

# 计及综合能源系统全寿命周期碳排放和碳交易的电转气设备和光伏联合优化配置

矫舒美, 乔学博, 李 勇, 姚天宇, 曹一家

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**综合能源系统(IES)能够提高能源利用效率,合理配置低碳设备可有效降低碳排放,促进碳中和。提出了一种计及IES全寿命周期碳排放和碳交易机制的电转气(P2G)设备和光伏(PV)容量联合配置方法。对基于某分布式能源站的IES进行设备建模,构建了IES全寿命周期碳排放模型,给出了P2G设备和PV的全寿命周期碳排放计算方法;以基于阶梯罚金机制的碳交易成本、含用水成本和考虑分时电价的购能成本以及设备成本之和最小为优化目标,建立了P2G设备和PV的联合优化配置模型。基于某分布式能源站的实际参数进行算例分析以验证所提方法的正确性和有效性,并探讨了碳交易机制对优化配置结果的影响。

**关键词:**分布式能源站;综合能源系统;全寿命周期碳排放;碳交易;容量配置;联合优化

**中图分类号:**TM 715;TK 01

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202109044

## 0 引言

综合能源系统(IES)凭借其多能源互补方式不仅可促进能源高效利用,还可提升可再生能源的消纳能力,是助力我国实现2030碳达峰、2060碳中和的重要手段<sup>[1]</sup>。其中,低碳设备的合理配置可以在保证系统经济性的同时降低碳排放。

目前,已有诸多学者针对IES的优化配置问题进行了相关的研究。文献[2]以多能耦合系统长期协调运行总成本最小为目标,对电转气(P2G)设备与风电场进行协同规划;文献[3]以包括投资、运行和维护费用的全寿命周期成本最小为目标,建立了园区IES的多阶段规划模型;文献[4]考虑P2G、储能及可再生能源出力设备对系统的影响,对IES规划阶段的容量配置进行优化;文献[5]基于光伏(PV)与负荷的季节性日场景削减结果,对PV与P2G设备进行多场景规划;文献[6]考虑全寿命周期成本,建立了协调可靠性与经济性的园区IES规划方案;文

献[7]利用典型日场景处理PV的不确定性,提出了一种含冷、热、电、气多能流的IES容量规划模型,保证了系统在整个规划周期内的经济性和可靠性;文献[8]采用设备年利用小时数作为衡量设备全寿命周期利用率指标,提出了一种计及风、光、荷不确定性场景的园区IES长时间尺度规划方法。上述研究基于场景法分析了IES在规划周期内的经济性和能效性,但忽略了环保性和低碳性。

关于IES的低碳运行也已有相关的研究:文献[9]基于储热装置、电锅炉,构建了计及碳交易成本的热电联合调度模型;文献[10]通过分析碳交易机制和碳排放配额,研究了碳交易对含风电电热联合系统的影响;文献[11]建立了考虑碳交易价格影响的电-气互联IES的低碳经济运行模型;文献[12]考虑热电联合需求响应和碳交易成本,建立了兼顾新能源消纳的园区IES联合经济调度模型;文献[13]考虑储液式碳捕集电厂,建立了含风电系统的低碳经济调度模型,能够保证系统获得最佳的低碳和经济效益。但上述研究只计及设备运行时的碳排放,未考虑设备全寿命周期内的碳排放。

P2G设备可以利用电能将捕集的CO<sub>2</sub>转化为燃气,且PV发电过程是零碳排放的,因此P2G设备与PV是降低碳排放、助力碳中和的重要低碳设备。但P2G设备和PV的制造过程并不是零碳排放的,因此有必要考虑设备生产以及回收过程的碳排放对IES优化配置的影响。此外,IES内大部分设备都需要利用水传递热量以及冷量,所以水是IES的重要组成部分。为了更贴合工程实际,有必要将与水相关的约束纳入IES的优化配置模型中。

针对上述分析,本文提出了一种计及IES全寿命周期碳排放和碳交易机制的P2G设备和PV联合

**收稿日期:**2021-06-11;**修回日期:**2021-08-22

**基金项目:**国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点项目(2018YFE0125300);国家自然科学基金资助项目(52061130217);湖湘高层次人才聚集工程项目(2019RS1016);长沙市杰出创新青年计划项目(KQ2009037);湖南省研究生科研创新项目(CX20200429)

Project supported by the Key Intergovernmental Cooperation Project on International Science, Technology and Innovation of the National Key Research and Development Program of China(2018YFE0125300), the National Natural Science Foundation of China(52061130217), the Innovative Construction Program of Hunan Province(2019RS1016), the Excellent Innovation Youth Program of Changsha(KQ2009037) and the Postgraduate Scientific Research Innovation Project of Hunan Province(CX20200429)

优化配置方法。首先,建立了基于湖南省某实际分布式能源站的IES内部设备模型,提出了IES全寿命周期碳排放模型,给出了P2G设备和PV的全寿命周期碳排放计算方法;然后,以基于阶梯罚金机制的碳排放成本、含用水成本在内的购能成本、设备投资成本之和最小为目标函数,建立了P2G设备和PV的联合优化配置模型;最后,以湖南省某分布式能源站为对象对所提模型和方法进行算例分析与验证。

## 1 分布式能源站 IES 建模

基于湖南省某分布式能源站的IES架构如图1所示,内部已有设备包含储冷装置、储热装置、储气装置、冷热电联产(CCHP)机组、燃气锅炉、热泵机以及离心式冷水机组。该能源站采用分布式供能系统,供能区域内有大量稳定的冷、热、电负荷需求。本文拟在该IES中配置PV和P2G设备,以提升系统的运行经济性并降低碳排放。

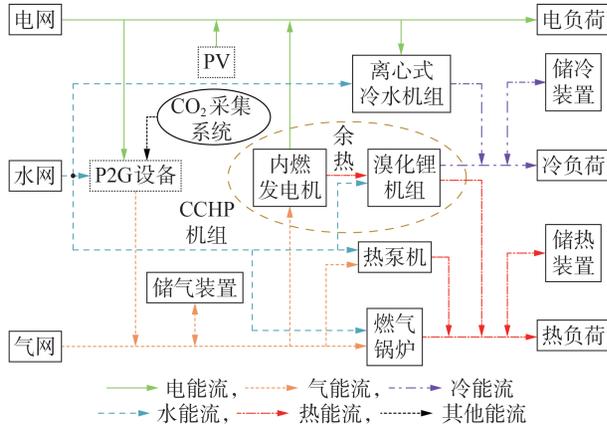


图1 IES架构

Fig.1 Architecture of IES

### 1.1 CCHP 机组模型

CCHP 机组由内燃发电机和溴化锂机组组成,内燃发电机利用燃气燃烧发电,并将产生的烟气余热供给溴化锂机组。内燃发电机模型可表示为:

$$P_{s,t}^{\text{Ngen}} = G_{s,t}^{\text{Ngen}} L^{\text{gas}} \eta^{\text{Ngen}} / \kappa \quad (1)$$

