

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250363

# 综合能源系统全生命周期零碳规划及多时间尺度能量优化

程志平<sup>1</sup>, 穆玉皓<sup>1</sup>, 李忠文<sup>1</sup>, 刘晓宇<sup>2</sup>, 杨新志<sup>3</sup>, 李伟<sup>4</sup>

(1. 郑州大学电气与信息工程学院, 河南 郑州 450000; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192;  
3. 三峡国际能源投资集团有限公司, 北京 101100; 4. 中国长江三峡集团有限公司, 北京 101100)

**摘要:** 针对可再生能源和负荷的不确定性制约综合能源系统(integrated energy systems, IES)实现零碳目标的问题, 提出了一种考虑不确定性的 IES 零碳容量规划和多时间尺度优化方法。以新疆某含电、热、冷负荷需求的 IES 为例, 首先, 利用多元联合分布并结合蒙特卡洛方法模拟可再生能源和负荷的不确定性及其相关性。然后, 提出利用氢储能电解水过程产生的碱性溶液吸收二氧化碳的 IES 全生命周期零碳容量规划方法。最后, 构建了 IES 规划周期内的零碳排放调度框架, 以协调 IES 在长时间规划周期和短时间调度周期的零碳优化。并基于该框架设计随机-滚动两阶段优化调度模型, 以应对可再生能源和负荷的不确定性, 最小化 IES 综合运行成本。仿真分析结果验证了所提方法在促进可再生能源消纳、减少一次能源消耗、实现零碳排放和经济运行方面的有效性。

**关键词:** 综合能源系统; 全生命周期; 零碳排放; 容量规划; 优化调度; 氢储能

## Whole life-cycle zero-carbon planning and multi-time-scale energy optimization for integrated energy systems

CHENG Zhiping<sup>1</sup>, MU Yuhao<sup>1</sup>, LI Zhongwen<sup>1</sup>, LIU Xiaoyu<sup>2</sup>, YANG Xinzhi<sup>3</sup>, LI Wei<sup>4</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. Three Gorges International Energy Investment Group Co., Ltd., Beijing 101100, China; 4. China Three Gorges Corporation, Beijing 101100, China)

**Abstract:** To address the challenge that uncertainties in renewable energy sources and loads hinder the achievement of zero-carbon targets in integrated energy systems (IES), this paper proposes a zero-carbon capacity planning and multi-time-scale optimization method for IES considering uncertainties. Taking an IES in Xinjiang with electric, heating, and cooling load demands as the study case, a multivariate joint distribution combined with the Monte Carlo method is first employed to model the uncertainties and correlations of renewable energy sources and loads. Then, a whole life-cycle zero-carbon capacity planning method for IES is proposed, in which carbon dioxide is absorbed by alkaline solution generated during the electrolysis process of hydrogen energy storage. Finally, a zero-carbon emission dispatch framework over the IES planning horizon is constructed to coordinate zero-carbon optimization across long-term planning and short-term dispatch cycles. Based on this framework, a stochastic-rolling two-stage optimization dispatch model is designed to cope with uncertainties in renewable energy and load, aiming to minimize the overall operation cost of the IES. Simulation results verify the effectiveness of the proposed method in promoting renewable energy consumption, reducing primary energy usage, and achieving zero-carbon emissions with economic operation.

This work is supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 62273312).

**Key words:** integrated energy system; whole life-cycle; zero-carbon emissions; capacity planning; optimal dispatch; hydrogen energy storage

## 0 引言

在全球气候治理的背景下, “双碳”目标与碳排

放问题备受各国瞩目<sup>[1-3]</sup>。综合能源系统(integrated energy systems, IES)以其多能源互补、智能调度和能源高效利用等独特优势, 不仅优化了能源结构、提高了能源利用效率, 还为能源供应的稳定性提供了坚实保障<sup>[4-6]</sup>。然而, 可再生能源和负荷的不确定性给 IES 的优化带来了一系列挑战, 这不仅影响了 IES 对可再生能源的有效利用, 还制约了 IES 实现零碳

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目资助(62273312); 河南省优秀青年科学基金项目资助(232300421094); 郑州大学博士后科学基金项目资助(22120016)

目标的潜力。因此, 面对碳达峰、碳中和的宏伟目标, 探索 IES 在实现零碳排放目标中的有效路径, 显得尤为迫切与重要<sup>[7-8]</sup>。

现有的 IES 低碳转型研究主要包括以下几个方面: 技术革新、经济政策和全生命周期评估(涵盖设备生产、运行及回收阶段)。

在技术革新层面, 文献[9]利用碳捕集机组对 IES 的热电联产机组进行低碳改造, 文献[10]引入了碳捕集与电转气(power to gas, P2G)协同运行框架。通过引入碳捕集、氢能应用及 P2G 等先进技术, 可以显著增强 IES 的可再生能源整合与利用能力。

在经济维度上, 文献[11]借助碳交易机制与政策扶持, 通过碳交易市场激励 IES 节能减排, 确保了低碳转型的经济合理性和可行性。

尽管技术及经济层面的研究在 IES 低碳转型方面已取得初步成效, 但它们均未充分考虑可再生能源的波动性。同时, 这些研究在设备容量规划上缺乏针对性, 未能充分探索如何最大限度地消纳 IES 中的可再生能源并发挥其低碳优势。

在全生命周期评估方面, 文献[12]提出了一种以投资、运行、弃风成本总和最小为目标的 IES 容量规划方法。文献[13]综合考虑通货膨胀、名义利率等因素的影响, 构建了涵盖投资成本的目标函数。文献[14]采用生命周期评估法分析了不同能源链的碳排放, 建立了 IES 的低碳经济运行模式。文献[15]运用生命周期分析方法, 求得归一计量后的碳排放系数, 为 IES 低碳化建模以及碳排放计量提供了分析方法。然而, 上述研究中使用的全生命周期评价法主要侧重于单一成本或环境因素, 如文献[12-13]在 IES 全生命周期分析中未考虑设备生产回收过程中的碳排放, 而文献[14-15]则未统筹考量设备投资成本与碳排放。

在全面评估 IES 全生命周期的成本与碳排放之后, 为了进一步提升 IES 的运行效率与低碳效益, 可以引入多时间尺度优化方法。该方法允许 IES 在不同的时间尺度上进行优化调度, 从而更有效地应对能源需求的多样性和动态变化。文献[16]分析了 IES “日-季节-年度”碳排放特性, 建立了 IES 多时间尺度低碳经济调度方法。文献[17]构建了源荷协调的日前-日内-实时多阶段低碳经济调度模型。文献[18]提出了考虑多能灵活性的 IES 多时间尺度优化调度策略。尽管上述研究在能量优化时均已考虑可再生能源和负荷的波动性, 并将低碳目标纳入考量, 但它们尚未深入探索 IES 的低碳、零碳性, 同时也未充分评估 IES 的碳排放目标是否能有效应用于以长时间规划运行为周期的优化中。

综上所述, 现有研究较少同时考虑 IES 容量规划、全生命周期评估与多时间尺度优化调度。此外, 关于结合氢储能实现系统零碳排放的研究相对较少, 且对 IES 零碳特性的探索尚不够深入。因此, 本文提出一种全生命周期零碳 IES 容量规划和多时间尺度优化方法, 主要针对以电、热和冷负荷为主的 IES, 如典型社区、工业等 IES, 建立了由能源供给侧(天然气源及外部主电网)、能源转换设备(风机、光伏、燃气轮机、电锅炉、电冷机、吸收式制冷机、热泵、P2G 设备、太阳能集热器)、多元储能装置(电储能、热储能及氢储能)以及能源管理单元所构成的 IES 模型, 对上述问题展开研究。首先, 建立可再生能源与负荷不确定性描述方法, 并基于此提出了考虑全生命周期成本和碳排放的零碳 IES 容量规划方法。其次, 构建了 IES 规划周期内的零碳排放调度框架, 并以此引入日前随机优化方法, 以全生命周期零碳排放和最小化运维及购能成本为目标, 实现 IES 在运行周期内的最优能量调度。最后, 采用滚动优化方法, 结合超短期预测数据, 对日内能量调度计划进行调整。通过对比分析各类情形下的优化结果, 验证了所提策略的有效性。主要贡献如下所述。

