

# 多区域综合能源系统互联下的共享储能容量优化配置

帅轩越, 王秀丽\*, 黄晶

(西安交通大学电气工程学院, 陕西省 西安市 710049)

## Optimal Configuration of Shared Energy Storage Capacity Under Multiple Regional Integrated Energy Systems Interconnection

SHUAI Xuanyue, WANG Xiuli\*, HUANG Jing

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

**Abstract:** To effectively improve the energy utilization rate of multiple regional integrated energy systems (RIESs) while rationally configuring the energy storage system capacity, a model for the optimal allocation of the shared energy storage system capacity under multi-RIES interconnection is proposed. First, the multi-RIES operation framework is introduced in the context of shared energy storage and the operation mode of the shared energy storage system is analyzed. Second, for a type of RIES including CHP (combined heat and power) and heat pump, a bi-level optimal configuration model with a shared energy storage system as the upper layer and multiple RIESs as the lower layer is established. Among them, the upper layer takes the maximum profit of the shared energy storage system as the goal, and uses genetic algorithms to optimize the capacity and charge and discharge power of the shared energy storage; the lower layer takes the minimum total operating cost of multiple RIESs as the goal and uses the CPLEX solver to contribute to the equipment in each RIES. The plan, the purchase and sales plan with the main network, and the power interaction with the interconnection RIES are solved. Furthermore, considering that multiple RIESs belong to different stakeholders, the Nash bargaining method and the IPOPT solver are used to distribute the benefits of each RIES. Finally, through the analysis of a numerical example, it is verified that the model proposed in this paper can effectively reduce the operating cost of each RIES while simultaneously optimizing the parameter configuration of the shared energy storage system.

**Keywords:** regional integrated energy system; shared energy storage; bi-level optimization; Nash bargaining

**摘要:** 为有效提高多个区域综合能源系统 (regional integrated energy system, RIES) 的能源利用率, 同时合理配

置储能系统的容量, 提出一种多RIES互联下的共享储能系统容量优化配置模型。首先, 介绍了共享储能背景下多RIES运行框架, 分析了共享储能系统的运行模式。其次, 针对一类包含热电联产机组与热泵等设备的RIES, 建立以共享储能系统作为上层、多个RIES作为下层的双层优化配置模型。其中, 上层以共享储能系统盈利最大作为目标, 利用遗传算法对共享储能的容量、充放电功率进行优化; 下层以多RIES总运行成本最小作为目标, 利用CPLEX求解器对各RIES内设备出力计划、与主网间的购/售电计划以及与互联RIES的交互功率等进行求解。进一步, 考虑到多个RIES属于不同利益参与者, 利用纳什议价方法并结合IPOPT求解器对各RIES的利益进行分配。最后, 通过算例分析, 验证所提模型能够有效减少各RIES的运行成本, 同时优化了共享储能系统的参数配置。

**关键词:** 区域综合能源系统; 共享储能; 双层优化; 纳什议价

## 0 引言

能源始终在人类社会发展的进程中担任不可缺少的角色, 如何减少弃风弃光、提高能源利用率、实现可持续发展引起学者的广泛关注<sup>[1-3]</sup>。区域综合能源系统 (regional integrated energy system, RIES) 作为能源互联网的重要载体<sup>[4-8]</sup>, 能够将冷、热、电、气等多种能源协调调度, 实现系统多能互补与灵活运行。RIES在低碳运行<sup>[9]</sup>、提高可再生能源消纳率<sup>[10]</sup>以及提高系统灵活性<sup>[11]</sup>等多个方面具有显著优势, 可以有效提高系统能源利用率。

目前, 从RIES优化调度的目标数量出发, 可分为单目标优化<sup>[12]</sup>与多目标优化<sup>[13]</sup>。其中, 单目标优化大多针对RIES经济调度方面展开研究, 按照所研究的RIES数量可进一步分为单个RIES优化调度<sup>[14-15]</sup>与多

基金项目: 扬中绿色能源岛规划再分析及前景研究。

RIES互联优化调度<sup>[16-17]</sup>。文献[14]全面考虑了多种能源间的协调配合，建立了包含电、热、冷、气4个子系统的园区综合能源系统经济调度模型，通过分别对子系统独立运行与耦合运行的仿真，验证了不同能源子系统间耦合调度能有效减少系统总成本。文献[15]侧重分析用户行为对综合能源系统调度的影响，构建了计及用户行为下综合能源系统两阶段经济调度模型，其中第一阶段考虑了用户侧负荷的波动性，第二阶段在第一阶段的基础上以综合采购费用最低为目标。文献[16]以小型冷-热-电微网作为研究对象，考虑微网间功率交互与微网内的微源协调配合，建立了冷-热-电联供型多微网优化调度模型，结果表明多个微网可通过合作提高整体收益。文献[17]引入动态电价与非合作博弈论表征多个园区型综合能源系统间的竞争关系，建立了考虑动态电价机制的多园区博弈优化模型，验证了多个园区可通过内部电价交易减少彼此运行成本。

随着共享经济与储能技术的大力发展，共享储能技术<sup>[18]</sup>应运而生，在减少投资建设成本、提供辅助服务等方面具有显著优势。在综合能源系统优化调度的基础上，诸多学者引入共享储能系统（shared energy storage system, SESS）展开研究。文献[19]以社区型综合能源系统为研究对象，建立了共享储能与用户聚合商间的协同优化模型，用户可通过缴纳服务费用使用共享储能，从而降低用户用能费用。文献[20]面向不同类型的工业用户，建立基于共享储能的工业用户优化调度模型，研究对比了所有用户使用共享储能服务与各用户独立配置储能设备的情形，结论表明引入共享储能机制能显著降低用户日运行成本。文献[19-20]中共享储能系统的容量与充放电功率等参数为给定值，事实上，共享储能系统应针对“消费者”的实际租赁容量来确定最优参数以保证自身盈利最大。文献[21]给出了储能电站容量参数配置的思路，建立了基于储能电站与多微网系统的双层优化模型，保证了用户侧与储能电站运营商的收益双赢，但未考虑不同利益体的隐私保护。

需要指出的是，目前针对共享储能的研究才刚刚起步，大多研究将共享储能的参数视为常值，缺乏对共享储能参数配置的考虑，配置参数时不同利益体间的数据隐私未能得到保护。同时大多研究未考虑共享储能服务下多利益体的收益分配机制，而收益分配机制的设计决定着参与者合作的积极性。文献[19]仅通过用户的电热能耗来进行收益分配，所考虑的因素较

为局限。文献[20-21]将多个综合能源系统总运行成本最小作为目标函数，未对各系统的收益进行结算。另外，多个RIES、微网等互联运行的趋势日益突出，现有研究缺乏对多个RIES互联情况的考虑。