式中: $P_{s,t}^{\text{Ngen}}$ 、 $G_{s,t}^{\text{Ngen}}$ 分别为场景 $s$ 下 $t$ 时刻内燃发电机输出的电功率(单位为kW)、消耗的燃气量(单位为 $\text{m}^3/\text{h}$ ); $L^{\text{gas}}$ 为天然气的低位热值,单位为 $\text{kJ}/\text{m}^3$ ; $\eta^{\text{Ngen}}$ 为内燃发电机的发电效率; $\kappa$ 为电量与热量的转换系数,取值为 $3600 \text{ kJ}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

溴化锂机组采用制冷采暖专用机,该机型可工作在制冷、制热2种模式下,且在不同模式下设备的效率不同,其模型可表示为:

$$\begin{cases} H_{s,t}^{\text{XL}} \leq \eta_1^{\text{XL}} P_{s,t}^{\text{Ngen}} \mu \\ C_{s,t}^{\text{XL}} \leq \eta_2^{\text{XL}} P_{s,t}^{\text{Ngen}} \mu \\ 0 \leq H_{s,t}^{\text{XL}} \leq \lambda_{s,t}^{\text{XL}} H_{s,t}^{\text{XL,max}} \\ 0 \leq C_{s,t}^{\text{XL}} \leq (1 - \lambda_{s,t}^{\text{XL}}) C_{s,t}^{\text{XL,max}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $H_{s,t}^{\text{XL}}$ 、 $C_{s,t}^{\text{XL}}$ 分别为场景 $s$ 下 $t$ 时刻溴化锂机组输出的热功率、冷功率,单位为kW; $H_{s,t}^{\text{XL,max}}$ 、 $C_{s,t}^{\text{XL,max}}$ 分别为场景 $s$ 下 $t$ 时刻溴化锂机组可输出的最大热功率、冷功率; $\lambda_{s,t}^{\text{XL}}$ 为0-1变量,表示场景 $s$ 下 $t$ 时刻溴化锂机组的运行状态,制热时取值为1,制冷时取值为0; $\mu$ 为内燃发电机发电与产生余热的功率比例; $\eta_1^{\text{XL}}$ 、 $\eta_2^{\text{XL}}$ 分别为溴化锂机组的制热、制冷效率。

### 1.2 燃气锅炉与热泵机模型

燃气锅炉与热泵机的输入均为天然气,输出均为热量,但设备效率不同,两者之间的能量转化关系可用式(3)表示。

$$H_{s,t}^{\chi} = C_{s,t}^{\chi} L^{\text{gas}} \eta^{\chi} / \kappa \quad \chi \in X \quad (3)$$

式中: $X = \{\text{GB}, \text{HP}\}$ 为设备集合,GB、HP分别表示燃气锅炉、热泵机; $H_{s,t}^{\chi}$ 、 $C_{s,t}^{\chi}$ 分别为场景 $s$ 下 $t$ 时刻设备 $\chi$ 输出的热功率(单位为kW)、消耗的燃气量(单位为 $\text{m}^3/\text{h}$ ); $\eta^{\chi}$ 为设备 $\chi$ 的效率。

### 1.3 离心式冷水机组模型

离心式冷水机组利用氟利昂制冷剂在蒸发器内蒸发吸收载冷剂水的热量进行循环制冷,制取冷冻水供用户使用,其模型可表示为:

$$C_{s,t}^{\text{CC}} = P_{s,t}^{\text{CC}} \eta^{\text{CC}} \quad (4)$$

式中: $C_{s,t}^{\text{CC}}$ 、 $P_{s,t}^{\text{CC}}$ 分别为场景 $s$ 下 $t$ 时刻离心式冷水机组输出的冷功率、消耗的有功功率,单位为kW; $\eta^{\text{CC}}$ 为离心式冷水机组的效率。

### 1.4 储能装置模型

为了缓解源、荷不确定性的影响,IES需要加入储气、储热、储冷装置。各储能装置的运行方式相同,以储热装置为例,其模型可表示为:

$$\begin{cases} D_{s,t+1}^{\text{HS}} = D_{s,t}^{\text{HS}} + (H_{s,t}^{\text{ch}} \eta^{\text{ch}} - H_{s,t}^{\text{dch}} / \eta^{\text{dch}}) \Delta t \\ \sum_{t=1}^T (H_{s,t}^{\text{ch}} \eta^{\text{ch}} - H_{s,t}^{\text{dch}} / \eta^{\text{dch}}) \Delta t = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \gamma^{\text{ch}} H^{\text{ch,min}} \leq H_{s,t}^{\text{ch}} \leq \gamma^{\text{ch}} H^{\text{ch,max}} \\ \gamma^{\text{dch}} H^{\text{dch,min}} \leq H_{s,t}^{\text{dch}} \leq \gamma^{\text{dch}} H^{\text{dch,max}} \\ 0 \leq \gamma^{\text{ch}} + \gamma^{\text{dch}} \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $D_{s,t}^{\text{HS}}$ 为场景 $s$ 下 $t$ 时刻储热装置的能量,单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ; $H_{s,t}^{\text{ch}}$ 、 $H_{s,t}^{\text{dch}}$ 分别为场景 $s$ 下 $t$ 时刻储热装备的储热、释热功率,单位为kW; $\eta^{\text{ch}}$ 、 $\eta^{\text{dch}}$ 分别为储热装备的储热、释热效率; $\Delta t$ 为时间间隔,取值为1h; $T$ 为设备运行时间周期,取值为24h; $H^{\text{ch,max}}$ 、 $H^{\text{ch,min}}$ 和 $H^{\text{dch,max}}$ 、 $H^{\text{dch,min}}$ 分别为储热装置储热和释热功率的上、下限; $\gamma^{\text{ch}}$ 、 $\gamma^{\text{dch}}$ 为0-1变量,表示储热装置的储热(释热)运行状态,储热(释热)时取值为1,装置不工作时取值为0。

### 1.5 P2G 设备模型

P2G设备可以将电能转化成 $\text{H}_2$ 或者 $\text{CH}_4$ ,并按照符合规定的比例注入天然气网络,在实现电气互转的同时提升了清洁能源的消纳比例。本文中的

P2G设备生成 $\text{CH}_4$ ,一般分为2个化学反应过程<sup>[14]</sup>:第一个过程是水电解反应,水分子在催化剂、高温以及通电的情况下生成 $\text{H}_2$ 和 $\text{O}_2$ ;第二个过程是 $\text{H}_2$ 与 $\text{CO}_2$ 在高温高压的条件下产生 $\text{CH}_4$ 。其中,消耗的水量、消耗的 $\text{CO}_2$ 量、生成的 $\text{CH}_4$ 量之比为2:1:1。则P2G设备模型可表示为:

$$G_{s,t}^{\text{P2G}} = \kappa P_{s,t}^{\text{P2G}} \eta^{\text{P2G}} / L^{\text{gas}} \quad (7)$$

式中: $P_{s,t}^{\text{P2G}}$ 、 $G_{s,t}^{\text{P2G}}$ 分别为场景 $s$ 下 $t$ 时刻P2G设备输入的电功率(单位为kW)、输出的 $\text{CH}_4$ 体积(单位为 $\text{m}^3/\text{h}$ ); $\eta^{\text{P2G}}$ 为P2G设备的效率。