1) 基于 IES 所在地区 5 年的完整可再生能源与负荷历史数据, 通过构建不确定性模型, 全面模拟了 IES 的可再生能源发电与负荷需求场景, 在此基础上结合随机优化算法, 提出了一种兼顾 IES 全年各季节的全生命周期零碳容量规划方法。

2) 在 IES 零碳容量规划及能量优化调度方法中, 提出了利用氢储能电解水过程产生的碱性溶液实现系统零碳排放的方案, 探索了氢储能在实现 IES 零碳排放过程中的特性。

3) 构建了 IES 规划周期内的零碳排放调度框架, 将系统在规划周期内的长时间尺度与基于短期预测的日前-日内短时间尺度相结合, 根据系统的 CO<sub>2</sub> 吸收情况动态调整能量调度计划, 以确保系统实现零碳排放目标, 并提升可再生能源的利用效率。

## 1 IES 结构

本文以新疆某地区的电热冷 IES 作为研究对象。在此基础上增加了 P2G、氢储能等设备, 构建了零碳 IES, 其结构如图 1 所示。该系统涉及多个能源转换和一次能量输入设备。具体而言, IES 的能源供给侧包含天然气源和主电网; 能源转化设备包含清洁能源场站(P2G 设备、风机和光伏)、燃气轮机、电锅炉、电冷机、吸收式制冷机、太阳能集热器和热泵; 能源存储设备包含电储能、热储能和氢储能; 需求侧主要满足电、热和冷负荷的需求。

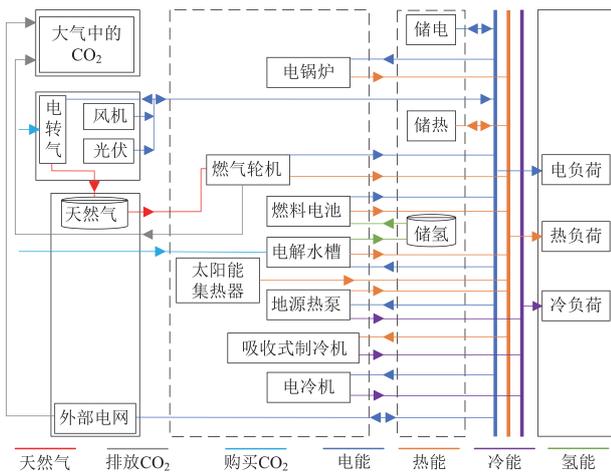


图 1 IES 结构  
Fig. 1 Structure of IES

为保证 IES 可靠性，通过能源管理中心对采集到的信息进行优化，并将调度结果传递给各设备。其中，清洁能源场站内的风机和光伏发电经能量管理系统计算后，一部分能量直接供给 P2G 设备，其余参与 IES 电能调度。P2G 设备用于吸收 IES 产生的全生命周期碳排放，并将其转换成甲烷供燃气轮机使用。正常运行时，IES 的电热冷负荷由主网以外的设备供能，当可再生能源波动且超出储能平衡范围时，IES 通过主网购买或出售电力以达到能量平衡<sup>[19]</sup>。当 IES 从主网购入电力时，这部分电力被视为源自燃煤发电，并且其发电过程中产生的碳排放也将被纳入 IES 的碳排放统计之中。在 IES 中，系统吸收的 CO<sub>2</sub> 与其全生命周期排放量相当，这些 CO<sub>2</sub> 均购自依赖可再生能源的直接空气捕集系统。同时，输入 P2G 设备用于合成甲烷的 CO<sub>2</sub> 原料若未被完全消耗，将直接进入封存处理环节。

氢储能吸收 CO<sub>2</sub> 的原理具体为：在电解水制氢过程中，水分子被分解为氢气和氧气，同时，阴极区域会产生富含氢氧根离子的碱性溶液。这一碱性环境具备高效吸收 CO<sub>2</sub> 的能力，使其转化为碳酸氢根离子。这个过程为氢储能系统提供了双重效益：既生产了绿色氢气，又减少了碳排放<sup>[20]</sup>。

零碳 IES 系统的建模及运行约束可参考文献 [15, 20-22]。

## 2 零碳 IES 容量规划方法和可再生能源及负荷不确定性描述

### 2.1 零碳 IES 容量规划方法

本文提出了一种考虑全生命周期的零碳 IES 容量规划方法。该方法旨在全面考虑设备从生产、运

行到最终退役，整个生命周期内的碳排放。设备容量规划方法如图 2 所示。

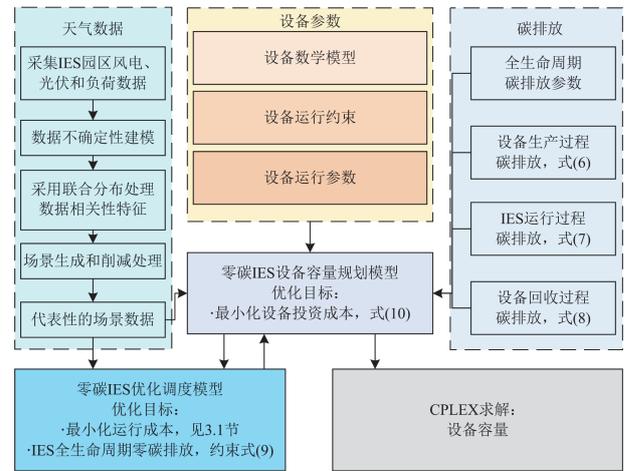


图 2 零碳 IES 容量规划方法

Fig. 2 Zero-carbon IES capacity planning strategy

在进行设备容量规划时，考虑到 IES 设备的使用寿命，选取 20 年为 IES 实现全生命周期零碳排放的一个完整调度周期，具体分析可见 4.1 节。针对风力、光伏发电和负荷需求的波动性，首先采集 IES 园区所处地理位置 5 年的典型风力、光伏发电和负荷数据，对这些数据进行重复以模拟 20 年的完整数据。这些数据不仅涵盖了日常和季节性的波动特征，还包含了风、光资源与负荷之间的相关性信息。

随后，对这些数据进行不确定性建模，采用多元联合分布方法捕捉和反映可再生能源与负荷需求之间的相关性，并描述可再生能源的波动性和负荷的变化。然后，选取高时间分辨率历史数据，使用蒙特卡洛方法模拟出风光资源的时序特性，并进行场景的生成和削减，以保证场景的代表性，并降低计算复杂度。

在此基础上，根据设备的全生命周期成本和碳排放系数，建立设备在 20 年规划周期内的投资成本和全生命周期各阶段碳排放模型，如 2.3 节所示。

最后，将削减得到的场景数据与零碳 IES 容量规划模型相结合，以 IES 在 20 年规划周期内零碳排放为约束，以 IES 投资成本最小为目标，通过零碳优化调度模型对容量规划模型进行反馈，求解各设备所需规划的容量。

规划和调度模型的协同优化机制具体如下。首先，能量优化调度模型向容量规划模型输出满足系统负荷需求及零碳排放约束的各设备运行功率可行域。其次，容量规划模型基于设备运行功率的可行域，以系统总投资成本最小化为目标函数，求解得到最优设备容量配置方案。然后，将所得容量配置

