

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240230

## 储充换一体站协同多综合能源楼宇的低碳经济调度

徐斌<sup>1</sup>, 王傲<sup>2</sup>, 王小明<sup>1</sup>, 赵文广<sup>1</sup>, 毕锐<sup>2</sup>

(1. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230601; 2. 安徽省新能源利用与节能重点实验室  
(合肥工业大学), 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 储充换一体站(storage-charging-swapping integrated station, SCSIS)与综合能源楼宇(integrated energy buildings, IEB)结合将是未来多能建筑的重要形式之一。针对其协同运行展开研究, 提出了一种 SCSIS 协同多 IEB 的低碳经济调度方法。首先, 构建了 SCSIS 与多 IEB 组成的电能共享协同运行架构。其次, 基于阶梯型碳交易机制在电能共享模式下建立了多主体协同的低碳经济调度模型。再次, 为了最大化主体利益, 以纳什谈判理论为依据, 采用交替方向乘法(alternating direction method of multipliers, ADMM)对电能共享价格进行求解。最后, 通过算例对所提调度模型的可行性与有效性进行探讨。算例结果表明, 通过引入电能共享与阶梯型碳交易机制, 使得系统在兼顾经济性的前提下有效降低了碳排放, 且证明 ADMM 对电能共享价格的求解具有较好的收敛性。

**关键词:** 储充换一体站; 综合能源楼宇; 电能共享; 阶梯型碳交易机制; 纳什谈判; ADMM

### SCSIS collaborative multi-IEB scheduling for a low carbon economy

XU Bin<sup>1</sup>, WANG Ao<sup>2</sup>, WANG Xiaoming<sup>1</sup>, ZHAO Wenguang<sup>1</sup>, BI Rui<sup>2</sup>

(1. State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230601, China; 2. Anhui Province Key Laboratory of Renewable Energy Utilization and Energy Saving, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** The combination of a storage-charging-swapping integrated station (SCSIS) and integrated energy buildings (IEB) will be one of the important forms of multi-energy buildings in the future. This paper proposes a low-carbon economic scheduling method of SCSIS cooperating with multiple IEBs. First, a power sharing cooperative operation architecture composed of SCSIS and multiple IEBs is constructed. Secondly, based on the ladder carbon trading mechanism, a multi-agent cooperative low-carbon economic scheduling model is established in power sharing mode. Then, to maximize the interests of the main body, and based on Nash negotiation theory, the alternating direction method of multipliers (ADMM) is used to determine the power sharing price. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed scheduling model are explored through examples. The results show that the system can effectively reduce carbon emission while ensuring economy by introducing the power sharing and the ladder-type carbon trading mechanism, and prove that the ADMM has a good convergence for the determination of the power sharing price.

This work is supported by the Anhui Provincial Science and Technology Major Project (No. 202203f07020003).

**Key words:** storage-charging-swapping integrated station; integrated energy buildings; electricity sharing; ladder-type carbon trading mechanism; Nash negotiation; ADMM

## 0 引言

化石燃料的过度使用导致了全球气候变暖的问题日益严重<sup>[1]</sup>。为了应对此环境问题, 我国提出了

“双碳”目标, 该目标的确立对能源应用的安全性、经济性和环保性带来了新的挑战<sup>[2-4]</sup>。

随着人口增长和经济蓬勃发展, 楼宇建筑对能源的需求急剧上升, 《中国建筑节能发展报告》指出: 中国建筑业对能源的需求占能源消费总量的 20.6%<sup>[5]</sup>, 此占比预计在未来将进一步增大, 因而其减排也存在着巨大潜力。

**基金项目:** 安徽省科技重大专项资助(202203f07020003);  
国家电网有限公司科技项目资助(52120522000F)

电动汽车(electric vehicle, EV)作为新兴的交通工具, 其对降低交通领域碳排放具有重要作用。储充换一体站(storage-charging-swapping integrated station, SCSIS)作为电动汽车补能的关键设备, 可以在楼宇群附近及其内部进行建设, 其不仅能够满足附近电动汽车用户的充换电需求, 而且有助于提高对楼宇分布式能源的就地消纳, 缓解电力系统面临的供电压力, 降低发电侧高碳能源的使用<sup>[6]</sup>。另外SCSIS在增强电动汽车充换电便捷性的同时, 可以通过与综合能源楼宇(integrated energy buildings, IEB)进行能量协同, 充分发挥建筑行业的减排潜力。因此有必要开展SCSIS和IEB的低碳调度与管理工作。

已有学者针对楼宇侧低碳调度问题进行了相关研究。文献[7]研究了家庭型智能楼宇中源网侧、光伏和储能系统对碳排放的影响。但在碳排放模型中只计及了单一的碳排放量要素, 并未考虑碳交易机制对楼宇低碳化的引导作用。文献[8-9]将阶梯碳交易机制应用于多能楼宇系统, 以达到引导用户合理用能及降低高碳能源使用的目的。文献[10-11]基于楼宇蓄热特性, 提出了考虑楼宇虚拟储能的冷热电联供经济调度方法, 降低了楼宇调度的总成本。但上述文献仅对楼宇调度的经济性进行研究, 未发掘围护结构在调度中降碳的潜力。因此, 文献[12]在电阻电容等值电路的基础上, 考虑围护结构的热传递特性, 构建了基于建筑蓄热特性的多目标低碳调度模型, 通过统筹协调多能设备, 实现了系统的低碳运行。而随着共享观念的普及, 有学者在能源共享领域开展了研究。文献[13]提出了一种考虑条件风险价值下基于合作博弈的多能源微电网协同运行模型, 该模型可有效降低微电网组的运行成本, 提高系统的环保效益。文献[14]研究了完全信息合作博弈环境下的储能共享方案, 但完全信息博弈的要求对用户隐私的安全性产生了威胁, 降低了楼宇主体参与合作的积极性。针对此类风险, 文献[15-17]进行了更加详细的研究。文献[15]提出了一种基于主从博弈的实时需求响应模型。文献[16]采用交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM)得到了楼宇之间的能量共享调度方案, 此方法虽然保护了用户的隐私, 但未对能量共享产生的收益进行分配。文献[17]通过纳什谈判理论描述了能源共享参与者的利益分配问题, 实现了联盟成员的经济最优目标。

近年来, 随着SCSIS的普及, 针对其建模和调度问题展开了研究。文献[18]结合用户行为特性与城市交通线路的实际模型构建了一种新型SCSIS数

学模型。但由于SCSIS独立运行的效率较低, 因此文献[19-20]以日综合成本最小为目标建立了SCSIS接入配电网的优化调度模型, 不仅降低了配电网运行成本, 还能有效利用SCSIS的资源。然而上述研究对调度运行的假设过于理想, 未充分考虑配电网和SCSIS主体的意愿。文献[6]基于Stackelberg博弈建立了一种分析微电网和SCSIS交互过程的双层调度模型, 通过微电网与SCSIS之间的交互, 不仅可以提高微电网和SCSIS的收益, 还可以充分利用SCSIS的资源, 实现与微电网的互补利用。上述研究虽然考虑了不同主体的意愿, 但少有针对SCSIS与IEB共同参与博弈的研究。

根据对已有文献的梳理, 总结出有研究存在以下两点不足, 其中第(2)条路线少有进行合作博弈范畴的研究。

1) 现有楼宇侧研究侧重点多在与微电网相结合或者与同类型楼宇合作, 鲜有文献考虑具有储能特性的SCSIS与IEB的互补协同。

2) 对于SCSIS与IEB协同的研究主要分为两类路线: (1) 将SCSIS与IEB视为同一利益主体; (2) 构建SCSIS与IEB作为不同利益主体的博弈模型。

针对上述不足, 本文提出一种SCSIS协同多IEB的低碳经济调度方法。该方法解决了SCSIS协同多IEB的低碳经济运行与成本分配的问题。首先提出了SCSIS协同多IEB的运行框架。其次, 在电能共享的运行模式下采用阶梯型碳交易机制, 构建了SCSIS协同多IEB的低碳优化调度模型。然后, 为了最大化各个主体利益, 以纳什谈判理论为依据, 构建多IEB、SCSIS的纳什谈判模型, 等效转化为联盟成本最小化和电能共享成本分配两个子问题, 并采用ADMM进行求解。最后, 对电能共享、阶梯型碳交易机制在减少成本、节能减排的效果方面进行分析。