### 1.6 PV模型

PV模型可表示为:

$$P_{s,t}^{\text{PV}} = P^{\text{PV,max}} \tau_{s,t}^{\text{PV}} \quad (8)$$

式中: $P_{s,t}^{\text{PV}}$ 为场景 $s$ 下 $t$ 时刻PV的发电功率,单位为kW; $P^{\text{PV,max}}$ 为PV的最大安装功率,单位为kW; $\tau_{s,t}^{\text{PV}}$ 为场景 $s$ 下 $t$ 时刻PV的发电系数。

## 2 分布式能源站 IES 全寿命周期碳排放

从全寿命周期角度而言,IES碳排放可分为设备建造过程碳排放、设备运行过程碳排放以及拆除回收过程碳排放。对于P2G设备和PV而言,其运行过程中不产生碳排放,因此只需考虑P2G设备和PV在建造以及拆除回收过程中产生的 $\text{CO}_2$ 量。对于除P2G设备、PV以外的其他设备而言,其容量均已确定,设备建造以及拆除回收过程中的碳排放量为定值,因此只需考虑设备运行过程中的碳排放即可。

### 2.1 PV全寿命周期碳排放

1)PV建造过程的碳排放。

PV在建造过程中排放的 $\text{CO}_2$ 包括间接碳排放、直接碳排放2类。间接碳排放是指PV产业链生产过程中生产设备用电能耗转换为相应的 $\text{CO}_2$ 排放量,此处主要是指多晶硅还原、切割、组件封装、系统集成安装等过程消耗电能而产生的碳排放<sup>[15]</sup>,可表示为:

$$\psi^{\text{PV,inde}} = E^{\text{PV,inde}} \alpha \quad (9)$$

式中: $\psi^{\text{PV,inde}}$ 为PV产业链生产过程中的间接碳排放量,单位为 $\text{kg}/\text{kW}$ ;  $E^{\text{PV,inde}}$ 为PV产业链生产过程中所有生产设备的用电能耗,单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kW}$ ;  $\alpha$ 为从电网购买电量对应的碳排放系数,取值为 $0.997 \text{ kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

直接碳排放是指PV产业链生产过程中直接排放的 $\text{CO}_2$ 量,此处是指硅沙还原到冶金硅过程中直接排放的 $\text{CO}_2$ 量。工厂建造1kW PV电池大约需要12.5kg工业硅( $\text{SiO}_2$ ),根据还原硅沙的化学公式,可计算得到该过程中PV的直接碳排放量 $\psi^{\text{PV,de}} = 18.4 \text{ kg}/\text{kW}$ <sup>[16]</sup>。

综上,PV在建造过程中的碳排放量 $\psi^{\text{PV,made}}$ 为:

$$\psi^{\text{PV,made}} = (\psi^{\text{PV,inde}} + \psi^{\text{PV,de}}) P^{\text{PV,max}} \quad (10)$$

2)PV拆除回收过程的碳排放。

PV组件在退役后需要进行组件回收利用,若有效利用可回收的PV组件,可降低碳排放。则PV在拆除回收过程中的碳排放量 $\psi^{\text{PV,re}}$ 可表示为:

$$\psi^{\text{PV,re}} = \omega^y s^{\text{PV}} P^{\text{PV,max}} + \omega^f (1 - s^{\text{PV}}) P^{\text{PV,max}} \quad (11)$$

式中: $s^{\text{PV}}$ 为PV组件的有效回收效率; $\omega^y$ 为PV组件有效回收时的碳排放系数; $\omega^f$ 为PV组件不能有效回收时的碳排放系数。

基于费用等年值法<sup>[17]</sup>,设PV组件的使用寿命为 $m_1$ 年,贴现率为 $I_1$ ,则PV的全寿命周期碳排放量的年折现值 $L^{\text{PV}}$ (单位为 $\text{kg}/\text{a}$ )可表示为:

$$L^{\text{PV}} = \frac{I_1}{1 - (1 + I_1)^{-m_1}} (\psi^{\text{PV,made}} + \psi^{\text{PV,re}}) \quad (12)$$

### 2.2 P2G设备全寿命周期碳排放

1)P2G设备建造过程的碳排放。

P2G设备主要由2级反应装置及控制系统组成,且其设备容量主要由2级反应装置的容量共同决定。由于P2G设备的容量对控制系统的影响不大,本文认为不同容量P2G设备的控制系统在建造及拆除回收过程中的碳排放量是一致的,即本文只考虑P2G设备2级反应装置的全寿命周期碳排放。

第一级反应装置为质子交换膜水电解制氢装置<sup>[18]</sup>,主要由装置外架构以及电解槽组成,其建造过程中的碳排放主要包括钢铁铸造碳排放以及阴极和阳极电催化剂的贵金属还原碳排放;第二级反应装置为甲烷化装置<sup>[19]</sup>,主要由甲烷化反应器、脱硫槽、废热锅炉、蒸汽过热器、循环压缩机组成,其建造过程中的碳排放主要为钢铁铸造碳排放。故P2G设备在建造过程中的直接碳排放 $\psi^{\text{P2G,de}}$ 可表示为:

$$\psi^{\text{P2G,de}} = \sigma^{\text{sl}} P^{\text{P2G,max}} + \sigma^{\text{cl}} P^{\text{P2G,max}} \quad (13)$$

式中: $P^{\text{P2G,max}}$ 为P2G设备的安装容量上限; $\sigma^{\text{sl}}$ 为钢铁铸造碳排放系数; $\sigma^{\text{cl}}$ 为贵金属还原碳排放系数,取值为 $8.25 \text{ kg}/\text{kW}$ 。

P2G设备在建造过程中也会产生间接碳排放,主要为钢铁铸造和还原贵金属催化剂时生产设备消耗电能所产生的碳排放,可表示为:

$$\psi^{\text{P2G,inde}} = E^{\text{P2G,inde}} \alpha \quad (14)$$

式中: $\psi^{\text{P2G,inde}}$ 为P2G设备建造过程中的间接碳排放量,单位为 $\text{kg}/\text{kW}$ ;  $E^{\text{P2G,inde}}$ 为P2G设备建造过程中所有生产设备的用电能耗,单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kW}$ 。

综上,P2G设备在建造过程中的碳排放量 $\psi^{\text{P2G,made}}$ 为:

$$\psi^{\text{P2G,made}} = (\psi^{\text{P2G,inde}} + \psi^{\text{P2G,de}}) P^{\text{P2G,max}} \quad (15)$$

2)P2G设备拆除回收过程的碳排放。

P2G设备在超过使用年限后,需要拆除回收。由于P2G设备的大部分架构使用钢铁,若能及时对其进行合理的回收利用,可大幅降低碳排放。P2G

设备在拆除回收过程中的碳排放量 $\psi^{P2G, re}$ 可表示为:

$$\psi^{P2G, re} = \epsilon^{P2G} P^{P2G, max} \quad (16)$$

式中: $\epsilon^{P2G}$ 为P2G设备拆除回收时的碳排放系数。

设P2G设备的使用寿命为 $m_2$ 年,贴现率为 $I_2$ ,则P2G全寿命周期碳排放量的年折现值 $L^{P2G}$ (单位为 $\text{kg/a}$ )可表示为:

$$L^{P2G} = \frac{I_2}{1 - (1 + I_2)^{-m_2}} (\psi^{P2G, made} + \psi^{P2G, re}) \quad (17)$$