本文针对一类电-热区域综合能源系统，建立了共享储能系统与多个RIES的双层优化配置模型，通过启发式算法与求解器相结合的方法求解，进一步利用纳什议价方法对多个RIES的收益进行结算，为共享储能系统的优化配置提供参考方案。

## 1 系统运行框架

假定所研究的场景包含SESS、多个RIES系统以及配网，具体运行框架与RIES内部能量流动关系如图1所示。

SESS主要通过向多个RIES租赁储能服务盈利，即每个RIES在与SESS进行充放电时需缴纳相应的服务费用。

RIES主要由热电联产（CHP）机组、风机（WT）、热泵（HP）以及电、热负荷组成，电储能主要通过向SESS购买租赁服务，同时各RIES间通过联络线互联，进一步改善系统的经济性与可靠性。各RIES需时刻满足电、热出力与负荷的平衡，由于

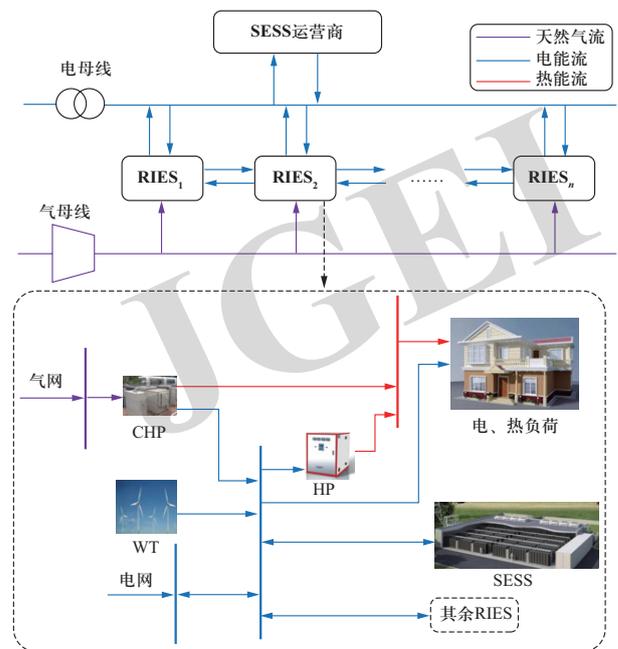


图1 系统运行框架与RIES内部能流关系

Fig. 1 System operation framework and RIES internal energy flow relationship

RIES内配有可再生能源发电, RIES具有“源荷二重性”: 当RIES内部电出力小于/大于电负荷时, RIES可向配网购/售电、向其余RIES取/送电以及向SESS租/返电。

## 2 SESS模型

设定所研究的场景包含 $n$ 个RIES, 研究周期为 $T$ 。SESS运营商通过向RIES租赁储能服务收取服务费, 但需承担SESS的投资建设成本与维护成本。如何设置合理的容量、功率极限, 使得SESS效益最大是本文关注的问题。

### 2.1 SESS收益组成

SESS的收益主要由储能服务费用、投资建设成本以及维护成本3个部分组成, 依次表示为

$$F_{\text{SESS}}^1 = \lambda_{\text{SESS}} \sum_{t=1}^T (P_{\text{SESS},c}^t + P_{\text{SESS},d}^t) \quad (1)$$

$$F_{\text{SESS}}^2 = \frac{\lambda_p P_{\text{SESS}}^{\max} + \lambda_s E_{\text{SESS}}^{\max}}{T_s} \quad (2)$$

$$F_{\text{SESS}}^3 = M_{\text{SESS}} \quad (3)$$

式中:  $\lambda_{\text{SESS}}$ 为SESS的单位租赁服务费用;  $P_{\text{SESS},c}^t$ 、 $P_{\text{SESS},d}^t$ 分别为在 $t$ 时段SESS的充电、放电功率;  $P_{\text{SESS}}^{\max}$ 与 $E_{\text{SESS}}^{\max}$ 分别为SESS的充放电功率极限与额定容量;  $\lambda_p$ 与 $\lambda_s$ 分别为SESS的功率成本与容量成本;  $T_s$ 与 $M_{\text{SESS}}$ 分别为SESS的预期使用天数与日维护成本。

### 2.2 SESS约束条件

SESS约束条件主要为容量约束与充放电功率约束, 表示为

$$E_{\text{SESS}}^{t+1} = E_{\text{SESS}}^t + (\eta_c^{\text{SESS}} P_{\text{SESS},c}^t - \frac{P_{\text{SESS},d}^t}{\eta_d^{\text{SESS}}}) \Delta t \quad (4)$$

$$E_{\text{SESS}}^0 = E_{\text{SESS}}^T \quad (5)$$

$$0.1 E_{\text{SESS}}^{\max} \leq E_{\text{SESS}}^t \leq 0.9 E_{\text{SESS}}^{\max} \quad (6)$$

$$0 \leq P_{\text{SESS},c}^t \leq P_{\text{SESS}}^{\max} \quad (7)$$

$$0 \leq P_{\text{SESS},d}^t \leq P_{\text{SESS}}^{\max} \quad (8)$$

$$E_{\text{SESS}}^{\max} = \beta P_{\text{SESS}}^{\max} \quad (9)$$

式中:  $E_{\text{SESS}}^t$ 为SESS在 $t$ 时段的实时容量;  $\eta_c^{\text{SESS}}$ 与 $\eta_d^{\text{SESS}}$ 分别表示SESS的充电、放电效率;  $\beta$ 表示SESS额定容量与功率极限的比例系数。式(5)确保SESS能够提供长期稳定的服务; 式(6)与式(7)~(8)防止容量、充

放电功率过限, 延长SESS的使用寿命; 式(9)假定SESS的额定容量与功率极限为线性关系<sup>[18]</sup>。

## 3 RIES模型

RIES内可控变量为 $T$ 时段内CHP机组与HP的出力计划、与SESS充放电功率以及与配网电能交易。

### 3.1 CHP机组

CHP机组通过燃烧天然气同时产生电能与热能, 则第 $i$ 个RIES内CHP机组在 $t$ 时段内的燃气成本可表示为

$$C_{i,\text{CHP}}^t = \frac{c_{\text{gas}}}{\eta_{\text{MT}} Q_{\text{LHV}}} P_{i,\text{CHP},e}^t \quad (10)$$

相应约束条件为

$$P_{i,\text{CHP},h}^t = \frac{(1 - \eta_{\text{MT}} - \eta_{\text{loss}}) \eta_{\text{B}}}{\eta_{\text{MT}}} P_{i,\text{CHP},e}^t \quad (11)$$

$$P_{i,\text{CHP},e}^{\min} \leq P_{i,\text{CHP},e}^t \leq P_{i,\text{CHP},e}^{\max} \quad (12)$$

$$\lambda_{i,\text{CHP},e}^{\min} \leq (P_{i,\text{CHP},e}^t - P_{i,\text{CHP},e}^{t-1}) / \Delta t \leq \lambda_{i,\text{CHP},e}^{\max} \quad (13)$$