方案反馈至能量优化调度模型进行可行性验证。最终, 当能量优化调度模型在给定容量配置下能够实现稳定运行时, 输出该最优容量规划方案作为最终解。这一双向反馈优化机制确保了系统规划方案在满足运行约束的同时实现经济性最优。

## 2.2 可再生能源及负荷不确定性描述

可再生能源发电和负荷需求的预测误差通常服从平均值为 0、标准差为  $\delta$  的正态分布, 模型如式(1)所示。

$$w_v(t) \sim N(0, (\delta_v(t))^2) \quad (1)$$

式中:  $w_v(t)$  为不确定变量  $v$  在  $t$  时段的预测误差,  $v \in \{\text{PV}, \text{WT}, \text{Load}\}$ ;  $N$  为正态分布的标准数学符号;  $\delta_v(t)$  为不确定变量  $v$  在  $t$  时段的标准差。

使用累积分布的反函数可以得到预测误差的波动范围, 不确定变量的范围如式(2)所示。

$$P_r(\underline{w}_v(t) \leq w_v(t) \leq \overline{w}_v(t)) = \alpha \quad (2)$$

式中:  $P_r$  表示概率;  $\overline{w}_v$ 、 $\underline{w}_v$  分别表示不确定变量  $v$  的预测误差上、下限;  $\alpha$  表示置信水平。

建立可再生能源发电和负荷需求预测误差的多元联合正态分布, 并使用协方差矩阵以描述其相关性, 模型如式(3)所示。

$$\begin{pmatrix} w_{\text{PV}}(t) \\ w_{\text{WT}}(t) \\ w_{\text{Load}}(t) \end{pmatrix} \sim N \left( \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \boldsymbol{\varphi} \right) \quad (3)$$

式中:  $\boldsymbol{\varphi}$  表示可再生能源发电和负荷需求预测误差的协方差矩阵。

基于可再生能源发电和负荷需求预测误差的多元联合分布, 利用蒙特卡洛方法生成 200 个随机场景以模拟全年预测数据的误差<sup>[23-24]</sup>。生成场景的模型如式(4)所示。

$$P_{v,s}(t) = P_{v,f}(t)(1 + w_{v,s}(t)) \quad (4)$$

式中:  $P_{v,s}(t)$  表示考虑了预测误差的不确定变量  $v$  在场景  $s$  下  $t$  时段的功率;  $P_{v,f}(t)$  表示不确定变量  $v$  在场景  $s$  下  $t$  时段采集到的数据;  $w_{v,s}(t)$  表示不确定变量  $v$  在场景  $s$  下  $t$  时段的预测误差。

## 2.3 零碳 IES 容量规划模型

在 IES 容量规划阶段, 根据 IES 在 20 年规划周期内既能实现零碳排放, 又能最小化投资成本的目标, 确定每个设备的容量。这一目标综合考虑了设备规划投资成本、设备生产、运行和回收阶段的碳排放。数学模型如下所示。

1) 平均每年投资成本如式(5)所示。

$$C_{\text{CI}} = \sum_i (C_{\text{I},i} P_{i,\text{rated}} / y_i) \quad (5)$$

式中:  $C_{\text{CI}}$  为 IES 平均每年投资成本;  $C_{\text{I},i}$  为设备  $i$  的单位容量投资成本,  $i \in \{\text{燃气轮机}, \text{电锅炉}, \text{电冷机}, \text{吸收式制冷机}, \text{光伏}, \text{风电}, \text{P2G}, \text{太阳能集热器}, \text{热泵}, \text{电储能}, \text{热储能}, \text{氢储能}\}$ ;  $P_{i,\text{rated}}$  为设备  $i$  配置的容量, 单位为 kW;  $y_i$  为设备  $i$  的生命周期, 单位为年。

2) IES 设备在生产阶段的平均每年碳排放如式(6)所示。

$$E_{\text{PCE}} = \sum_i (E_{\text{CE},i} P_{i,\text{rated}} / y_i) \quad (6)$$

式中:  $E_{\text{PCE}}$  为 IES 平均每年碳排放;  $E_{\text{CE},i}$  为设备  $i$  在生产阶段的单位容量碳排放。

3) IES 设备在运行阶段平均每年排放或吸收的  $\text{CO}_2$  累加量如式(7)所示。

$$E_{\text{OCE}} = \sum_t^{t \times 365 \times 24} (E_g(P_{\text{in}}(t) - P_{\text{out}}(t)) - \xi_{\text{EL}} P_{\text{EL}}(t) + E_{\text{OE,CHP}} P_{\text{CHP}}(t) - \alpha_{\text{CO}_2} P_{\text{P2G}}(t)) \quad (7)$$

式中:  $E_{\text{OCE}}$  为 IES 运行过程的碳排放;  $E_g$  和  $E_{\text{OE,CHP}}$  分别为外部电网燃煤发电和燃气轮机的单位功率碳排放强度;  $P_{\text{in}}(t)$ 、 $P_{\text{out}}(t)$ 、 $P_{\text{EL}}(t)$ 、 $P_{\text{CHP}}(t)$  和  $P_{\text{P2G}}(t)$  分别为从外部电网购电、向外部电网售电、氢储能电解水槽、燃气轮机和 P2G 在  $t$  时段的功率;  $\xi_{\text{EL}}$  为电解水槽消耗单位电能制氢对应可吸收的  $\text{CO}_2$  量;  $\alpha_{\text{CO}_2}$  为 P2G 设备的  $\text{CO}_2$  转化效率。

4) IES 设备在回收阶段的平均每年碳排放如式(8)所示。

$$E_{\text{DC}} = \sum_i (E_{\text{D},i} P_{i,\text{rated}} / y_i) \quad (8)$$

式中:  $E_{\text{DC}}$  为 IES 在回收过程中平均每年碳排放;  $E_{\text{D},i}$  为设备  $i$  在回收阶段的单位容量碳排放。

IES 在 20 年规划周期内应实现零碳排放, 约束如式(9)所示。

$$(E_{\text{PCE}} + E_{\text{DC}} + E_{\text{OCE}}) y_d \leq 0 \quad (9)$$

式中:  $y_d$  为 IES 零碳排放的规划周期, 单位为年。

在 IES 容量规划阶段, 考虑设备运行约束, 求解如式(10)所示的目标函数  $F_{\text{rated}}$ , 得到设备  $i$  的容量。

$$\min F_{\text{rated}} = C_{\text{CI}} y_d \quad (10)$$

## 3 IES 零碳优化调度

### 3.1 IES 零碳排放调度框架

在 IES 能量优化调度阶段, 为了有效应对不确定性因素给零碳排放及能量优化带来的影响, 构建了 IES 零碳排放调度框架, 将 IES 在 20 年规划运行周期内的零碳排放调度与多时间尺度优化方法相结合。该框架的能量调度策略如图 3 所示。其中,  $y_{\text{day}}$  为 IES 运行的总天数;  $\Delta t$  为时间间隔, 在日前优化

