

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241150

考虑生物质交易的乡村能源系统多主体协同规划

雷杨^{1,2}, 雷泽雨^{1,2}, 杭俊^{1,2}, 丁石川^{1,2}, 王丹³, 郭小璇⁴, 鲍海波⁵

(1. 安徽大学电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230601; 2. 教育部电能质量工程研究中心(安徽大学), 安徽 合肥 230601; 3. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072; 4. 广西电网有限责任公司电力科学研究院, 广西 南宁 530023; 5. 广西电网有限责任公司南宁供电局, 广西 南宁 530031)

摘要: 生物质能作为一种可调度的资源参与到能源市场的交互竞争中, 对乡村能源系统的资源合理调度和协同规划运营具有重要意义。此背景下提出了一种考虑生物质交易的乡村能源系统多主体协同规划方法。首先, 建立乡村能源系统多主体协同规划模型框架, 分析乡村地区农业生物质的季节特性, 并构建了生物质可用量模型和沼气站的产气量模型。接着, 根据各主体的利益诉求与交易模式, 构建乡村综合能源系统运营商和抽水蓄能电站运营商的目标函数和约束模型。然后, 利用纳什谈判理论求解协同规划模型, 求解出能源系统的规划方案与交易机制。最后, 选取广西某乡村案例数据, 通过仿真验证所提方法的有效性。结果表明, 所提方法能够发挥各主体的主动性, 充分调度生物质资源, 实现乡村能源系统内多主体的协同规划运营, 有效保障了各主体的利益。

关键词: 乡村能源系统; 生物质交易; 纳什谈判; 协同规划

Multi-agent collaborative planning of rural energy system considering biomass trading

LEI Yang^{1,2}, LEI Zeyu^{1,2}, HANG Jun^{1,2}, DING Shichuan^{1,2}, WANG Dan³, GUO Xiaoxuan⁴, BAO Haibo⁵

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230601, China; 2. Power Quality Engineering Research Center of Ministry of Education (Anhui University), Hefei 230601, China; 3. Key Laboratory of Smart Grid, Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin 300072, China; 4. Electric Power Research Institute, Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China; 5. Nanning Power Supply Bureau, Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530031, China)

Abstract: As a dispatchable resource, biomass energy plays a significant role in the rational resource scheduling and cooperative planning and operation of rural energy systems by participating in the interactive competition of energy markets. Against this background, a multi-agent collaborative planning method for rural energy systems considering biomass trading is proposed. First, a framework for multi-agent collaborative planning in rural energy systems is established. The seasonal characteristics of agricultural biomass in rural areas are analyzed, and models for biomass availability and gas production in biogas station are constructed. Then, according to the interests and trading modes of different stakeholders, objective functions and constraint models are formulated for rural integrated energy system operators and pumped storage power station operators. The Nash bargaining theory is used to solve the collaborative planning model, determining the energy system planning scheme and trading mechanism. Finally, a case study using data from a rural area in Guangxi is conducted to verify the effectiveness of the proposed method through simulation. Results show that the proposed method can stimulate the initiative of each agent, fully dispatch biomass resources, and achieve cooperated planning and operation among multiple stakeholders within the rural energy system, effectively safeguarding the interests of all parties.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52407074 and No. 52377034).

Key words: rural energy system; biomass trading; Nash negotiation; collaborative planning

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52407074, 52377034); 安徽省自然科学基金项目资助(2308085QE177); 安徽省教育厅高校自然科学重点科研项目资助(2023AH050092)

0 引言

我国是农业人口大国，乡村地区能源绿色转型和新型能源系统建设对促进乡村振兴和实现“双碳”目标具有重要意义^[1-3]。合理开发乡村地区丰富的生物质资源、科学发展农村能源综合利用模式，是促进农村产业兴旺、生活富裕的重要举措^[4]。乡村地区有着丰富的生物质资源，如农作物秸秆、畜禽粪便等，这些资源的开发利用对实现乡村地区能源供应多元化、解决农业废弃物产生的环境问题具有重要作用^[5-7]。乡村能源系统在规划过程中应充分考虑乡村地区生物质的季节性特征，合理调度乡村地区具有一定规模且易于运输的农业废弃物资源，通过多主体间能源交易与信息互通，实现资源的灵活调度和协同规划。

在构建新型乡村能源系统的愿景下，国内学者围绕其发展路径展开了相关研究。文献[8]提出一种乡村综合能源系统优化框架，从农业负荷建模、综合能源系统优化运行及规划方面开展了深入研究；文献[9]提出一种乡村型综合能源系统规划模型，考虑了需求响应、能源利用效率和碳排放成本，提升了系统的经济效益；文献[10]构建了包含光伏制氢、能量存储等要素的综合能源系统模型，提出了乡村综合能源系统两阶段鲁棒优化日前调度方法；文献[11]建立了电转氨耦合设备的数学模型，定义了能源系统的协调运行指标，构建了以协调运行指标最大化为上层目标、运行成本最小化为下层目标的双层优化调度模型；文献[12]考虑农村地区分布式电源和农业设施的运行特性，建立了配电网分布鲁棒优化模型。然而，这些文献忽略了规划区域内生物质种类、产量、开发利用模式等因素对乡村综合能源系统规划的影响。文献[13]提出了考虑生物质储运模式的多区域综合能源系统协同规划方法，协调优化了生物质原料的运输过程；文献[14]提出了一种生物质收购价格弹性理论，建立了秸秆收集成本模型，将其引入工业园区综合能源系统的上层目标函数中。文献[15]构建了乡村综合能源系统中4种生物质原料供应模型，分别分析了不同供应模式的效果、适用性与相应正式的实施策略。这些文献虽然考虑了规划区域的生物质开发利用模式，但侧重于规划区域内生物质资源的“自产自销”，忽略了生物质资源可以交易获取的商品属性。

“能源交易”和“博弈”是新型乡村综合能源系统多主体协同规划的“纽带”和“手段”，许多学者在能源系统博弈方面取得了一些进展。文献[16]基于碳交易和绿证交易原理，构建了多园区的绿证-

碳排放联动双层交易框架；文献[17]通过建立成本降低比分布模型，提出了一种非合作博弈的多微网分布式协同优化方法；文献[18]考虑柔性配电装置快速灵活调节网络潮流的优点，提出一种柔性网架结构下考虑多微网与配电网双边交易的协同规划方法；文献[19]为实现综合能源系统可再生能源的充分消纳，提升能源系统各主体的交互效益，提出了一种基于三层博弈的社区综合能源系统电热交易方法。但是，现有的多主体能源交易多集中在能源优化运行和电、热、气等能源交易方面，而涉及乡村地区能源系统规划建设和生物质交易的研究较少。

基于上述背景，本文针对乡村场景提出一种考虑生物质交易的乡村能源系统多主体协同规划方法。首先，建立乡村能源系统多主体的协同规划模式框架，分析乡村地区生物质的季节特性，并构建了生物质可用量模型和沼气站的季节性产气量模型。接着，根据各主体的利益诉求与交易模式，构建乡村综合能源系统运营商和抽水蓄能电站运营商的目标函数和约束条件。然后，通过纳什谈判理论求解协同规划模型，利用交替乘子法求解出能源系统的规划方案与交易机制。最后，选取广西某乡村案例数据，通过仿真验证了所提方法的有效性。

1 新型乡村能源系统协同规划框架

本文提出的新型乡村能源系统集成乡村综合能源系统(integrated rural energy system, IRES)和抽水蓄能电站(pumped storage power station, PSPS)于一体，以电能和生物质交易为纽带，通过能源交易和信息互联机制实现乡村能源系统的协同规划，如图1所示。