式中:  $c_{\text{gas}}$ 与 $Q_{\text{LHV}}$ 分别为天然气单价与低热值;  $\eta_{\text{MT}}$ 、 $\eta_{\text{loss}}$ 以及 $\eta_{\text{B}}$ 分别为CHP机组的发电效率、散热损失率以及制热系数;  $P_{i,\text{CHP},e}^t$ 与 $P_{i,\text{CHP},h}^t$ 分别为第 $i$ 个RIES的CHP机组在 $t$ 时段内电出力与热出力;  $P_{i,\text{CHP},e}^{\max}$ 与 $P_{i,\text{CHP},e}^{\min}$ 分别为第 $i$ 个RIES内CHP机组电出力的上、下限;  $\lambda_{i,\text{CHP},e}^{\max}$ 与 $\lambda_{i,\text{CHP},e}^{\min}$ 分别为第 $i$ 个RIES内CHP机组爬坡率上、下限。

### 3.2 热泵

热泵能实现电制热, 本身不消耗一次能源, 第 $i$ 个RIES内热泵的热出力与消耗电功率间的关系为

$$P_{i,\text{HP},h}^t = P_{i,\text{HP},e}^t \eta_{\text{HP}} \quad (14)$$

热泵热出力约束为

$$P_{i,\text{HP},h}^{\min} \leq P_{i,\text{HP},h}^t \leq P_{i,\text{HP},h}^{\max} \quad (15)$$

式中:  $P_{i,\text{HP},h}^t$ 与 $P_{i,\text{HP},e}^t$ 分别为第 $i$ 个RIES内HP在 $t$ 时段内的热出力与消耗的电功率;  $P_{i,\text{HP},h}^{\max}$ 表示热泵热出力的上限;  $\eta_{\text{HP}}$ 为制热效率。

### 3.3 使用SESS进行充放电

每个RIES可与SESS进行电能交互, 第 $i$ 个RIES内在 $t$ 时段使用SESS的服务费用为

$$C_{i,\text{SESS}}^t = \lambda_{\text{SESS}} (P_{i,\text{SESS},c}^t + P_{i,\text{SESS},d}^t) \quad (16)$$

相应约束条件为

$$0 \leq P_{i,\text{SESS},c}^t \leq P_{i,\text{SESS}}^{\max} \quad (17)$$

$$0 \leq P'_{i,SESS,d} \leq P_{i,SESS}^{\max} \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^n (P'_{i,SESS,d} - P'_{i,SESS,c}) = P'_{SESS,c} - P'_{SESS,d} \quad (19)$$

式中:  $P'_{i,SESS,c}$ 、 $P'_{i,SESS,d}$ 分别为第*i*个RIES在*t*时段的与SESS的充电、放电功率;  $P_{i,SESS}^{\max}$ 为第*i*个RIES允许的最大充放电功率。式(19)表明各RIES的充放电功率应与SESS平衡。

### 3.4 与配电网以及其余IES的电能交互

当RIES内有功无法满足平衡时,可通过与配网进行电力交易,则第*i*个RIES在*t*时段与配网的电能交易成本为

$$C'_{i,EG} = [\lambda'_{gs} \max(P'_{i,EG}, 0) + \lambda'_{gb} \min(P'_{i,EG}, 0)] \Delta t \quad (20)$$

相应约束条件为

$$-P_{i,EG}^{\max} \leq P'_{i,EG} \leq P_{i,EG}^{\max} \quad (21)$$

$$-P_{i,j}^{\max} \leq P'_{i,j} \leq P_{i,j}^{\max} \quad (22)$$

特别地,当所有RIES不互联时,应有

$$P'_{i,j} = 0 \quad (23)$$

式中:  $\lambda'_{gs}$ 与 $\lambda'_{gb}$ 分别为配网侧在*t*时段售电价与购电价;  $P'_{i,EG}$ 与 $P_{i,EG}^{\max}$ 分别为第*i*个RIES在*t*时段与配网的交互功率与交互上限,  $P'_{i,EG}$ 取正/负为RIES购/售电;同理,  $P'_{i,j}$ 与 $P_{i,j}^{\max}$ 分别为RIES*i*与*j*在时段*t*内的电能交互与交互上限。

### 3.5 电、热供需平衡

每个RIES内电、热有功出力与负荷需时刻维持平衡,对于第*i*个RIES应满足

$$P'_{i,CHP,e} + P'_{i,w} + P'_{i,SESS,d} + P'_{i,EG} + \sum_{j \neq i} P'_{i,j} \geq P'_{i,e} + P'_{i,HP,e} + P'_{i,SESS,c} \quad (24)$$

$$P'_{i,CHP,h} + P'_{i,HP,h} + P'_{i,HS,d} \geq P'_{i,h} + P'_{i,HS,c} \quad (25)$$

式中:  $P'_{i,w}$ 与 $P'_{i,e}$ 、 $P'_{i,h}$ 分别为第*i*个RIES在时段*t*内的风机出力与电、热负荷。

### 3.6 切负荷

当RIES内电能的供需平衡无法满足时,需要进行切负荷,第*i*个RIES在时段*t*内的切负荷成本可表示为

$$C'_{i,c} = P'_{i,c} \lambda_c \quad (26)$$

相应约束条件为

$$0 \leq P'_{i,c} \leq P_{i,c}^{\max} \quad (27)$$

式中:  $C'_{i,c}$ 与 $P'_{i,c}$ 分别表示第*i*个RIES在*t*时段的切负荷成

本与切除的电负荷;  $P_{i,c}^{\max}$ 表示电负荷切除上限;  $\lambda_c$ 表示单位切负荷成本。

## 4 双层优化模型与求解流程

### 4.1 双层优化模型

一方面,由于SESS的容量与功率极限影响着各RIES与SESS交互的空间与最大步长,即决定各RIES的约束边界;另一方面,各RIES与SESS交互的实际功率总和决定SESS投入建设的容量。

该问题为双层优化问题:将SESS作为上层,目标函数为在一个周期内的盈利最大:

$$\max F_{SESS} = F_{SESS}^1 - F_{SESS}^2 - F_{SESS}^3 \quad (28)$$

决策变量为容量(不考虑关联变量),约束条件为式(4)–(9)。

将多个RIES作为下层,目标函数为在一个周期内多个RIES运行成本总和最小:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T (C'_{i,CHP} + C'_{i,HS} + C'_{i,EG} + C'_{i,SESS} + C'_{i,c}) \quad (29)$$

