 1 上层控制淘金算法求解步骤

Table 1 Upper control gold rush optimizer solution steps
算法 1：上层利用淘金优化算法
1. 初始化碳税 e_{co_2} 、种群数量 N 、总迭代次数 K_1 以及当前迭代次数 $k_1 = 0$;
Repeat:
2. $k_1 = k_1 + 1$;
3. 将 e_{co_2} 下发至下层，下层根据算法 2 和算法 3，将得到的 W_{port} 、 W_{ship} 上传至上层；
4. 根据下层反馈数据，利用淘金优化算法以港区和船东整体成本最小化重新制定 e_{co_2} 并下传给下层；
End for $k_1 = K_1$;

表 2 下层控制 CPLEX 求解步骤

Table 2 CPLEX solution steps of lower-level control

算法 2：港区求解	算法 3：船东求解
1. 接收 e_{co_2} ，初始化电价 E_{sell} ，总迭代次数 K_2 ，当前迭代次数 $k_2 = 0$;	1. 接收 e_{co_2} 以及算法 2 的 E_{base} 和 E_{tk} ;
Repeat:	2. 以成本最小利用 CPLEX 求解器计算 $P_{\text{ship,ij}}$ 、 $\Delta P_{\text{ship,cd}}$ ，综合后得到 P_{ship} 、 W_{co_2} 以及船东成本 W_{ship} ;
2. $k_2 = k_2 + 1$;	3. 将 P_{ship} 回馈给算法 2;
3. 以供电成本最小为目标，利用 CPLEX 求解器得到岸电供应量 P_{port} 、外部购电成本 W_{grid} 以及岸电售电收益 W_{sell} ;	
4. 将电价传递给船东进行算法 3;	
5. 根据船东反馈的岸电需求量 P_{ship} ，结合 P_{port} 调整 E_{base} 和 E_{tk} ，得到新的岸电电价，再重新代入步骤 3 计算得到新的 P_{port} ;	
End for $k_2 = K_2$;	

4 仿真分析

4.1 参数设置

为验证本文港区双层协调调度策略的有效性，将所提方法应用于溧阳港案例进行研究，选取溧阳港某日 24 h 实际出力作为数据来源，以 1 h 为一个调度周期，相关柔性资源可见图 3，相关参数见表 3，分时电价见表 4。

4.2 仿真结果分析

为验证本文方案“双层协调优化”的效果，本节将其与以下两个方案进行对比分析。方案 1：单主从博弈；方案 2：未协调博弈。

图 4 为港区和船东负荷分布图，图 5 为港区与船东整体成本的收敛曲线，在第 8 次迭代已收敛，可见淘金算法的收敛速度较快。

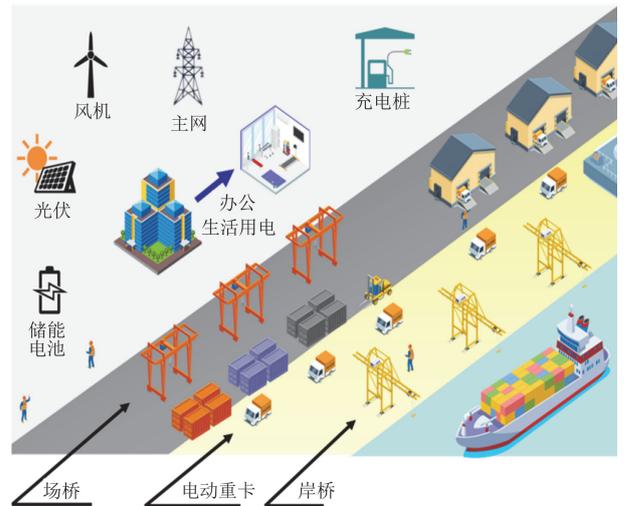


图 3 电气化示意图

Fig. 3 Electrification diagram

表 3 相关参数设置

Table 3 Related parameter settings

参数	设定值
上、下层迭代次数	$K_1 = 50, K_2 = 15$
种群数量	30
岸电功率上限/kW	700
碳排放上限/(kg/h)	1000
补贴系数	$\lambda_2 = -356, \lambda_1 = 30$
行为限制系数	$\sigma_2 = -0.002, \sigma_1 = 1.6$
燃料价格系数及功率燃料系数	$\rho_{ac} = 0.07, m_2 = 0.01, m_1 = 0.2, m_0 = 0.2$
碳排放换算系数	$\rho_{co_2} = 0.2587$
碳税上、下限/(元/kg)	$e_{co_2, max} = 0.1, e_{co_2, min} = 0.01$