### 2.3 其他碳排放

其他碳排放指IES中所有设备的运行碳排放,主要包括设备消耗天然气的碳排放和外购电对应的碳排放两部分。P2G设备产生的 $\text{CH}_4$ 会加入天然气管道,因此IES运行过程中的年碳排量 $E^{\text{CO}_2}$ (单位为 $\text{kg/a}$ )可表示为:

$$E^{\text{CO}_2} = \sum_{s=1}^S \left[ \sum_{t=1}^T \vartheta (G_{s,t}^{\text{Grid}} + G_{s,t}^{\text{P2G}}) + \sum_{t=1}^T \alpha P_{s,t}^{\text{Grid}} \Delta t \right] D_s \quad (18)$$

式中: $G_{s,t}^{\text{Grid}}$ 为场景 $s$ 下 $t$ 时刻IES消耗的天然气量,单位为 $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $P_{s,t}^{\text{Grid}}$ 为场景 $s$ 下 $t$ 时刻IES从电网购电的功率,单位为 $\text{kW}$ ;  $S$ 为一年内典型场景的数量;  $\vartheta$ 为标准工况下生成 $1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$ 需要的 $\text{CO}_2$ 量,同时也表示燃烧 $1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$ 生成的 $\text{CO}_2$ 量,取值为 $1.9647 \text{ kg/m}^3$ ;  $D_s$ 为场景 $s$ 对应的天数。

由于P2G设备会吸收 $\text{CO}_2$ ,IES全寿命周期碳排放量 $S^c$ (单位为 $\text{t}$ )可表示为:

$$S^c = \left[ L^{\text{PV}} + L^{\text{P2G}} + E^{\text{CO}_2} - \sum_{s=1}^S \left( \sum_{t=1}^T \vartheta G_{s,t}^{\text{P2G}} \right) D_s \right] / 1000 \quad (19)$$

## 3 P2G设备和PV的容量配置模型

### 3.1 目标函数

本文以系统总成本最小为目标进行P2G设备和PV的容量联合优化配置,系统总成本 $C^{\text{all}}$ 主要包括碳交易成本 $C^c$ 、购能成本 $C^{\text{in}}$ 、设备投资成本 $C^e$ 和设备运维成本 $C^w$ ,则目标函数如式(20)所示。

$$\min C^{\text{all}} = C^c + C^{\text{in}} + C^e + C^w \quad (20)$$

#### 1) 碳交易成本。

碳交易实质上是通过建立碳排放权二次分配的合理制度,借助市场对碳排放权进行交易,从而控制企业的碳排放量,促进全球温室气体减排,助力碳中和<sup>[20]</sup>。本文设置了阶梯罚金价格,具体碳交易制度如下:在一定的调度周期内,若企业的实际碳排放量小于指定配额,则可通过出售多余的碳排放额度以获取收益;若企业的实际碳排放量大于指定配额,则必须购买额外的碳排放额度。当企业的实际碳排放量大于指定配额且超额量大于可购买的碳排放额度时,除了需支付购买碳排放额度的交易成本外,还需要支付超额部分的高额罚金,且随着超额量的增加,罚金价格也会按一定的幅度增长。因此,碳交易成

本 $C^c$ 可表示为:

$$C^c = \begin{cases} \nu^c (S^c - D^c) & 0 \leq S^c \leq D^c + H^c \\ \nu^c H^c + w^c (S^c - D^c - H^c) & D^c + H^c < S^c \leq D^c + 2H^c \\ \nu^c H^c + w^c H^c + w^c d (S^c - D^c - 2H^c) & D^c + 2H^c < S^c \leq D^c + 3H^c \\ \nu^c H^c + w^c H^c + w^c d H^c + w^c d^2 (S^c - D^c - 3H^c) & D^c + 3H^c < S^c \leq D^c + 4H^c \\ \vdots & \end{cases} \quad (21)$$

式中: $\nu^c$ 为碳交易价格,本文取值为 $100 \text{ 元/t}$ ;  $D^c$ 为IES的碳排放配额,单位为 $\text{t}$ ;  $H^c$ 为不同罚金阶段IES可购买的碳排放额度,单位为 $\text{t}$ ;  $w^c$ 为初级罚金价格,单位为 $\text{元/t}$ ;  $d$ 为罚金价格增长系数,本文取值为 $1.2$ 。

#### 2) 购能成本。

根据分布式能源站的实际运行情况,购水成本占据一定的比例,因此本文将购水成本纳入购能成本,计算式为:

$$C^{\text{in}} = \sum_{k \in K} \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T (\varphi_{s,t}^{\text{gas}} G_{s,t}^{\text{Grid}} \Delta t + \varphi_{s,t}^{\text{water}} W_{s,t}^k + \varphi_{s,t}^{\text{elec}} P_{s,t}^{\text{Grid}} \Delta t) D_s \quad (22)$$

式中: $\varphi_{s,t}^{\text{gas}}$ 、 $\varphi_{s,t}^{\text{water}}$ 、 $\varphi_{s,t}^{\text{elec}}$ 分别为场景 $s$ 下 $t$ 时刻的天然气、水以及电的分时价格,单位分别为 $\text{元/m}^3$ 、 $\text{元/t}$ 、 $\text{元/(kW}\cdot\text{h)}$ ;  $W_{s,t}^k$ 为场景 $s$ 下 $t$ 时刻设备 $k$ 的用水量,单位为 $\text{t/h}$ ;  $K = \{\text{P2G, XL, GB, HP, CC}\}$ 为设备集合, XL、CC分别表示溴化锂机组、离心式冷水机组。

用水设备主要包括溴化锂机组、燃气锅炉、热泵机、离心式冷水机组、P2G设备。溴化锂机组、燃气锅炉、热泵机和离心式冷水机组用水以携带能量供给冷、热负荷,用水量由负荷大小以及负荷所需温度决定。溴化锂机组、燃气锅炉、热泵机、离心式冷水机组用水量的计算式为:

$$W_{s,t}^{k'} = \frac{H_{s,t}^{k'} \kappa \times 10^{-3}}{c |T_{s,t}^r - T_{s,t}^o|} \quad (23)$$

式中: $W_{s,t}^{k'}$ 为场景 $s$ 下 $t$ 时刻设备 $k'$ 的用水量,单位为 $\text{t/h}$ ,  $k' \in K_e$ ,  $K_e = \{\text{XL, GB, HP, CC}\}$ 为设备集合;  $c$ 为水的比热容,取值为 $4.2 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{°C)}$ ;  $T_{s,t}^r$ 、 $T_{s,t}^o$ 分别为场景 $s$ 下 $t$ 时刻经设备 $k'$ 处理后、未经设备 $k'$ 处理的水温,单位为 $\text{°C}$ ;  $H_{s,t}^{k'}$ 为场景 $s$ 下 $t$ 时刻设备 $k'$ 的输出功率,单位为 $\text{kW}$ 。

根据P2G设备的工作原理,其用水量可表示为:

$$W_{s,t}^{\text{P2G}} = \delta G_{s,t}^{\text{P2G}} \times 10^{-3} \quad (24)$$

式中: $W_{s,t}^{\text{P2G}}$ 为场景 $s$ 下 $t$ 时刻P2G设备的用水量,单位为 $\text{t/h}$ ;  $\delta$ 为标准工况下生成 $1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$ 的用水量,取值为 $1.6084 \text{ kg/m}^3$ 。