## 1 基于电能共享的SCSIS与IEB运行框架

为了更好地满足IEB的多能负荷需求, 实现低碳高效运行, 运行框架的构建至关重要。首先, 由于电能具有便于传输的特点, 因此在合作运行框架的选择上, 电能共享是一种极具优势的解决方案。其次, 通过电能共享, 各个主体可利用的分布式能源范围扩大, 可实现能源在时空上的互补。然后, 根据峰谷价差, 通过电能共享灵活实现能源互济, 可以实现整个系统的经济运行。

本节构建的SCSIS与IEB电能共享协同运行框架详见图1。

SCSIS组成见图2, 其由光伏、电储能、充电

桩(charging pile, CP)、换电站(battery swapping station, BSS)组成。SCSIS的换电站作为换电汽车补能的关键场所,其主要功能是满足换电需求,但在电池充足的情况下,换电电池可作为SCSIS的储能和系统电储能共同参与调度。

IEB系统的组成见图3,由光伏(photovoltaic, PV)、

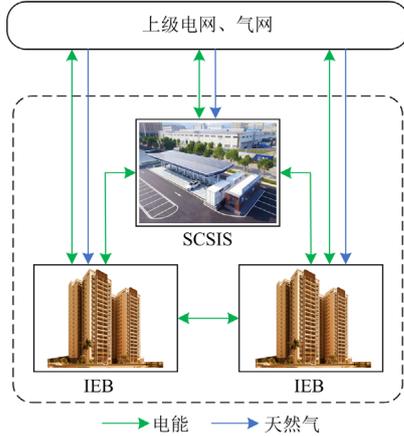


图1 基于电能共享的协同运行框架

Fig. 1 Collaborative operation framework based on power sharing



图2 SCSIS结构框架

Fig. 2 Structural framework of SCSIS

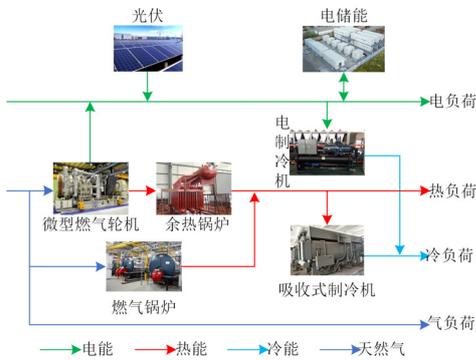


图3 IEB结构框架

Fig. 3 Structural framework of IEB

电储能(energy storage, ES)、微型燃气轮机(microturbine, MT)、余热锅炉(heat recovery boiler, HRB)、燃气锅炉(gas boiler, GB)、电制冷机(electric chillers, EC)、吸收式制冷机(absorption refrigerator, AR)组成。IEB系统中的电能来源可以是上级电网、共享电能、建筑光伏、微型燃气轮机和电储能;气源是从气网购买的燃气;热源包括微型燃气轮机、余热锅炉和燃气锅炉。微燃机由于其难以单独控制热输出,可与燃气锅炉配合,满足热负荷需求。

## 2 设备模型

### 2.1 光伏

光伏发电的出力不仅与光照强度相关,还会受到环境温度的影响。因此,光伏在某一时刻的输出表达式<sup>[21]</sup>为

$$P_{PV}(t) = P_{STC} \frac{I_R(t)}{I_{STC}} [1 + k(T_{PV}(t) - T_{STC})] \quad (1)$$

$$T_{PV}(t) = T_{OUT}(t) + \frac{I_R(t)}{800} (T_{RPV} - 20) \quad (2)$$

$$0 \leq P'_{PV}(t) \leq P_{PV}(t) \quad (3)$$

式中:  $P_{PV}(t)$  为光伏在  $t$  时刻的输出功率(kW);  $P_{STC}$  为标准状态下光伏电池的输出功率(kW);  $I_R(t)$ 、 $I_{STC}$  分别为  $t$  时刻的光照强度、标准条件下的光照强度;  $k$  为功率温度系数;  $T_{PV}(t)$ 、 $T_{OUT}(t)$ 、 $T_{STC}$ 、 $T_{RPV}$  分别为光伏的工作温度、室外温度、标准状态下的温度、电池板的额定温度;  $P'_{PV}(t)$  为光伏在  $t$  时刻的实际出力(kW)。

### 2.2 电储能

通过对SCSIS与IEB中的电储能设备进行充放电控制,可以实现电能需求在时间上的转移。电储能的数学模型<sup>[22]</sup>为

$$E_{CAP}(t) = E_{CAP}(t-1) + \left[ P_{CH}(t)\eta_{e,CH} - \frac{P_{DIS}(t)}{\eta_{e,DIS}} \right] \Delta t \quad (4)$$

$$E_{CAP,min} \leq E_{CAP}(t) \leq E_{CAP,max} \quad (5)$$

$$P_{CH,min} \leq P_{CH}(t) \leq P_{CH,max} \quad (6)$$

$$P_{DIS,min} \leq P_{DIS}(t) \leq P_{DIS,max} \quad (7)$$

$$E_{CAP}(t_{start}) = E_{CAP}(t_{end}) \quad (8)$$

式中:  $E_{CAP}(t)$  为电储能在  $t$  时刻存储的能量(kWh);  $P_{CH}(t)$ 、 $P_{DIS}(t)$  分别为电储能在  $t$  时刻的充、放功率(kW);  $\eta_{e,CH}$ 、 $\eta_{e,DIS}$  分别为电储能的充、放效率;  $\Delta t$  为调度时间间隔(h);  $E_{CAP,max}$ 、 $E_{CAP,min}$  分别为电储能容量的上下限(kWh);  $P_{CH,max}$ 、 $P_{CH,min}$  分别

为充电功率上下限(kW);  $P_{DIS,max}$ 、 $P_{DIS,min}$  分别为放电功率上下限(kW);  $E_{CAP}(t_{start})$ 、 $E_{CAP}(t_{end})$  分别为电储能在始、末时刻的容量(kWh)。

### 2.3 微型燃气轮机

微型燃气轮机消耗的燃气量与输出功率的关系<sup>[23]</sup>为

$$P_{MT}(t) = \eta_{MT} H_{ng} V_{MT}(t) \quad (9)$$

式中:  $P_{MT}(t)$  为微型燃气轮机在  $t$  时刻的输出功率(kW);  $\eta_{MT}$  为微型燃气轮发电效率;  $H_{ng}$  为天然气热值(9.7 kW/m<sup>3</sup>);  $V_{MT}(t)$  为  $t$  时刻的天然气消耗量(m<sup>3</sup>)。

实际运行时, 微型燃气轮机需要满足运行限制和爬坡约束, 即

$$P_{MT,min} \leq P_{MT}(t) \leq P_{MT,max} \quad (10)$$

$$P_{MT,down} \leq P_{MT}(t+1) - P_{MT}(t) \leq P_{MT,up} \quad (11)$$

式中:  $P_{MT,max}$ 、 $P_{MT,min}$  分别为微型燃气轮机的输出功率上下限(kW);  $P_{MT,up}$ 、 $P_{MT,down}$  分别为微型燃气轮机的爬坡上下限(kW)。

微型燃气轮机输出功率与输出余热的关系为

$$Q_{MT}(t) = \frac{1 - \eta_{MT} - \eta_L}{\eta_{MT}} P_{MT}(t) \quad (12)$$

式中:  $Q_{MT}(t)$  为微型燃气轮机在  $t$  时刻的输出余热(kW);  $\eta_L$  为微型燃气轮机的散热损失系数。

### 2.4 余热锅炉

用余热锅炉生产过程产生的废气中的余热给综合能源系统供热。本文中余热锅炉的热源来自于微型燃气轮机产生的余热。数学模型如式(13)<sup>[23]</sup>所示。

$$Q_{HRB}(t) = \eta_{HRB} Q_{MT}(t) \quad (13)$$

式中:  $Q_{HRB}(t)$  为余热锅炉在  $t$  时刻利用微型燃气轮机的余热输出的热功率(kW);  $\eta_{HRB}$  为余热锅炉余热回收效率。

