

计及风电消纳下基于纳什议价理论的 多综合能源系统协同运行

帅轩越¹, 王秀丽¹, 王志成¹, 郭慧¹, 马志程²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 730070, 兰州)

摘要: 为有效提高多个电热综合能源系统(HE-IES)的能源利用率,针对计及风电消纳下多个 HE-IES 协同运行的成本分摊问题,提出一种基于纳什议价理论的多 HE-IES 的多目标优化运行模型。构建多 HE-IES 的框架,针对 HE-IES 内燃气轮机、热泵、电储能、热储能等设备进行建模,并建立多个 HE-IES 间、HE-IES 与配网间的功率交互模型;以多 HE-IES 的运行成本与风电消纳作为指标,通过多目标加权规划法建立多 HE-IES 的多目标优化模型;进一步地,通过纳什议价理论建立多个 HE-IES 的合作博弈模型,通过数学转换将非凸问题转换为两个凸的子问题,实现每个 HE-IES 均达到帕累托最优,以保证各 HE-IES 参与合作的积极性。算例仿真表明,相比各 HE-IES 独立运行,所提模型使得总运行成本和总弃风成本分别减少了 660.14 与 222.03 元,使得每个 HE-IES 的运行成本与弃风成本分别减少了 220.05 与 74.07 元,实现了所有 HE-IES 的帕累托最优。

关键词: 电热综合能源系统;合作博弈;纳什议价;风电消纳;多目标优化

中图分类号: TM73 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202203019 **文章编号:** 0253-987X(2022)03-0187-10



OSID 码

Cooperative Operation for Multiple Integrated Energy Systems Considering Wind Power Consumption by Nash Bargaining Convention

SHUAI Xuanyue¹, WANG Xiuli¹, WANG Zhicheng¹, GUO Hui¹, MA Zhicheng²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Electric Power Research Institute of State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To effectively improve energy efficiency of multiple HE-IESs, aiming at the cost sharing problem of multiple HE-IESs coordinated operation taking wind power consumption into account, a multi-HE-IESs multi-objective optimization operation model with Nash bargaining theory is proposed. The framework of multi-HE-IESs is constructed to model gas turbine, heat pump, electric energy storage, thermal energy storage and the other equipments in HE-IES, and multiple power interaction models among HE-IESs and between HE-IES and distribution network are established. Taking operating costs and wind power consumption of multi-HE-IESs as the indicators, the multi-objective weighted programming method is used to establish a multi-HE-IESs multi-objective optimization model. Furthermore, following Nash bargaining theory, a cooperative game model of multi-HE-IESs is constructed, and the non-convex problem is transformed into two convex sub-problems via mathematical transformation to realize the Pareto optimum for each HE-IES, which ensures the enthusiasm of all HE-IESs to participate in

cooperation. A simulation example verifies that the proposed method enables to reduce total operating costs and total wind curtailment costs by 660.14 and 222.03 yuan, respectively, and also to reduce operating costs and wind curtailment costs of each HE-IES by 220.05 and 74.07 yuan, thus the Pareto optimum of overall HE-IESs is achieved.

Keywords: heat-electricity integrated energy system; cooperative game; Nash bargaining; wind power consumption; multi-objective optimization

能源是人类赖以生存的物质基础,同时人类社会的发展也离不开能源的供给^[1]。随着煤炭、石油、天然气等不可再生能源的大规模开发,人类社会面临着能源日益枯竭与环境恶化的危机^[2-3]。

为提高对能源的利用率,第三次工业革命中提出了能源互联网,并引发了全球的高度关注^[4]。综合能源系统作为能源互联网的物理载体,能够对能源的产生、输送、转换、分配等环节进行协调与优化^[5-7]。相比于传统相互独立运行的电、气、热系统,综合能源系统能实现各类能源之间的灵活转换,旨在提高系统能源利用率^[8]。

目前,已有诸多学者针对综合能源系统的运行优化展开研究。文献[9]从系统运行经济性出发,综合考虑了电、热、冷、气共4种能源类型的转换,建立园区综合能源系统经济优化调度模型,突出多能互补、阶梯利用能够显著降低系统运行经济成本,为综合能源系统的优化调度奠定了基础框架。随着低碳理念的不断深入,碳排放引起广泛学者的关注。文献[10]在传统综合能源系统的研究上引入光热电站,并结合低碳背景在系统运行成本中考虑碳排放成本,建立考虑多能转换与光热电站参与的综合能源系统低碳经济运行模型。然而,文献[9-10]均从源侧的角度展开研究,负荷侧的需求响应也能参与系统的优化调度,从而实现源-荷协同优化。文献[11]计及了电、热、气综合需求响应,所建立的模型在削峰填谷、减少弃风弃光以及降低系统运行成本上更具优势。

然而,这些研究均属于单目标优化的范畴。事实上,综合能源系统的优化指标不唯一,如系统运行成本最低、可再生能源消纳率最大、碳排放最少等,调度人员需要对不同指标权衡考虑。目前,针对多目标优化问题主要有两大思路:一是将多目标问题转换为单目标问题^[12-14],通过设置不同指标的权重系数将目标统一化,所得最优方案具有唯一性;二是求解 Pareto 最优解集^[15-16],即给出优化问题的多个非劣解供参考。对于前者:文献[12]以系统运行成本最小与系统污染气体排放量最小为目标,建立了

综合能源系统经济环境调度模型,利用线性加权的方法将多目标问题转换为单目标问题,保证了不同目标能够无量纲求和。但是,这种评价方法较为简单,不能很好地统一不同指标的灵敏度。文献[13]结合了模糊规划理论的优点,通过建立隶属度函数将不同目标归一化、模糊化,使得不同指标的量纲保持一致,同时统一了不同指标的灵敏度。然而,文献[12-13]在权重系数上选择具有一定主观性。文献[14]所使用的改进熵权法能够从数据本身出发,通过熵的含义计算每个目标的熵权,从而得到客观的权重系数。对于后者,文献[15-16]直接对多目标优化问题进行求解,分别使用改进型多目标粒子群优化算法与带精英策略的非支配排序遗传算法求解得到 Pareto 最优解集。