和容量规划模型中  $\Delta t = 1 \text{ h}$ 。

首先，在 IES 的 20 年规划运行周期内，根据

2.3 节所构建模型，计算出系统需要吸收的、来自设备生产与回收阶段的碳排放量，记为  $E_{OD}$ ，单位为 kg。

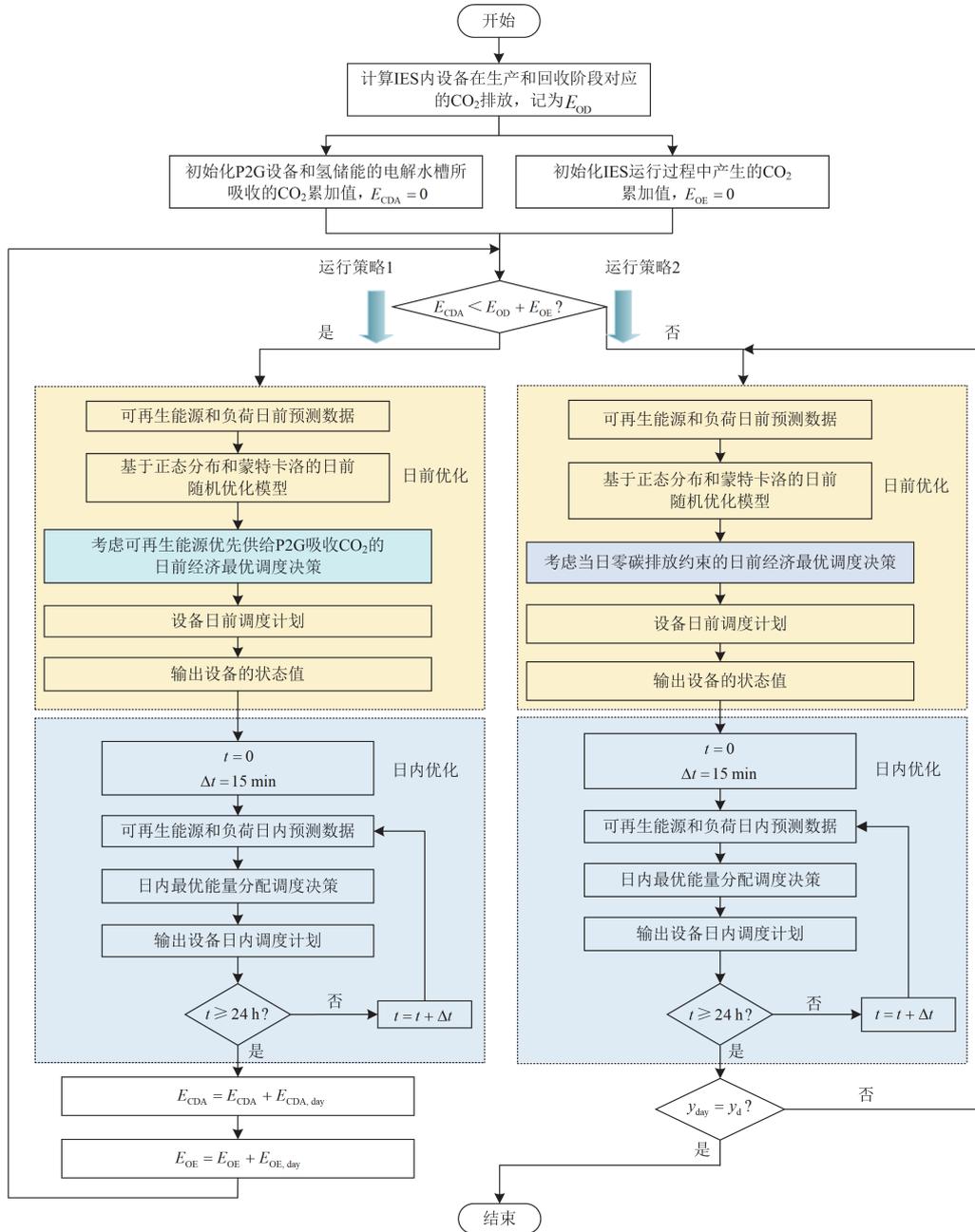


图 3 IES 零碳排放调度框架与多时间尺度优化调度策略

Fig. 3 IES zero-carbon emission scheduling framework and multi-time scale optimization scheduling strategy

其次，对 IES 中 P2G 设备和氢储能的电解水槽所吸收的  $\text{CO}_2$  累加值进行初始化，并记为  $E_{CDA}$ ，单位为 kg，同时对系统运行过程中产生的  $\text{CO}_2$  累加值进行初始化，并记为  $E_{OE}$ ，单位为 kg。

接着，在运行过程中，系统首先采用运行策略 1。在此策略下，IES 会将当日 P2G 设备和氢储能

的电解水槽所吸收的碳排放量  $E_{CDA,day}$  累加至  $E_{CDA}$ ，并同时设备当日运行过程中产生的碳排放  $E_{OE,day}$  累加至  $E_{OE}$ 。当  $E_{CDA} < E_{OD} + E_{OE}$  时，系统会优先将可再生能源发电供给 P2G 设备，此时，系统的首要优化目标是吸收碳排放，而运行成本则作为次要优化目标。

然后, 当  $E_{CDA} = E_{OD} + E_{OE}$  时, 系统会切换至运行策略 2。在此策略下, IES 将部分可再生能源发电供给 P2G 设备, 并通过调整氢储能的充放电行为, 确保系统满足当日的零碳排放约束。与此同时, 剩余的可再生能源发电则优先参与 IES 的电能调度。此时, 系统的首要优化目标转变为运行成本, 而吸收  $CO_2$  则成为次要优化目标。

最后, 当 IES 运行的总天数  $y_{day}$  等于系统零碳排放的规划周期  $y_d$  时, 完成对 IES 的零碳优化调度。

在优化调度过程中, 根据 IES 零碳排放调度框架所采用的运行策略, 运用多时间尺度滚动优化方法, 以天为单位对 IES 进行滚动优化, 并实时调整各设备出力, 以最小化调度偏差, 确保系统高效且稳定地运行, 并达成零碳排放目标。

本文提出的多时间尺度滚动优化策略包括日前随机最优调度阶段和日内滚动优化调度阶段, 其中 IES 日前-日内能量优化的调度周期为 24 h, 具体如下。

1) 日前阶段: 确定系统运行的最佳启停计划, 作为日内设备调度的基础。日前随机最优调度阶段的时间分辨率为 1 h, 调度周期为 24 h。

2) 日内阶段: 在不改变日前启停决策前提下实现日内最优功率分配, 减少日前预测误差对日内调度结果的影响。滚动优化以未来 6 h 为时间窗进行日内最优功率分配, 以减少预测误差的影响。该窗口每 15 min 向前滚动一次, 确保策略的实时性。滚动优化策略在日内运行期间共执行了 96 次<sup>[21]</sup>。在日内滚动优化中  $\Delta t = 15 \text{ min}$ 。

其中, 系统在运行策略 2 下的当日零碳排放约束如式(11)所示。

$$\sum_t \left( E_g(P_{in}(t) - P_{out}(t)) - \xi_{EL} P_{EL}(t) - \alpha_{CO_2} P_{P2G}(t) + E_{OE,CHP} P_{CHP}(t) \right) \leq 0 \quad (11)$$

式中:  $T$  为 IES 日前随机优化的调度周期, 为 24 h。

### 3.2 随机优化阶段数学模型

在日前随机优化调度阶段, 本文综合考虑能量平衡、分时电价和储能设备的运行特性, 以 24 h 能量优化调度周期内日运行成本最小化为目标进行调度决策。其中运行成本包括各个设备的运维成本、燃气轮机的启停成本、天然气购买成本和外部电网电力成本。

1) 当处于运行策略 1 且  $t$  时段  $P_{PV,s}(t) + P_{WT,s}(t) \geq P_{P2G,rated}$  时, 可再生能源发电会优先供给 P2G 设备用于吸收碳排放, 剩余的可再生能源发电则参与 IES 的电能调度。

当处于运行策略 1 且  $t$  时段可再生能源发电量

小于 P2G 设备规划的容量  $P_{P2G,rated}$  时, 可再生能源发电会全部供给 P2G 设备用于吸收  $CO_2$ , 无多余的可再生能源发电参与 IES 的电能调度。