### 2.5 燃气锅炉

燃气锅炉是直接利用燃气燃烧产生热功率。其供热模型<sup>[23]</sup>为

$$Q_{GB}(t) = \eta_{GB} H_{ng} V_{GB}(t) \quad (14)$$

$$Q_{GB,min} \leq Q_{GB}(t) \leq Q_{GB,max} \quad (15)$$

式中:  $Q_{GB}(t)$  为燃气锅炉在  $t$  时刻的输出热功率(kW);  $\eta_{GB}$  为燃气锅炉热效率;  $V_{GB}(t)$  为燃气锅炉在  $t$  时刻消耗的燃气量(m<sup>3</sup>);  $Q_{GB,max}$ 、 $Q_{GB,min}$  分别为燃气锅炉输出热功率上下限(kW)。

### 2.6 电制冷机

电制冷机是直接电能转换为冷功率, 数学模

型<sup>[24]</sup>为

$$Q_{EC}(t) = C_{OP,EC} P_{EC}(t) \quad (16)$$

$$Q_{EC,min} \leq Q_{EC}(t) \leq Q_{EC,max} \quad (17)$$

式中:  $Q_{EC}(t)$  为电制冷机在  $t$  时刻的输出冷功率(kW);  $C_{OP,EC}$  为电制冷机的能效比;  $P_{EC}(t)$  为电制冷机消耗的电功率(kW);  $Q_{EC,max}$ 、 $Q_{EC,min}$  分别为电制冷机制冷上下限(kW)。

### 2.7 吸收式制冷机

吸收式制冷机依靠余热进行制冷, 其数学模型<sup>[24]</sup>为

$$Q'_{AR}(t) = C_{OP,AR} Q_{AR}(t) \quad (18)$$

$$Q_{AR,min} \leq Q'_{AR}(t) \leq Q_{AR,max} \quad (19)$$

式中:  $Q'_{AR}(t)$  为吸收式制冷机在  $t$  时刻的输出冷功率(kW);  $Q_{AR}(t)$  为吸收式制冷机在  $t$  时刻的吸收热功率(kW);  $C_{OP,AR}$  为吸收式制冷机能效比;  $Q_{AR,max}$ 、 $Q_{AR,min}$  分别为吸收式制冷机制冷上下限(kW)。

### 2.8 充电桩

充电桩是一种为电动汽车服务的补能装置, 本文充电桩使用恒功率充电模式。

$$P_{CP}(t) = N_{CP}(t) P_{CCP} \quad (20)$$

式中:  $P_{CP}(t)$  为充电桩群在  $t$  时刻的充电总功率(kW);  $N_{CP}(t)$  为充电桩群在  $t$  时刻的使用数量;  $P_{CCP}$  为充电桩的恒定充电功率(kW)。

### 2.9 换电站

换电站内根据状态对电池进行分类, 设在  $t$  时刻空状态、满电状态、充电状态、放电状态电池的数量分别为  $E(t)$ 、 $F(t)$ 、 $M(t)$ 、 $N(t)$ , 换电需求为  $N_{LOAD}(t)$ , 换电站  $t$  时刻的电池总量设为  $Z(t)$ , 其关系<sup>[25]</sup>为

$$Z(t) = E(t) + F(t) + M(t) + N(t) + N_{LOAD}(t) \quad (21)$$

其中, 换电站的运行基于以下假设: 电池容量一致, 设定标准容量为  $C_B$ ; 为延长电池寿命, 电池充、放电功率恒定为  $P_C$  (kW), 即需要  $T_C = C_B/P_C$  个充、放电可充满或者放电完毕; 充、放电电池在充满之前不提供任何服务; 电动汽车换下的空电池需要等到下一时刻方可安排充电业务。

综上所述, 换电站的模型<sup>[25]</sup>为

$$\begin{cases} M(t) = M^{(1)}(t) + M^{(2)}(t) + \dots + M^{(T_C)}(t) \\ M^{(2)}(t) = M^{(1)}(t-1) \\ M^{(3)}(t) = M^{(2)}(t-1) \\ \vdots \\ M^{(T_C)}(t) = M^{(T_C-1)}(t-1) \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} N(t) = N^{(1)}(t) + N^{(2)}(t) + \dots + N^{(T_c)}(t) \\ N^{(2)}(t) = N^{(1)}(t-1) \\ N^{(3)}(t) = N^{(2)}(t-1) \\ \vdots \\ N^{(T_c)}(t) = N^{(T_c-1)}(t-1) \end{cases} \quad (23)$$

$$N_{\text{LOAD}}(t) + N^{(1)}(t) + F(t) = M^{(T_c)}(t-1) + F(t-1) \quad (24)$$

$$M^{(1)}(t) + E(t) = N_{\text{LOAD}}(t) + N^{(T_c)}(t-1) + E(t-1) \quad (25)$$

式中:  $M^{(1)}(t)$ 、 $M^{(2)}(t)$ 、 $\dots$ 、 $M^{(T_c)}(t)$  为在  $t$  时刻处于整个充电过程中所有充电状态的电池数量;  $N^{(1)}(t)$ 、 $N^{(2)}(t)$ 、 $\dots$ 、 $N^{(T_c)}(t)$  为在  $t$  时刻处于整个放电过程中所有放电状态的电池数量。式(24)保证了满电电池的数量平衡, 式(25)保证了空电电池的数量平衡。

### 3 基于电能共享的低碳经济调度模型

由于 SCSIS 和 IEB 内部的源荷特性不同, 各自的调度模型存在差异, 因此本节基于前述的电能共享框架, 考虑阶梯型碳交易机制, 分别构建了 SCSIS、IEB 的低碳经济调度模型。

#### 3.1 SCSIS 低碳调度模型

##### 3.1.1 目标函数

考虑到电能共享主体为 SCSIS 和 IEB, 下标  $I$  代表主体  $I$  对应的参数, 本节目标函数中的主体类型为 SCSIS。SCSIS 低碳调度目标函数由式(26)一式(32)表示。

$$\min C_{I,\text{BUY}} + C_{I,\text{OP}} + C_{I,\text{CO}_2} + C_{I,J,\text{EX}} \quad (26)$$

$$C_{I,\text{BUY}} = \sum_{t=1}^T [v_{\text{E,BUY}}(t)P_{I,\text{BUY}}(t) - v_{\text{E,SELL}}(t)P_{I,\text{SELL}}(t)] \quad (27)$$

$$C_{I,\text{OP}} = \sum_{t=1}^T \left\{ \begin{aligned} &\lambda_{\text{PV}}P'_{I,\text{PV}}(t) + \lambda_{I,\text{CP}}P_{I,\text{CP}}(t) + \\ &\lambda_{\text{ABA,PV}}[P_{I,\text{PV}}(t) - P'_{I,\text{PV}}(t)] + \\ &\lambda_{\text{ES}}[P_{I,\text{CH}}(t) + P_{I,\text{DIS}}(t)] + \\ &\lambda_{I,\text{C}}[M_I(t) + N_I(t)]P_{\text{C}} - \lambda'_{I,\text{CP}}P_{I,\text{CP}}(t) - \\ &\lambda_{I,\text{RENT}}N_{I,\text{LOAD}}(t) - \lambda_{I,\text{SELL}}C_{\text{B}}N_{I,\text{LOAD}}(t) \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

$$R_I = \sum_{t=1}^T \alpha_{\text{E}}[P_{I,\text{BUY}}(t) - P_{I,\text{SELL}}(t)] \quad (29)$$

$$A_I = \sum_{t=1}^T \beta_{\text{E}}[P_{I,\text{BUY}}(t) - P_{I,\text{SELL}}(t)] \quad (30)$$

$$C_{I,\text{CO}_2} = \begin{cases} -c(1+2\lambda)(R_I - A_I - v), & A_I \leq R_I - v \\ -c(1+2\lambda)v - c(1+\lambda)(R_I - A_I), & R_I - v < A_I \leq R_I \\ c(A_I - R_I), & R_I < A_I \leq R_I + v \\ cv + c(1+\alpha)(A_I - R_I - v), & R_I + v < A_I \leq R_I + 2v \\ c(2+\alpha)v + c(1+2\alpha)(A_I - R_I - 2v), & R_I + 2v < A_I \end{cases} \quad (31)$$

$$C_{I,J,\text{EX}} = \sum_{J=1, J \neq I}^N \sum_{t=1}^T u_{I,J,\text{EX}}(t)P_{I,J,\text{EX}}(t) \quad (32)$$