图1 乡村能源系统多主体框架

Fig. 1 Multi-agent framework for rural energy systems

乡村能源系统中不同 IRES 运营商所在区域的农业产业、负荷情况以及投资运营方不同。因此，它们在能源规划方案与利益诉求上有不同的导向

性,在协同规划时,这些运营商应本着“自产自用,余能交易”的原则参与乡村能源系统的协同规划。

乡村能源系统中 IRES 运营商所在村庄分布着温室大棚、养殖场、水稻农田等,能够产生大量的生物质资源。本文因地制宜拟选建沼气站(biogas station, BS)、沼气燃机(biogas turbine, BT)、沼气锅炉(biogas boiler, BB)、光伏(photovoltaic, PV)、风电(wind turbine, WT)、电锅炉(electric boiler, EB)、电储能(electric energy storage, EES)、热储能(heat energy storage, HES)等设备,如图 2 所示。乡村地区梯级水力资源丰富,乡村能源系统可充分发挥区位优势,利用 PSPS 为系统提供新能源消纳和功率平衡服务。由于 PSPS 运营商具备电力市场化交易的条件,乡村能源系统通过“容量租赁”的方式引入 PSPS 运营商,通过电力交易机制发挥独立储能的技术优势。

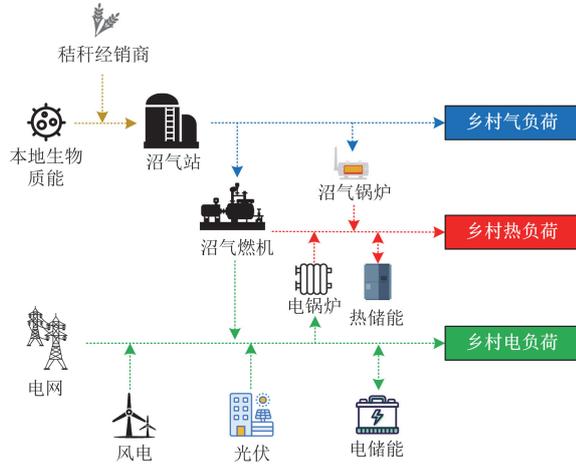


图 2 IRES 运营商拟建设框架

Fig. 2 IRES operator's framework planned to set up

乡村地区各运营商分布广泛,热网和气网联通交易损耗较大,不具备现实条件,因此本文研究的侧重点在乡村各主体的电能交易与生物质交易。乡村能源系统基于多主体博弈理论建立协同机制, IRES1 运营商、IRES2 运营商和 PSPS 运营商作为博弈参与者,以实现最大化自身效益为目标,寻求自身最优规划方案和能源交易策略。各主体通过纳什谈判博弈寻求纳什均衡点,并以均衡点为基础确立规划建设方案和能源交易机制。

2 乡村地区的生物质模型

2.1 乡村地区生物质的季节性特征

乡村地区农业活动具有季节性和周期性特征,这对农业生物质的产出具有显著影响。沼气生产通常依赖于农业生物质,如畜禽粪便、农作物秸秆等,这些废弃物的产量在不同季节会有所变化,从而影

响到沼气的生产量,如图 3 所示。因此, IRES 运营商沼气站需要根据各季节生物质原料供应量调整生产计划。

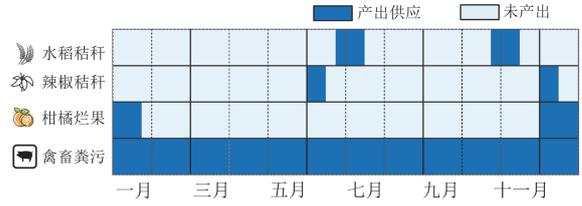


图 3 生物质原料时令图

Fig. 3 Biomass materials seasonal map

2.2 生物质产出量模型

乡村地区农业生产活动产生的生物质产量难以统计和监测^[20],本文利用该地区农作物预测产量和畜禽预测存栏量推算相应生物质的量。

2.2.1 种植业生物质可用量

利用农业种植物预测产量来推算水稻秸秆、温室大棚辣椒秸秆、柑橘烂果等生物质的理论可用总量,其数学模型为

$$W_{scn,i}^r = h_{scn,i}^r \tau_i v_i \quad (1)$$

式中: $W_{scn,i}^r$ 为第 r 季度第 i 类种植业废弃物的理论可用总量; $h_{scn,i}^r$ 为第 r 季度第 i 类农作物的产量; τ_i 为第 i 类生物质的产废比系数; v_i 为第 i 类农作物废弃物的收集系数。

2.2.2 养殖业生物质可用量

利用畜禽每日预测存栏数量推算每季度畜禽粪污可用量,其数学模型为

$$W_{scf}^r = \sum z^r x \phi \quad (2)$$

式中: W_{scf}^r 为畜禽在第 r 季度的粪污可用量; z^r 为第 r 季度畜禽每日在栏量; x 为单个畜禽的粪污日产出量; ϕ 为畜禽粪污的收集系数。

2.3 IRES 运营商收集当地生物质成本模型

IRES 运营商收集当地农业生物质的成本主要包含收购成本、运输成本和原料预处理成本。

生物质收购成本表示为

$$C_{b1,i} = W_i c_{de,i} \quad (3)$$

式中: $C_{b1,i}$ 为第 i 类生物质收购成本; W_i 为第 i 类生物质的收购量; $c_{de,i}$ 为第 i 类生物质的收购价格。

生物质运输成本表示为

$$C_{b2,i} = W_i c_{tra,i} d_i \quad (4)$$

式中: $C_{b2,i}$ 为第 i 类生物质的运输成本; $c_{tra,i}$ 为第 i 类生物质单位距离运输成本; d_i 为第 i 类生物质的运输距离。

生物质原料预处理成本表示为

$$C_{b3,i} = k_i W_i \quad (5)$$

式中: $C_{b3,i}$ 为第 i 类生物质的原料预处理成本; k_i 为第 i 类生物质预处理成本系数。

IRES 运营商收集当地生物质的成本, 表示为

$$\pi_{col} = \sum_i C_{b1,i} + C_{b2,i} + C_{b3,i} \quad (6)$$

式中: π_{col} 为 IRES 运营商生物质收集成本。

2.4 沼气站季度产气量与建设容量模型

IRES 运营商中沼气站每个季度的产气总量取决于该季度用于发酵生物质原料的总固体量, 又称干物质量。基于沼气站发酵各类生物质的质量, 计算沼气站每季度的产气量, 表示为

$$G^r = \sum_i M_i^r S_i Y_i y_i \quad (7)$$

式中: G^r 为沼气站在第 r 季度的沼气总产量; M_i^r 为沼气站第 r 季度发酵的第 i 类生物质质量; S_i 为第 i 类生物质总固体含量; Y_i 为第 i 类生物质总固体的产气率; y_i 为第 i 类生物质产气量修正因子。

沼气站建设容量与沼气季度产气量的关系式为

$$V_{BIO} = \frac{\max(G^r/D^r)}{r_{p(20)} \theta^{(T_c-20)}} \quad (8)$$

式中: V_{BIO} 为沼气站的建设容量; D^r 为第 r 季度的天数; T_c 为发酵环境设定温度; $r_{p(20)}$ 为容积产气率; θ 为温度影响系数。