2) 当处于运行策略 2 时, IES 在运行过程中需要额外满足当日零碳排放约束, 如式(11)所示。

在日前随机优化调度阶段, 考虑设备运行约束求解如式(12)所示的目标函数  $F_{ahead}$ 。

$$\min F_{ahead} = \sum_{t=1}^T (C_o(t) + C_e(t) + C_g(t) + C_n(t) + C_{CO_2}(t)) \quad (12)$$

式中:  $C_o(t)$ 、 $C_e(t)$ 、 $C_n(t)$ 、 $C_g(t)$  和  $C_{CO_2}(t)$  分别为  $t$  时段设备  $i$  的运维成本、燃气轮机的启停成本、天然气购买成本、外部电网电力成本和  $CO_2$  综合成本。燃气轮机在  $t$  时段的启停成本如式(13)所示。

$$C_e(t) = (C_{CHP,e} z_{CHP,SU}(t) + C_{CHP,e} z_{CHP,SD}(t)) \Delta t \quad (13)$$

式中:  $C_{CHP,e}$  表示燃气轮机的启停成本系数;  $z_{CHP,SU}(t)$  表示燃气轮机在  $t$  时段的启动变量;  $z_{CHP,SD}(t)$  表示燃气轮机在  $t$  时段的停机变量。其中,  $z_{CHP,SU}(t)$  和  $z_{CHP,SD}(t)$  的计算表达式如式(14)所示。

$$\begin{cases} z_{CHP,SU}(t) = 0.5(s_{CHP}(t) - s_{CHP}(t-1))^2 + \\ \quad 0.5(s_{CHP}(t) - s_{CHP}(t-1)) \\ z_{CHP,SD}(t) = 0.5(s_{CHP}(t-1) - s_{CHP}(t))^2 + \\ \quad 0.5(s_{CHP}(t-1) - s_{CHP}(t)) \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $s_{CHP}(t)$  表示燃气轮机在  $t$  时段的运行状态。

天然气在  $t$  时段的购买成本如式(15)所示。

$$C_n(t) = C_{gas} (V_{CHP}(t) - V_{P2G}(t)) \Delta t \quad (15)$$

式中:  $C_{gas}$  为天然气的成本系数;  $V_{CHP}(t)$  为燃气轮机在  $t$  时段消耗的天然气;  $V_{P2G}(t)$  为 P2G 设备在  $t$  时段生成的天然气。

外部电网在  $t$  时段的电力成本如式(16)所示。

$$C_g(t) = (C_{in}(t) P_{in}(t) - C_{out}(t) P_{out}(t)) \Delta t \quad (16)$$

式中:  $C_{in}(t)$ 、 $C_{out}(t)$  分别为  $t$  时段的购电和售电分时电价。

$CO_2$  在  $t$  时段的综合成本如式(17)所示。

$$C_{CO_2}(t) = C_Q (\xi_{EL} P_{EL}(t) + \alpha P_{P2G}(t)) + C_{CS} (\alpha(1-\eta) P_{P2G}(t)) \quad (17)$$

式中:  $C_Q$  和  $C_{CS}$  分别为购买和封存单位  $CO_2$  的成本系数;  $\eta$  为 P2G 的效率。

### 3.3 滚动优化阶段数学模型

在日内滚动优化调度阶段, 缩短预测周期为 6 h, 根据可再生能源的实际发电量和负荷需求的最新预测, 基于日前启停决策, 使用滚动优化策略实

现预测时域内的最优功率分配。

日内优化阶段的目标函数与日前相同，以运行成本最小化为目标，实现最优功率分配。当处于运行策略 1 时，IES 遵循 3.2 节所述策略进行可再生能源发电的调度，处于运行策略 2 时，系统的电平衡约束不变。

在日内滚动优化阶段，考虑设备运行约束求解如式(18)所示的目标函数  $C_{in}$ 。

$$\min C_{in} = \sum_t^{t+N_p} \left( C_o(t) + C_e(t) + C_g(t) + C_n(t) + C_{CO_2}(t) \right) \quad (18)$$

式中： $N_p$  为日内滚动优化调度的预测时间窗。

在滚动优化过程中，每次优化覆盖未来  $N_p + 1$  个时段(即  $t \sim t + N_p$ )，但仅实施当前  $t$  时段的最优决策。优化窗口随后向前滚动，以此类推。

## 4 算例分析

### 4.1 参数设置

本文使用图 1 所示的 IES 系统验证所提出的零碳设备容量规划方法和多时间尺度优化策略的有效性。其中，设备的运行技术参数参考文献[21-22]，考虑到大多数设备的生命周期为 20 年，本文选定 20 年为 IES 实现全生命周期零碳排放的一个完整调度周期<sup>[21]</sup>。设备各个环节的成本和碳排放系数参考文献[15, 21-22]。

研究过程中，综合考虑了 IES 电热冷负荷需求、天然气消耗和主网电价等关键因素，以零碳排放为目标，选取我国北方某地区进行研究。为了降低 IES 在日内调整阶段对电网的潜在影响，本文对日内调整阶段的电价进行设置，从主网买入的电价设定为日前电价的 2 倍，出售至主网的电价设定为日前的 0.5 倍<sup>[25]</sup>。其中日前阶段的主网电价参考我国北方某市的分时电价。为了模拟 IES 园区可再生能源出力和负荷需求的不确定性及相关性，基于采集到的 IES 园区可再生能源和负荷需求数据，采用多元联合分布结合蒙特卡洛方法构建了 200 个随机场景，用于表征其不确定性波动特性。在处理这些不确定性时，本文引用文献[26-27]中关于预测误差标准差的计算方法，以确保研究结果的准确性和可靠性。

在日前随机优化阶段，光电出力、风电出力和负荷需求的预测误差分别为预测值的 20%、25%和 10%。日内滚动优化阶段光电出力、风电出力和负荷需求的预测误差分别为预测值的 10%、10%和 5%。在进行 IES 能量优化调度时，基于日前可再生能源出力和负荷需求的预测值，经过不确定性处理后，得到了削减后的日前预测结果，将这些具有代

表性的场景数据作为 IES 的随机优化预测值。

### 4.2 零碳 IES 容量规划

为验证本文所提零碳 IES 容量优化方法的有效性，选取两种案例进行 IES 容量规划优化结果的对比分析。1) 案例 1：不配置氢储能，IES 仅使用电储能和热储能参与系统能量调度；2) 案例 2：在 IES 中配置氢储能，并利用其碱性溶液吸收系统全生命周期碳排放。其中案例 2 为本文所提案例。

根据本文所提的 IES 可再生能源出力和负荷需求的不确定性模拟结果，以 20 年为规划运行周期，通过图 2 所提的零碳 IES 容量规划方法，对以上两种案例进行了零碳设备容量规划的计算，两种案例的设备配置与碳排放结果分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 案例 1 设备配置与碳排放结果

Table 1 Equipment capacity configuration and carbon emission results for case 1

设备	配置	生产阶段 碳排放/t	回收阶段 碳排放/t
燃气轮机	384.33 kW	19.79	3.28
电锅炉	150.47 kW	7.03	1.13
吸收式制冷机	301.49 kW	15.2	2.45
电冷机	241.18 kW	11.27	1.8
电储能	312.5 kWh	33.13	10.94
热储能	250 kWh	7.83	1.39
氢储能	0 kWh	0	0
风机	2007.09 kW	1372.25	0.18
光伏	1301.68 kW	1431.85	0.03
P2G	1459.59 kW	1260.75	209.06
太阳能集热器	749.22 m <sup>2</sup>	820.4	3.75
热泵	601.37 kW	13.89	2.04