式中:  $T$  为调度时刻;  $v_{\text{E,BUY}}(t)$ 、 $v_{\text{E,SELL}}(t)$  分别为在  $t$  时刻上级电网的单位购电成本和上网成本(元/kWh);  $P_{I,\text{BUY}}(t)$ 、 $P_{I,\text{SELL}}(t)$  分别为 IEB 向上级电网的购、售电功率(kW);  $\lambda_{\text{PV}}$ 、 $\lambda_{\text{ES}}$  分别为光伏、电储能单位运行成本(元/kWh);  $\lambda_{\text{ABA,PV}}$  为光伏单位弃光成本(元/kWh);  $\lambda_{I,\text{CP}}$ 、 $\lambda_{I,\text{C}}$  分别为充电桩、换电站电池充放电的单位电能运维成本(元/kWh);  $\lambda'_{I,\text{CP}}$  为充电桩单位充电价格(元/kWh);  $\lambda_{I,\text{RENT}}$  为换电电池单位租赁价格(元/块);  $\lambda_{I,\text{SELL}}$  为换电电池内单位电能售卖价格(元/kWh);  $R_I$ 、 $A_I$  分别为无偿碳排放配额和实际碳排放量(t);  $\alpha_{\text{E}}$  为单位发电量无偿碳排放配额(t/kWh);  $\beta_{\text{E}}$  为单位发电量碳排放系数(t/kWh); 本文采用了阶梯型碳交易机制, 划分为多个区间, 根据无偿碳排放配额和实际碳排放的差值进行定价, 式(31)中:  $c$ 、 $v$ 、 $\lambda$ 、 $\alpha$  分别为单位碳成本基价、碳排放量区间长度、奖励系数、惩罚系数。式(32)中:  $N$  为参与调度的所有主体数量;  $u_{I,J,\text{EX}}(t)$  为  $I$  与其他主体  $J$  之间的单位电能共享成本(元/kWh);  $P_{I,J,\text{EX}}(t)$  为  $I$  与其他主体  $J$  之间的电能共享量(kW), 正值表示接收其他主体的电能, 负值表示将电能共享给其他主体。

##### 3.1.2 约束条件

约束条件包括能量守恒约束、上级电网约束、设备运行约束。

###### 1) 能量守恒约束

$$P_{I,\text{BUY}}(t) - P_{I,\text{SELL}}(t) + P'_{I,\text{PV}}(t) + P_{I,\text{CH}}(t) - P_{I,\text{DIS}}(t) + N_I(t)P_{\text{C}} + P_{I,J,\text{EX}}(t) = M_I(t)P_{\text{C}} + P_{I,\text{CP}}(t) \quad (33)$$

###### 2) 上级电网约束

$$0 \leq P_{I,\text{BUY}}(t) \leq P_{I,\text{BUY,max}}y_{I,\text{BUY}}(t) \quad (34)$$

$$0 \leq P_{I,\text{SELL}}(t) \leq P_{I,\text{SELL,max}}y_{I,\text{SELL}}(t) \quad (35)$$

$$y_{I,\text{BUY}}(t) + y_{I,\text{SELL}}(t) = 1 \quad (36)$$

式中:  $P_{I,\text{BUY,max}}$ 、 $P_{I,\text{SELL,max}}$  分别为购、售电上限(kW);  $y_{I,\text{BUY}}(t)$ 、 $y_{I,\text{SELL}}(t)$  分别为购、售电状态 0-1 变量,  $y_{I,\text{BUY}}(t)$  为 0 表示不购电, 为 1 表示购电,  $y_{I,\text{SELL}}(t)$  同理。

###### 3) 设备运行约束

见式(1)一式(8)、式(20)一式(25)。

#### 3.2 IEB 低碳调度模型

##### 3.2.1 目标函数

本节主体类型为 IEB。调度成本包括向上级购电成本  $C_{I,\text{BUY}}$ 、设备运行成本  $C_{I,\text{OP}}$ 、碳交易成本  $C_{I,\text{CO}_2}$ 、

$I$  与其他主体  $J$  的电能共享成本  $C_{I,J,EX}$ 。IEB 主体低碳调度模型目标函数可由式(37)一式(43)表示。

$$\min C_{I,BUY} + C_{I,OP} + C_{I,CO_2} + C_{I,J,EX} \quad (37)$$

$$C_{I,BUY} = \sum_{t=1}^T \left[ \nu_{E,BUY}(t)P_{I,BUY}(t) - \nu_{E,SELL}(t)P_{I,SELL}(t) + \nu_{G,BUY}(t)V_{I,BUY}(t) \right] \quad (38)$$

$$C_{I,OP} = \sum_{t=1}^T \left\{ \begin{aligned} &\lambda_{PV}P'_{I,PV}(t) + \lambda_{AR}Q'_{I,AR}(t) + \\ &\lambda_{ABA,PV}[P_{I,PV}(t) - P'_{I,PV}(t)] + \\ &\lambda_{ES}[P_{I,CH}(t) + P_{I,DIS}(t)] + \lambda_{MT}P_{I,MT}(t) + \\ &\lambda_{GB}Q_{I,GB}(t) + \lambda_{EC}Q_{I,EC}(t) + \lambda_{HRB}Q_{I,HRB}(t) \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

$$R_I = \sum_{t=1}^T \left\{ \begin{aligned} &\alpha_E[P_{I,BUY}(t) - P_{I,SELL}(t)] + \\ &\alpha_E[P_{I,MT}(t) + \sigma_{I,MT}Q_{I,MT}(t)] + \\ &\alpha_H[Q_{I,GB}(t) + Q_{I,HRB}(t)] \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

$$A_I = \sum_{t=1}^T \left\{ \begin{aligned} &\beta_E[P_{I,BUY}(t) - P_{I,SELL}(t)] + \\ &\beta_E[P_{I,MT}(t) + \sigma_{I,MT}Q_{I,MT}(t)] + \\ &\beta_H[Q_{I,GB}(t) + Q_{I,HRB}(t)] \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

$$C_{I,CO_2} = \begin{cases} -c(1+2\lambda)(R_I - A_I - v), & A_I \leq R_I - v \\ -c(1+2\lambda)v - c(1+\lambda)(R_I - A_I), & R_I - v < A_I \leq R_I \\ c(A_I - R_I), & R_I < A_I \leq R_I + v \\ cv + c(1+\alpha)(A_I - R_I - v), & R_I + v < A_I \leq R_I + 2v \\ c(2+\alpha)v + c(1+2\alpha)(A_I - R_I - 2v), & R_I + 2v < A_I \end{cases} \quad (42)$$

$$C_{I,J,EX} = \sum_{J=1, J \neq I}^N \sum_{t=1}^T u_{I,J,EX}(t)P_{I,J,EX}(t) \quad (43)$$

式中： $\nu_{G,BUY}(t)$  为天然气单位购买成本(元/m<sup>3</sup>)； $V_{I,BUY}(t)$  为天然气购买量(m<sup>3</sup>)； $\lambda_{MT}$ 、 $\lambda_{GB}$ 、 $\lambda_{HRB}$ 、 $\lambda_{EC}$ 、 $\lambda_{AR}$  分别为微型燃气轮机、燃气锅炉、余热锅炉、电制冷机、吸收式制冷机的单位运行成本(元/kWh)； $\alpha_H$  为单位发热量无偿碳排放配额(t/kWh)； $\beta_H$  为单位发热量碳排放系数(t/kWh)； $\sigma_{I,MT}$  为热电折算系数。

### 3.2.2 约束条件

约束条件包括能量守恒约束、建筑热平衡约束、上级能源网约束、设备运行约束。

#### 1) 能量守恒约束

$$\begin{aligned} P_{I,BUY}(t) - P_{I,SELL}(t) + P'_{I,PV}(t) + P_{I,CH}(t) - P_{I,DIS}(t) + \\ P_{I,MT}(t) + P_{I,J,EX}(t) = P_{I,LOAD}(t) + P_{I,EC}(t) \end{aligned} \quad (44)$$

$$Q_{I,GB}(t) + Q_{I,HRB}(t) = Q_{I,LOAD}(t) + Q_{I,AR}(t) \quad (45)$$

$$V_{I,BUY}(t) = V_{I,LOAD}(t) + V_{I,MT}(t) + V_{I,GB}(t) \quad (46)$$

#### 2) 建筑热平衡约束

$$\left\{ \begin{aligned} &k_{I,WALL}S_{I,WALL}[T_{OUT}(t) - T_{I,IN}(t)] + \\ &k_{I,WIN}S_{I,WIN}[T_{OUT}(t) - T_{I,IN}(t)] + \\ &SC_I I_R(t)S_{I,WIN} - Q_{I,EC}(t) - Q_{I,AR}(t) \end{aligned} \right\} \Delta t = \quad (47)$$

$$\begin{aligned} \rho CV_I [T_{I,IN}(t+1) - T_{I,IN}(t)] \\ T_{I,IN,min} \leq T_{I,IN}(t) \leq T_{I,IN,max} \end{aligned} \quad (48)$$