3 博弈主体模型

3.1 IRES 类型运营商目标函数与约束条件

IRES 类型运营商中第 j 个运营商的目标函数为等年值规划成本 $F_{IRES,j}$, 包含建设成本 $C_{inv,j}$ 、维护成本 $C_{op,j}$ 、能源交易成本 $C_{trade,j}$ 、电网购电成本 $C_{grid,j}$ 、生物质经销商秸秆购买成本 $C_{de,j}$ 和生物质收集成本 $\pi_{col,j}$ 。其目标函数表示为

$$\min F_{IRES,j} = C_{inv,j} + C_{op,j} + C_{trade,j} + C_{grid,j} + C_{de,j} + \pi_{col,j} \quad (9)$$

$$C_{inv,j} = \sum_{n=1}^N \frac{s(1+s)^{T_{n,j}^h}}{(1+s)^{T_{n,j}^h} - 1} \zeta_{n,j} \psi_{n,j} \quad (10)$$

$$C_{op,j} = \sum_{r=1}^{R_{sc}} \sum_{d=1}^{D^r} \sum_{t=1}^T P_{n,j}^{t,r} c_{op,n,j}^{t,r} \quad (11)$$

$$C_{trade,j} = \sum_{r=1}^{R_{sc}} \sum_{d=1}^{D^r} \sum_{t=1}^T P_{k,j}^{t,r} R_{k,j}^{t,r} + P_{PSPS,j}^{t,r} R_{PSPS,j}^{t,r} + M_{k,j}^{bio,r} R_{k,j}^{bio,r} \quad (12)$$

$$C_{grid,j} = \sum_{r=1}^{R_{sc}} \sum_{d=1}^{D^r} \sum_{t=1}^T P_{grid,j}^{t,r} R_{grid}^{t,r} \quad (13)$$

$$C_{de,j} = \sum_{r=1}^{R_{sc}} M_j^{scn2,r} R_j^{scn2,r} \quad (14)$$

式中: $\zeta_{n,j}$ 、 $T_{n,j}^{li}$ 、 $\psi_{n,j}$ 分别为第 j 个 IRES 运营商第 n 类设备的规划容量、生命周期和单位容量建设成本; N 为设备类型数; s 为设备的贴现率; R_{sc} 为季度总数; $P_{n,j}^{t,r}$ 、 $c_{op,n,j}^{t,r}$ 分别为第 j 个 IRES 运营商第 n 类设备在第 r 季度 t 时刻的出力和单位出力维护成本; T 取值 24; $P_{k,j}^{t,r}$ 为第 k 个 IRES 运营商和第 j 个 IRES 运营商电能在第 r 季度 t 时刻的交易量, 正值表示第 k 个 IRES 运营商向第 j 个 IRES 运营商出售电能; $R_{k,j}^{t,r}$ 表示第 k 个 IRES 运营商和第 j 个 IRES 运营商在第 r 季度 t 时刻的电能交易价格; $P_{PSPS,j}^{t,r}$ 、 $R_{PSPS,j}^{t,r}$ 分别为 PSPS 运营商和第 j 个 IRES 运营商在第 r 季度 t 时刻的电能交易量和交易价格; $P_{grid,j}^{t,r}$ 表示第 j 个 IRES 运营商在第 r 季度 t 时刻向电网的购电量; $R_{grid}^{t,r}$ 为第 r 季度 t 时刻电网电价; $M_{k,j}^{bio,r}$ 、 $R_{k,j}^{bio,r}$ 分别为第 k 个 IRES 运营商和第 j 个 IRES 运营商在第 r 季度生物质的交易量与交易价格; $M_j^{scn2,r}$ 、 $R_j^{scn2,r}$ 分别为第 j 个 IRES 运营商在第 r 季度向生物质经销商购买秸秆量和购买价格。

IRES 类型运营商约束模型如下。

1) 设备建设约束

$$\theta_{n,j} \zeta_{n,j}^{\min} \leq \zeta_{n,j} \leq \theta_{n,j} \zeta_{n,j}^{\max} \quad (15)$$

式中: $\zeta_{n,j}$ 表示第 j 个 IRES 运营商第 n 类能源设备规划容量; $\theta_{n,j}$ 表示设备的建设情况, 为布尔变量, 1 表示建设, 0 表示未建设; $\zeta_{n,j}^{\min}$ 、 $\zeta_{n,j}^{\max}$ 分别为设备规划容量的最小值和最大值。

2) 设备爬坡约束

IRES 运营商的设备正常工作时, 需要运行在合理的功率区间且满足爬坡约束。

$$\begin{cases} P_{n,j}^{\min} \leq P_{n,j}^t \leq P_{n,j}^{\max} \\ D_{n,j} \Delta t \leq P_{n,j}^{t+1} - P_{n,j}^t \leq B_{n,j} \Delta t \end{cases} \quad (16)$$

式中: $P_{n,j}^{\min}$ 、 $P_{n,j}^{\max}$ 分别为第 j 个 IRES 运营商第 n 类能源设备的最小、最大运行功率; $P_{n,j}^t$ 为第 j 个 IRES 运营商第 n 类能源设备在 t 时刻的运行功率; Δt 为单位时间, 本文取值为 1 h; $B_{n,j}$ 、 $D_{n,j}$ 分别为第 j 个 IRES 运营商第 n 类能源设备爬坡功率的上下限。

3) 功率约束

$$\begin{cases} P_{BT,j}^{t,r,e} + P_{PV,j}^{t,r,e} + P_{WT,j}^{t,r,e} - P_{EB,j}^{t,r,e} + P_{k,j}^{t,r,e} + P_{PSPS,j}^{t,r,e} + \\ P_{EES,j}^{t,r,e} + P_{grid,j}^{t,r} = P_{load,j}^{t,r,e} \\ P_{BT,j}^{t,r,h} + P_{BB,j}^{t,r,h} + P_{EB,j}^{t,r,h} + P_{HES,j}^{t,r,h} = P_{load,j}^{t,r,h} \\ P_{BS,j}^{t,r,g} - P_{BT,j}^{t,r,g} - P_{BB,j}^{t,r,g} = P_{load,j}^{t,r,g} \end{cases} \quad (17)$$

$$\sum_{d=1}^{D^r} \sum_{t=1}^T P_{BS,j}^{t,r,g} \leq G_j^r \quad (18)$$

式中: $P_{load,j}^{t,r,e}$ 、 $P_{load,j}^{t,r,h}$ 、 $P_{load,j}^{t,r,g}$ 分别为第 j 个 IRES 运营商在第 r 季度 t 时刻的电负荷、热负荷和气负荷; $P_{BT,j}^{t,r,e}$ 、 $P_{BT,j}^{t,r,h}$ 分别为第 j 个 IRES 运营商的沼气燃机在第 r 季度 t 时刻发电功率、发热功率; $P_{PV,j}^{t,r,e}$ 为第 j 个 IRES 运营商的光伏在第 r 季度 t 时刻发电功率; $P_{WT,j}^{t,r,e}$ 为第 j 个 IRES 运营商的风电在第 r 季度 t 时刻的发电功率; $P_{EB,j}^{t,r,e}$ 、 $P_{EB,j}^{t,r,h}$ 分别为第 j 个 IRES 运营商的电锅炉在第 r 季度 t 时刻的用电功率和发热功率; $P_{PSPS,j}^{t,r,e}$ 为 PSPS 运营商与第 j 个 IRES 运营商在第 r 季度 t 时刻的电能交易量; $P_{k,j}^{t,r,e}$ 为第 k 个 IRES 运营商和第 j 个 IRES 运营商在第 r 季度 t 时刻的电能交易量; $P_{BS,j}^{t,r,g}$ 为第 j 个 IRES 运营商的沼气池在第 r 季度 t 时刻的出气量; $P_{BB,j}^{t,r,g}$ 、 $P_{BB,j}^{t,r,h}$ 分别为第 j 个 IRES 运营商的沼气锅炉在第 r 季度 t 时刻的用气功率和产热功率; $P_{ESS,j}^{t,r,e}$ 、 $P_{HES,j}^{t,r,h}$ 分别为第 j 个 IRES 运营商的电储能和热储能在第 r 季度 t 时刻的出力功率; G_j^r 为第 j 个 IRES 运营商的沼气池在第 r 季度沼气总产量。