表 4 分时电价

Table 4 Time-of-use electricity price

阶段划分	电价/(元/kWh)
谷时	0.4
平时	0.8
峰时	1.2

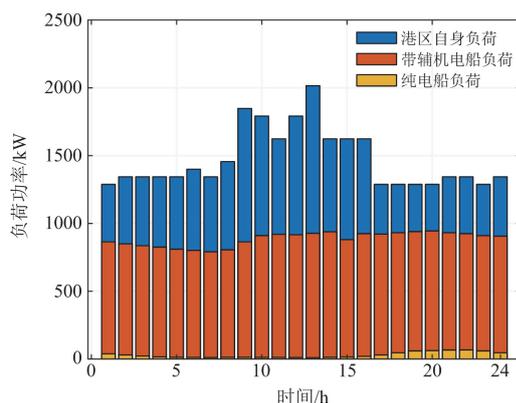


图 4 港区和船东负荷分布图

Fig. 4 Port area and shipowner load distribution map

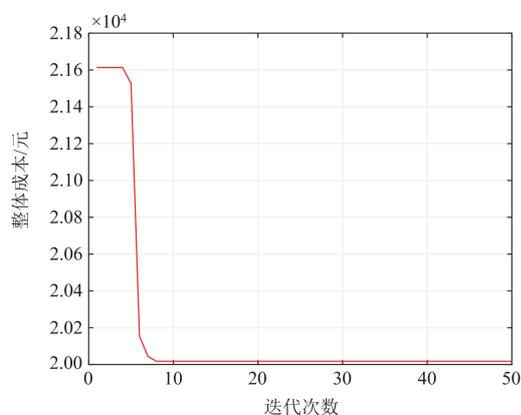
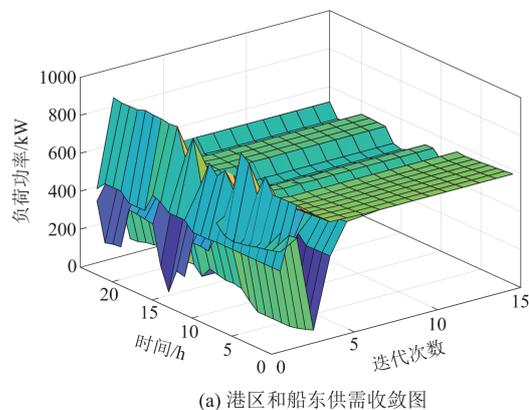


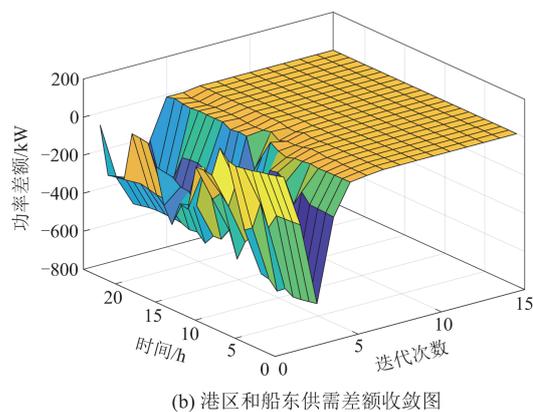
图 5 本文方案整体成本的收敛曲线

Fig. 5 Convergence curve of overall cost of the scheme proposed

为体现仿真结果,以本文方案中下层主从博弈的结果为例,图 6 为港区和船东 24 h 电能供需平衡收敛图,图 7 为港区和船东电能总供需平衡收敛图,可见两者在迭代结束时,港区电能供应量和船东岸电需求量在 24 h 内都达到平衡。