#### 3) 设备成本。

设备成本包括设备投资成本和运维成本。设备投资成本由P2G设备和PV的容量决定,设备初始投资等年值成本可表示为:

$$C^e = \frac{I_1 \varepsilon^{PV} P^{PV, \max}}{1 - (1 + I_1)^{-m_1}} + \frac{I_2 \varepsilon^{P2G} P^{P2G, \max}}{1 - (1 + I_2)^{-m_2}} \quad (25)$$

式中： $\varepsilon^{PV}$ 、 $\varepsilon^{P2G}$ 分别为单位容量PV、P2G设备的投资成本，单位为元/kW。

设备运维成本包括PV、P2G设备的运维成本，可表示为：

$$C^w = \beta^{PV} P^{PV, \max} + \beta^{P2G} P^{P2G, \max} \quad (26)$$

式中： $\beta^{PV}$ 、 $\beta^{P2G}$ 分别为单位容量PV、P2G设备的年运维成本，单位为元/kW。

### 3.2 约束条件

1) 电、热、冷、气平衡约束。

$$\begin{cases} P_{s,t}^{Ngen} + P_{s,t}^{Grid} + P_{s,t}^{PV} = P_{s,t}^{CC} + P_{s,t}^{Load} + P_{s,t}^{P2G} \\ H_{s,t}^{XL} + H_{s,t}^{GB} + H_{s,t}^{HP} + H_{s,t}^{deh} = H_{s,t}^{Load} + H_{s,t}^{ch} \\ C_{s,t}^{XL} + C_{s,t}^{CC} + C_{s,t}^{deh} = C_{s,t}^{Load} + C_{s,t}^{ch} \\ G_{s,t}^{P2G} + G_{s,t}^{Grid} + G_{s,t}^{deh} = G_{s,t}^{Ngen} + G_{s,t}^{GB} + G_{s,t}^{HP} + G_{s,t}^{ch} \end{cases} \quad (27)$$

式中： $P_{s,t}^{Load}$ 、 $H_{s,t}^{Load}$ 分别为场景s下t时刻的电、热负荷。

2) P2G设备、PV容量约束。

$$\begin{cases} P_{s,t}^{P2G, \min} \leq P_{s,t}^{P2G} \leq P_{s,t}^{P2G, \max} \\ P_{s,t}^{PV, \min} \leq P_{s,t}^{PV} \leq P_{s,t}^{PV, \max} \end{cases} \quad (28)$$

式中： $P_{s,t}^{P2G, \min}$ 、 $P_{s,t}^{PV, \min}$ 分别为P2G设备、PV的安装容量下限。

此外，其他设备相关约束如式(1)——(8)所示。

## 4 算例分析

### 4.1 算例设置

本文基于湖南省某实际分布式能源站IES进行算例分析。PV发电具有随机性，负荷也具有一定的波动性，且都具有季节性，因此利用K-means聚类方法将PV和电、冷、热负荷的历史数据按照季节生成4个典型日场景，即S=4，s=1,2,3,4分别对应春、夏、秋、冬季典型日场景，数据曲线见附录A图A1。根据湖南省的电价、水价以及气价，确定各能源的分时价格如附录A表A1所示。且将能量单位统一换算为kW。利用商业软件GAMS进行优化求解。

### 4.2 配置方案对比分析

为了说明本文模型的有效性，设置了8种情形

进行对比分析，如附录A表A2所示。IES的碳排放配额 $D^e = 6000$  t，不同罚金阶段IES可购买的碳排放额度 $H^e = 3000$  t，初级罚金价格 $w^e = 300$ 元/t。优化配置结果如表1所示。

对比表1中情形2—4的配置结果可知，相较于P2G设备单独配置的情形2、PV单独配置的情形3，PV和P2G设备联合优化配置的情形4下P2G设备容量增加了1389.24 kW(约3.6倍)，PV容量增加了2267.072 kW(约1.46倍)。可见，联合优化配置使得PV、P2G设备这2种低碳设备的接入容量均增大，有效提升了可再生能源的利用率。相较于情形1，情形4的碳交易成本减少了868.942万元，系统总成本减少了1466.629万元，这是因为P2G设备可将PV产生的部分电能转换成燃气，内燃发电机可将燃气转换成电能，实现了实时的电气互转，从而降低了系统的购能成本，也有效减少了碳排放量以及系统总成本。相较情形1—3，情形4实现了系统的低碳经济优化，证明了PV、P2G设备联合优化配置的有效性和可行性。

对比表1中情形3、6的结果可知，情形3的PV配置容量增加了1156.94 kW，碳交易成本减少了62.37万元，系统总成本减少了4.437万元；对比表1中情形2和5、情形4和7的结果可知，无论是低碳设备单独配置还是PV与P2G设备联合优化配置，只要在目标函数中考虑碳交易成本，各低碳设备的接入容量均增大，且系统总成本相应减少。考虑碳交易机制的配置方法有效提升了清洁能源的利用率，并兼顾了IES的经济性。这是因为采用传统经济配置模型时，碳排放系数小、发电成本较高的PV以及吸碳、成本高的P2G设备没有得到有效利用，使得传统配置方案中包括电网购电成本在内的购能成本较高，导致系统总成本增加，碳排放量也较大。

对比情形1和其他情形可知，如果IES不配置PV、P2G设备这2种低碳设备，则IES的碳排放量很高，达27736.835 t，系统总成本也最大，达3058.975万元，表明PV与P2G设备是目前降低碳排放、助力碳中和的重要手段，有必要在规划IES时对PV、P2G

表1 不同情形的优化配置结果

Table 1 Optimal configuration results of different conditions

情形	PV容量/kW	P2G设备容量/kW	碳排放量/t	$C^e$ /万元	$C^c$ /万元	$C^w$ /万元	$C^{in}$ /万元	$C^{all}$ /万元
1	—	—	27736.835	989.698	0	0	2069.277	3058.975
2	—	385.076	24617.122	745.819	15.403	6.931	1867.534	2635.687
3	4894.941	—	18870.903	402.748	186.987	73.424	1378.440	2041.599
4	7162.013	1774.316	12021.007	120.756	344.562	139.368	987.660	1592.346
5	—	329.996	25014.890	775.505*	13.200	5.940	1959.473	2754.118
6	3738.001	—	20074.034	465.118*	142.792	56.070	1382.056	2046.036
7	5975.097	574.881	15001.588	228.069*	251.244	99.974	1100.577	1679.864
8	7257.597	1807.114	11976.982	119.309	349.525	141.392	1082.832	1693.058