表 2 案例 2 设备配置与碳排放结果

Table 2 Equipment capacity configuration and carbon emission results for case 2

设备	配置	生产阶段 碳排放/t	回收阶段 碳排放/t
燃气轮机	351.26 kW	18.09	3
电锅炉	141.61 kW	6.61	1.06
吸收式制冷机	301.49 kW	15.2	2.45
电冷机	241.18 kW	11.27	1.8
电储能	62.5 kWh	6.63	2.19
热储能	250 kWh	7.83	1.39
氢储能	25 kWh	60.5	10
风机	1998.33 kW	1366.26	0.18
光伏	1301.68 kW	1431.85	0.03
P2G	1445 kW	1248.15	206.97
太阳能集热器	725.12 m <sup>2</sup>	794.01	3.63
热泵	632.38 kW	14.61	2.14

通过对比表 1 和表 2 的数据可知,在案例 2 中,由于额外配备了氢储能,IES 的储能种类增加,提高了系统的灵活性,使得系统在规划设备(如燃气轮机、电锅炉、风机及太阳能集热器)时,其总容量相对于案例 1 有所降低。案例 2 的规划结果使设备在生产及回收阶段产生的碳排放总量相对于案例 1 降低了约 13.6 t,即 0.26%,表明了本文提出的零碳 IES 容量规划方法在系统设备生产制造阶段降低碳排放的有效性。同时,在案例 2 中,由于氢储能在运行过程中产生的碱性溶液可以吸收系统的全生命周期碳排放,提升了系统吸收 CO<sub>2</sub> 的灵活性,且进一步减少了 P2G 设备在 20 年运行周期内需要吸收的 CO<sub>2</sub> 量,因此,相对于案例 1,案例 2 中的 P2G 设备规划的容量也有所减少。

#### 4.3 零碳 IES 日前随机优化

在系统日前运行阶段,引入两种案例下零碳 IES 容量规划的结果,并结合可再生能源及负荷在日前预测的典型案例,进行了 20 年的运行模拟,得到系统日前随机优化阶段的平均年度成本如表 3 所示。

表 3 日前运行阶段不同案例的平均年度成本

Table 3 Average annual cost of different cases in the day-ahead operation stage

案例	元			
	投资成本	运维成本	购能成本	总成本
1	1 858 132.68	4 284 113.31	336 999.30	6 479 245.29
2	1 870 821.37	4 094 571.73	317 109.99	6 282 503.2

由表 3 可知,在设备容量规划阶段,案例 2 的投资成本略高于案例 1。这是由于案例 2 中配备了氢储能系统,且其投资成本较高所导致的,具体如表 4 所示,常规设备即 IES 中除氢储能外的所有设备。尽管初始投资成本较高,但由于案例 2 引入了氢储能系统,IES 运行的灵活性有所提升,虽然氢储能系统会产生额外的运维成本,但从系统规划运行的 20 年长期效益看,IES 的运维和购能总成本仍低于案例 1,使得案例 2 平均每年的总成本要比案例 1 低 196 742.09 元,即 3%。因此,本文所提出的零碳 IES 容量规划方法具有更好的经济性。

表 4 日前运行阶段不同案例的投资及运维平均年度成本

Table 4 Average annual investment and operational costs for different cases in the day-ahead operation stage

案例	元			
	氢储能系统 投资成本	常规设备 投资总成本	氢储能系统 运维成本	常规设备运 营总成本
1	—	4 284 113.31	—	647 9245.29
2	44 550	4 050 021.73	2543.11	627 9960.09

日前运行阶段在两种案例下,系统各设备的平均年度碳排放和吸收结果如表 5 所示。

表 5 不同案例的平均年度碳排放和吸收结果

Table 5 Average annual carbon emission and absorption results for different cases

案例	生产及回收 阶段 CO <sub>2</sub> /t	运行阶段 CO <sub>2</sub> /t			
		电网	燃气轮机	P2G	碱性溶液
1	236.21	9.34	590.4	-835.97	—
2	235.76	0.4	555.79	-787.17	-4.79

由表 5 可知,案例 2 在生产、回收以及运行阶段,由电网和燃气轮机产生的 CO<sub>2</sub> 均低于案例 1,这表明本文所提出的零碳 IES 容量规划方法在实现系统全生命周期零碳排放方面具有显著优势。此外,氢储能在运行过程中通过碱性溶液实现的碳吸收量,约占系统全生命周期碳排放总量的 0.6%,这表明其在降低系统净碳排放方面具有良好潜力。

以案例 2 为例,对 IES 日前优化阶段各设备的能量调度情况进行分析。IES 在不同季节典型时段的电能、热能、冷能优化结果分别如图 4、图 5 和图 6 所示。

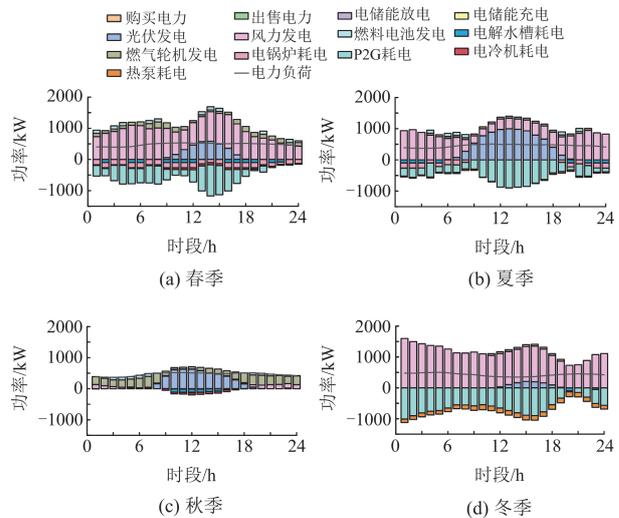
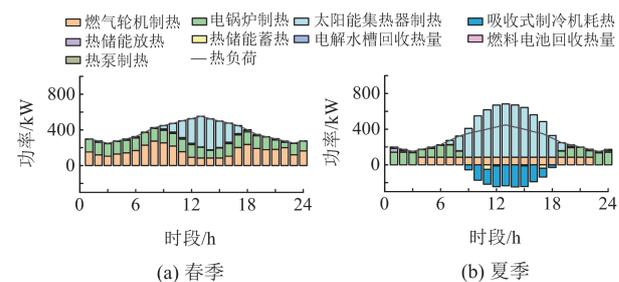


图 4 IES 电能优化结果

Fig. 4 IES electric energy optimization results



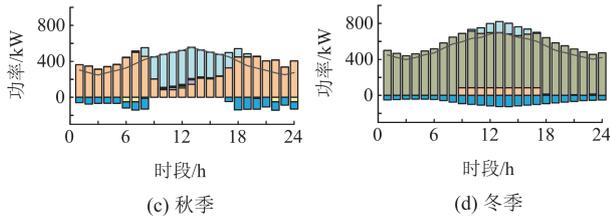


图 5 IES 热能优化结果

Fig. 5 IES thermal energy optimization results

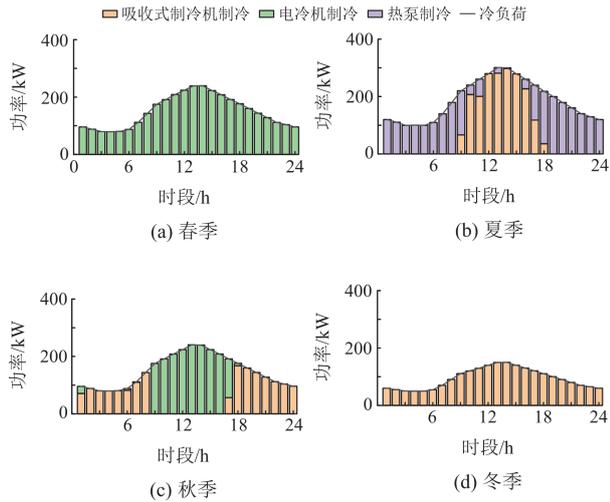


图 6 IES 冷能优化结果

Fig. 6 IES cold energy optimization results

由图 4—图 6 可知，本文所提出的 IES 日前随机优化方法能够在最小化运维和购能成本的同时实现不同能源设备之间的协调最优调度，并实现零碳排放。

在 IES 中，氢储能因其响应较慢，在 IES 调度中主要承担长时间尺度调节功能，通常在日前 1 h 时间尺度的调度中承担主要的调峰功能，如图 4 所示。而日内调度由于时间尺度短，调峰功能主要由能快速响应的电储能承担。关于 IES 日内电能优化调度的结果，可参考图 7。