但是,这些研究均针对单个综合能源系统展开研究,随着物理互联与信息交互技术的发展,多个综合能源系统也能进行能量交互。此类问题的关键在于如何对多个参与者的利益进行分配,而博弈论为交互决策问题提供了参考。博弈论主要分为非合作博弈^[17]与合作博弈^[18]。文献[17]针对多个园区购电过程中的竞争问题,基于非合作博弈论建立了多园区综合能源系统的博弈优化模型,所提模型能较好地权衡多园区间的利益。文献[18]建立了多个综合能源微网间的合作博弈模型,并利用 Shapley 值法与功率交互贡献度法对各微网的收益进行分配,维持了多微网协同运行的积极性。非合作博弈侧重分析多个参与者间的竞争现象,重点关注纳什均衡点。与非合作博弈不同的是,合作博弈注重整体利益最大与利益分配问题,本文重点关注合作博弈问题。

需要指出的是,大多研究仅针对单个综合能源系统的多目标优化问题展开研究,鲜有研究关注于多目标背景下多个综合能源系统的优化问题。如何建立一套合理的运行机制权衡不同综合能源系统的利益,同时兼顾系统调度人员对不同目标的偏好需求,是值得思考的问题。

因此,本文以电-热综合能源系统(HE-IES)的运行成本与风电消纳率作为研究指标,建立多个

HE-IES 的多目标合作博弈模型。利用多目标加权规划法将多目标问题转换为单目标优化问题,进一步采用纳什议价的方法对所有 HE-IES 的合作效益进行分配,通过算例分析验证了所提模型的有效性与合理性。

1 多电-热综合能源系统运行框架

假定所研究的场景由多个 HE-IES 与配网构成,且多个 HE-IES 由调度中心统一调度。HE-IES 内主要包括热电联产(CHP)单元、热泵(HP)、储能电池(ES)、储热罐(HS)、风机(WT)等设备,多个 HE-IES 框架与 HE-IES 内部能流关系如图 1 所示。

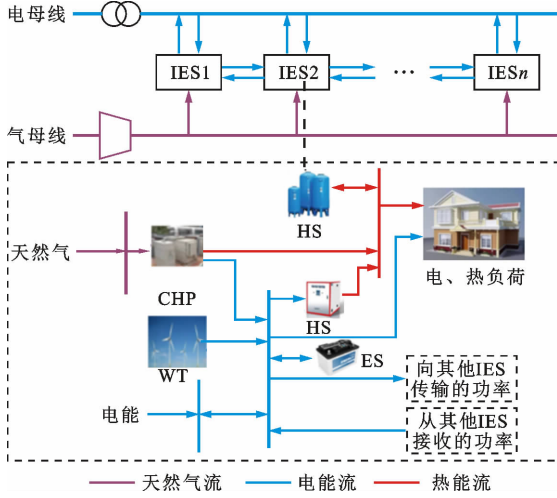


图1 多 HE-IES 框架与 HE-IES 能流

Fig.1 Multiple HE-IESs framework and HE-IES energy flow

由图 1 可知:一方面,HE-IES 主要通过燃气轮机与热泵进行产能,储能电池与储热罐负责协调配合;另一方面,HE-IES 也能通过气网与电网相连进行能源交易,实现内部供需平衡。由于配电网侧的售电价高于购电价,HE-IES 独立运行时与配电网进行电能交易将产生交易亏损。但是,当多个 HE-IES 通过联络线互联时,HE-IES 也能与其他 HE-IES 进行电能交互,从而减少与主网进行电能交易过程中的价格套利现象。

2 电-热综合能源系统数学模型

设所研究的场景包含 HE-IES 的总数为 n ,研究周期为 T 。

2.1 热电联产单元

CHP 主要由燃气轮机组组成。HE-IES 通过外购天然气供燃气轮机^[19]燃烧,燃气轮机同时产生电

能与热能。CHP 单元燃气成本表示为

$$C_{i, \text{CHP}}^t = \frac{c_{\text{gas}} P_{i, \text{CHP}(e)}^t}{Q_{\text{LHV}} \eta_{\text{MT}}} \quad (1)$$

约束条件表示为

$$P_{i, \text{CHP}(h)}^t = \frac{(1 - \eta_{\text{MT}} - \eta_{\text{loss}}) \eta_{\text{b}} P_{i, \text{CHP}(e)}^t}{\eta_{\text{MT}}} \quad (2)$$

$$P_{i, \text{CHP}(e)}^{\min} \leq P_{i, \text{CHP}(e)}^t \leq P_{i, \text{CHP}(e)}^{\max} \quad (3)$$

$$\lambda_{i, \text{CHP}(e)}^{\min} \leq P_{i, \text{CHP}(e)}^{t+1} - P_{i, \text{CHP}(e)}^t \leq \lambda_{i, \text{CHP}(e)}^{\max} \quad (4)$$

式中: c_{gas} 与 Q_{LHV} 分别为天然气的单价与低热值; η_{MT} 为燃气轮机的发电效率; $C_{i, \text{CHP}}^t$ 与 $P_{i, \text{CHP}(e)}^t$ 分别为第 i 个 HE-IES 的 CHP 单元在时段 t 的燃气成本与电出力; η_{loss} 与 η_{b} 分别为散热损失率与制热系数; $P_{i, \text{CHP}(e)}^{\max}$ 、 $P_{i, \text{CHP}(e)}^{\min}$ 、 $\lambda_{i, \text{CHP}(e)}^{\max}$ 以及 $\lambda_{i, \text{CHP}(e)}^{\min}$ 分别为第 i 个 HE-IES 的 CHP 单元在时段 t 的电出力以及爬坡率上下限。

2.2 热泵

热泵^[20]能将电能转换为热能,约束条件为

$$P_{i, \text{HP}(h)}^t = \eta_{\text{HP}} P_{i, \text{HP}(e)}^t \quad (5)$$

$$P_{i, \text{HP}(h)}^{\min} \leq P_{i, \text{HP}(h)}^t \leq P_{i, \text{HP}(h)}^{\max} \quad (6)$$

式中: η_{HP} 为热泵的转化效率; $P_{i, \text{HP}(h)}^t$ 、 $P_{i, \text{HP}(e)}^t$ 、 $P_{i, \text{HP}(h)}^{\max}$ 以及 $P_{i, \text{HP}(h)}^{\min}$ 分别为第 i 个 HE-IES 的热泵在时段 t 的热出力、消耗的电功率以及热出力上下限。