4) 生物质约束

$$M_{j,i}^r = W_{j,i}^r + M_{k,j,i}^{bio,r} + M_j^{scn2,r} \quad (19)$$

$$M_{k,j,i}^{bio,r} \leq W_{k,i}^r \quad (20)$$

式中: $M_{j,i}^r$ 为第 j 个 IRES 运营商的沼气站在第 r 季度发酵第 i 类生物质的质量; $W_{j,i}^r$ 为第 j 个 IRES 运营商所在村庄在第 r 季度第 i 类生物质的可用量; $M_j^{scn2,r}$ 为第 j 个 IRES 运营商向生物质经销商购买的水稻秸秆量; $M_{k,j,i}^{bio,r}$ 为第 k 个 IRES 运营商和第 j 个 IRES 运营商间第 i 类生物质的交易量, 正值表示出售, 负值表示购买; $W_{k,i}^r$ 为第 k 个 IRES 运营商所在村庄在第 r 季度第 i 类生物质的可用量。

3.2 PSPS 运营商主体目标函数与约束条件

抽水蓄能运营商运营模式为区域代理模式, 目标函数包含两个部分: 容量租赁费和电能交易收益, 数学表达式为

$$\min F_{PSPS} = \zeta_{PSPS} \psi_{PSPS} + \sum_{r=1}^{R_{sc}} \sum_{d=1}^{D^r} \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J P_{j,PSPS}^{t,r} R_{j,PSPS}^{t,r} \quad (21)$$

式中: F_{PSPS} 为 PSPS 的等年值经济效益; ζ_{PSPS} 、 ψ_{PSPS} 分别为 PSPS 的租赁容量和单位容量租赁成本; $P_{j,PSPS}^{t,r}$ 、 $R_{j,PSPS}^{t,r}$ 分别为第 j 个 IRES 运营商和 PSPS 运营商在第 r 季度 t 时刻的电能交易量和交易价格; J 为 IRES 运营商数量, 本文取值为 2。

$$I_{PSPS}^{t,r,gs} P_{PSPS}^{gs,min} \leq P_{PSPS}^{t,r,gs} \leq I_{PSPS}^{t,r,gs} P_{PSPS}^{gs,max} \quad (22)$$

$$I_{PSPS}^{t,r,ps} P_{PSPS}^{ps,min} \leq P_{PSPS}^{t,r,ps} \leq I_{PSPS}^{t,r,ps} P_{PSPS}^{ps,max} \quad (23)$$

$$I_{PSPS}^{t,r,gs} + I_{PSPS}^{t,r,ps} \leq 1 \quad (24)$$

$$E^{t,r} = E^{t-1,r} + \sum (P_{PSPS}^{t,r,ps} - P_{PSPS}^{t,r,gs}) \quad (25)$$

$$E^{min} \leq E^{t,r} \leq \zeta_{PSPS} \quad (26)$$

$$E^T = E^0 \quad (27)$$

式中: $P_{PSPS}^{t,r,gs}$ 、 $P_{PSPS}^{t,r,ps}$ 分别为 PSPS 运营商在第 r 季度 t 时刻售电功率和购电功率; $P_{PSPS}^{gs,min}$ 、 $P_{PSPS}^{gs,max}$ 分别为 PSPS 运营商售电功率的最小值和最大值; $P_{PSPS}^{ps,min}$ 、 $P_{PSPS}^{ps,max}$ 分别为 PSPS 运营商购电功率的最小值和最大值; $I_{PSPS}^{t,r,gs}$ 、 $I_{PSPS}^{t,r,ps}$ 分别为 PSPS 运营商第 r 季度 t 时刻售电和购电状态变量; $E^{t,r}$ 为第 r 季度 t 时刻租赁容量状态; E^{min} 为租赁容量状态的下限; ζ_{PSPS} 为 PSPS 运营商租赁容量; E^T 、 E^0 分别为 PSPS 运营商在 T 时刻和初始时刻的容量状态, T 取值 24。

4 多主体博弈模型

本文所构建的乡村能源系统多主体博弈架构中, 博弈者为 IRES1 运营商、IRES2 运营商和 PSPS 运营商。三者博弈过程中地位相当, 分别作为独立、理性的个体参与能源交易, 通过纳什谈判博弈达成共识, 共同制定能源系统协同规划方案和交易机制, 如图 4 所示。纳什谈判博弈中各博弈参与者存在可调和的利益冲突, 博弈参与者都会尽可能地远离谈判破裂点, 乡村能源系统多主体纳什谈判博弈效用函数可表示为

$$\begin{cases} \min \prod (F_m - F_m^0) \\ \text{s.t. } F_m \leq F_m^0 \end{cases} \quad (28)$$

式中: $m \in \{\text{IRES1, IRES2, PSPS}\}$; F_m 为博弈者 m 经过纳什谈判建立协同机制后的经济效益; F_m^0 为博弈参与者 m 的谈判破裂点, 即 m 主体独立建设运行的经济效益。

纳什谈判博弈模型本质上是一个典型的非线性优化问题, 本文将多主体纳什谈判问题等效转化为两个谈判子问题, 然后利用交替乘子法构造分布式

优化框架，并采用顺序优化方式依次循环迭代求解两个子问题，得到原问题的最优解，具体求解方法参见文献[21-22]。

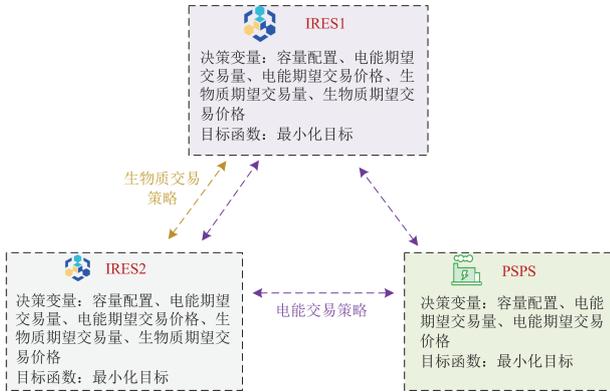


图 4 多主体纳什谈判框架

Fig. 4 Multi-agent Nash negotiation framework

5 算例验证

5.1 算例描述

为验证所提方法的有效性，本文选取广西某乡村地区的案例数据进行仿真分析。乡村能源系统季节场景包括春季、夏季、秋季及冬季。图 5 和图 6 分别为该地风电、光伏的功率标么值。沼气站生物质原料季节性供应如表 1 所示，沼气站的建设成本为 4.50×10^3 元/ m^3 ，等年值维护成本为 3.20×10^2 元/ m^3 ，其他能源设备的建设成本和维护成本如表 2 所示，设备贴现率为 8%。抽水蓄能电站的相关参数参见文献[23]，农业废弃物的收集系数、产废比等参见文献[24]，农业废弃物的总固体含量与产气率等参数参见文献[25]。