#### 3) 上级能源网约束

如式(34)一式(36)、式(49)所示。

$$0 \leq V_{I,BUY}(t) \leq V_{I,BUY,max} \quad (49)$$

#### 4) 设备运行约束

见式(1)一式(19)。

约束条件中： $P_{I,LOAD}(t)$ 、 $Q_{I,LOAD}(t)$ 、 $V_{I,LOAD}(t)$

分别为电、热、气在  $t$  时刻的负荷值； $k_{I,WALL}$ 、 $k_{I,WIN}$  分别为建筑墙体、建筑外窗传热系数(W/(m<sup>2</sup>·K))； $S_{I,WALL}$ 、 $S_{I,WIN}$  分别为建筑墙体、建筑外窗的面积(m<sup>2</sup>)； $T_{I,IN}(t)$  为 IEB 在  $t$  时刻的室内温度(°C)； $SC_I$  为建筑遮阳系数； $\rho$  为标准状态下空气密度； $C$  为空气比热容； $V_I$  为建筑空气容量； $T_{I,IN,max}$ 、 $T_{I,IN,min}$  分别为建筑温度上下限(°C)； $V_{I,BUY,max}$  为天然气购买上限(m<sup>3</sup>)。

## 4 基于纳什谈判的电能共享成本分配模型

上一节构建了 SCSIS 和 IEB 的低碳经济调度模型，在电能共享的模式下进行合作。合理公平的分配方案是影响各个主体共享意愿的重要因素，为了最大化各个主体的利益，本节基于纳什谈判理论对电能共享价格进行求解以及对电能共享成本进行分配。

合理确定电能共享价格是纳什谈判的重点，根据纳什谈判理论，式(50)纳什乘积最大的解等于求纳什谈判问题的均衡解，此解可使得各个主体得到帕累托最优效益。系统的纳什谈判模型为

$$\begin{cases} \max \prod_{I=1}^N (C_I^0 - C_I) \\ \text{s.t. } C_I^0 - C_I \geq 0 \end{cases} \quad (50)$$

式中： $C_I^0$  为主体  $I$  的谈判破裂点，即不参与谈判时的目标值； $C_I$  为主体  $I$  参与纳什谈判后的目标值。

本文通过算术-几何均值不等式将此问题进行转换分解，得到两个子问题<sup>[26]</sup>：联盟成本最小化子问题 P1 和电能共享成本分配子问题 P2。

#### 4.1 联盟成本最小化子问题 P1

联盟成本最小化, 即 SCSIS 和 IEB 的调度成本之和最小, 即

$$\begin{cases} \min \sum_{I=1}^N C_{I,BUY} + C_{I,OP} + C_{I,CO_2} \\ \text{s.t. 式(1)一式(25), 式(33)一式(36), 式(44)一式(46)} \end{cases} \quad (51)$$

根据式(51)可得电能共享功率和主体  $I$  最优成本结果  $C'_I$ 。由于共享总收益平衡, 所以共享成本不体现在联盟调度中, 这也证明了使用纳什谈判的必要性。

#### 4.2 电能共享成本分配子问题 P2

为了使联盟合作达成, 避免谈判破裂导致直接向电网购电, 各个主体向其他主体提供的电能价格应低于电网电价且高于上网电价, 将非合作解  $C_I^0$  和合作解  $C'_I$  代入式(50), 得到电能共享成本分配子问题 P2。

$$\begin{cases} \max \prod_{I=1}^N \left[ C_I^0 - C'_I - \sum_{J=1, J \neq I}^N \sum_{t=1}^T u_{I,J,EX}(t) P_{I,J,EX}(t) \right] \\ \text{s.t. } C_I^0 - C'_I - \sum_{J=1, J \neq I}^N \sum_{t=1}^T u_{I,J,EX}(t) P_{I,J,EX}(t) > 0 \\ v_{E,SELL}(t) < u_{I,J,EX}(t) < v_{E,BUY}(t) \end{cases} \quad (52)$$

式(52)的目标函数是乘积优化问题, 通过对数等价转换可得到便于求解的求和优化问题, 见式(53)。

$$\min \sum_{I=1}^N -\ln \left[ C_I^0 - C'_I - \sum_{J=1, J \neq I}^N \sum_{t=1}^T u_{I,J,EX}(t) P_{I,J,EX}(t) \right] \quad (53)$$

### 5 模型求解

子问题 P1 可以直接进行求解。子问题 P2 是凸优化问题。由于 ADMM 是一种求解可分离凸优化问题的重要方法, 且处理速度快、收敛性能好, 因此子问题 P2 可使用 ADMM 进行求解。

在纳什谈判求解电能共享价格过程中, 目标函数存在多组耦合电能价格决策变量  $u_{I,J,EX}^E(t)$ , 需要进行解耦转换, 解耦式为

$$u_{I,J,EX}(t) = u_{J,I,EX}(t) \quad (54)$$

式中,  $u_{J,I,EX}(t)$  为电能价格解耦辅助变量, 表征主体  $J$  向主体  $I$  购买电能的期望价格, 当满足式(54)时, 表示主体之间达成合作。

将式(53)的目标函数转换为增广拉格朗日函数的形式, 见式(55)。

$$\begin{aligned} L = & -\sum_{I=1}^N \ln \left[ C_I^0 - C'_I - \sum_{J=1, J \neq I}^N \sum_{t=1}^T u_{I,J,EX}(t) P_{I,J,EX}(t) \right] + \\ & \sum_{I=1}^N \sum_{J=1, J \neq I}^N \sum_{t=1}^T \left[ \mu_{I,J}(t) (u_{I,J,EX}(t) - u_{J,I,EX}(t)) + \right. \\ & \left. \frac{\rho}{2} \|u_{I,J,EX}(t) - u_{J,I,EX}(t)\|_2^2 \right] \end{aligned} \quad (55)$$

式中:  $\mu_{I,J}(t)$  为拉格朗日乘子;  $\rho$  为惩罚因子。

根据 ADMM 原理, 对式(55)各个主体进行分布式求解, 通过式(56)进行迭代更新。

$$\begin{cases} u_{I,J,EX}^{K+1} = \arg \min_{u_{I,J,EX}} (u_{I,J,EX}, u_{J,I,EX}^K, \mu_{I,J}^K) \\ u_{J,I,EX}^{K+1} = \arg \min_{u_{J,I,EX}} (u_{I,J,EX}^{K+1}, u_{J,I,EX}, \mu_{I,J}^K) \\ \mu_{I,J}^{K+1} = \mu_{I,J}^K + \rho (u_{I,J,EX}^{K+1} - u_{J,I,EX}^{K+1}) \end{cases} \quad (56)$$

迭代收敛判据见式(57)。

$$\sum_{I=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{J=1, J \neq I}^N \|u_{I,J,EX}(t) - u_{J,I,EX}(t)\|_2^2 \leq \varepsilon \quad (57)$$

式中,  $\varepsilon$  为收敛判据, 成立时表示迭代收敛, 得到各个主体的电能共享价格, 若超出收敛上限则证明各个主体的谈判无法达成, 需要重新设置参数。

### 6 算例分析

#### 6.1 场景参数设置

参考文献[6,23,27]中的算例数据。在 ADMM 中, 拉格朗日乘子初始设置为 0, 惩罚因子设置为 1, 收敛系数设置为 0.001, IEB 考虑的温度范围为 20~25 °C, 温度控制时段为 09:00—17:00。

为了验证本文提出的协同架构和调度模型的普遍性, 设置了 4 种场景进行对比分析。场景 1: 不考虑阶梯型碳交易机制, 各个主体独立调度运行; 场景 2: 不考虑阶梯型碳交易机制, 主体之间通过电能共享模式参与调度运行; 场景 3: 考虑阶梯型碳交易机制, 各个主体独立调度运行; 场景 4: 考虑阶梯型碳交易机制, 主体之间通过电能共享模式参与调度运行。