2.3 储能电池

储能电池能实现电能的时空转移。本文以蓄电池作为储能电池。储能电池调度成本为

$$C_{i, \text{ES}}^t = c_{\text{ES}(e)} P_{i, \text{ES}(e)}^t \Delta t + c_{\text{ES}(d)} P_{i, \text{ES}(d)}^t \Delta t \quad (7)$$

约束条件为

$$E_{i, \text{ES}}^{t+1} = E_{i, \text{ES}}^t + P_{i, \text{ES}(e)}^t \eta_{\text{ES}(e)} \Delta t - \frac{P_{i, \text{ES}(d)}^t \Delta t}{\eta_{\text{ES}(d)}} \quad (8)$$

$$0 \leq P_{i, \text{ES}(e)}^t \leq P_{i, \text{ES}(e)}^{\max} \quad (9)$$

$$0 \leq P_{i, \text{ES}(d)}^t \leq P_{i, \text{ES}(d)}^{\max} \quad (10)$$

$$E_{i, \text{ES}}^{\min} \leq E_{i, \text{ES}}^t \leq E_{i, \text{ES}}^{\max} \quad (11)$$

$$E_{i, \text{ES}}^0 = E_{i, \text{ES}}^T \quad (12)$$

式中: $c_{\text{ES}(e)}$ 与 $c_{\text{ES}(d)}$ 分别表示充放电成本系数; $P_{i, \text{ES}(e)}^t$ 、 $P_{i, \text{ES}(d)}^t$ 以及 $E_{i, \text{ES}}^t$ 分别为第 i 个 HE-IES 的蓄电池在时段 t 的充电功率、放电功率以及蓄电池容量; $\eta_{\text{ES}(e)}$ 与 $\eta_{\text{ES}(d)}$ 分别表示蓄电池的充电效率与放电效率; $P_{i, \text{ES}(e)}^t$ 、 $P_{i, \text{ES}(d)}^t$ 、 $E_{i, \text{ES}}^{\min}$ 以及 $E_{i, \text{ES}}^{\max}$ 分别为第 i 个 HE-IES 的蓄电池在时段 t 的充放电功率与容量上下限。

2.4 储热罐

与储能电池类似,储热罐同样能实现热能的时空转移。储热罐调度成本为

$$C_{i, \text{HS}}^t = c_{\text{HS}(e)} P_{i, \text{HS}(e)}^t \Delta t + c_{\text{HS}(d)} P_{i, \text{HS}(d)}^t \Delta t \quad (13)$$

约束条件为

$$E_{i,HS}^{t+1} = E_{i,HS}^t + P_{i,HS(c)}^t \eta_{HS(c)} \Delta t - \frac{P_{i,HS(d)}^t \Delta t}{\eta_{HS(d)}} \quad (14)$$

$$0 \leq P_{i,HS(c)}^t \leq P_{i,HS(c)}^{\max} \quad (15)$$

$$0 \leq P_{i,HS(d)}^t \leq P_{i,HS(d)}^{\max} \quad (16)$$

$$E_{i,HS}^{\min} \leq E_{i,HS}^t \leq E_{i,HS}^{\max} \quad (17)$$

$$E_{i,HS}^0 = E_{i,HS}^t \quad (18)$$

式中: $c_{HS(c)}$ 与 $c_{HS(d)}$ 分别表示储热与放热成本系数; $P_{i,HS(c)}^t$ 、 $P_{i,HS(d)}^t$ 以及 $E_{i,HS}^t$ 分别为第 i 个 HE-IES 的储热罐在时段 t 的储热功率、放热功率以及储热罐容量; $\eta_{HS(c)}$ 与 $\eta_{HS(d)}$ 分别表示储热罐的储热效率与放热效率; $P_{i,HS(c)}^t$ 、 $P_{i,HS(d)}^t$ 、 $E_{i,HS}^{\max}$ 以及 $E_{i,HS}^{\min}$ 分别为第 i 个 HE-IES 的储热罐在时段 t 的蓄放热功率与容量上下限。

2.5 与配电网电力交易

假定配电网侧电价采用分时电价, HE-IES 能在电能不足时从配电网购电, 在电能盈余时向配电网售电, 则相应交易成本与约束条件可表示为

$$C_{i,EG}^t = \lambda_{EG,sell}^t \max(P_{i,EG}^t, 0) \Delta t + \lambda_{EG,buy}^t \min(P_{i,EG}^t, 0) \Delta t \quad (19)$$

$$-P_{i,EG}^{\max} \leq P_{i,EG}^t \leq P_{i,EG}^{\max} \quad (20)$$

式中: $\lambda_{EG,sell}^t$ 与 $\lambda_{EG,buy}^t$ 分别为第 t 个时段配电网的售电价与购电价; $P_{i,EG}^t$ 与 $P_{i,EG}^{\max}$ 表示第 i 个 HE-IES 在时段 t 与配电网交互功率与允许上限。

2.6 切负荷

当 HE-IES 内部能源供给小于需求时, 为了维护系统的安全性, HE-IES 将采取切负荷的手段以保证有功出力与负荷间的平衡。本文简化处理, 认为负荷切除仅为电负荷, HE-IES i 的切负荷成本为

$$C_{i,c}^t = \lambda_c P_{i,c}^t \quad (21)$$

约束条件为

$$0 \leq P_{i,c}^t \leq P_{i,c}^{\max} \quad (22)$$

式中: $C_{i,c}^t$ 与 $P_{i,c}^t$ 分别表示第 i 个 HE-IES 在时段 t 的切负荷成本与功率; λ_c 与 $P_{i,c}^{\max}$ 分别表示切负荷单位成本与功率上限。

3 多电-热综合能源系统多目标优化运行模型

3.1 多电热综合能源系统运行分析

当多个 HE-IES 间签订合作协议, 通过联络线互联进行功率交互, HE-IES i 的相关约束为

$$-P_{i,j}^{\max} \leq P_{i,j}^t \leq P_{i,j}^{\max} \quad (23)$$

式中: $P_{i,j}^t$ 与 $P_{i,j}^{\max}$ 分别表示 HE-IES i 与 HE-IES j 在时段 t 的交互功率与交互上限, HE-IES j 为与 HE-IES i 互联的 HE-IES; $P_{i,j}^t$ 取正表示功率由 i 流向 j , 取负表示功率由 j 流向 i 。