5.2 结果分析

为验证所提方法的合理性和实用性，本文设置了 4 种不同的规划方案进行分析。

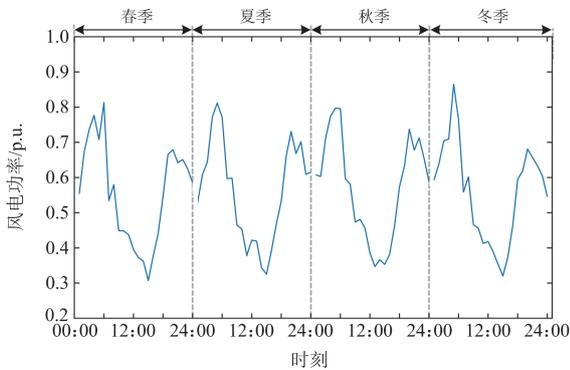


图 5 风电功率

Fig. 5 Wind turbine power

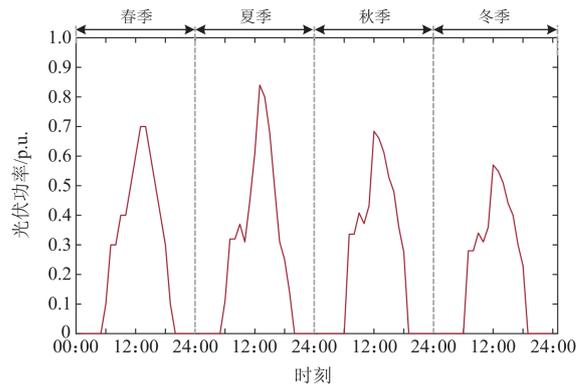


图 6 光伏功率

Fig. 6 Photovoltaic power

表 1 沼气站生物质季节性供应

Table 1 Biogas station biomass seasonal supply

| 农作物 | 春季 | 夏季 | 秋季 | 冬季 |
|------|----|----|----|----|
| 水稻秸秆 | — | √ | √ | — |
| 辣椒秸秆 | — | √ | — | √ |
| 柑橘烂果 | — | — | — | √ |
| 禽畜粪污 | √ | √ | √ | √ |

表 2 能源设备的建设成本和维护成本

Table 2 Construction costs and maintenance costs of energy equipment

| 设备 | 元/kWh | |
|-----|--------------------|-----------------------|
| | 建设成本 | 维护成本 |
| PV | 3.50×10^4 | 3.90×10^{-2} |
| WT | 2.80×10^4 | 2.10×10^{-2} |
| BB | 3.20×10^4 | 4.00×10^{-2} |
| BT | 3.50×10^4 | 1.30×10^{-2} |
| EB | 1.80×10^4 | 1.50×10^{-2} |
| EES | 5.00×10^4 | 2.40×10^{-2} |
| HES | 6.00×10^4 | 1.80×10^{-2} |

方案 1：本文所提乡村能源系统多主体协同规划方法。

方案 2：乡村能源系统多主体协同规划，但不考虑 IRES1 运营商和 IRES2 运营商间的生物质交易。

方案 3：乡村能源系统多主体协同规划，但不考虑 IRES1 运营商和 IRES2 运营商间的电能交易与生物质交易。

方案 4：不考虑各主体间的能源交易，各主体分别独立求解自身的最优规划方案。

5.2.1 各主体设备建设情况分析

表 3 为不同方案下乡村能源系统各运营商的设备建设情况，“—”表示未建设或未租赁。图 7 为方案 1 乡村能源系统的设备建设情况。方案 1 中，IRES1 运营商建设的设备包括 BS、PV、WT、EB、BB，IRES2 运营商建设的设备有 BS、PV、WT、EB、

表 3 不同方案下各运营商设备建设情况
Table 3 Construction of each main equipment under different schemes

| 设备类型 | 运营商 | 方案 1 | 方案 2 | 方案 3 | 方案 4 |
|-------------------|-------|------|------|------|------|
| BS/m ³ | IRES1 | 4151 | 4622 | 4423 | 5422 |
| | IRES2 | 4653 | 4254 | 4254 | 5754 |
| PV/kW | IRES1 | 3256 | 3390 | 3647 | 3742 |
| | IRES2 | 3247 | 3624 | 3766 | 3815 |
| WT/kW | IRES1 | 3840 | 3891 | 4034 | 4113 |
| | IRES2 | 4156 | 4578 | 4600 | 4750 |
| BT/kW | IRES1 | — | — | — | 151 |
| | IRES2 | — | — | — | 212 |
| BB/kW | IRES1 | 393 | 448 | — | 474 |
| | IRES2 | 440 | — | — | 508 |
| EB/kW | IRES1 | 933 | 908 | 942 | 963 |
| | IRES2 | 1503 | 1904 | 1904 | 1562 |
| EES/kW | IRES1 | — | — | — | 2731 |
| | IRES2 | — | — | — | 3572 |
| HES/kW | IRES1 | — | — | — | — |
| | IRES2 | — | — | — | — |
| PSPS/kW | PSPS | 6261 | 6448 | 7579 | — |

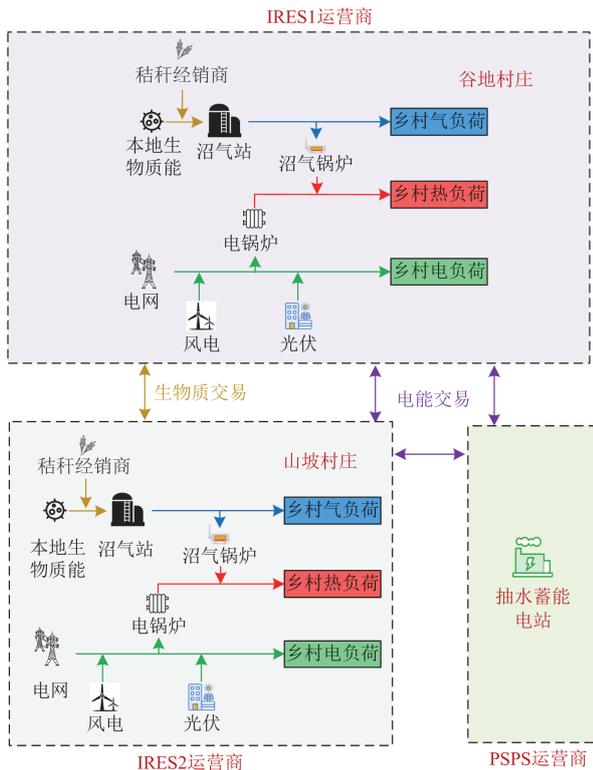


图 7 方案 1 乡村能源系统设备建设情况

Fig. 7 Rural energy system equipment construction in scenario 1

BB, 两个 IRES 运营商都未建设 EES, 说明在多主体协同规划时, IRES1、IRES2 运营商与 PSPS 运营商进行电能交易的经济性优于独立配置 EES。4 种

方案中, IRES1、IRES2 运营商均未选择建设 HES, 表明 HES 在广西乡村场景下不具有经济性。

方案 1 对比方案 2, IRES1 和 IRES2 运营商的 PV、WT 设备容量以及 PSPS 运营商的租赁容量都有所降低。其中, 方案 1 中 IRES2 运营商较方案 2 增大了 BS 规划容量, 还增加建设了 BB 设备, 而 IRES1 运营商的 BS 容量较方案 2 减少了 471 m³, 同时减少了 BB 设备的建设容量。可知, 生物质交易使得 IRES 类运营商根据生物质开发规模建设更加合理的 BS 容量。

结合表 4 可知, 方案 2 不考虑 IRES1 运营商和 IRES2 运营商间的生物质交易, 乡村能源系统的等年值设备配置成本比方案 1 高出 3.00×10^5 元; 方案 3 因不考虑 IRES1 运营商和 IRES2 运营商间的生物质交易与电能交易, 其乡村能源系统等年值设备配置成本比方案 1 高 6%; 方案 4 不考虑乡村能源系统各主体的协同规划与能源交互, 乡村能源系统不再引进 PSPS 运营商的容量租赁服务。与方案 4 相比, 方案 1 乡村能源系统等年值设备配置成本降低了 18%。通过多种方案对比验证了本文所提方法在设备配置上的经济性和有效性。

表 4 不同方案下各运营商等年值设备建设成本或租赁成本
Table 4 Annualized equipment construction cost or leasing cost for each operator under different schemes

| | IRES1 | IRES2 | PSPS | 乡村能源系统 |
|------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 方案 1 | 4.46×10^6 | 4.89×10^6 | 2.19×10^6 | 1.16×10^7 |
| 方案 2 | 4.75×10^6 | 4.90×10^6 | 2.26×10^6 | 1.19×10^7 |
| 方案 3 | 4.64×10^6 | 4.95×10^6 | 2.65×10^6 | 1.23×10^7 |
| 方案 4 | 6.77×10^6 | 7.42×10^6 | — | 1.42×10^7 |