决策变量为各RIES内CHP机组与HP的出力、与配网的交互功率、各RIES间的交互功率以及与SESS的交互功率,约束条件为式(11)–(15)、(17)–(19)、(21)–(25)及(27)。

### 4.2 求解流程

参考文献[22]中双层优化算法思路,该双层优化模型求解伪代码如下。

(1) **Start:**

(2) 初始化SESS与各RIES参数,  $k=0$ 。

(3) 利用遗传算法初始随机生成*m*个SESS的额定容量,将参数传至下层。

(4) **Repeat:**

(5)  $k=k+1$ 。

(6) **For** RIES<sub>*i*</sub> ( $i \in n$ ) **Do**

(7) RIES<sub>*i*</sub>接收*m*个SESS额定容量初始值,利用CPLEX求解器求解RIES<sub>*i*</sub>内设备的出力、与配网的交互功率、RIES<sub>*i*</sub>与其余RIES的交互功率以及与SESS的交互功率,将优化后的决策变量返回至SESS。

(8) **End For**

(9) SESS根据一天内各RIES返回的功率交互值计算当前*m*个额定容量值下的收益,保留当前收益 $F_{SESS}^k$ 。

(10) 利用遗传算法的选择、变异生成新的SESS容量值,重复步骤(6)–(9),计算得到SESS收益值

$F_{SESS}^k$ 。

(11) **If**  $F_{SESS}^k > F_{SESS}^k$ ,  $F_{SESS}^{k+1} = F_{SESS}^k$

(12) **Else**  $F_{SESS}^{k+1} = F_{SESS}^k$

(13) **End If**

(14) **Until** SESS与RIES群的收益收敛。

(15) **End**

## 5 基于纳什议价方法的利益分配

多个RIES在优化总运行成本最低时,为实现整体目标函数最优,可能存在个别RIES牺牲自身利益的现象。为此,需要进一步探讨一套科学合理的RIES收益分配机制,维持各RIES参与协同运行的积极性。本文采用纳什议价方法<sup>[23]</sup>对各RIES的收益进行分配,该方法能同时满足对称性、帕累托最优、独立与无关选择以及线性变换不变性4个性质,以各RIES独立运行下的成本作为谈判崩裂点,所建立的模型具体表示为

$$\max \prod_{i=1}^n (C_i^0 - C_i) \quad (30)$$

$$\text{s.t.} \quad C_i \leq C_i^0$$

式中:  $C_i^0$ 与 $C_i$ 分别表示第 $i$ 个RIES在一个周期内独立运行下的成本与纳什议价后的运行成本。

考虑到式(30)为非凸非线性问题,利用文献[20]中的方法将其分解为2个凸的子问题,利用IPOPT求解器求解,所分解的子问题依次为

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

$$\max \sum_{i=1}^n \ln(C_i^0 - C_i^* + Z_i) \quad (32)$$

式中:  $C_i^*$ 为式(31)优化后第 $i$ 个RIES的运行成本;  $Z_i$ 为第 $i$ 个RIES的议价收益转移。

## 6 算例分析

### 6.1 算例描述

选取3个RIES与1个SESS作为实例进行算例分析,在MATLAB平台上建模与仿真。设研究周期为1 d,  $T$ 取24 h。SESS参数参考文献[17],单位租赁服务费用为0.3元/kWh,  $\beta$ 取0.2,荷电状态上、下限分别取0.9与0.1,容量成本与功率成本分别为1100元/kW与1000元/kW,运维成本为72元/a,寿命周期为8 a;各RIES间、各RIES与配电网的功率交互极限分别为30 kW与100 kW,各RIES切负荷上限均为200 kW,单位切负荷成本为20元/kW,SESS初始容量取额定容量

的一半,RIES内其余参数参考文献[24],详见附录A。各RIES内风电出力、电热负荷以及净电负荷分别如图2—图4所示,一天内电网侧分时电价见表1。

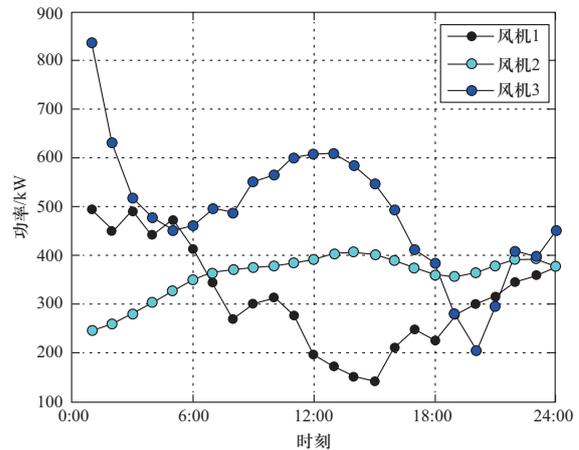


图2 各RIES内风电出力预测曲线

Fig. 2 Wind power output forecast curves in each RIES

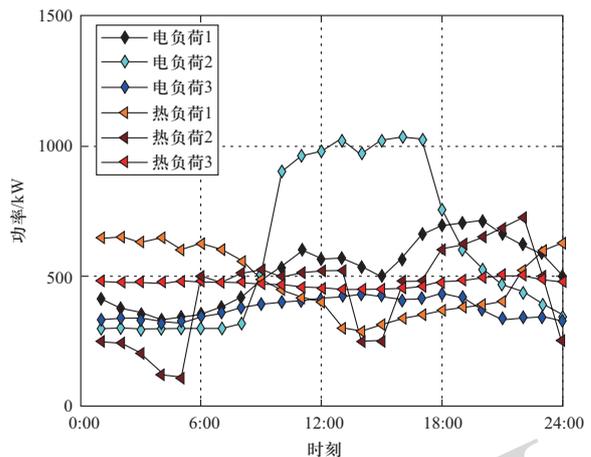


图3 各RIES内电、热负荷预测曲线

Fig. 3 Electricity and heat load forecast curves of each RIES

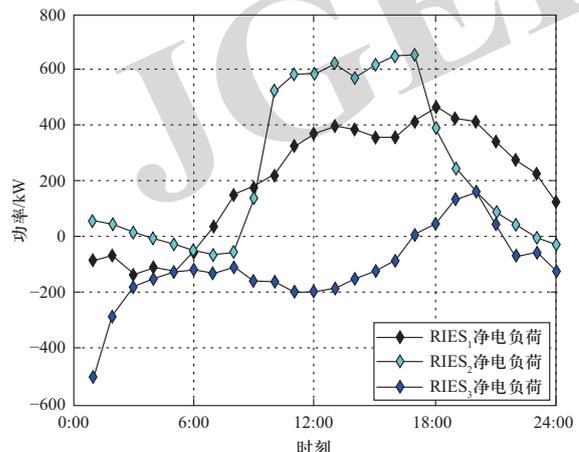


图4 各RIES内净电负荷曲线

Fig. 4 Net electricity load curves in each RIES

表 1 电网侧分时电价

Table 1 Grid-side time-of-use electricity price

时段	售电价/(元·(kWh) <sup>-1</sup> )	购电价/(元·(kWh) <sup>-1</sup> )
23:00—6:00	0.42	0.36
7:00—16:00	0.88	0.75
17:00—22:00	1.35	1.16