在多 HE-IES 互联的基础上, 每个 HE-IES 内电、热有功出力与负荷需满足平衡约束, 则第 i 个 HE-IES 的电、热有功平衡约束表示为

$$P_{i,w}^t + P_{i,CHP(e)}^t + P_{i,EG}^t + P_{i,ES(d)}^t + \sum_{j \neq i} P_{i,j}^t \geq P_{i,c}^t + P_{i,ES(c)}^t + P_{i,HP(e)}^t + P_{i,e}^t \quad (24)$$

$$P_{i,CHP(h)}^t + P_{i,HS(d)}^t + P_{i,HP(h)}^t \geq P_{i,HS(c)}^t + P_{i,h}^t \quad (25)$$

式中: $P_{i,w}^t$ 、 $P_{i,e}^t$ 以及 $P_{i,h}^t$ 分别为 HE-IES i 在时段 t 的风电出力与电、热负荷。

当 HE-IES i 处于独立运行模式时, 式(23)变为

$$P_{i,j}^t = 0 \quad (26)$$

3.2 多目标问题的转换

本文所考虑的目标函数有系统运行经济成本与系统风电消纳率两个指标, 具体表示为

$$\min F_{1,i} = \sum_{t=1}^T C_i^t \quad (27)$$

$$\min F_{2,i} = \sum_{t=1}^T \min(P_{i,w}^t, P_{i,n}^t)$$

$$P_{i,n}^t = P_{i,w}^t + P_{i,CHP(e)}^t + P_{i,EG}^t + P_{i,ES(d)}^t + \sum_{j \neq i} P_{i,j}^t - (P_{i,c}^t + P_{i,ES(c)}^t + P_{i,HP(e)}^t + P_{i,e(h)}^t) \quad (28)$$

式(28)表示系统弃风量, 其中 $P_{i,n}^t$ 表示 HE-IES i 在时段 t 内系统未消纳的电功率。

为权衡两个指标的评价标准, 设单位弃风成本为 λ_w , 将目标函数归一为成本, 进一步采用多目标加权规划的方法构建目标函数。所转换的单目标优化问题可表示为

$$\left. \begin{aligned} \min F_i &= \lambda_1 F_{1,i} + \lambda_2 (\lambda_w F_{2,i}) \\ \text{s. t. } \lambda_1 + \lambda_2 &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

式中: λ_1 与 λ_2 分别表示两个指标的权重系数, 指标的系数越大, 说明该指标的重要程度越高; F_i 为 HE-IES i 经加权处理后的综合运行成本。

4 基于纳什议价理论的分配方法

为维持参与合作中 HE-IES 的积极性, 需要合理地对各 HE-IES 的收益进行结算。考虑到纳什议价模型能满足所有参与合作个体的帕累托最优, 本文采用纳什议价模型进行求解。该模型的表达式为

$$\left. \begin{aligned} &\max \prod_{i=1}^n (F_i^0 - F_i) \\ &\text{s. t. } F_i \leq F_i^0 \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

式中 F_i 与 F_i^0 分别表示所有 HE-IES 协同运行与独立运行时 HE-IES i 的综合运行成本。

值得注意的是,当参与者数量多于 2 时,式(30)为非凸问题,求解难度较大。采用文献[21-22]中的方法进行数学转换,具体推导过程见本文首页 OS-ID 码中的开放科学数据与内容附录 A。经转换后,两个凸的子问题分别为

$$\min \sum_{i=1}^n F_i \quad (31)$$

$$\left. \begin{aligned} &\max \sum_{i=1}^n \ln(F_i^0 - F_i^* + Z_i) \\ &\text{s. t. } \sum_{i=1}^n Z_i = 0 \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

式中: F_i^* 为式(31)求解后 HE-IES i 的最优值; Z_i 为 HE-IES i 的议价转移。

由式(32)可求得所有 HE-IES 经过纳什议价后的综合运行成本,再利用式(29)中的权重系数进一步分配,得到每个 HE-IES 的运行成本与弃风成本,分别表示为

$$F_{i,1}^* = (F_i^* - Z_i^*) \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad (33)$$

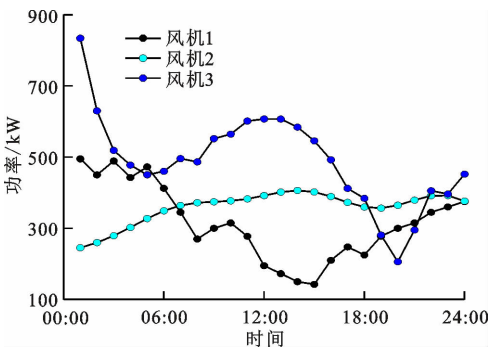
$$F_{i,2}^* = (F_i^* - Z_i^*) \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad (34)$$