5.2.2 运营商能源交易及运营情况分析

图 8 为方案 1 中 IRES1 运营商的电功率出力情况, IRES1 运营商建设有较大容量的 PV 和 WT 新能源设备, 能够产生较为充足的电能。在电能交易方面, IRES1 运营商与 IRES2 运营商的交易量较小, 而与 PSPS 运营商的能源交易量较大且更为频繁, 验证了 PSPS 运营商在乡村能源系统中的调峰服务属性。春季时, IRES1 运营商在 11:00—15:00 与 17:00—20:00 这两个时段内向其他运营商出售电能, 而在 16:00 购入电能, 这一状态突变体现了多主体协同规划下电能市场化交易的灵活性。图 9 为方案 1 中 IRES1 运营商热功率出力情况, 在春、秋、冬 3 个季节主要由 EB 制热满足乡村用户热负荷需求, 而夏季则由 BB 和 EB 共同出力满足谷地村庄用户热负荷需求, 这一结果产生的原因, 其一为夏季电负荷水平较高, IRES1 运营商选择减少 EB 制

热;其二是夏季 IRES1 运营商生物质资源较为充足, BS 有较为充足的产气量供 BB 制热。图 10 为方案 1 中 IRES1 运营商气功率出力情况, IRES1 运营商 BS 通过将乡村地区的农业生物质转换为沼气, 为用户提供了足量的燃气供应。

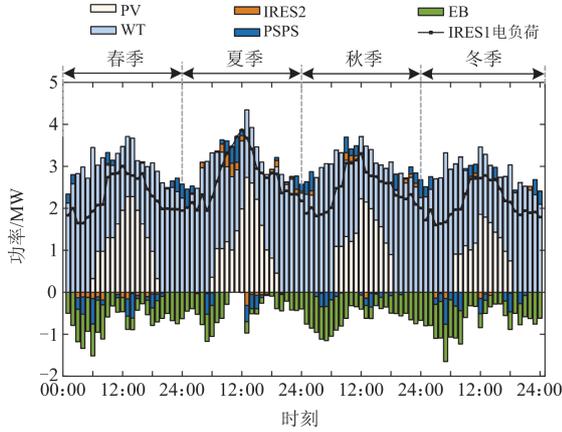


图 8 方案 1 IRES1 运营商电功率出力情况

Fig. 8 IRES1 operator electrical power output in scenario 1

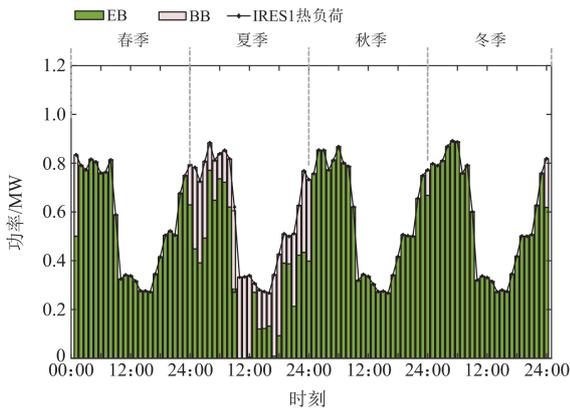


图 9 方案 1 IRES1 运营商热功率出力情况

Fig. 9 IRES1 operator thermal power output in scenario 1

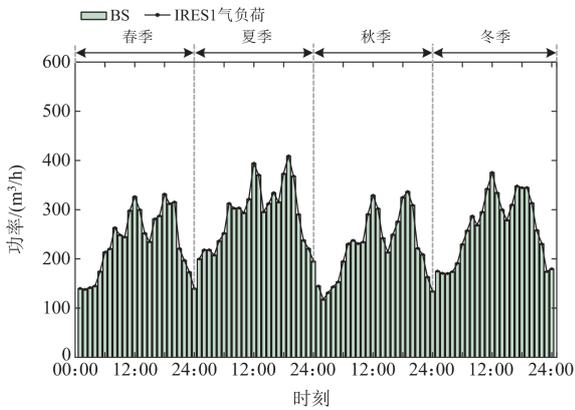


图 10 方案 1 IRES1 运营商气功率出力情况

Fig. 10 IRES1 operator gas power output in scenario 1

图 11 为乡村能源系统各运营商电能交易价格, 可以看出, IRES1 运营商、IRES2 运营商和 PSPPS 运营商间电能交易价格低于电网的分时电价。IRES1 运营商、IRES2 运营商能以低于电网电价的价格买入电能来满足自身需求。同时, PSPPS 运营商也能以较低的价格购入电能, 在电价较高时出售, 以获得一定的经济收益。

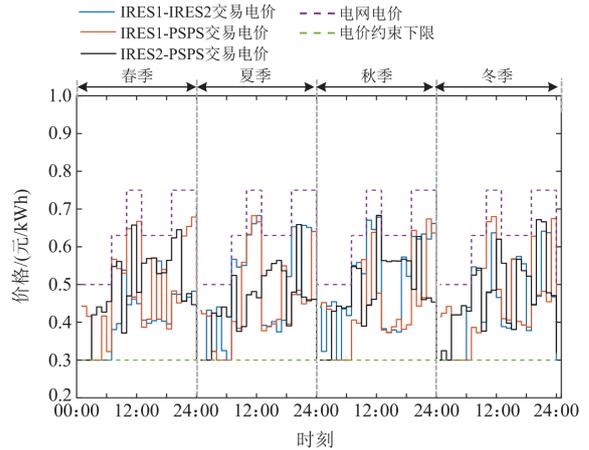


图 11 方案 1 运营商电能交易价格

Fig. 11 Operator electricity transaction price in scenario 1

图 12 为方案 1 中 PSPPS 运营商的出力情况, 可知 PSPPS 运营商夏季电能交易量占比较少, 租赁容量状态曲线较为平顺, 而在春、冬两季 PSPPS 的交易量更多, 租赁容量曲线起伏较大。图 13 为方案 1 中 PSPPS 运营商不同季节电能交易量占比, 四季占比分别为 27%、22%、24%和 27%。夏季交易量较少, 这是由于夏季电负荷较高, 且 IRES 运营商 BB 灵活运行, 因此 IRES 运营商的电能交易需求相对较小。结合图 12 和图 13 可知, 乡村能源系统内部的电能交易也具有季节性特征。

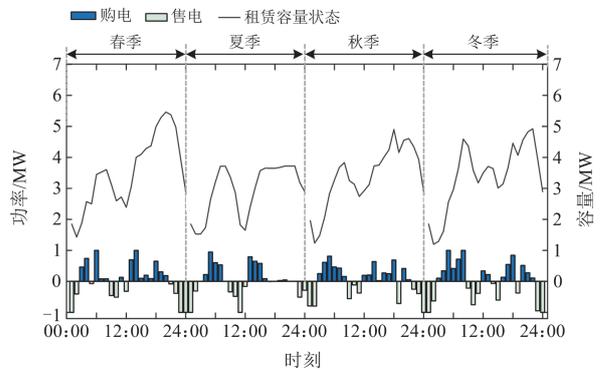


图 12 方案 1 PSPPS 运营商运营情况

Fig. 12 PSPPS operator operations in scenario 1

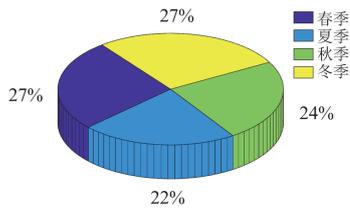


图 13 方案 1 PSPS 运营商不同季节电能交易量占比
Fig. 13 PSPS operator share of electricity trading volume in different seasons in scenario 1