#### 6.2 场景成本、碳排放分析

各场景的调度成本结果、碳排放结果分别见表 1 和表 2。

1) 对比场景 1 与场景 2 得到, 在不考虑碳交易策略的情况下, 考虑电能共享的 IEB 调度成本比非共享情况下均有不同程度的降低, 且 SCSIS 的收益比非共享情况下提高了 6.33%。

2) 对比场景 3 与场景 4 得到, 在考虑碳交易策略的情况下, 电能共享场景的 IEB 调度成本比非共享情况下有所减少, 且 SCSIS 的收益增加了 35.32%。

表 1 调度成本  
Table 1 Scheduling cost

场景	主体	购能成本	运维成本	碳交易成本	共享成本分配	SCSIS 服务收益	总计
1	IEB1	40 130.17	658.62	—	—	—	40 788.79
	IEB2	32 218.15	523.26	—	—	—	32 741.41
	SCSIS	6629.59	2716.19	—	—	12 957.50	-3611.73
2	IEB1	40 907.54	658.27	—	-1005.48	—	40 560.33
	IEB2	32 438.19	494.22	—	-419.48	—	32 512.93
	SCSIS	7024.81	658.27	—	1434.22	12 957.50	-3840.20
3	IEB1	41 028.63	600.18	6139.59	—	—	47 768.40
	IEB2	32 319.39	504.08	6460.48	—	—	39 283.95
	SCSIS	6624.92	2721.06	1519.46	—	12 957.50	-2092.06
4	IEB1	40 472.57	602.37	6290.69	-336.26	—	47 029.37
	IEB2	34 639.78	419.43	4178.78	-693.09	—	38 544.90
	SCSIS	2203.95	602.37	6290.69	1029.55	12 957.50	-2830.94

表 2 碳排放结果  
Table 2 Carbon emission results

场景	主体	碳排放量/t	总计/t
1	IEB1	59.85	124.00
	IEB2	51.34	
	SCSIS	12.81	
2	IEB1	59.24	120.00
	IEB2	46.77	
	SCSIS	13.69	
3	IEB1	48.81	111.04
	IEB2	49.42	
	SCSIS	12.80	
4	IEB1	49.83	95.61
	IEB2	33.95	
	SCSIS	11.83	

3) 对比场景 1 与场景 3 得到, 各个主体处于独立运行模式下, 考虑阶梯型碳交易机制的 IEB 成本会相应变高, IEB1 成本增加了 17.11%, IEB2 成本增加了 19.18%, SCSIS 收益降低了 42.08%。

4) 对比场景 2 与场景 4 得到, 各个主体处于电能共享运行模式下, 考虑阶梯型碳交易机制的 IEB 成本会相应变高, IEB1 成本增加了 15.95%, IEB2 成本增加了 18.55%, SCSIS 收益降低了 26.28%。

对比不同场景下, 考虑电能共享模式和阶梯型碳交易机制对碳排放的影响。

1) 电能共享模式对碳排放的影响: 对比场景 1 与场景 2 得出在不考虑碳交易策略的情况下, 场景 2 采用电能共享模式的碳排放量降幅为 3.23%; 对比场景 3 与场景 4 得出在考虑碳交易策略情况下, 场景 4 采用电能共享模式的碳排放量降幅为 13.90%。

2) 阶梯型碳交易机制对碳排放的影响: 对比场

景 1 与场景 3 得出在不考虑电能共享模式的情况下, 场景 3 考虑阶梯型碳交易机制的碳排放量降幅为 10.45%; 对比场景 2 与场景 4 得出在考虑电能共享模式的情况下, 场景 4 采用阶梯型碳交易机制的碳排放量降幅为 20.33%。

根据上述分析得出, 采用阶梯型碳交易机制比电能共享模式的降碳效果明显。

根据调度成本和碳排放结果可以得出: 通过电能共享模式并利用源荷的差异性可以在各个主体之间达成共识的情况下, 实现经济低碳调度。阶梯型碳交易机制策略虽然会提升 SCSIS、IEB 的调度成本, 但有效降低了碳排放。因此, 电能共享模式与阶梯型碳交易机制的结合可实现一种经济性与低碳性之间的均衡。

### 6.3 算法收敛情况

本文采用 ADMM 求解 SCSIS 协同 IEB 调度的电能共享成本分配问题, 以场景 4 为例, 其子问题 P2 优化迭代收敛情况见图 4。

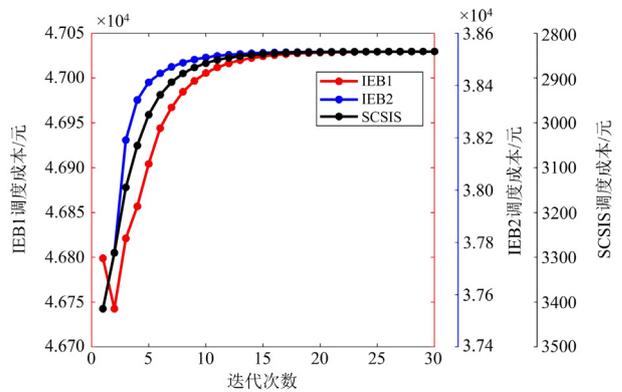


图 4 子问题 P2 收敛结果

Fig. 4 Convergence results of sub-problem P2

由图 4 映射了 3 个主体的博弈过程, 可看出 ADMM 算法求解到第 30 次时, 基本达到收敛状态, 计算时间为 108.988 s。由于联盟各主体能源使用情况具有差异, 使得在电能共享情况下各主体为了自身的利益进行博弈。经过博弈, 调度成本的变化逐渐减小, 直至达到平衡。

#### 6.4 调度结果分析

在场景 4 中, IEB1 的电、热调度结果分别见图 5 和图 6。由图 5 可知, 在 02:00—07:00、16:00—20:00、22:00—24:00 时段, 电能主要获取途径为上级电网, 将电能存储在电储能中, 在电能价格较高时使用。在 08:00—15:00 时段, 从电网购买的电能较少, 电能主要由光伏出力、微型燃气轮机和电储能提供。这是因为此时电能价格较高, IEB1 通过生产价格相对较低且碳排放量较低的光伏、电储能、微

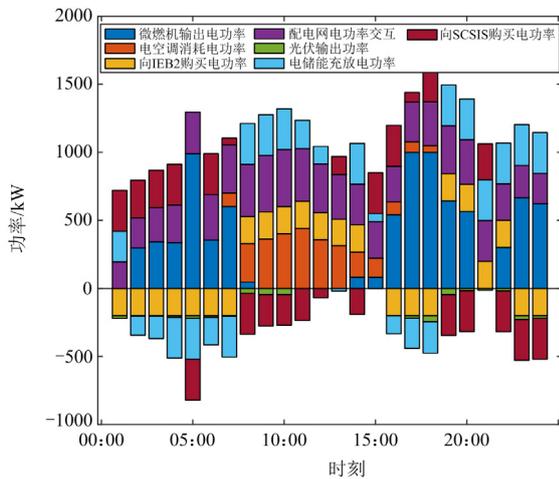


图 5 IEB1 电能调度结果

Fig. 5 Electrical scheduling results of IEB1

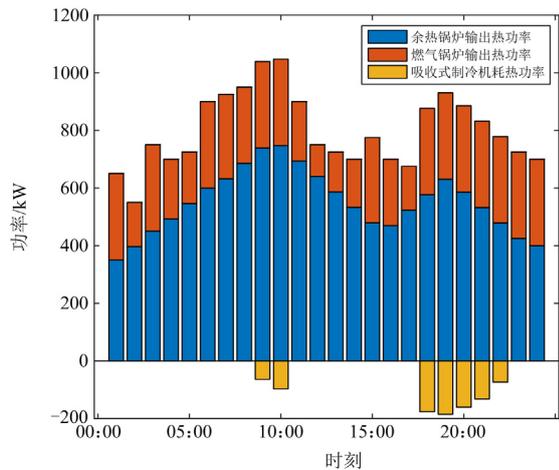


图 6 IEB1 热能调度结果

Fig. 6 Heat scheduling results of IEB1

型燃气轮机与其他主体共享电能去满足自身需求。

由图 6 可知, 在 01:00—10:00、17:00—19:00 时段燃气轮机出力逐步上升, 11:00—16:00、20:00—24:00 燃气轮机出力逐步下降, 其余热消耗由燃气锅炉提供, 这是因为 IEB1 的热负荷需求仅通过微型燃气轮机与燃气锅炉去供应, 但微型燃气轮机需要同时供电供热, 当负荷变化大时, 由于爬坡约束无法瞬间进行过快的响应, 应对负荷变化的能力较弱, 需要燃气锅炉进行补充供热。