式中 Z_i^* 为 HE-IES i 优化后的支付转移。

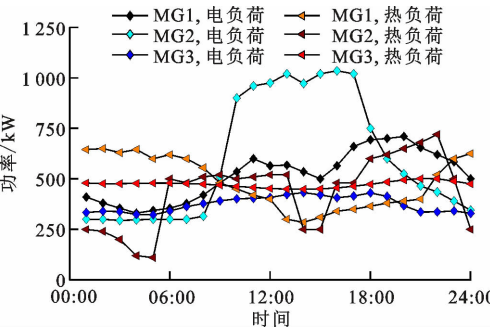
5 算例分析

5.1 算例描述

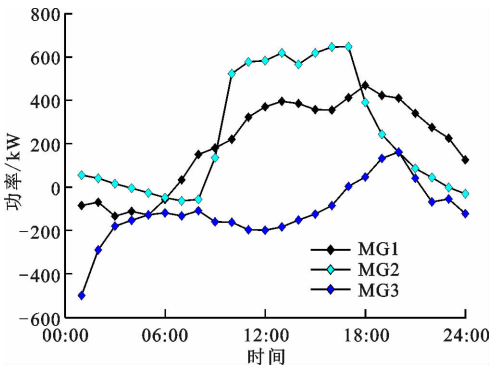
为了进一步验证所提方法的有效性,选取 3 个 HE-IES 作为算例进行分析,利用 MATLAB Yalmip 工具进行建模,结合 Ipopt 求解器求解。设一天研究时段 $T=24$ h,与配电网间的功率交互上限均为 50 kW,切负荷上限与单位切负荷成本分别为 200 kW 与 0.8 元/kW,单位弃风成本为 0.5 元/kW,HE-IES1 与 HE-IES2、HE-IES1 与 HE-IES3、HE-IES2 与 HE-IES3 的功率交互允许上限分别为 50、40、30 kW,各 HE-IES 内储能电池、储热罐的初始容量均为额定容量的一半。各 HE-IES 内的风电出力、电热负荷以及净电负荷如图 2 所示,电网分时电价见表 1,HE-IES 内 CHP、GB、ES 以及 HS 等设备参数参考文献[23],详细见本文首页 OSID 码中的开放科学数据与内容附录 B。



(a) 风电出力



(b) 电热负荷



(c) 净电负荷

图 2 各 HE-IES 内风电出力、电热负荷以及净电负荷
Fig. 2 Wind power output, electric heating load and net electric load in each HE-IES

表 1 电网分时电价
Table 1 Time-of-use price of grid

时间	售电价/(元·kW ⁻¹)	购电价/(元·kW ⁻¹)
23:00~07:00	0.42	0.36
07:00~17:00	0.88	0.75
17:00~23:00	1.35	1.16

5.2 算例流程

算例的求解具体流程如下。

(1)初始化所有 HE-IES 的基础数据,包含一天内风电预测出力、电热负荷、设备参数以及各联络线

交互极限等。

(2) 设定系统运行经济成本与系统风电消纳率两个指标的权重系数, 将多目标优化问题转换为单目标问题。

(3) 利用 CPLEX 求解器分别计算各 HE-IES 独立运行(仅与配电网互联, 各 HE-IES 不互联)与协同运行(各 HE-IES 互联)下的运行成本。

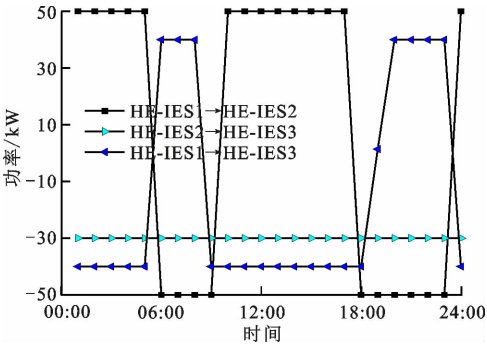
(4) 利用 IPOPT 求解器求解各 HE-IES 的议价模型, 即式(32), 得到各 HE-IES 的议价转移, 进而得到合作博弈后各 HE-IES 需承担的综合运行成本。

(5) 根据步骤(2)中所设定的权重系数, 将各 HE-IES 的综合运行成本按式(33)(34)进行分配计算, 得到各 HE-IES 需承担的运行成本与弃风成本。

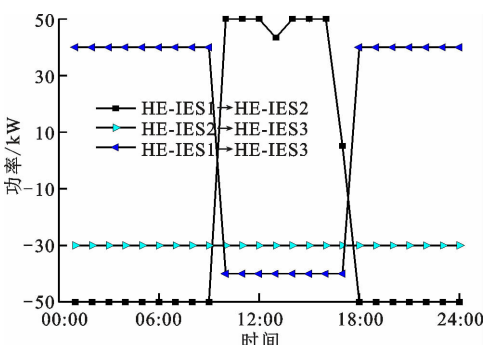
5.3 结果分析

记 3 个 HE-IES 独立运行行为模式 1, 3 个 HE-IES 协同运行行为模式 2。

为探究关于两个指标的单目标优化下 3 个 HE-IES 间功率交互的合理性, 依次取总运行成本最低($\lambda_1=1, \lambda_2=0$)和总弃风成本最低($\lambda_1=0, \lambda_2=1$), 模式 2 下 3 个 HE-IES 间的功率交互见图 3。



(a) 总运行成本最低



(b) 总弃风成本最低

图 3 单目标优化下 3 个 HE-IES 间的功率交互曲线
Fig. 3 Power interaction curve between three HE-IESs under single objective optimization

结合图 2 与图 3a 可知: 当所有 HE-IES 处于协

同运行时, 一天中 00:00~05:00 时段 HE-IES1 与 HE-IES3 均向 HE-IES2 输送电功率, 这是因为 HE-IES2 处于缺电状态, 同时 HE-IES1 与 HE-IES3 处于余电状态, HE-IES 群内通过功率交互减少与主网的电力交易以达到减少系统总运行成本最低。同样地, 对于图 3b, 一天中 00:00~05:00 的功率传输趋势总体表现为 HE-IES2 内的电功率向 HE-IES1 与 HE-IES3 传输。这是因为 HE-IES2 内净电负荷在 00:00~05:00 时段较高, 会产生大量弃风现象, 为有效减少弃风成本, HE-IES2 需将自身电功率传输至其余 HE-IES。需要指出的是, 虽然 HE-IES1 与 HE-IES3 中的风电出力在 00:00~05:00 时段较高, 但二者的电负荷水平在 00:00~05:00 时段也很高, 因此大量风电资源被就地消纳, 弃风程度低于 HE-IES2。其余时段的分析与 00:00~05:00 时段类似, 不再赘述。

为对比多目标问题下 HE-IES 协同运行下的优越性, 以 $\lambda_1=0.6, \lambda_2=0.4$ 为例进行比较。两种模式下 3 个 HE-IES 的运行成本与储能设备容量总和分别见表 2 与表 3。

表 2 两种模式下各 HE-IES 的运行成本
Table 2 Operating costs of each HE-IES in two modes

对象	模式 1 成本/元	模式 2 成本/元
HE-IES1	6 291.37	6 071.32
HE-IES2	6 199.83	5 979.78
HE-IES3	4 554.32	4 334.27
合计	17 045.52	16 385.38