## 6.2 结果分析

设模式1为各RIES独立运行，无储能设备参与运行；模式2为各RIES独立运行，每个RIES内部配置与SESS参数相同的储能设备；模式3为各RIES独立运行，所有RIES使用SESS提供的容量租赁服务，协同运行后依据纳什议价方法对各RIES的运行成本进行分配；模式4在模式3的基础上增添所有RIES互联的条件。需要说明的是，模式1与模式2中的优化对象为各RIES运行成本，模式3与模式4中的优化对象为所有RIES的总运行成本。

通过启发式算法与求解器相结合的双层算法求解得到模式1~4下SESS运营商盈利与所有RIES运行成本总和如表2所示，模式2~4下储能设备的容量和功率极限规划结果与日运行成本如表3所示。为了进一步说明所使用算法的有效性，对结果进行验证，具体见附录B。

表 2 4种模式下SESS运营商盈利与所有RIES总运行成本

Table 2 Profit of SESS operator and total operating costs of all RIES in four modes

模式	SESS运营商盈利/元	RIES群总运行成本/元
模式1	—	16 152.91
模式2	—	15 158.86
模式3	1 120.98	14 984.25
模式4	999.28	14 366.19

表 3 模式2~4下储能设备的容量和功率极限规划结果与日运行成本

Table 3 Capacity and power limit planning results and daily operating costs of energy storage equipment in mode 2 to mode 4

模式	对象	容量/kWh	功率/kW	成本/元
模式2	RIES <sub>1</sub>	750	150	334.10
	RIES <sub>2</sub>	1599	320	711.71
	RIES <sub>3</sub>	0	0	0
模式3	SESS	1625	325	723.49
模式4	SESS	1447	289	644.29

结合表2与表3分析可知：当RIES侧没有储能设备参与时（模式1），RIES无法将电能进行时空转移，系统灵活性较差，系统运行总成本为16 152.91元；当RIES侧内部配有分布式储能装置时（模式2），RIES内能够灵活转移电能，系统运行成本总和为15 158.86元，相比模式1减少了996.05元，但3个RIES的储能设备建设成本较高，依次为334.10元、711.71元及0，共1 045.81元（需要指出的是，RIES<sub>3</sub>中储能容量规划结果为0，是因为对于RIES<sub>3</sub>来说，储能设备的投资建设成本大于因储能设备而减少的运行成本，即装配储能设备没有净盈利空间）；当RIES在不互联的情况下使用SESS服务（模式3），SESS的容量与功率极限优化结果分别为1625 kWh与325 kW，3个RIES通过协同运行，进一步减少了所有RIES的总运行成本，总运行成本为14 984.25元，同时SESS通过收取服务费用盈利1 120.98元，实现了SESS与RIES群的双赢；当RIES在互联情况下使用SESS服务（模式4），SESS的容量与功率极限优化结果分别为1447 kWh与289 kW，SESS容量相比模式3减少了178 kWh，RIES群总运行成本进一步减少，相比模式3减少了618.06元，而SESS侧盈利减少了121.70元，这是因为多个RIES互联使得RIES间可进行功率交互，实现电能的互补利用，进一步减少与SESS的电能交互。

总结来看，模式1下由于没有共享储能服务的引入，3个RIES仅能与配电网进行电能交易，此时3个RIES的运行成本最高；模式2下各RIES内可通过配置储能设备来减少运行成本，但存在个别RIES（RIES<sub>3</sub>）因储能设备带来的效益相比建设成本较低而不愿意配置储能设备的情况；模式3下各RIES可使用共享储能服务来减少运行成本，相比模式2储能设备的总建设容量减少；模式4下3个RIES能通过联络线进行功率互传，提高了RIES群的电能“就地消纳”能力，进一步减少了RIES群的运行成本，因此共享储能的容量配置有所降低。

由纳什议价方法计算模式3与模式4下各RIES的运行成本，4种模式下各RIES运行成本见表4。

由表4分析可知，模式3与模式4下每个RIES的运行成本得到了分配，相比所有RIES独立运行（模式1），SESS服务的引入（模式3）与RIES互联（模式4）显著减少了各RIES的运行成本。同时相比模式1，模式3下各RIES的运行成本均减少了389.55元，模式4下均减少了595.57元，实现了所有RIES的帕累托最优，有效维持了多RIES长期协同运行的积极性。

表4 4种模式下各RIES运行成本  
Table 4 Operating costs of each RIES in four modes  
元

模式	RIES <sub>1</sub>	RIES <sub>2</sub>	RIES <sub>3</sub>
模式1	5 992.67	6 518.25	3 642.00
模式2	5 893.64	5 623.02	3 642.00
模式3	5 603.12	6 128.70	3 252.45
模式4	5 397.10	5 922.68	3 046.43

模式3与模式4下SESS容量变化曲线见图5, 3个RIES的充放电功率曲线分别见图6与图7, 模式4下3个RIES功率交互曲线见图8, 4种模式下每个RIES内CHP机组与HP出力见附录C。