在场景 4 中, SCSIS 的换电站电池调度结果见表 3。根据表 3 可知, SCSIS 主要在 01:00—07:00、15:00—18:00 电价较低的时段进行大规模充电。其中, 电池租赁价格设置为 10 元/块, 单位电价设置为 0.8 元/kWh, 单块电池容量设置为 50 kWh, 可以推算出 SCSIS 要想获利, 上级电能购买价格需要小于 1 元/kWh。因为上级电网的阶梯售电价格为 1.2、0.75、0.4 元/kWh, 因此在 01:00—11:00、15:00—18:00、23:00—24:00 时段附近进行大规模充电不仅满足 SCSIS 的换电需求, 同时降低了系统的运行成本。

表 3 电池调度结果

Table 3 Battery scheduling result

时刻	块				
	空电池	满电池	充电电池	放电电池	换电需求
01:00	30	0	20	0	5
02:00	10	12	25	0	3
03:00	13	9	25	0	3
04:00	14	29	2	0	5
05:00	0	23	21	0	6
06:00	0	15	25	0	10
07:00	0	19	16	0	15
08:00	0	12	25	0	13
09:00	3	12	25	0	10
10:00	0	21	23	0	6
11:00	0	26	19	0	5
12:00	2	34	9	0	5
13:00	7	22	3	10	8
14:00	4	19	11	10	6
15:00	6	14	25	0	5
16:00	0	11	25	0	14
17:00	0	5	25	0	20
18:00	9	1	25	0	15
19:00	10	5	25	0	10
20:00	19	10	15	0	6
21:00	25	16	1	0	8
22:00	28	7	5	0	10
23:00	18	0	25	0	7
24:00	25	0	20	0	5

图7为SCSIS的电能调度结果。由图可以看出, 01:00—07:00、15:00—24:00时段由于光伏输出较少, 通过上级电网和共享电能来满足换电和充电桩的需求, 在08:00—14:00时段光伏输出提升, 负荷通过光伏、电储能、换电电池和共享电能来满足。其中在13:00—14:00时段, 电储能的最大放电功率无法满足外部电能需求, 经济性要求下又无法接受昂贵的电网电能, 此时的换电需求较少, 因而可以进行换电电池的放电。通过电储能与换电电池的协调运行, 可以在保证供电的前提下实现经济性最优。

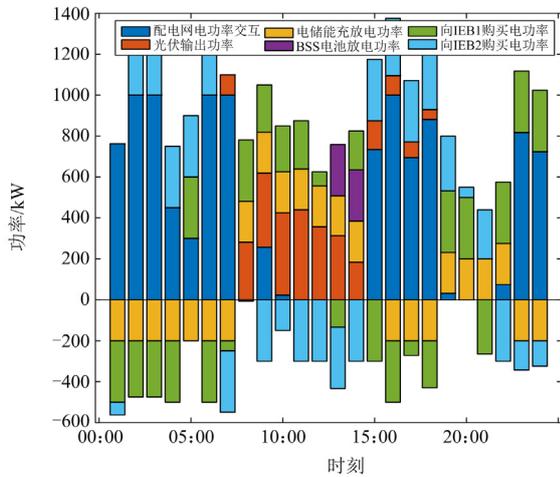


图7 SCSIS 电能调度结果

Fig. 7 Electrical scheduling results of SCSIS

### 6.5 电能共享结果

针对场景4, 各个主体之间的电能共享功率如图8所示, 其中正代表提供电能, 负值代表接收电能。

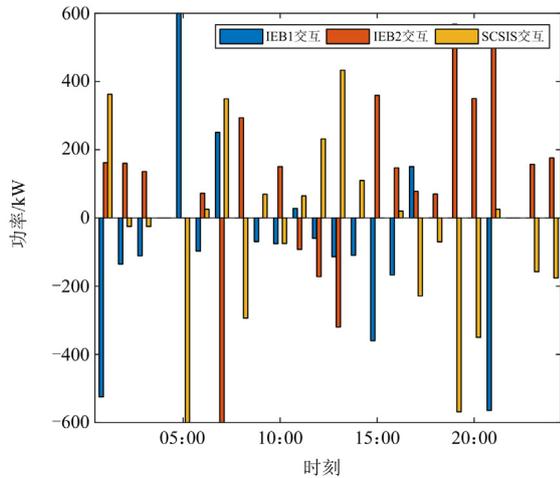


图8 电能共享结果

Fig. 8 Result of power sharing

由图8可知, 24h调度时段都存在电能共享情况。IEB1在01:00—03:00、06:00、09:00—10:00、12:00—16:00、21:00时段接收共享电能, 在05:00、07:00、11:00、17:00时段出售多余电能获利; IEB2在07:00、11:00—13:00时段接收共享电能, 在01:00—03:00、06:00、08:00、10:00、15:00—21:00、23:00—24:00时段出售多余电能获利; SCSIS在02:00—03:00、05:00、08:00、10:00、17:00—20:00、23:00—24:00时段接收电能, 在01:00、06:00—07:00、09:00、11:00—14:00、16:00、21:00时段出售多余电能获利。各个主体在进行电能共享后, 为了兼顾各方以及整体利益, 需要对共享的电能进行议价谈判。各个主体之间的电能价格谈判结果如图9所示。

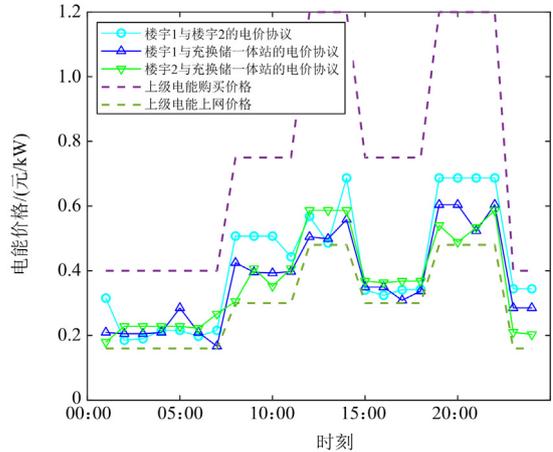


图9 电能价格谈判结果

Fig. 9 Results of electricity price negotiations

## 7 结论

本文建立了SCSIS协同IEB的低碳经济调度模型, 并通过纳什谈判理论对电能共享成本进行合理分配。其主要结论如下:

1) 本文构建了SCSIS与IEB电能共享的低碳经济调度模型。算例分析表明, 通过电能共享, 各个主体调度成本比单独运行皆有一定幅度的降低, 降幅分别为1.55%、1.88%、35.32%。阶梯型碳交易机制虽然会增加SCSIS和IEB的调度成本, 但是可以有效控制碳排放量。电能共享和阶梯型碳交易机制在控制碳排放量的基础上兼顾了各个主体的利益, 实现经济与低碳的均衡, 证明了调度模型的可行性与有效性。

2) 本文对子问题P2的3-block模型进行求解, 在第30次迭代实现了收敛, 证明对于电能共享价格的求解使用ADMM具有较好的收敛性。

但是本文所提模型仅考虑了 SCSIS 和 IEB 在电能共享的情况, 未考虑多类型能源共享下的情况。同时在研究过程中也未考虑上级能源网的利益问题, 另外算法的收敛速度仍有提高的可能。上述问题有待进一步研究。