表 3 两种模式下各 HE-IES 的弃风成本
Table 3 Wind curtailment costs of each HE-IES in two modes

对象	模式 1 成本/元	模式 2 成本/元
HE-IES1	919.45	845.44
HE-IES2	401.55	327.54
HE-IES3	4 694.65	4 620.64
合计	6 015.65	5 793.62

由表 2 与表 3 可知: 相比于模式 1, 所有 HE-IES 运行于模式 2 时的总运行成本与总弃风成本均得到减少, 分别减少了 660.14、222.03 元。每个 HE-IES 经过纳什议价后各自的运行成本与弃风成本均有所减少, 且每个 HE-IES 的运行成本均减少了 220.05 元, 弃风成本均减少了 74.07 元, 实现了所有 HE-IES 的帕累托最优。

两种模式下 3 个 HE-IES 内的设备优化出力分别见图 4 与图 5(图中 CHP(e)表示 CHP 的电出力),协同运行模式下 3 个 HE-IES 的功率交互曲线见图 6。

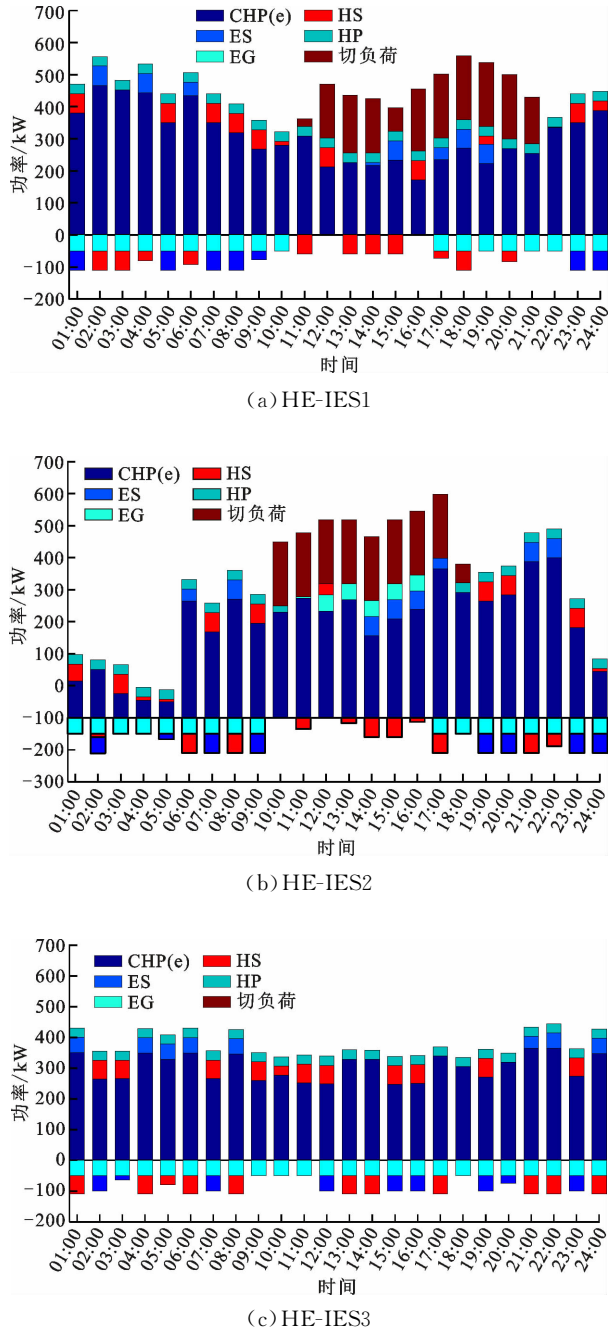


图 4 模式 1 下一天中各 HE-IES 内的设备出力以及与配电网的电力交易

Fig.4 Output of each HE-IES equipment and electricity transaction with the distribution network in a day under model1

由于设定的权重系数 λ_1 与 λ_2 分别为 0.6、0.4,即调度人员认为系统运行成本与弃风成本的重要性分别为 60%与 40%,因此在优化过程中需综合考虑

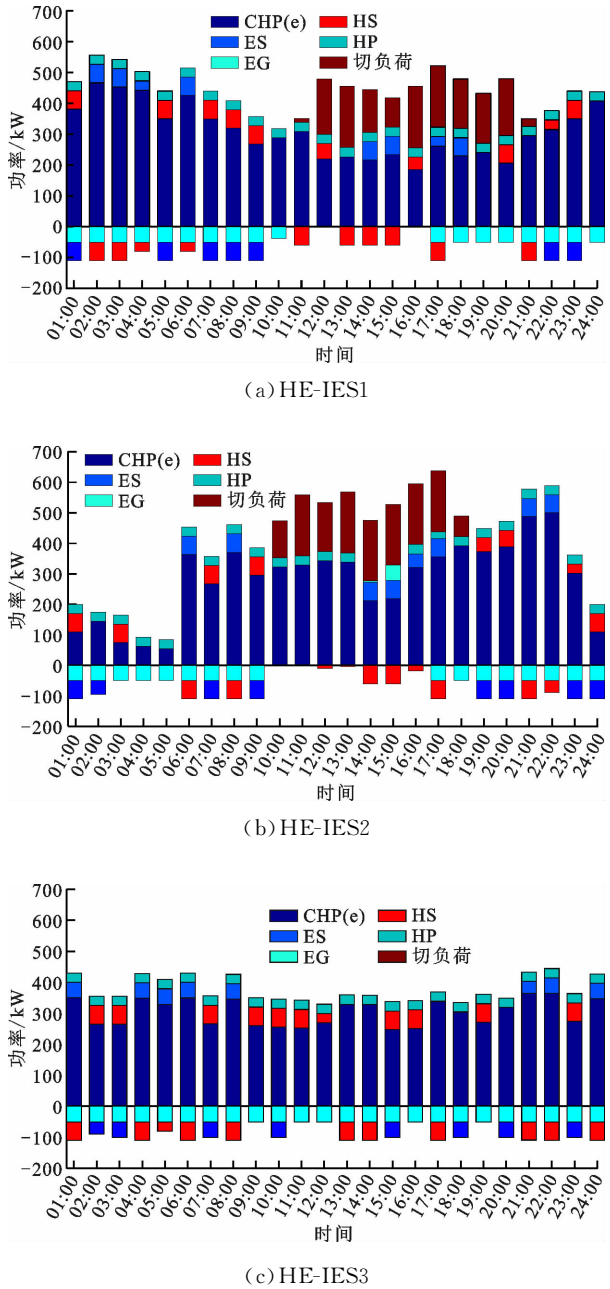


图 5 模式 2 下一天中各 HE-IES 内的设备出力以及与配电网的电力交易

Fig.5 Output of each HE-IES equipment and electricity transaction with the distribution network in a day under mode2