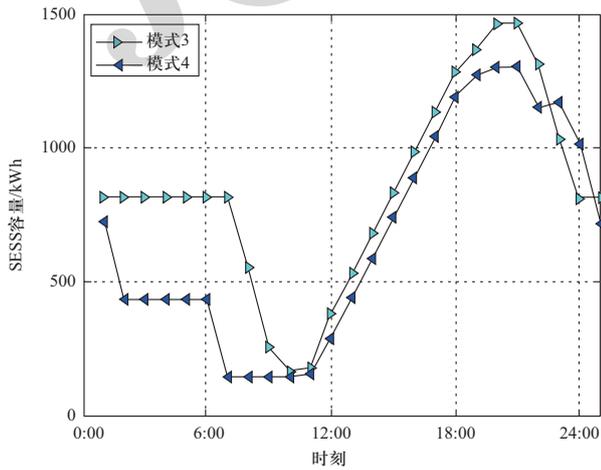


图5 模式3与模式4下SESS容量变化曲线

Fig. 5 SESS capacity curves in mode 3 and mode 4

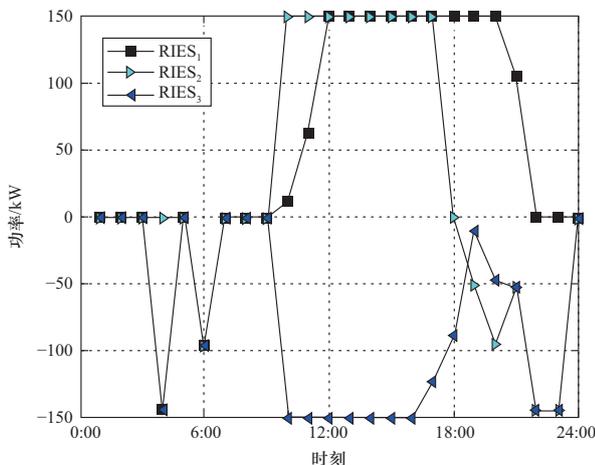


图6 模式3下所有RIES充放电功率曲线

Fig. 6 Charging and discharging power curves of all RIES in mode 3

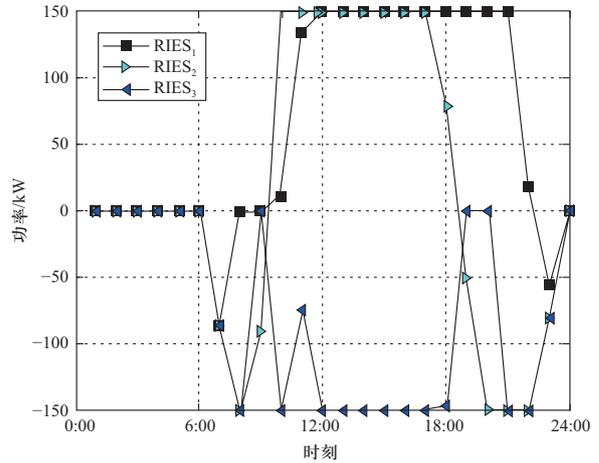


图7 模式4下所有RIES充放电功率曲线

Fig. 7 Charging and discharging power curves of all RIESs in mode 4

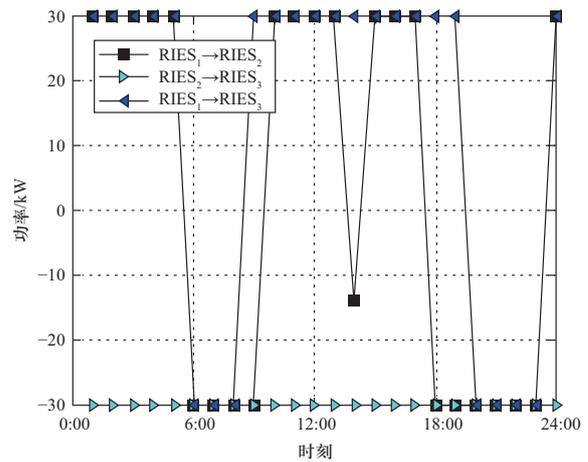


图8 模式4下3个RIES功率交互曲线

Fig. 8 Power interaction curves among three RIESs in mode 4

由图5分析可知, 模式3下SESS分别在一天内10:00与21:00达到最小、最大荷电状态(10.00%与90.00%), 模式4下SESS分别在一天内7:00与21:00达到最小、最大荷电状态, 且模式4优化后的容量值小于模式3, 这是因为模式4下3个RIES处于互联状态, 不同RIES间可通过功率交互完成电能的互补, 导致RIES群整体与SESS的交互程度有所下降。结合图6—图8分析可知, 模式3与模式4下所有RIES与SESS交互功率总和分别为5 884.21 kW与5 742.59 kW, 相比模式3, 模式4下交互功率总和减少了141.62 kW。以一天内3:00—4:00以及5:00—6:00时段为例进行分析, 模式4下RIES<sub>3</sub>在该时段未使用SESS容量租赁服务, 这是因为RIES<sub>3</sub>将自身多余电能通过联络线传送至RIES<sub>1</sub>与RIES<sub>2</sub>, 进一步减少RIES整体使用SESS的服务费用。

为了进一步说明本文所提方法的优越性, 对3个

RIES的功率传输极限进行灵敏度分析。在模式4下依次取3个RIES间的功率传输极限为30 kW、40 kW、50 kW、60 kW、70 kW, 得到RIES群的运行成本曲线如图9所示。

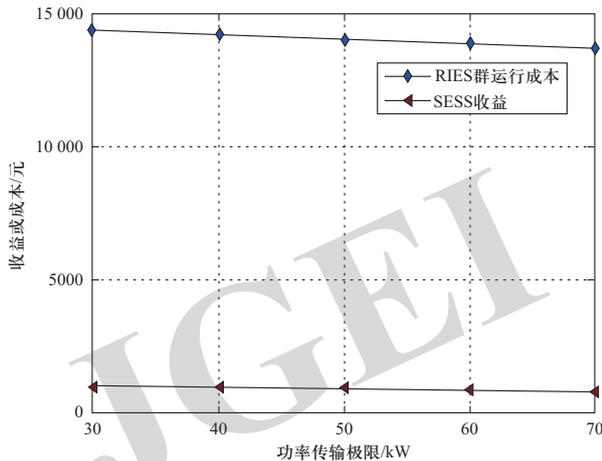


图9 模式4下RIES间功率传输极限灵敏度分析

Fig. 9 Sensitivity analysis of the power transmission limit between RIESs in mode 4

由图9可知, 随着每个RIES间的功率传输极限的增加, RIES群的运行成本逐渐减少。这为RIES间功率传输极限参数的设定提供了参考方案, 也进一步说明本文所提多RIES互联模型能够有效减少运行成本, 实现RIES群内部的电能互补利用。

## 7 结论

随着共享经济的兴起, 本文提出一种共享储能系统与多RIES的双层优化配置模型, 并利用纳什议价方法对多个RIES间的利益进行分配, 主要结论如下。

1) 相比各RIES内部配置储能设备, 使用SESS服务能有效减少RIES的总运行成本, 所提双层优化模型能够优化配置SESS的容量与充放电功率极限参数, 有效权衡了SESS运营商与RIES群的利益。

2) 多个RIES间互联能够有效提高能源利用率, 目前已有较多相关研究, 其发展趋势日益凸显。所建立的多RIES互联模型更符合未来实际应用场景, 使得SESS侧的容量规划更接近真实结果。