(a) 港区和船东供需收敛图



(b) 港区和船东供需差额收敛图

图 6 24 h 电能供需平衡收敛图

Fig. 6 Convergence diagram of 24-hour power supply and demand balance

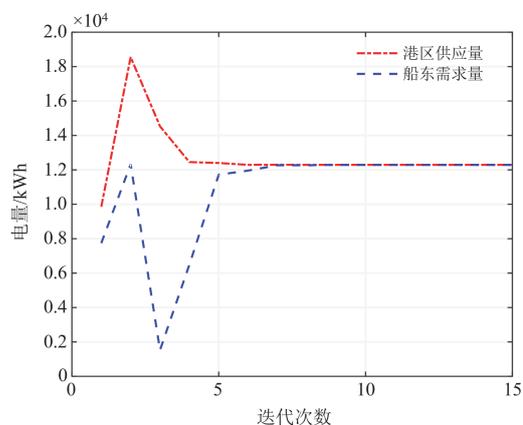


图 7 港区和船东电能总供需平衡收敛图

Fig. 7 Convergence diagram of total supply and demand balance of electric energy between port area and ship owner

图 8 为主从博弈前后港区和船东的成本收敛图，图 9 为 1 时段调控电价和基础电价的收敛图，图 10 则为最终的 24 h 综合电价策略图。

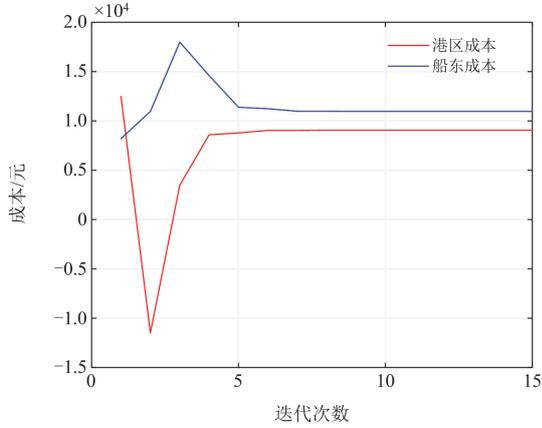


图 8 港区和船东的成本收敛图

Fig. 8 Convergence diagram of costs of the port area and shipowners

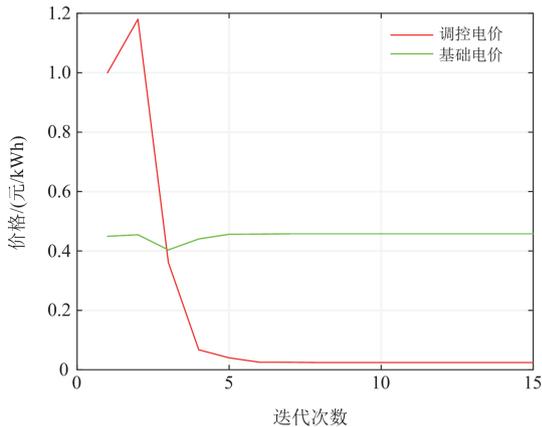


图 9 下层 1 时段电价收敛图

Fig. 9 Convergence diagram of lower 1-period price

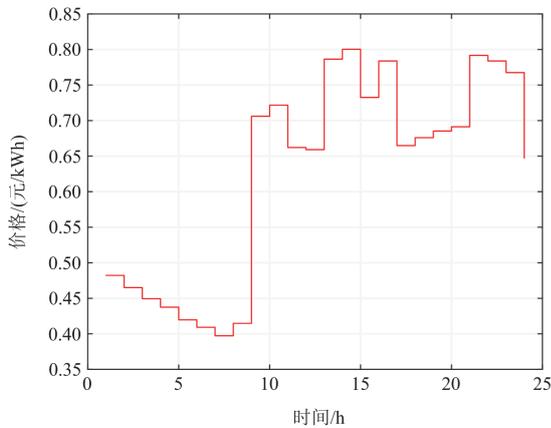


图 10 下层 24 h 综合电价

Fig. 10 Lower 24-hour comprehensive electricity price

图 11—图 13 为 3 种方案的港区电能调度图，从整体看，由于港区自身新能源发电量有限，且其自身负荷远大于船东用电负荷，所以港区的网购电量是主要能量来源，且考虑了对储能本身寿命的影响，将储能充放电次数限制在 10 次及以内，在图中也有所体现。