5.2.3 乡村能源系统生物质交易情况分析

图 14 为谷地村庄和山坡村庄的农业生物质产出量与交易情况，谷地村庄分布有温室大棚和水稻农田。该村庄的温室大棚种植有辣椒，水稻一年两熟，早稻收获后农民会种植其他经济作物，因此晚稻秸秆的可用量少于早稻秸秆。在夏季和秋季，IRES1 运营商有着较充裕的水稻秸秆产量，不仅能满足自身 BS 用料需求，还能够售卖给 IRES2 运营商获取经济收益。在春、冬两季，IRES1 运营商需要向秸秆经销商购买一些秸秆来满足自身用料需求。

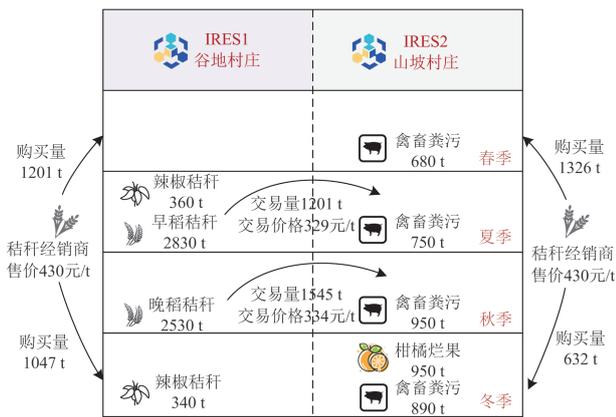


图 14 方案 1 下生物质交易情况

Fig. 14 Biomass trade chart under scenario 1

IRES2 运营商内部有生猪养殖场，禽畜粪污来源较为稳定，其夏、秋两季能从 IRES1 运营商获取更加经济的生物质秸秆。冬季随着柑橘烂果应季产出，IRES2 运营商从经销商处购买的秸秆量相对较少。

因此，对乡村能源系统投资者而言，通过开展 IRES1、IRES2 的生物质交易，可以实现生物质资源的“商品化”利用，使其成为一种可以灵活调度的资源参与到乡村综合能源系统的规划中。

图 15 为 IRES 运营商电能季节性交易量图，方案 1 中每个季节的电能交易量都低于方案 2，可见 IRES 运营商间的生物质交易使得各主体电能交易量有所减少。此外，方案 1 和方案 2 电能交易量差异最明显的两个季节为夏季和秋季，这两个季节

IRES 运营商分别交易了 1201 t、1545 t 水稻秸秆，可知，生物质交易发生季节可使得该季电能交易量大幅下降。通过方案 1、方案 2 对比可知，考虑生物质交易的乡村能源系统多主体规划能够削减 IRES 运营商的电能交易量，且这种削减现象在生物质交易发生季节更为明显。

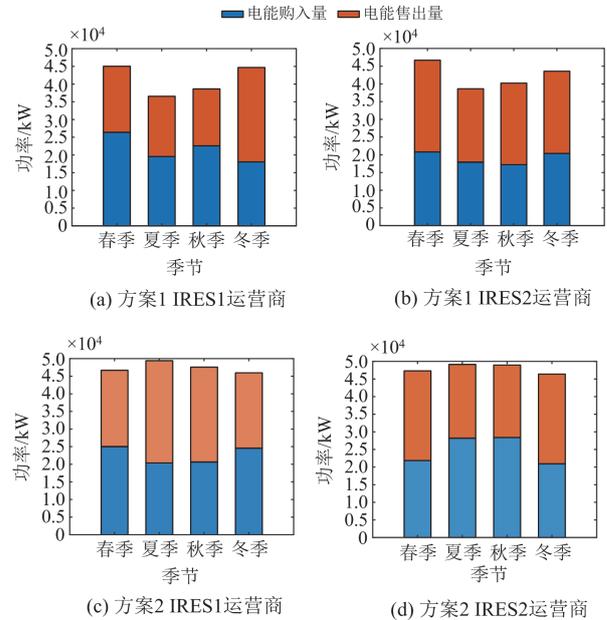


图 15 IRES 运营商电能季节性交易量

Fig. 15 IRES operator electricity seasonal trading volume

5.2.4 多方案经济性对比分析

表 5 为不同方案下各运营商的等年值成本，其中正值表示成本，负值表示收益。方案 1、方案 2、方案 3 中 PSPS 运营商的等年值盈利分别为 6.91×10^5 元、 9.42×10^5 元、 1.05×10^6 元，可见 IRES1 运营商和 IRES2 运营商的能源交易种类越少，乡村能源系统的 PSPS 运营商的盈利越多。方案 2 中 IRES1 运营商、IRES2 运营商间无生物质交易，其等年值成本分别增加了 11%、3%，乡村能源系统等年值成本较方案 1 增加了 4%；对比方案 3，方案 1 的乡村能源系统等年值成本降低了 17%；对比方案 4，方案 1 中乡村综合能源系统多主体在联合规划运营后总规划成本降低了 33%。对比 4 种方案可以得出以下结论：1) PSPS 运营商作为系统的储能服务主体，其盈利情况受到其他运营商能源交易种类的影响，且 IRES1 运营商和 IRES2 运营商的能源交易种类越多，乡村能源系统的 PSPS 运营商盈利越少；2) IRES1 和 IRES2 间的生物质交易与电能交易对降低乡村能源系统经济成本有重要意义，各运营商通过协同规划、能源交易能够提升乡村能源系统的经济效益。

表 5 不同方案下各运营商等年值成本
Table 5 Equivalent annual cost of each operator
under different schemes

| | IRES1 | IRES2 | PSPS | 乡村能源系统 |
|------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| 方案 1 | 6.12×10^6 | 7.27×10^6 | -6.9×10^5 | 1.16×10^7 |
| 方案 2 | 6.78×10^6 | 7.45×10^6 | -9.4×10^5 | 1.19×10^7 |
| 方案 3 | 7.16×10^6 | 7.83×10^6 | -1.05×10^6 | 1.39×10^7 |
| 方案 4 | 8.16×10^6 | 9.06×10^6 | — | 1.72×10^7 |

6 结论

本文以乡村能源系统协同规划为背景,提出一种考虑生物质交易的乡村能源系统多主体协同规划方法,通过算例分析验证了所提方法的有效性,主要结论如下。

1) 乡村能源系统多主体协同规划能够发挥各主体的主动性, IRES 运营商与 PSPS 运营商的收益运营模型存在差异,可以利用差异化目标函数和约束条件进行求解。在新型乡村能源系统内,各主体通过能源交互、信息共享建立协同机制,可实现各类能源的合理调度,并提升系统整体的经济效益。

2) PSPS 运营商作为独立主体参与乡村综合能源的交互竞争,使得 IRES 运营商不再独立配置 ESS 设备,并且 IRES 运营商间能源交易种类越少,系统中 PSPS 运营商的收益越高。

3) 仿真结果显示,乡村地区生产生活和能源系统的“季节性特征”不仅影响着农业生物质的产出、风光特性及用户负荷,而且也影响和制约着乡村能源系统的规划运营与能源交易。

参考文献

[1] 国家能源局、农业农村部、国家乡村振兴局. 加快农村能源转型发展助力乡村振兴的实施意见[EB/OL]. [2021-12-29]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/07/content_5666809.htm

[2] 郭正雄, 秦耀文, 李欣悦, 等. “双碳”一站式数字化服务平台建设与应用[J]. 供用电, 2023, 40(11): 18-25. GUO Zhengxiong, QIN Yaowen, LI Xinyue, et al. Construction and application of the “dual carbon” one-stop digital service platform[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(11): 18-25.