3) 利用纳什议价方法对所有RIES的运行成本进行分配, 实现所有RIES的帕累托最优, 进一步有效维持所有RIES参与协同运行的积极性。

4) 将启发式算法与求解器相结合进行求解, 保护了SESS运营商与RIES运营商的信息隐私。

## 参考文献

- [1] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11.  
DONG Zhaoyang, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. From smart grid to energy Internet: basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11(in Chinese).
- [2] 高晓松, 李更丰, 肖遥, 等. 基于分布鲁棒优化的电-气-热综合能源系统日前经济调度[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2245-2254.  
GAO Xiaosong, LI Gengfeng, XIAO Yao, et al. Day-ahead economical dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system based on distributionally robust optimization[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2245-2254(in Chinese).
- [3] 盛四清, 邱昊, 张文朝, 等. 考虑稳态和动态有功平衡约束的新能源消纳综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 51-56.  
SHENG Siqing, QIU Hao, ZHANG Wenchao, et al. Comprehensive assessment method of new energy consumption considering steady and dynamic active power equilibrium constraints[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 51-56(in Chinese).
- [4] WANG D, WANG C S, LEI Y, et al. Prospects for key technologies of new-type urban integrated energy system[J]. Global Energy Interconnection, 2019, 2(5): 402-412.
- [5] 贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 198-207.  
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207(in Chinese).
- [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(in Chinese).
- [7] 熊显智, 程晓绚, 李嘉丰, 等. 多能互补的综合能源供热系统工程设计及优化[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(2): 153-162.  
XIONG Xianzhi, CHENG Xiaoxuan, LI Jiafeng, et al. Engineering design and optimization of multi-energy heating systems[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(2): 153-162(in Chinese).
- [8] 张萌萌, 董军. 基于CVaR的灵活综合能源系统随机调度优化模型[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(3): 301-309.  
ZHANG Mengmeng, DONG Jun. Stochastic scheduling model for flexible integrated energy system based on CVaR[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 301-309(in Chinese).

- [9] 卫志农, 张思德, 孙国强, 等. 基于碳交易机制的电-气互联综合能源系统低碳经济运行[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 9-16.  
WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, et al. Carbon trading based low-carbon economic operation for integrated electricity and natural gas energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 9-16(in Chinese).
- [10] 李杨, 刘伟佳, 赵俊华, 等. 含电转气的电-气-热系统协同调度与消纳风电效益分析[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3680-3689.  
LI Yang, LIU Weijia, ZHAO Junhua, et al. Optimal dispatch of combined electricity-gas-heat energy systems with power-to-gas devices and benefit analysis of wind power accommodation[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3680-3689(in Chinese).
- [11] 汤翔鹰, 胡炎, 耿琪, 等. 考虑多能灵活性的综合能源系统多时间尺度优化调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 81-90.  
TANG Xiangying, HU Yan, GENG Qi, et al. Multi-time-scale optimal scheduling of integrated energy system considering multi-energy flexibility[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 81-90(in Chinese).
- [12] 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(in Chinese).
- [13] 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(in Chinese).
- [14] 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(in Chinese).
- [15] 张涛, 章佳莹, 王凌云, 等. 计及用户行为的电-气-热综合能源系统日前经济调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 86-94.  
ZHANG Tao, ZHANG Jiaying, WANG Lingyun, et al. Day-ahead economical dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system considering user behaviors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 86-94(in Chinese).
- [16] 王守相, 吴志佳, 庄剑. 考虑微网间功率交互和微源出力协调的冷热电联供型区域多微网优化调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7185-7194.  
WANG Shouxiang, WU Zhijia, ZHUANG Jian. Optimal dispatching model of CCHP type regional multi-microgrids considering interactive power exchange among microgrids and output coordination among micro-sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7185-7194(in Chinese).
- [17] 吴福保, 刘晓峰, 孙谊娟, 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(in Chinese).
- [18] 康重庆, 刘静琨, 张宁. 未来电力系统储能的新形态: 云储能[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 2-8.  
KANG Chongqing, LIU Jingkun, ZHANG Ning. A new form of energy storage in future power system: cloud energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 2-8(in Chinese).
- [19] 王仕俊, 平常, 薛国斌. 考虑共享储能的社区综合能源系统协同优化研究[J]. 中国电力, 2018, 51(8): 77-84.  
WANG Shijun, PING Chang, XUE Guobin. Synergic optimization of community energy Internet considering the shared energy storage[J]. Electric Power, 2018, 51(8): 77-84(in Chinese).
- [20] 李淋, 徐青山, 王晓晴, 等. 基于共享储能电站的工业用户日前优化经济调度[J]. 电力建设, 2020, 41(5): 100-107.  
LI Lin, XU Qingshan, WANG Xiaoqing, et al. Optimal economic scheduling of industrial customers on the basis of sharing energy-storage station[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(5): 100-107(in Chinese).
- [21] 吴盛军, 李群, 刘建坤, 等. 基于储能电站服务的冷热电多微网系统双层优化配置[J/OL]. 电网技术, (2020-12-08)[2021-03-08]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.tm.20201207.1122.002.html>.  
WU Shengjun, LI Qun, LIU Jiankun, et al. Bi-level optimal configuration for combined cooling heating and power multi-microgrids based on energy storage station service[J/OL]. Power System Technology, (2020-12-08)[2021-03-08]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.tm.20201207.1122.002.html>(in Chinese).
- [22] LIU N, CHENG M Y, YU X H, et al. Energy-sharing provider for PV prosumer clusters: a hybrid approach using stochastic programming and Stackelberg game[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(8): 6740-6750.
- [23] 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(in Chinese).
- [24] 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(in Chinese).

## 附录A 各RIES内设备参数

表A1 各RIES内设备参数  
Table A1 Parameters of devices in each RIES

对象	参数( $i=1,2,3$ )	取值
CHP机组	$P_{i,CHP,e}^{\max}$	500 kW
	$P_{i,CHP,e}^{\min}$	50 kW
	$\lambda_{i,CHP,e}^{\max}$	300 kW/h
	$\lambda_{i,CHP,e}^{\min}$	-300 kW/h
	$\eta_{MT}$	0.35
	$\eta_{loss}$	0.15
	$\eta_B$	0.9
热泵	$\eta_{HP}$	0.35
	$P_{i,HP,h}^{\max}$	30 kW
	$P_{i,HP,h}^{\min}$	0

## 附录B 算法验证

选取10 kWh作为容量步长进行验证, 模式3与模式4的验证结果分别如图B1与图B2所示。

本文所采用的双层优化算法得到的模式3下SESS容量规划结果为1625 kWh, 与图B1所示验证结果基

本一致, 在精度可接受范围内。

本文所采用的双层优化算法得到的模式4下SESS容量规划结果为1447 kWh, 与图B2所示验证结果基本一致, 在精度可接受范围内。

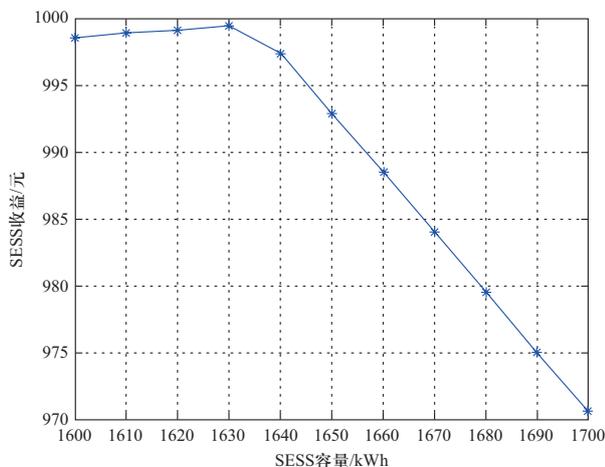


图 B1 模式3下步长为10 kWh的验证结果  
Fig. B1 Verification results with step length of 10 kWh in mode 3