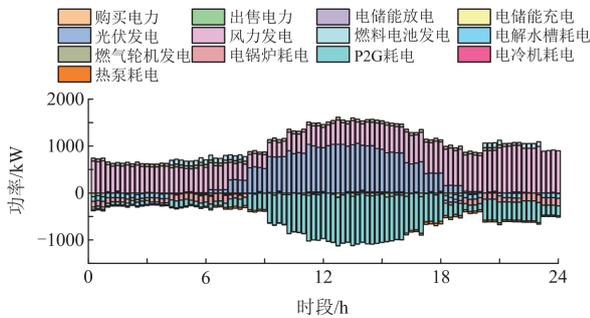


图 7 IES 日内电能优化结果

Fig. 7 IES intraday electric energy optimization results

#### 4.4 零碳 IES 日内滚动优化

日前优化基于提前 24 h 的预测，其周期较长，导致预测误差较大。为提升调度精度并确保 IES 的稳定运行，在日内阶段转而利用超短期预测数据，并采用滚动优化方法对日前计划进行实时修正，以减小预测误差对能量调度的影响。为了研究所提出的多时间尺度优化方法能否有效应对可再生能源和负荷需求随机性强的特点，并保证 IES 在日内实现最优能量分配和稳定运行，基于案例 2 运行 20 年所得出的日前阶段调度方案，结合日内超短期预测数据，进行日内滚动优化，运行得到的日内滚动优化阶段典型电能调度计划如图 7 所示。

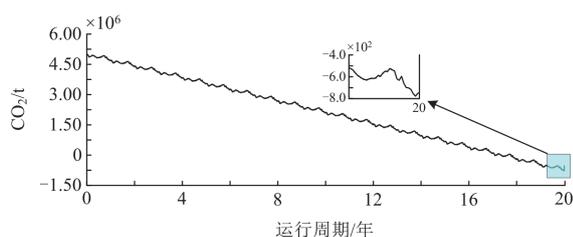
由图 7 可知，IES 在日内的能量调度计划遵循了日前能量调度的结果，并未出现显著偏差。面对可再生能源和负荷需求的波动性，当日前制定的能量调度计划无法满足日内实际需求时，IES 会优先使用电储能设备，在可再生能源富余时储存能量，在负荷需求增加或可再生能源供应不足时释放能量，从而有效地平衡供需差异，发挥重要的调峰作用；当可再生能源和负荷的波动超过电储能调节能力时，IES 可以通过电网购买或出售电力，确保系统在日内能量调度时保持稳定运行。表 6 展示了案例 2 在 20 年规划运行周期内，基于日前调度并经过日内滚动优化后，所获得的系统在日内运行阶段的平均年度结果。尽管可再生能源与负荷需求存在波动，但本文所提的能量优化策略依然实现了零碳排放与稳定运行。综上所述，本文所提的多时间尺度优化策略有效应对了可再生能源和负荷的波动性，确保 IES 零碳且稳定运行。图 8 展示了 IES 运行周期内的全生命周期 CO<sub>2</sub> 吸收情况。

由表 6 和图 8 可知，在系统 20 年的运行周期中，由于设备初始生产制造阶段会产生大量 CO<sub>2</sub>，因此系统的全生命周期碳排在 20 年规划运行周期初期达到峰值。在运行阶段，尽管燃气轮机和外部电网燃煤发电等设备在运行时仍会产生 CO<sub>2</sub>，但 P2G 和氢储能等设备在运行时能利用可再生能源吸收更

表 6 IES 日内运行阶段平均年度成本及碳排放和吸收结果

Table 6 Average annual cost, carbon emissions, and absorption results of IES in the intraday operation stage

系统运行结果	数值	系统运行结果	数值
运维成本/元	4 382 233.9	购能成本/元	317 889.6
电网买电碳排放/t	16.2	电网卖电碳排放/t	-41.93
P2G 吸收 CO <sub>2</sub> /t	-787.17	燃气轮机碳排放/t	556.03
碱性溶液吸收 CO <sub>2</sub> /t	-4.79	生产及回收阶段碳排放/t	235.76
平均每年碳排放/t	-25.9	—	—

图8 IES运行周期内的全生命周期CO<sub>2</sub>吸收情况Fig. 8 Full life cycle CO<sub>2</sub> absorption during the IES operating cycle

多的CO<sub>2</sub>,使得系统的总CO<sub>2</sub>量呈下降趋势。大约在第19年,系统实现了零碳排放,在第20年的时候达到了负碳排放量,然而,由于系统内设备在运行20年后要经历回收阶段,设备在回收阶段也会产生一定的CO<sub>2</sub>,因此系统的CO<sub>2</sub>量在20年后会出现小幅上升,最终CO<sub>2</sub>量为-518 t。这一结果充分证明了本文提出的零碳设备容量规划方法和多时间尺度优化策略在应对可再生能源和负荷波动、实现零碳排放方面的有效性。

#### 4.5 零碳 IES 环境能源影响

为验证本文所提的零碳设备容量优化方法对环境和能源领域的贡献,设置了案例3。案例3与案例1的设备配置方法相似,但关键区别在于不配备P2G设备。因此,案例3既无法吸收CO<sub>2</sub>,也无法将CO<sub>2</sub>转换成天然气以供系统内的燃气轮机使用。为了实现IES零碳排放的目标,案例3通过碳交易市场购买碳排放额度,以此作为碳抵消的方式,实现零碳排放。

经过图2所提的零碳IES容量规划方法对案例3进行容量优化配置,随后,基于这些配置结果,通过本文所提的多时间尺度优化方法对能量进行优化调度。在此过程中,案例2与案例3在春季某天的天然气消耗与交易量的对比情况如图9所示。案例2与案例3在系统运行满20年后的年度平均结果如表7所示。

由图9可知,案例3在运行期间,由于缺少将

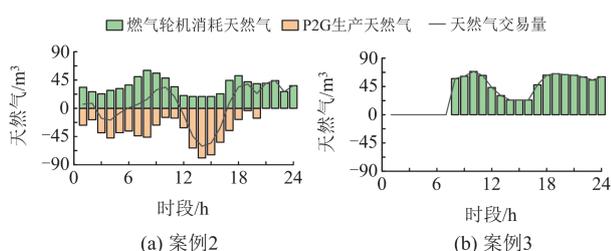


图9 IES天然气消耗与交易结果

Fig. 9 IES gas consumption and transaction results

表7 不同案例的平均年度环境和能源结果

Table 7 Average annual environmental and energy results of different cases

案例	碳排放量/t	天然气购买量/m <sup>3</sup>
2	0	82 659
3	1535	266 832

CO<sub>2</sub>转换成天然气以供燃气轮机使用的P2G设备,系统所需的天然气均需通过外部购买。相比之下,案例2的系统具备P2G设备,能够在一定程度上自给自足天然气。具体而言,当燃气轮机在 $t$ 时段消耗的天然气量超过P2G设备当前生成量 $V_{P2G}(t)$ 时,系统会额外购买天然气以满足需求;反之,若燃气轮机消耗的天然气少于P2G设备生成量,系统则可将多余的天然气出售给外部。通过这种天然气消耗与生成的相互抵消机制,案例2的IES能够显著减少一次能源的消耗。