[3] 周小光, 资慧, 金田, 等. 双碳目标下电网异址双活调控中心负载均衡控制方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(7): 107-115. ZHOU Xiaoguang, ZI Hui, JIN Tian, et al. Load balancing control method for remote active-active control centers of power grid with carbon peak and neutrality targets[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,

2023, 60(7): 107-115.

[4] 王永利, 韩煦, 刘晨, 等. 基于生-光耦合利用的乡村电-热综合能源系统规划[J]. 电力建设, 2023, 44(3): 1-14. WANG Yongli, HAN Xu, LIU Chen, et al. Rural electricity-heat integrated energy system planning based on coupling utilization of biomass and solar resources[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(3): 1-14.

[5] 王泽楠, 滕云, 闫佳佳, 等. 考虑供能成本与碳排放权收益协同的新型乡村能源系统规划[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 7074-7088. WANG Zedi, TENG Yun, YAN Jiajia, et al. A new rural energy system planning method with consideration of energy resource cost and carbon emission trading benefit synergies[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 7074-7088.

[6] 字琼珍, 王昌梅, 吴凯, 等. “双碳”目标下中国农村能源发展现状、问题与对策[J]. 南方能源建设, 2024, 11(6): 69-78. ZI Qiongzhen, WANG Changmei, WU Kai, et al. Current situation, problem and countermeasure of China's rural energy development under the “dual carbon” goal[J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(6): 69-78.

[7] 张新, 杨建华, 王维洲, 等. 面向农村微电网的评价指标构建及应用[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6): 196-205. ZHANG Xin, YANG Jianhua, WANG Weizhou, et al. Construction and application of evaluation indexes for rural micro-energy-grid[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(6): 196-205.

[8] 谭洪. 含智慧农业负荷的乡村综合能源系统运行与规划研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.

[9] 刘莹, 宋丽敏, 龚强, 等. 考虑需求响应的乡村综合能源系统源网荷储协调规划模型研究[J]. 湖南电力, 2023, 43(3): 21-28. LIU Ying, SONG Limin, GONG Qiang, et al. Research on source-grid-load-storage coordinated planning model of rural integrated energy system considering demand response[J]. Hunan Electric Power, 2019, 43(3): 21-28.

[10] 王瑞琪, 王新立, 郭光华, 等. 农村光-氢-沼储能综合能源系统建模与鲁棒优化调度[J]. 中国电力, 2023, 56(5): 89-98. WANG Ruiqi, WANG Xinli, GUO Guanghua, et al. Modeling and robust optimal dispatch of rural integrated energy system considering PV-hydrogen-methane energy storage characteristics[J]. Electric Power, 2023, 56(5): 89-98.

[11] 袁文腾, 陈亮, 王春波, 等. 基于氨储能技术的电转氨耦合风-光-火综合能源系统双层优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(18): 6992-7003. YUAN Wenteng, CHEN Liang, WANG Chunbo, et al. Bi-level optimal scheduling of power-to-ammonia coupling

- wind-photovoltaic-thermal integrated energy system based on ammonia energy storage technology[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(18): 6992-7003.
- [12] 王雯沁, 高红均, 王仁浚, 等. 考虑分布式电源支撑与农业设施协调的配电网分布鲁棒优化[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(21): 89-98.
WANG Wenqin, GAO Hongjun, WANG Renjun, et al. Distributionally robust optimization of distribution network considering distributed generator support and agricultural facility coordination[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(21): 89-98.
- [13] 刘小慧, 王小君, 张义志, 等. 考虑生物质储运模式的多区域综合能源系统协同规划[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(6): 1648-1661.
LIU Xiaohui, WANG Xiaojun, ZHANG Yizhi, et al. Multi-regional integrated energy system collaborative planning considering biomass storage and transportation mode[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(6): 1648-1661.
- [14] 高阳, 席焱, 刘小慧, 等. 考虑生物质供给价格弹性的工业园区综合能源系统规划[J]. *电力建设*, 2021, 42(4): 49-58.
GAO Yang, XI Xiao, LIU Xiaohui, et al. Integrated energy system planning method for industrial parks considering the price elasticity of biomass supply[J]. *Electric Power Construction*, 2021, 42(4): 49-58.
- [15] 罗开颜. 考虑农村正式组织的生物质发电原料供应链博弈模型[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- [16] 岳子宜, 刘华志, 李永刚. 基于多阶段双重博弈的多园区随机场景低碳分布式调度优化[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(22): 8860-8873.
YUE Ziyi, LIU Huazhi, LI Yonggang. Low-carbon distributed scheduling optimization for multi-park stochastic situations based on a multi-stage dual game[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(22): 8860-8873.
- [17] 李希俊, 郝飞, 李杰, 等. 基于非合作博弈的多微电网协同运行策略[J/OL]. *电气工程学报*: 1-11[2024-12-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1289.TM.20240809.1123.008.html>.
LI Xijun, HAO Fei, LI Jie, et al. Distributed collaborative optimization strategy of multi-microgrid based on non-cooperative game[J/OL]. *Journal of Electrical Engineering*: 1-11[2024-12-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1289.TM.20240809.1123.008.html>.
- [18] 柏昊阳, 李华强, 臧天磊, 等. 柔性网架结构下考虑双边交易的多微网与配网协同规划[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(6): 51-64.
BAI Haoyang, LI Huaqiang, ZANG Tianlei, et al. Collaborative planning of multiple microgrids and a distribution network considering bilateral transactions in a flexible network structure[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(6): 51-64.
- [19] 牛焕娜, 王青林, 袁嘉兴, 等. 基于三层博弈的社区综合能源系统电热交易策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(5): 25-37.
NIU Huanna, WANG Qinglin, YUAN Jiaying, et al. Heat-electricity trading decisions of a community integrated energy system based on three-layer game theory[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(5): 25-37.
- [20] 黄小美, 刘晓赫, 莫忠磊, 等. 混合原料在不同发酵工况下的产气规律研究[J]. *能源研究与信息*, 2018, 34(2): 70-74, 81.
HUANG Xiaomei, LIU Xiaohe, MO Zhonglei, et al. Biogas production characteristics in the anaerobic fermentation process of mixed raw materials at different conditions[J]. *Energy Research and Information*, 2018, 34(2): 70-74, 81.
- [21] 李崎勇, 赵新哲, 郑一飞, 等. 基于纳什谈判考虑能源共享的区域综合能源系统优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(5): 22-32.
LI Jiyong, ZHAO Xinzhe, ZHENG Yifei, et al. Optimal configuration of a regional integrated energy system considering energy sharing based on Nash negotiation[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(5): 22-32.
- [22] 马腾飞, 裴玮, 肖浩, 等. 基于纳什谈判理论的风-光-氢多主体能源系统合作运行方法[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(1): 25-39, 395.
MA Tengfei, PEI Wei, XIAO Hao, et al. Cooperative operation method for wind-solar-hydrogen multi-agent energy system based on nash bargaining theory[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(1): 25-39, 395.
- [23] 刘艳娜. 水泵水轮机 S 特性对抽水蓄能电站过渡过程的影响[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.
- [24] 胡润青. 中国生物质能技术路线图研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [25] SCHERZINGER M, KALTSCHMITT M, ELBANHAWY A Y. Anaerobic biogas formation from crops' agricultural residues-modeling investigations[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 359.

收稿日期: 2024-08-30; 修回日期: 2025-01-25

作者简介:

雷 杨(1992—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为综合能源系统与配电网规划、人工智能技术在综合能源系统的应用等; E-mail: yleimirror@ahu.edu.cn

雷泽雨(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为乡村能源系统规划; E-mail: z22301217@stu.ahu.edu.cn

杭 俊(1987—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为永磁电机及电气装置的状态监测和故障诊断。E-mail: junhang@ahu.edu.cn

(编辑 许 威)