横向对比 3 种方案可发现：本文方案、方案 1 及方案 2 的船东岸电使用量呈递减趋势。方案 2 未协调博弈由于港口集团与船东之间没有博弈的机会，所以船东使用岸电的意愿较低，岸电使用量较少。方案 1 单主从博弈增加了博弈过程，相较于方案 2 未协调博弈，由于岸电价格降低，船东使用岸电量也随之提高。在本文方案中，政府通过碳税进一步协调，完善了港口的岸电补贴，限制了船东碳排放量，因此相比方案 1 单主从博弈，本文方案的岸电使用率提高，与政府建设岸电的预期目标相符。

由表 5 数据可知，在方案 2(未协调博弈)中，由于缺乏有效的约束机制，系统呈现较高的碳排放水

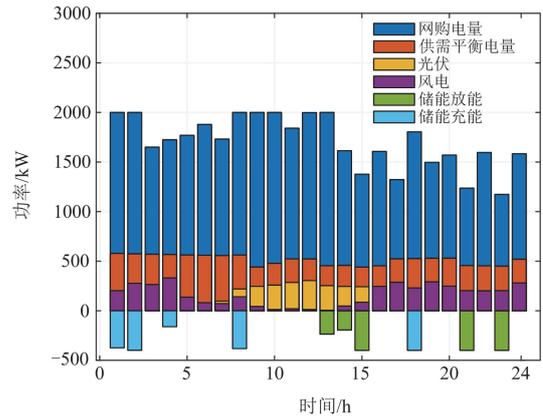


图 11 本文方案的港区电能调度图

Fig. 11 Port electric energy scheduling diagram of the scheme proposed

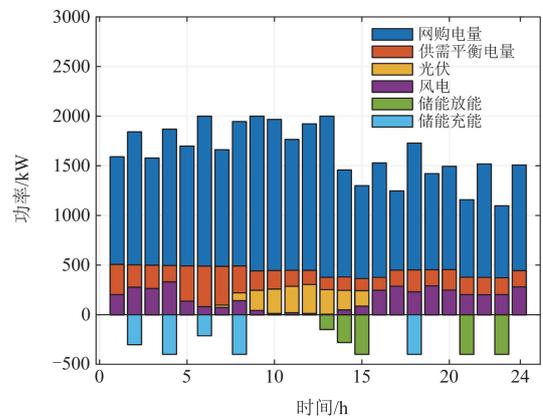


图 12 方案 1 的港区电能调度图

Fig. 12 Port electric energy scheduling diagram of scheme 1

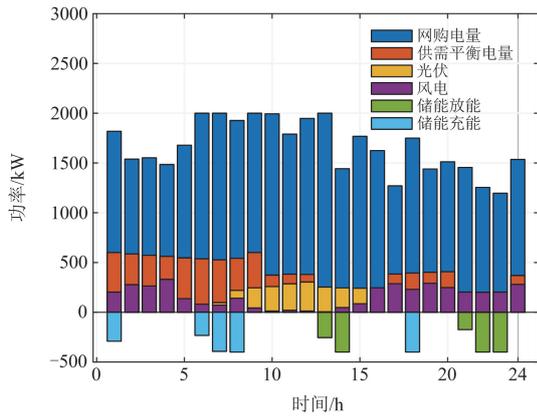


图 13 方案 2 的港区电能调度图

Fig. 13 Port electric energy scheduling diagram of scheme 2

表 5 各方案仿真结果对比

Table 5 Comparison of simulation results of various schemes

方案	整体 成本/元	港区 成本/元	船东 成本/元	碳排放/ kg
本文方案	20 018	9057	10 961	10 646
单主从博弈	23 225	12 557	10 668	14 675
未协调博弈	23 022	11 536	11 486	22 217