两个指标的重要程度。结合图 4 与图 6 进行分析可知:对于提高可再生能源消纳率这一指标,仅需减少系统弃风成本,因此 3 个 HE-IES 间的功率交互有 40%的贡献用于减少一天内系统弃风成本总和;对于减少系统运行成本这一指标,需综合考虑 3 个 HE-IES 内的 CHP 发电成本、电储能调度成本、切负荷成本以及与配电网电能交易成本,因此 3 个 HE-IES 间的功率交互有 60%的贡献用于减少一天

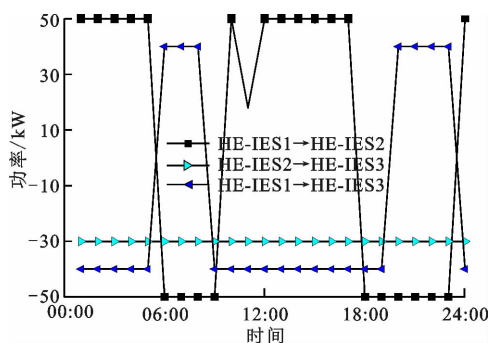


图6 协同运行模式下3个HE-IES的功率交互曲线

Fig. 6 Power interaction curve of three HE-IESs in cooperative operation mode

内系统运行成本总和。以HE-IES1为例,模式1与模式2下切负荷主要发生于11:00~21:00时段,相比于模式1,模式2下18:00~21:00时段的切负荷得到减少,结合图6可知,这是因为18:00~21:00时段HE-IES2向HE-IES1传送电功率,以减少HE-IES1在该时段的负荷切除,同时兼顾改善系统的风电消纳。同时,HE-IES1的电储能与热储能的出力在一天内17:00~24:00时段变化较为明显,这是因为模式2下引入了HE-IES间的功率交互,使得每个HE-IES内的设备出力能够在一定程度上灵活调整,进一步减少系统运行成本。

依次取 λ_1 为0、0.1、...、1,所提模型在模式2下3个HE-IES的总运行成本与总弃风成本如图7所示,3个HE-IES的功率交互曲线见本文首页OSID码中的开放科学数据与内容附录C。

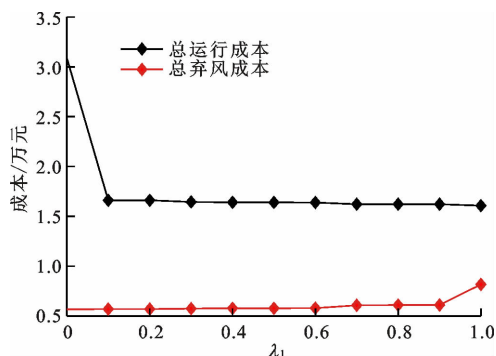


图7 不同加权系数下3个HE-IES的总运行成本与总弃风成本

Fig. 7 Total operating costs and total wind curtailment costs of three HE-IESs under different weighting factors

由图7可知:随着 λ_1 逐渐增加,HE-IES的总运行成本逐渐减少,同时HE-IES的总弃风成本逐渐增加。这是因为 λ_1 的增加使系统运行成本的权重

增加,即系统运行成本最小的重要程度增加,同时 λ_2 逐渐减少,使得风电消纳的重要程度降低。另外,当 λ_1 分别在0~0.1与0.9~1区间内,HE-IES的总运行成本减少的程度较为剧烈。这是因为在该区间内 λ_1 与 λ_2 差距较大,导致系统的总运行成本与总弃风成本的灵敏度较高。

6 结论

本文考虑了HE-IES经济运行成本与风电消纳率两个指标,在多HE-IES联合运行的背景下提出了基于纳什议价理论的多HE-IES协同运行多目标优化模型,主要结论如下。

(1)相比所有HE-IES独立运行,所提模型能有效减少所有HE-IES的总运行成本,同时提高HE-IES群总体风电消纳水平,其中总运行成本减少了660.14元,总弃风成本减少了222.03元。

(2)利用纳什议价的方法对所有HE-IES的运行成本与弃风成本进行分配,每个HE-IES的运行成本均减少了220.05元,弃风成本均减少了74.07元,满足所有HE-IES的帕累托最优,所有HE-IES的运行成本与风电消纳均得到改善。

(3)所提模型能通过调整两个指标的权重系数灵活适用各类场景,较好地权衡了两个指标的重要程度,应可为系统调度人员提供参考方案。

参考文献:

- [1] RIFKIN J. Third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world [M]. New York, USA: Palgrave MacMillan Trade, 2011: 33-72.
- [2] 孙宏斌,郭庆来,潘昭光,等. 能源互联网: 驱动力、评述与展望 [J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3005-3013.
SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang, et al. Energy Internet: driving force, review and outlook [J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3005-3013.
- [3] 王春晓,严超,张耀,等. 考虑条件风险价值的电气综合能源系统风险厌恶机组组合研究 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(6): 17-27.
WANG Chunxiao, YAN Chao, ZHANG Yao, et al. CVaR based risk-averse unit commitment of integrated electricity and natural gas system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(6): 17-27.
- [4] MOHSENIAN-RAD H. Coordinated price-maker operation of large energy storage units in nodal energy