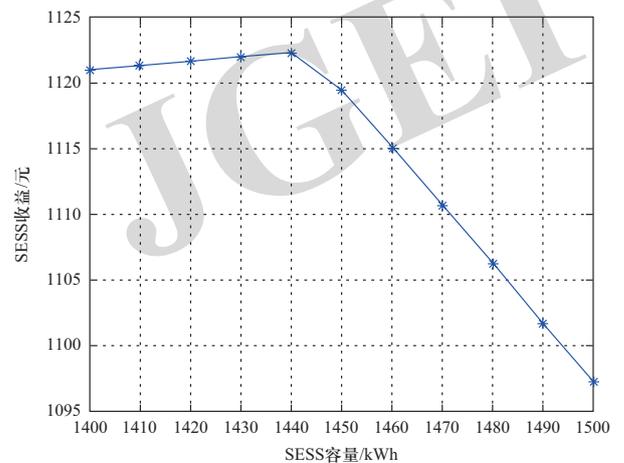


图 B2 模式4下步长为10 kWh的验证结果  
Fig. B2 Verification results with step length of 10 kWh in mode 4

### 附录C RIES内CHP机组与HP出力

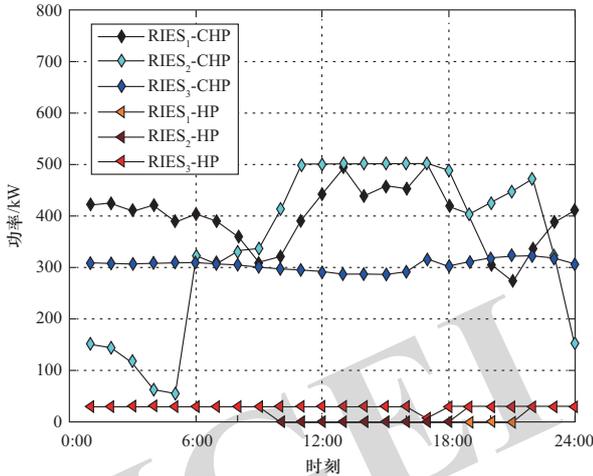


图 C1 模式1下所有RIES的CHP机组与HP出力曲线  
Fig. C1 CHP and HP output curves of all RIESs in mode 1

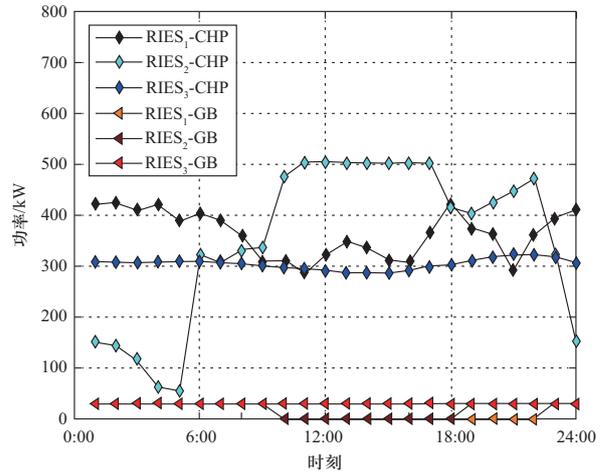


图 C3 模式3下所有RIES的CHP机组与HP出力曲线  
Fig. C3 CHP and HP output curves of all RIESs in mode 3

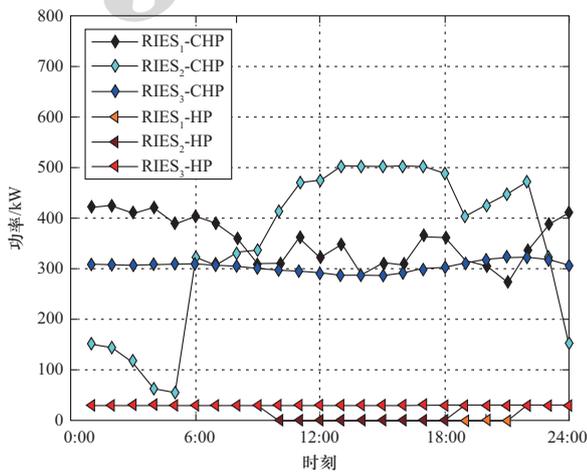


图 C2 模式2下所有RIES的CHP机组与HP出力曲线  
Fig. C2 CHP and HP output curves of all RIESs in mode 2

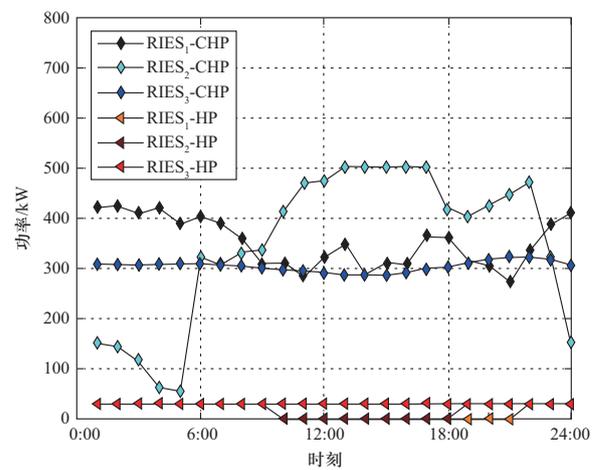


图 C4 模式4下所有RIES的CHP机组与HP出力曲线  
Fig. C4 CHP and HP output curves of all RIESs in mode 4

收稿日期: 2021-04-01; 修回日期: 2021-05-21。



帅轩越

作者简介:

帅轩越 (1998), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网优化运行、博弈论及其优化方法、双层优化, E-mail: sxysxy@stu.xjtu.edu.cn。

王秀丽 (1961), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析与规划、电力市场、电力系统可

靠性分析、新型输电方式。通信作者, E-mail: xiuliw@mail.xjtu.edu.cn。

黄晶 (1994), 女, 博士研究生, 主要研究方向为电动汽车充电调度研究, E-mail: huangjingee@foxmail.com。

(责任编辑 李锡)