注：“\*”标记的碳排放成本是根据碳排放量计算得到的。

设备进行优化配置。

配置PV与P2G设备后,IES运营商可根据优化结果合理安排机组出力,且在不同典型场景下IES的运行状态有所区别。例如:夏季冷负荷较大,且供冷的离心式冷水机组是电制冷设备,此时IES的电负荷需求较大,IES应以“以电定热”的模式运行,情形4下各设备的出力结果见附录A图A2;而冬季的热负荷需求较大,IES应以“以热定电”的模式运行。由图A2可知,P2G设备一直处于运行状态,利用CO<sub>2</sub>产生符合标准的天然气,促进碳中和。由于夜晚PV不发电,此时IES内部主要由内燃发电机供应电负荷,溴化锂机组利用其产生的余热输出热功率;而白天PV发电量较大,此时内燃发电机出力较少,所产生的较少余热被溴化锂机组转化为冷功率。溴化锂机组的产热/产冷工作状态受内燃发电机影响,而内燃发电机的出力受PV出力影响,且PV出力具有随机性和波动性,这使得溴化锂机组的产热/产冷量并不稳定,因此大部分冷负荷由离心式冷水机组提供。当PV不出力时,为了有效利用内燃发电机的余热,不造成能量损失,大部分热负荷由溴化锂机组供应。而在夏季热负荷很小,此时热泵机不出力。

由于用水成本是IES的重要能源成本之一,对比情形4和8可知:情形4考虑了用水成本,PV与P2G设备的配置容量较小,这是因为P2G设备在运行过程中会消耗一定量的水,产生一定的用水成本,当将用水成本纳入目标函数时,会影响P2G设备的配置容量,而P2G设备容量的减小,也会影响PV发电的消纳,使得PV容量减小。2种低碳设备容量的减小,使得IES的碳排放量稍有增加,但由于设备成本和包括用水成本在内的购能成本降低,使得系统总成本降低。因此,考虑用水成本的PV与P2G设备联合配置不仅贴合工程实际,还使IES具有更好的经济性。

### 4.3 碳交易机制分析

#### 4.3.1 碳排放配额对联合配置的影响

目前我国碳交易机制仍处于探索阶段,合理地设定碳交易机制中的参数,可以有效降低企业的碳排放量,其中企业的碳排放配额是重要参数。为了说明碳排放配额 $D^0$ 的作用,本文将未考虑碳交易成本(情形7)的IES碳排放量15 001.588 t作为IES的碳排放强度,并分析碳排放配额与碳排放强度之比 $\xi$ 取不同的值时,对PV与P2G设备联合配置的影响,结果如表2所示。

由表2可知,当 $\xi$ 较小时,IES的碳排放配额也很小,导致碳交易超额罚金较大,使得碳交易成本对目标函数的约束力度很强,因此低碳设备的配置容量也很大,碳排放量小,但系统总成本较高,虽然保证了IES的环保性,但IES的经济性并不好;随着 $\xi$ 增

表2  $\xi$ 对联合配置结果的影响

Table 2 Influence of  $\xi$  on joint configuration results

$\xi / \%$	PV容量 / kW	P2G设备容量 / kW	$C^{\text{all}}$ / 万元	碳排放量 / t
20	7333.284	1792.009	1659.979	11945.213
40	7162.013	1774.316	1592.345	12021.007
60	6905.402	1710.790	1621.940	13464.803
80	6785.482	1685.270	1659.062	15987.454
100	6521.129	1648.909	1687.403	18505.060
120	6343.973	1597.147	1693.704	21000.000

大,PV与P2G设备的配置容量减小,碳交易成本降低,且购能成本增加,系统总成本主要在碳交易成本和购能成本的博弈中变化;当 $\xi=40\%$ 时,系统总成本较小,碳排放量也较小,此时IES可获得较好的经济性和低碳效益。

#### 4.3.2 超额排放罚金价格对联合配置的影响

为了控制碳排放量,并使基于碳交易机制的设备容量配置更加合理,本文对IES设置超额排放罚金。设定初级罚金价格等于碳交易价格,即以不计罚金模式下的碳交易市场为起始点,并使初级罚金价格以100元/t递增。低碳设备联合优化配置时的碳排放量、系统总成本与初级罚金价格的关系曲线如图2所示,不同初级罚金价格下的低碳设备联合优化配置结果如表3所示。

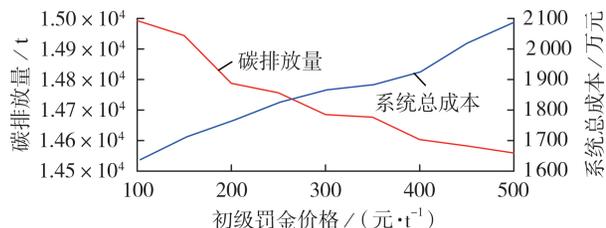


图2 碳排放量、系统总成本与初级罚金价格的关系曲线  
Fig.2 Relationship curves of carbon emissions and total system cost vs. primary penalty price

表3 初级罚金价格对低碳设备联合优化配置的影响

Table 3 Influence of primary penalty price on joint optimal configuration of low-carbon equipment

初级罚金价格 / (元·t <sup>-1</sup> )	PV容量 / kW	P2G设备容量 / kW
100	6623.809	1658.732
200	7035.899	1738.098
300	7162.013	1774.316
400	7245.038	1789.040
500	7248.650	1800.201

结合图2与表3可知,当初级罚金价格由100元/t增加至200元/t时,PV、P2G设备容量增幅分别为12.26%、28.56%,碳排放量减少了220 t,系统总成本增加了125.235万元。这是因为初级罚金价格的变化使得碳交易市场从无罚金机制变为带有罚金机制,导致碳交易成本迅速增加,为了降低碳交易

成本,低碳设备的接入容量便会增加。而随着初级罚金价格增大,高额罚金使得碳交易成本在系统总成本中的比重逐渐增大,IES逐渐加强了对碳排放的约束,促使低碳设备的配置容量逐渐增大,且碳排放量逐渐减少。通过合理设置超额碳排放的初级罚金价格,可以有效降低IES的碳排放量,提升PV以及P2G设备的配置容量,助力碳中和。

另外,计及IES全寿命周期碳排放与只计及设备运行过程中碳排放的PV与P2G设备的联合优化配置结果会受到初级罚金价格的影响,结果如图3所示。由图可知,当初级罚金价格较低时,计及IES全寿命周期碳排放与只计及设备运行过程中碳排放2种情形的配置结果几乎一致;当初级罚金价格大于300元/t时,相较于计及IES全寿命周期碳排放的情形,只计及设备运行过程中碳排放情形的设备配置容量均有所增加。这是因为设备生产以及拆除回收过程中的碳排放量比设备运行过程中的碳排放量小,当初级罚金价格较低时,设备生产以及拆除回收过程中的碳排放量产生的碳交易成本在系统总成本中占比较小,不足以影响优化配置结果;而随着初级罚金价格增大,碳交易成本不断增加,使得计及IES全寿命周期碳排放的配置容量相对减小,从而降低了设备生产以及拆除回收过程中的碳排放。

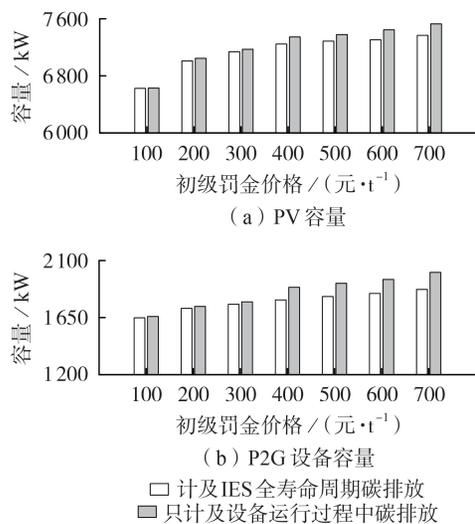


图3 初级罚金价格对联合配置结果的影响  
Fig.3 Influence of primary penalty price on joint configuration results