- markets [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 786-797.
- [5] 何丽美,王开科,曹岗林,等.采用可逆质子交换膜燃料电池/膨胀机的综合能源系统性能研究[J].西安交通大学学报,2020,54(3):97-105.
- HE Limei, WANG Kaike, CAO Ganglin, et al. Integrated energy system based on reversible proton exchange membrane fuel cell and expander [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(3): 97-105.
- [6] 贾宏杰,穆云飞,余晓丹.对我国综合能源系统发展的思考[J].电力建设,2015,36(1):16-25.
- JIA Hongjie, MU Yunfei, YU Xiaodan. Thought about the integrated energy system in China [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 16-25.
- [7] 李鹏,杨玉龙,黄越辉,等.综合热电负荷控制下的省级电网风电并网研究[J].西安交通大学学报,2014,48(2):69-73,117.
- LI Peng, YANG Yulong, HUANG Yuehui, et al. Wind power integration in provincial power grid under electricity and heating load control [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(2): 69-73, 117.
- [8] 许汉平,李姚旺,苗世洪,等.考虑可再生能源消纳效益的电力系统“源-荷-储”协调互动优化调度策略[J].电力系统保护与控制,2017,45(17):18-25.
- XU Hanping, LI Yaowang, MIAO Shihong, et al. Optimization dispatch strategy considering renewable energy consumptive benefits based on “source-load-energy storage” coordination in power system [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 18-25.
- [9] 孙强,谢典,聂青云,等.含电-热-冷-气负荷的园区综合能源系统经济优化调度研究[J].中国电力,2020,53(4):79-88.
- SUN Qiang, XIE Dian, NIE Qingyun, et al. Research on economic optimization scheduling of park integrated energy system with electricity-heat-cool-gas load [J]. Electric Power, 2020, 53(4): 79-88.
- [10] 董海鹰,负韞韵,马志程,等.计及多能转换及光热电站参与的综合能源系统低碳优化运行[J].电网技术,2020,44(10):3689-3700.
- DONG Haiying, YUN Yunyun, MA Zhicheng, et al. Low-carbon optimal operation of integrated energy system considering multi-energy conversion and concentrating solar power plant participation [J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3689-3700.
- [11] 杨海柱,李梦龙,江昭阳,等.考虑需求侧电热气负荷响应的区域综合能源系统优化运行[J].电力系统保护与控制,2020,48(10):30-37.
- YANG Haizhu, LI Menglong, JIANG Zhaoyang, et al. Optimal operation of regional integrated energy system considering demand side electricity heat and natural-gas loads response [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 30-37.
- [12] 郑超铭,黄博南,王子心,等.计及网络传输损耗的电热综合能源系统多目标优化调度[J].电网技术,2020,44(1):141-154.
- ZHENG Chaoming, HUANG Bonan, WANG Zixin, et al. Multi-objective optimization dispatch for integrated electro-heating systems including network transmission losses [J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 141-154.
- [13] 董帅,王成福,梁军,等.计及电转气运行成本的综合能源系统多目标日前优化调度[J].电力系统自动化,2018,42(11):8-15,121.
- DONG Shuai, WANG Chengfu, LIANG Jun, et al. Multi-objective optimal day-ahead dispatch of integrated energy system considering power-to-gas operation cost [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 8-15, 121.
- [14] 张兴平,张又中.计及P2G和CCS的园区级电-热-气综合能源系统多目标优化[J].电力建设,2020,41(12):90-99.
- ZHANG Xingping, ZHANG Youzhong. Multi-objective optimization model for park-level electricity-heat-gas integrated energy system considering P2G and CCS [J]. Electric Power Construction, 2020, 41(12): 90-99.
- [15] 杨锡运,张洋,谢志佳,等.基于风电-蓄热式电锅炉联合供暖的风电消纳多目标双层优化调度[J].太阳能学报,2020,41(1):273-281.
- YANG Xiyun, ZHANG Yang, XIE Zhijia, et al. Multi-objective bi-level optimization operation of wind power accommodation for heat storage electric boiler combined with wind power [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(1): 273-281.
- [16] 王子驰,雷炳银,杨灵芝,等.考虑电热联合需求响应的区域综合能源系统多目标双层优化调度[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(7):120-127.
- WANG Zichi, LEI Bingyin, YANG Lingyi, et al. Multi-objective double-step optimal dispatching of regional integrated energy system considering combined electric and heat demand response [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(7): 120-127.
- [17] 吴福保,刘晓峰,孙谊嫔,等.基于冷热电联供的多园区博弈优化策略[J].电力系统自动化,2018,42(13):68-75.

- WU Fubao, LIU Xiaofeng, SUN Yiqian, et al. Game optimization strategy for multiple parks based on combined cooling heating and power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 68-75.
- [18] 帅轩越, 王秀丽, 吴雄, 等. 计及条件风险价值下基于合作博弈的多微网协同优化调度 [J/OL]. 电网技术 [2021-07-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20210412.1437.005.html>.
- SHUAI Xuanyue, WANG Xiuli, WU Xiong, et al. Cooperative optimal scheduling of multi-microgrids based on cooperative game considering conditional value at risk [J/OL]. Power System Technology [2021-07-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20210412.1437.005.html>.
- [19] MA Li, LIU Nian, ZHANG Jianhua, et al. Energy management for joint operation of CHP and PV prosumers inside a grid-connected microgrid: a game theoretic approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(5): 1930-1942.
- [20] BOZCHALUI M C, HASHMI S A, HASSEN H, et al. Optimal operation of residential energy hubs in smart grids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1755-1766.
- [21] 芮涛, 李国丽, 王群京, 等. 配电侧多微电网日前电能交易纳什议价方法 [J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2576-2585.
- RUI Tao, LI Guoli, WANG Qunjing, et al. Nash bargaining method for multi-microgrid energy trading in distribution network [J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2576-2585.
- [22] 帅轩越, 王秀丽, 原晟淇, 等. 电力市场环境下基于改进纳什议价方法的多微网能源交易机制设计 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(11): 97-105.
- SHUAI Xuanyue, WANG Xiuli, YUAN Shengqi, et al. Design of multi-microgrids energy trading mechanism based on improved nash bargaining method in electricity market environment [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(11): 97-105.
- [23] 崔杨, 姜涛, 仲悟之, 等. 考虑风电消纳的区域综合能源系统源荷协调经济调度 [J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2474-2483.
- CUI Yang, JIANG Tao, ZHONG Wuzhi, et al. Source-load coordination economic dispatch method for regional integrated energy system considering wind power accommodation [J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2474-2483.

(编辑 陶晴)