## 参考文献

- [1] 贡保记, 张恩硕, 张国, 等. 考虑综合需求响应与“双碳”机制的综合能源系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 11-19.  
YUN Baoji, ZHANG Enshuo, ZHANG Guo, et al. Optimal operation of an integrated energy system considering integrated demand response and a “dual carbon” mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 11-19.
- [2] 张沈习, 王丹阳, 程浩忠, 等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 189-207.  
ZHANG Shenxi, WANG Danyang, CHENG Haozhong, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 189-207.
- [3] 董洁, 乔建强. “双碳”目标下先进煤炭清洁利用发电技术研究综述[J]. 中国电力, 2022, 55(8): 202-212.  
DONG Jie, QIAO Jianqiang. A review on advanced clean coal power generation technology under “carbon peaking and carbon neutrality” goal[J]. Electric Power, 2022, 55(8): 202-212.
- [4] 辛保安, 单葆国, 李琼慧, 等. “双碳”目标下“能源三要素”再思考[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3117-3126.  
XIN Baoan, SHAN Baoguo, LI Qionghui, et al. Rethinking of the “three elements of energy” toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3117-3126.
- [5] 靳小龙, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 集成智能楼宇的微网系统多时间尺度模型预测调度方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(16): 25-33.  
JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Model predictive control based multiple-time-scheduling method for microgrid system with smart buildings integrated[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16): 25-33.
- [6] 程杉, 倪凯旋, 赵孟雨. 基于 Stackelberg 博弈的储充换一体化电站微电网双层协调优化调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(6): 49-59.  
CHENG Shan, NI Kaixuan, ZHAO Mengyu. Stackelberg game based bi-level coordinated optimal scheduling of microgrid accessed with charging-swapping-storage integrated station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6): 49-59.
- [7] YI Lingzhi, ZHANG Huiting, WANG Yahui, et al. Multi-objective global dynamic optimal scheduling of smart building loads considering carbon emissions[J]. Energy and Buildings, 2023, 301.
- [8] 尚梦琪, 高红均, 贺帅佳, 等. 考虑阶梯碳奖惩和综合需求响应的楼宇低碳规划[J/OL]. 上海交通大学学报: 1-31[2023-12-13]. DOI:10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.527.  
SHANG Mengqi, GAO Hongjun, HE Shuaijia, et al. Low-carbon planning for building considering ladder carbon reward and punishment and integrated demand response[J/OL]. Journal of Shanghai Jiaotong University: 1-31[2023-12-13]. DOI:10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.527.
- [9] HOU Lei, LIN Huijie, YANG Xin, et al. Low-carbon demand response strategy of buildings considering load rebound[J]. Energy Reports, 2023, 10: 3599-3607.
- [10] 靳小龙, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 融合需求侧虚拟储能系统的冷热电联供楼宇微网优化调度方法[J]. 中国电机工程报, 2017, 37(2): 581-591.  
JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Optimal scheduling method for a combined cooling, heating and power building microgrid considering virtual storage system at demand side[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 581-591.
- [11] 朱超群, 陈辉, 殷俊平, 等. 基于虚拟储能模型的楼宇冷热电耦合系统经济调度策略[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(3): 52-57, 100.  
ZHU Chaoqun, CHEN Hui, YIN Junping, et al. Economic dispatching strategy for building CCHP coupling system based on virtual energy storage model[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(3): 52-57, 100.
- [12] 侯慧, 何梓娴, 陈跃, 等. 基于深度强化学习区间多目标优化的智能建筑低碳优化调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(21): 47-57.  
HOU Hui, HE Ziyin, CHEN Yue, et al. Low-carbon optimal dispatch of smart building based on interval multi-objective optimization with deep reinforcement learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(21): 47-57.
- [13] LIU Y, LIU T, HE S. Coordination and optimization of CCHP microgrid group game based on the interaction of electric and thermal energy considering conditional value at risk[J]. IEEE Access, 2021, 9: 88664-88673.
- [14] 冀瑞强, 胡健, 张晓杰. 基于合作博弈的城市楼宇集群分布式储能容量共享[J/OL]. 电力建设: 1-14[2023-12-14]. DOI:10.12204/j.issn.1000-7229.2024.02.010.  
JI Ruiqiang, HU Jian, ZHANG Xiaojie. Energy storage capacity sharing of urban building cluster based on cooperative game[J/OL]. Electric Power Construction: 1-14[2023-12-14]. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2024.02.010.
- [15] 胡洁, 李培强, 林仕满, 等. 考虑分时电价差异性和基于主从博弈的智能楼宇集群能量共享方法[J]. 电网技

术, 2021, 45(12): 4738-4750.

HU Jie, LI Peiqiang, LIN Shiman, et al. Energy-sharing method for smart building clusters considering differences of time-of-use prices and based on master-slave game[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4738-4750.

[16] 周军, 李佳旺, 马鸿君, 等. 考虑点对点电能共享的智能楼宇群分布式优化调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 113-121.

ZHOU Jun, LI Jiawang, MA Hongjun, et al. Distributed optimal scheduling for smart building clusters considering peer-to-peer electric energy sharing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 113-121.

[17] 刘可真, 董敏, 杨春昊, 等. 基于纳什谈判的智能园区 P2P 电能交易优化运行[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(5): 45-53.

LIU Kezhen, DONG Min, YANG Chunhao, et al. Optimal operation of P2P electric power trading in smart park based on Nash negotiation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(5): 45-53.

[18] 胡珏, 韦钢, 袁洪涛, 等. 电动汽车储充换一体站的建模[J]. 电力建设, 2020, 41(6): 44-51.

HU Jue, WEI Gang, YUAN Hongtao, et al. Modeling of EV charging-swapping-storage integrated station[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(6): 44-51.

[19] 袁洪涛, 韦钢, 张贺, 等. 计及充换储一体站的主动配电网鲁棒优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8): 2453-2468.

YUAN Hongtao, WEI Gang, ZHANG He, et al. Robust optimal scheduling of active distribution network considering with the charging-swapping-storage integrated station[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2453-2467.

[20] 袁洪涛, 韦钢, 张贺, 等. 基于模型预测控制含充换储一体站的配电网优化运行[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 187-197.

YUAN Hongtao, WEI Gang, ZHANG He, et al. Model predictive control based optimal operation of distribution network with charging-swapping-storage integrated station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 187-197.

[21] 代庚辉. 基于合作博弈的多园区综合能源系统优化运行策略研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2022.

DAI Genghui. Research on optimal operation strategy of multi-park integrated energy system based on cooperative game[D]. Jiaozuo: Henan University of Science and Technology, 2022.

[22] 王再闯, 陈来军, 李笑竹, 等. 基于合作博弈的能源共享模式下多园区低碳优化调度[J]. 高电压技术, 2023, 49(4): 1380-1391.

WANG Zaichuang, CHEN Laijun, LI Xiaozhu, et al. Multi-park low-carbon optimal scheduling under energy sharing mode based on cooperative game[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1380-1391.

[23] 贲保记, 白森珂, 张国. 基于混沌自适应粒子群算法的冷热电联供系统优化[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 123-130.

YUN Baoji, BAI Senke, ZHANG Guo. Optimization of CCHP system based on a chaos adaptive particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 123-130.

[24] 张晓烽, 战钰, 刘玉婷, 等. 考虑新能源汽车的住宅综合能源系统多目标优化配置研究[J/OL]. 热力发电: 1-11[2023-12-18].<https://doi.org/10.19666/j.rlfd.202307116>.

ZHANG Xiaofeng, ZHAN Yu, LIU Yuting, et al. Research on multi-objective optimization allocation of residential integrated energy system considering new energy vehicles[J/OL]. Thermal Power Generation: 1-11[2023-12-18]. <https://doi.org/10.19666/j.rlfd.202307116>.

[25] 孙伟卿, 王承民, 曾平良, 等. 基于线性优化的电动汽车换电站最优充放电策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 21-27.

SUN Weiqing, WANG Chengmin, ZENG Pingliang, et al. An optimal charging/discharging strategy for electric vehicle battery swapping stations based on linear optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 21-27.

[26] 臧云帆, 夏晟, 李嘉文, 等. 含共享储能的微电网群分布鲁棒博弈优化调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 90-101.

ZANG Yunfan, XIA Sheng, LI Jiawen, et al. A robust game optimization scheduling method for shared energy storage micro electric network group distribution[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 90-101.

[27] 张程, 罗玉锦, 陈昌亮. 考虑源荷不确定的多园区微网与共享储能电站协同优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 77-89.

ZHANG Cheng, LUO Yujin, CHEN Changliang. Collaborative optimization operation of multi park microgrids and shared energy storage power stations considering source load uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 77-89.

收稿日期: 2024-02-29; 修回日期: 2024-06-25

作者简介:

徐斌(1980—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为新能源与电能质量; E-mail: xubin1980@sina.com

王傲(1999—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统运行调度; E-mail: 846446395@qq.com

王小明(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为分布式资源调控与电能质量. E-mail: 316855097@qq.com

(编辑 姜新丽)