## 5 结论

在我国碳达峰和碳中和时代背景下,本文基于以湖南省某分布式能源站为原型的IES,提出了考虑全寿命周期碳排放和碳交易机制的P2G设备与PV联合优化配置模型。该模型考虑了对IES很重要的用水成本和分时电价,使得模型更加贴合实际情况。该模型计及IES全寿命周期碳排放和碳交易机制,

可极大地提升PV和P2G设备的配置容量,保证系统的运行经济性并有效降低系统的碳排放。此外,碳排放超额罚金对碳排放量以及容量配置结果有显著的影响。我国碳交易市场机制会迅速发展并逐渐成熟,合理设定企业碳排放配额以及碳排放阶梯罚金可以使企业积极参与碳交易并优化企业的用能方式和能源配置结构。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 陈胜,卫志农,孙国强,等. 电-气互联综合能源系统安全分析与优化控制研究综述[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):3-11. CHEN Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Review on security analysis and optimal control of electricity-gas integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8):3-11.
- [2] 刘天琪,曾红,何川,等. 考虑电转气设备和风电场协同扩建的气电互联综合能源系统规划[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):144-151. LIU Tianqi, ZENG Hong, HE Chuan, et al. Planning of integrated gas and electricity system considering coordinated expansion of power-to-gas facilities and wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8):144-151.
- [3] 曹严,穆云飞,贾宏杰,等. 考虑建设时序的园区综合能源系统多阶段规划[J]. 中国电机工程学报,2020,40(21):6815-6828. CAO Yan, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Multi-stage planning of park-level integrated energy system considering construction time sequence[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6815-6828.
- [4] 金泰,李娜,秦建华,等. 基于混合整数非线性规划的综合能源系统优化配置研究[J/OL]. 热力发电. (2021-07-08)[2021-07-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1111.TM.20210708.1626.003.html>. DOI: 10.19666/j.rld.202104064.
- [5] 马溪原,郭晓斌,雷金勇. 面向多能互补的分布式光伏与气电混合容量规划方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(4):55-63. MA Xiyuan, GUO Xiaobin, LEI Jinyong. Capacity planning method of distributed PV and P2G in multi-energy coupled system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 55-63.
- [6] 孙强,高松,谢典,等. 协调可靠性与经济性的园区综合能源系统优化规划[J]. 电力系统及其自动化学报,2020,32(4):76-82. SUN Qiang, GAO Song, XIE Dian, et al. Optimum planning for integrated community energy system with coordination of reliability and economy[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(4):76-82.
- [7] 程杉,徐建宇,何畅,等. 计及不确定性的综合能源系统容量规划方法[J/OL]. 电力系统保护与控制. (2021-03-26)[2021-06-05]. <https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.201506>.
- [8] 赵瑾,雍静,邹嘉嘉,等. 基于长时间尺度的园区综合能源系统随机规划[J]. 电力自动化设备,2020,40(3):62-67. ZHAO Jin, YONG Jing, HUAN Jiajia, et al. Stochastic planning of park-level integrated energy system based on long time-scale[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 62-67.
- [9] 王振浩,许京剑,田春光,等. 计及碳交易成本的含风电电力系统热电联合调度[J]. 太阳能学报,2020,41(12):245-253. WANG Zhenhao, XU Jingjian, TIAN Chunguang, et al. Combined heat and power scheduling strategy considering carbon

- trading cost in wind power system[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2020, 41(12):245-253.
- [10] 许剑. 考虑需求响应的含风电热电联合系统低碳经济调度研究[D]. 吉林:东北电力大学, 2019.  
XU Jingjian. Research on low-carbon economic scheduling of combined heat and power system with wind power considering demand response[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2019.
- [11] 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.
- [12] 王仕炬, 刘天琪, 何川, 等. 基于舒适度的需求响应与碳交易的园区综合能源经济调度[J/OL]. *电测与仪表*. (2021-04-27)[2021-08-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210427.0849.002.html>.
- [13] 彭元, 姜素华, 吴耀武, 等. 考虑储液式碳捕集电厂的含风电系统低碳经济调度[J/OL]. *电工技术学报*. (2021-04-01)[2021-08-17]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.201249>.
- [14] 周任军, 肖钧文, 唐夏菲, 等. 电转气消纳新能源与碳捕集电厂碳利用的协调优化[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(7):61-67.  
ZHOU Renjun, XIAO Junwen, TANG Xiafei, et al. Coordinated optimization of carbon utilization between power-to-gas renewable energy accommodation and carbon capture power plant[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(7):61-67.
- [15] SANTIBAÑEZ-AGUILAR J E, CASTELLANOS S, FLORESTA-CUAHUAC A, et al. Design of domestic photovoltaics manufacturing systems under global constraints and uncertainty[J]. *Renewable Energy*, 2020, 148:1174-1189.
- [16] 乌云娜, 贾卫兵, 郭晓鹏, 等. 基于LCA的光伏组件供应链生态-经济效益优化研究[J]. *生态经济*, 2019, 35(8):61-66.  
WU Yunna, JIA Weibing, GUO Xiaopeng, et al. Research on ecological-economic benefits optimization of supply chain for photovoltaic modules based on LCA[J]. *Ecological Economy*, 2019, 35(8):61-66.
- [17] 杨金涛, 乐健, 刘开培, 等. 基于LCC的配电网供电电压质量改善措施的优化[J]. *电力自动化设备*, 2015, 35(8):59-64.  
YANG Jintao, LE Jian, LIU Kaipei, et al. Improvement measure optimization based on LCC for voltage quality of distribution network[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2015, 35(8):59-64.
- [18] 张镇, 吴辉. 国内外质子交换膜燃料电池关键材料的性能和成本分析[J]. *电池工业*, 2019, 23(6):305-309, 326.  
ZHANG Zhen, WU Hui. A literature review on performance and cost analysis of key materials for PEMFC[J]. *Chinese Battery Industry*, 2019, 23(6):305-309, 326.
- [19] 邢承治, 胡兆吉, 韩启元, 等. 基于催化剂防护及SNG品质的甲烷化工艺设计[J]. *化学工程*, 2014, 42(9):74-78.  
XING Chengzhi, HU Zhaoji, HAN Qiyuan, et al. Methanation process design based on catalyst protection and substitute natural gas quality[J]. *Chemical Engineering*, 2014, 42(9):74-78.
- [20] 崔杨, 曾鹏, 仲悟之, 等. 考虑阶梯式碳交易的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(3):10-17.  
CUI Yang, ZENG Peng, ZHONG Wuzhi, et al. Low-carbon economic dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system based on ladder-type carbon trading[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(3):10-17.