平, 同时船东成本、港区成本及整体运营成本均处于较高水平。相较于不进行协调博弈的方案 2, 方案 1 单主从博弈的整体成本和港区成本分别提高 0.9% 和 8.9%, 船东成本和碳排放量分别降低 7.1% 和 33.9%, 这说明两者博弈必然会损害一方利益而使另一方收益, 且整体成本的提高也说明了在双方博弈达到均衡时, 双方各自利益达到最优不代表整体利益就是最优。

虽然方案 1 单主从博弈在降低碳排放方面取得的效果显著, 但它并未考虑港区和船东整体的利益, 在降低碳排放的同时也提高了整体的成本, 相比之下, 本文方案在方案 1 的基础上通过碳税优化机制, 实现了整体成本、港区成本和碳排放量的显著下降 (分别为 13.8%、27.9% 和 27.5%), 船东成本虽略微上升 1.2%, 但这在碳排放和成本降幅的补偿下凸显了碳税调控的有效性, 从而达成了系统性的经济与环境协同优化。

5 结论

针对港区多利益主体协调问题, 本文提出了一种面向多利益主体的港区电能双层协调优化策略。通过分析港区多利益主体关系, 建立了可协调的上下层模型, 并利用淘金优化算法和 CPLEX 求解器对模型进行求解。其中, 上层中, 政府通过优化碳税以达到整体成本最小化, 下层中, 船东通过

岸电需求量和负荷平移量来响应港区电价, 港区通过修改电价和电能供应量来响应船东岸电需求, 上下层相互协调, 仿真结果表明了本文提出的方案既有效协调了港区与船东之间的利益问题, 减少了碳排放, 促进了港区的绿色发展, 也降低了港区和船东的整体成本, 为港区资源调度、电价制定以及政府碳税的制定提供了有效参考。未来可考虑更多如分布式运行商、储能运营商等利益主体、船舶停泊费和装卸费等影响交通的因素来完善模型。

参考文献

- [1] 方斯顿, 赵常宏, 丁肇豪, 等. 面向碳中和的港口综合能源系统(一): 典型系统结构与关键问题[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 114-135.
FANG Sidun, ZHAO Changhong, DING Zhaohao, et al. Port integrated energy systems toward carbon neutrality (I): typical topology and key problems[J]. Proceedings of the CESS, 2023, 43(1): 114-135.
- [2] 方斯顿, 赵常宏, 丁肇豪, 等. 面向碳中和的港口综合能源系统(二): 能源-交通融合中的柔性资源与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(3): 950-969.
FANG Sidun, ZHAO Changhong, DING Zhaohao, et al. Port integrated energy systems toward carbon neutrality (II): flexible resources and key technologies in energy-transportation integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 950-969.
- [3] 李昊, 邵能灵, 余墨多, 等. 港口能源-物流耦合优化调度模型与方法综述[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(14): 1-21.
LI Hao, TAI Nengling, YU Moduo, et al. Review on energy-logistics coupled optimal dispatching models and methods for port[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(14): 1-21.
- [4] 汤明润, 李若昶, 程晓钰, 等. 基于博弈论-改进云模型的新能源电力系统适应性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(7): 40-51.
TANG Mingrun, LI Ruoyang, CHENG Xiaoyu, et al. Adaptability evaluation of new energy power system based on game theory and improved cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(7): 40-51.
- [5] 李明扬, 张智. 基于强化学习的含分布式风-光-储虚拟电厂优化调度[J]. 智慧电力, 2024, 52(8): 50-56.
LI Mingyang, ZHANG Zhi. Optimal dispatch of distributed wind-solar-storage virtual power plants based on reinforcement learning[J]. Smart Power, 2024, 52(8): 50-56.
- [6] 李佳蔚, 张冠宇. 大规模分布式新能源接入对省级电网稳定性影响[J]. 中国电力, 2024, 57(6): 174-180.
LI Jiawei, ZHANG Guanyu. Impact of large scale

- distributed new energy access on provincial power grid stability[J]. *Electric Power*, 2024, 57(6): 174-180.
- [7] 姜昊, 孙毅超, 张艺凡, 等. 集群式岸电能量路由器供能精细化就地管控策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(11): 31-41.
JIANG Hao, SUN Yichao, ZHANG Yifan, et al. Refined local energy management strategy for clustered shore power energy routers[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(11): 31-41.
- [8] 贾俊国, 陈晓楠, 房鑫炎, 等. 基于多源融合的船岸供电系统协调运行优化策略[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(2): 108-114.
JIA Junguo, CHEN Xiaonan, FANG Xinyan, et al. Research on coordinated operation optimization of ship-shore power supply system based on multi-source fusion[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(2): 108-114.
- [9] 周荔丹, 许健, 姚钢, 等. 船舶综合能源管理系统研究综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(13): 171-186.
ZHOU Lidan, XU Jian, YAO Gang, et al. Review of integrated energy management systems for a marine microgrid[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(13): 171-186.
- [10] 张沈习, 宋琪, 程浩忠, 等. 考虑能流-物流耦合的港口综合能源系统规划关键技术及挑战[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(19): 7616-7636.
ZHANG Shenxi, SONG Qi, CHENG Haozhong, et al. Key technologies and challenges on planning of port integrated energy system considering energy flow-logistics coupling[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(19): 7616-7636.
- [11] HUANG Yiwen, HUANG Wentao, XU Yan, et al. A hierarchical pricing strategy for shore-to-ship power services considering ship behaviors[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2024, 9(6): 1-15.
- [12] 侯慧, 谢应彪, 赵波, 等. 能源与交通耦合的港口多能微网优化调度综述[J]. *电力自动化设备*, 2025, 45(3): 50-63.
HOU Hui, XIE Yingbiao, ZHAO Bo, et al. Review of optimal scheduling for port multi-energy microgrid with energy and transportation coupling[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2025, 45(3): 50-63.
- [13] 张程, 江炜龙, 罗玉锦, 等. 考虑风光不确定性的多数数据中心微网与共享储能协同优化运行[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(4): 72-84.
ZHANG Cheng, JIANG Weilong, LUO Yujin, et al. Collaborative optimal operation of multiple data center microgrids and shared energy storage considering wind power and photovoltaic uncertainty[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(4): 72-84.
- [14] 宋天立. 计及需求响应的港口综合能源系统研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
SONG Tianli. Study on integrated port energy system considering demand response[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [15] 周迦琳, 朱继忠, 董瀚江, 等. 考虑源-荷不确定性的微能源网日前鲁棒优化调度[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(4): 2-12.
ZHOU Jialin, ZHU Jizhong, DONG Hanjiang, et al. Day-ahead robust optimal dispatch of micro-energy networks considering source-load uncertainty[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(4): 2-12.
- [16] HAN Haiteng, XU Yiteng, WU Chen, et al. Nash equilibrium-based two-stage cooperative operation strategy for multi-microgrids considering uncertainty[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2024, 9(6): 1-16.
- [17] 黄伟, 李宁坤, 李玟萱, 等. 考虑多利益主体参与的主动配电网双层联合优化调度[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(12): 3418-3428, 3669.
HUANG Wei, LI Ningkun, LI Wenxuan, et al. Bi-level joint optimization dispatch of active distribution network considering the participation of multi-stakeholder[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(12): 3418-3428, 3669.
- [18] 黄张浩, 张亚超, 郑峰, 等. 基于不同利益主体协调优化的主动配电网日前-实时能量管理方法[J]. *电网技术*, 2021, 45(6): 2299-2308.
HUANG Zhanghao, ZHANG Yachao, ZHENG Feng, et al. Day-ahead and real-time energy management for active distribution network based on coordinated optimization of different stakeholders[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(6): 2299-2308.
- [19] 黄松涛, 董金星, 赵雪楠, 等. 考虑多主体碳交易成本分摊的综合能源系统低碳经济调度[J]. *电力工程技术*, 2025, 44(3): 120-130.
HUANG Songtao, DONG Jinxing, ZHAO Xuenan, et al. Low-carbon economic dispatch of an integrated energy system considering carbon trading cost-sharing among multiple principals[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2025, 44(3): 120-130.
- [20] 王瑞, 程杉, 汪业乔, 等. 基于多主体主从博弈的区域综合能源系统低碳经济优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(5): 12-21.
WANG Rui, CHENG Shan, WANG Yeqiao, et al. Low-carbon and economic optimization of a regional integrated energy system based on a master-slave game with multiple stakeholders[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(5): 12-21.