#### 作者简介:



矫舒美

矫舒美(1997—),女,吉林吉林人,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统运行与规划(E-mail:2856926326@qq.com);

乔学博(1992—),男,河北张家口人,博士研究生,主要研究方向为配电网与综合能源系统优化(E-mail:xbq1992@hnu.edu.cn);

李勇(1982—),男,河南信阳人,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为能源与电力系统的优化运行与控制、电能变换系统与装备(E-mail:yongli@hnu.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

## Joint optimal configuration of P2G equipment and PV considering life-cycle carbon emissions and carbon trading of IES

JIAO Shumei, QIAO Xuebo, LI Yong, YAO Tianyu, CAO Yijia

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** IES(Integrated Energy System) can improve energy utilization efficiency, and reasonable configuration of low-carbon equipment can effectively reduce carbon emissions and promote carbon neutral. A joint capacity configuration method of P2G(Power-to-Gas) equipment and PV(PhotoVoltaic) is proposed considering life-cycle carbon emissions and carbon trading mechanism of IES. The model of equipment in IES based on a distributed energy station is established, the life-cycle carbon emission model of IES is constructed, and the calculation method of life-cycle carbon emissions of P2G equipment and PV is given. The joint optimal configuration model of P2G equipment and PV is established with the goal of minimizing the sum of ladder penalty mechanism-based carbon transaction cost, energy purchase cost including water cost and considering time-of-use electricity price, and equipment cost. Based on the actual parameters of an energy station, an example is given to verify the correctness and effectiveness of the proposed method, and the influence of carbon trading mechanism on the optimal configuration results is discussed.

**Key words:** distributed energy station; integrated energy system; life-cycle carbon emissions; carbon trading; capacity configuration; joint optimization

# 附录 A

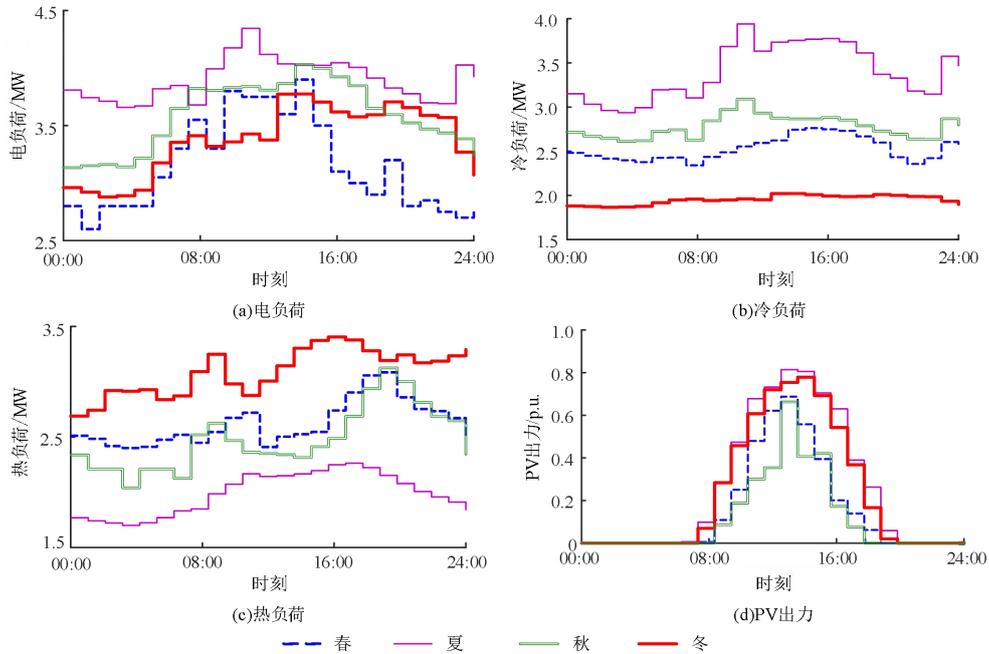


图 A1 4 种聚类场景的电、冷、热负荷以及 PV 出力曲线  
Fig.A1 Electrical,cold and heat load and PV output curves of four clustering scenarios

表 A1 电、水、气的分时价格  
Table A1 Time-sharing prices of electricity,water and gas

时段	电价/[元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	水价/(元·t <sup>-1</sup> )	气价/(元·t <sup>-1</sup> )	
	1—12 月	1—12 月	1、2、11、12 月	3—10 月
00:00—07:00	0.4603	2.49	3.28	2.92
07:00—08:00	0.6603	2.49	3.28	2.92
08:00—11:00	0.8103	2.49	3.28	2.92
11:00—15:00	0.6603	2.49	3.28	2.92
15:00—19:00	0.8103	2.49	3.28	2.92
19:00—22:00	0.9103	2.49	3.28	2.92
22:00—23:00	0.6603	2.49	3.28	2.92
22:00—24:00	0.4603	2.49	3.28	2.92

表 A2 8 种情形设置  
Table A2 Setting of eight conditions

情形	PV 容量	P2G 设备容量	碳交易成本	用水成本
1	×	×	√	√
2	×	√	√	√
3	√	×	√	√
4	√	√	√	√
5	×	√	×	√
6	√	×	×	√
7	√	√	×	√
8	√	√	√	×

注：√表示考虑该因素，×表示不考虑该因素。

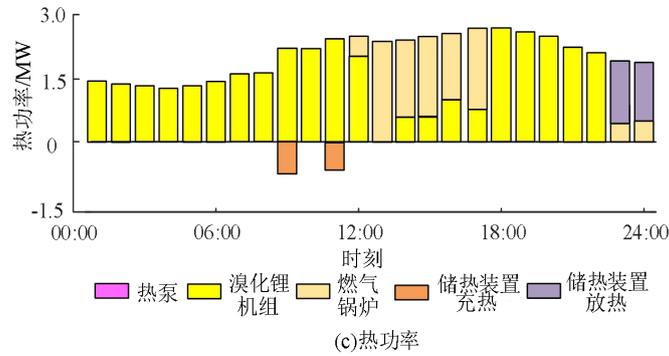
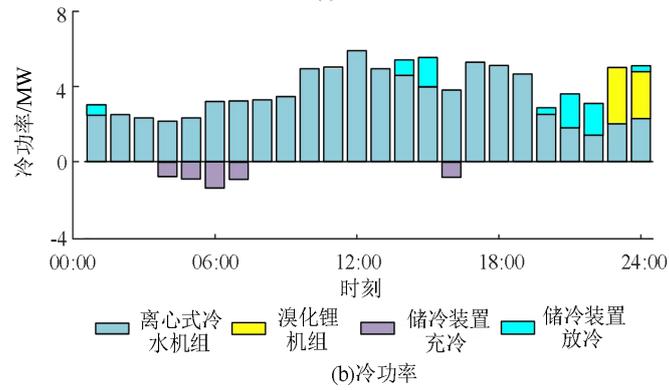
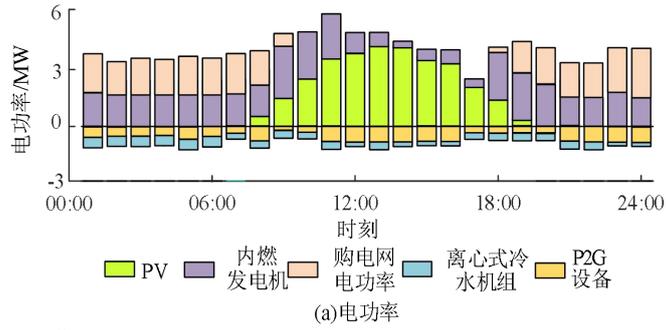


图 A2 情形 4 下各设备在夏季输出或输入电、冷、热功率

Fig.A2 Output or input of electric,cold and heat power of each device of case 4 in summer