- [21] 龚诚嘉锐, 林顺富, 边晓燕, 等. 基于多主体主从博弈的负荷聚合商经济优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 30-40.
GONG Chengjiarui, LIN Shunfu, BIAN Xiaoyan, et al. Economic optimization model of a load aggregator based on the multi-agent Stackelberg game[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 30-40.
- [22] 郭旭升, 文汀, 林湘宁, 等. 面向多利益主体的清洁能源化大型离网海岛源储一体化优化定容[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(增刊 1): 1-14.
GUO Xusheng, WEN Ding, LIN Xiangning, et al. Integration capacity optimization of multi-stakeholder generation-storage on large-scale off-grid island[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(S1): 1-14.
- [23] 高芊芊, 山雨琦, 朱晓荣. 基于合作博弈的共享混合储能电站规划[J]. 太阳能学报, 2024, 45(12): 509-519.
GAO Qianqian, SHAN Yuqi, ZHU Xiaorong. Planning of shared hybrid energy storage power station based on cooperative game[J]. Acta Energiac Solaris Sinica, 2024, 45(12): 509-519.
- [24] 戴磊, 王玉冰, 郭思清, 等. 港口岸电系统部署规划技术与运营方法综述[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(3): 42-59.
DAI Lei, WANG Yubing, GUO Siqing, et al. Review on deployment planning techniques and operational methods for port shore power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(3): 42-59.
- [25] 王盛华. 基于博弈论的港口公路运输服务整合及定价策略研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
WANG Shenghua. Research on the integration and pricing strategies of ports integrating highway transportation service based on game theory[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [26] 陈建伟. 港口综合能源系统的定价策略与优化调度研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2024.
CHEN Jianwei. Research on pricing strategy and optimization dispatching of seaport integrated energy system[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2024.
- [27] 陶雨婷. 基于博弈论的港岸船能源协调优化调度与交易策略研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2023.
TAO Yuting. Research on optimal scheduling and trading strategy of port shore ship energy coordination based on game theory[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2023.
- [28] 曾君, 谭豪杰, 刘俊峰, 等. 基于状态势博弈的微电网能量管理优化算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(5): 24-34.
ZENG Jun, TAN Haojie, LIU Junfeng, et al. Research on optimization algorithm of microgrid energy management based on a state potential game[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(5): 24-34.
- [29] 董啜兴, 文书礼, 朱淼, 等. 基于双层博弈理论的绿色港口集群能源经济优化调度[J/OL]. 电工技术学报: 1-14[2025-03-25]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.241447>
- [30] 董智兴, 文书礼, 朱淼, 等. 基于双层博弈理论的绿色港口集群能源经济优化调度[J/OL]. 电工技术学报: 1-14[2025-03-25]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.241447>
- [31] 王海洋, 李珂, 张承慧, 等. 基于主从博弈的社区综合能源系统分布式协同优化运行策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5435-5445.
WANG Haiyang, LI Ke, ZHANG Chenghui, et al. Distributed coordinative optimal operation of community integrated energy system based on Stackelberg game[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5435-5445.
- [32] KAMRAN Z. Gold rush optimizer: a new population-based metaheuristic algorithm[J]. Operations Research and Decisions 2023, 33(1): 113-150.

收稿日期: 2025-03-23; 修回日期: 2025-07-31

作者简介:

季振东(1986—), 男, 通信作者, 博士, 副研究员, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用; E-mail: zhendong_ji@njust.edu.cn

黄立飞(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用。E-mail: lifei_huang@njust.edu.cn

(编辑 周金梅)