由表7可知,尽管案例3通过碳交易的方式实现了所谓的“零碳排放”,但在运行期间平均每年实际排放了1535 t的CO<sub>2</sub>,本文采用的案例2是真正意义上的零碳排放,对环境产生了积极的影响,且案例2平均每年的天然气购买量相对于案例3减少了约69%,有效减少了一次能源消耗。综上所述,本文所提的设备容量优化方法可以对环境和能源做出巨大贡献。

## 5 结论

本文针对包含电热冷负荷需求的IES,提出了基于全生命周期成本与碳排放评估的零碳IES容量规划和多时间尺度优化方法。通过构建并模拟多种案例,本文重点围绕氢储能配置的作用、系统应对不确定性的能力、零碳排放目标的实现路径以及一次能源节约的环境影响进行了深入分析,得出以下主要结论。

1) 相对于在零碳IES中配置电储能和热储能,在零碳IES中配置氢储能在实现零碳排放和经济性方面更有优越性。在配置氢储能的情况下,IES在20年运行周期内,其平均每年总成本可降低约3%,并且氢储能在运行过程中产生的碱性溶液吸收了系统约0.6%的总碳排放,显示了其在降低IES碳排放方面的巨大潜力。

2) 所提出的零碳IES容量规划和多时间尺度优化方法能够有效应对可再生能源及负荷的不确定性,实现难以消纳的可再生能源高效利用。该方法在IES容量规划阶段即对不确定性问题进行了充分考虑,因此,即便面临可再生能源和负荷的波动,IES依然能够在每日24 h的运行周期内实现成本最

优的能量调度，同时确保全生命周期零碳排放目标的实现。

3) 传统的研究多依赖于碳交易机制来实现 IES 的零碳排放目标，而本文则通过 P2G 设备及氢储能的应用实现了 IES 全生命周期的零碳排放。采用本文所提的方法，天然气的购买量减少了约 69%，这不仅对环境产生了积极的影响，也对能源领域做出了重要贡献。

后续研究可考虑更大规模的 IES，探索多个 IES 园区之间的能量共享机制，并分析氢能源汽车和电动汽车接入 IES 的影响。

### 参考文献

- [1] 张显, 王彩霞, 谢开, 等. “双碳”目标下中国绿色电力市场建设关键问题[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(4): 25-33. ZHANG Xian, WANG Caixia, XIE Kai, et al. Key issues of green electricity market construction in China under goals of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(4): 25-33.
- [2] 张安安, 周奇, 李茜, 等. “双碳”目标下火电厂CO<sub>2</sub>计量技术研究现状与展望[J]. 发电技术, 2024, 45(1): 51-61. ZHANG An'an, ZHOU Qi, LI Qian, et al. Research status and prospect of CO<sub>2</sub> accounting technology in thermal power plants under the goal of dual carbon[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(1): 51-61.
- [3] 李剑峰, 姜涛, 窦文雷, 等. 电-热-氢综合能源系统鲁棒区间优化调度[J]. 电力工程技术, 2024, 43(2): 44-54. LI Jianfeng, JIANG Tao, DOU Wenlei, et al. Robust interval optimal dispatch of integrated electricity and district heating system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(2): 44-54.
- [4] 赵琛, 叶金池, 和萍, 等. 考虑源荷多重不确定性的园区综合能源系统优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(4): 148-164. ZHAO Chen, YE Jinchi, HE Ping, et al. A PIES optimization strategy considering multiple uncertainties in source and load[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(4): 148-164.
- [5] 刘珊珊, 李柯睿, 刘柏康, 等. 绿证-碳联合机制下含多类型需求响应和氢能多元利用的综合能源系统优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(5): 203-215, 225. LIU Shanshan, LI Kerui, LIU Baikang, et al. Optimal dispatching of integrated energy systems with diverse demand response and multifaceted hydrogen utilization under green certificate-carbon joint mechanism[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 203-215, 225.
- [6] 刘天蔚, 边晓燕, 吴珊, 等. 电力系统碳排放核算综述与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 176-187. LIU Tianwei, BIAN Xiaoyan, WU Shan, et al. Overview and prospect of carbon emission accounting in electric power systems[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 176-187.
- [7] 负保记, 赵文, 王建学, 等. 低碳矿区综合能源系统经济运行优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6): 177-187. YUN Baoji, ZHAO Wen, WANG Jianxue, et al. Economic operation optimization of an integrated energy system in low carbon mining area[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 177-187.
- [8] 李红伟, 吴佳航, 王佳怡, 等. 计及P2G及碳捕集的风光氢储综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(16): 26-36. LI Hongwei, WU Jiahang, WANG Jiayi, et al. Low-carbon economic dispatch of a wind, solar, and hydrogen storage integrated energy system considering P2G and carbon capture[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(16): 26-36.
- [9] 刘星磊, 刘俊, 杨崧, 等. 考虑多功能区低碳改造与氢能多模式利用低碳特性的综合能源系统不确定性协同规划方法[J]. 电网技术, 2025, 49(1): 1-11. LIU Xinglei, LIU Jun, YANG Yin, et al. Uncertainty planning method of integrated energy system with multi-functional areas considering low-carbon retrofit and multi-mode utilization of hydrogen[J]. Power System Technology, 2025, 49(1): 1-11.
- [10] 郭静蓉, 向月, 吴佳婕, 等. 考虑CCUS电转气技术及碳市场风险的电-气综合能源系统低碳调度[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1290-1303. GUO Jingrong, XIANG Yue, WU Jiajie, et al. Low-carbon optimal scheduling of integrated electricity-gas energy systems considering CCUS-P2G technology and risk of carbon market[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1290-1303.
- [11] 张玉敏, 李竞锐, 吉兴全, 等. 考虑电-碳市场决策协同的园区综合能源系统双层博弈调度[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(12): 45-59. ZHANG Yumin, LI Jingrui, JI Xingquan, et al. Bi-level game dispatch of park integrated energy system considering decision-making synergy of electricity-carbon markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(12): 45-59.
- [12] 葛怀宇, 贾燕冰, 韩肖清. 考虑季节互补特性的电-气综合能源系统容量规划[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 147-158. GE Huaiyu, JIA Yanbing, HAN Xiaqing. Capacity planning of integrated electricity-gas energy systems

- considering seasonal complementarity[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 147-158.
- [13] 邹磊, 汪超群, 杜先波, 等. 计及管网选型与潮流约束的区域综合能源系统分期协同规划[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(11): 3765-3780.  
ZOU Lei, WANG Chaoqun, DU Xianbo, et al. Staged collaborative planning of regional integrated energy system considering thermoelectric pipe selection and power flow constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(11): 3765-3780.
- [14] WANG Rutian, WEN Xiangyun, WANG Xiuyun, et al. Low carbon optimal operation of integrated energy system based on carbon capture technology, LCA carbon emissions and ladder-type carbon trading[J]. Applied Energy, 2022, 311.
- [15] 王泽森, 石岩, 唐艳梅, 等. 考虑LCA能源链与碳交易机制的综合能源系统低碳经济运行及能效分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1614-1626.  
WANG Zesen, SHI Yan, TANG Yanmei, et al. Low carbon economy operation and energy efficiency analysis of integrated energy systems considering lca energy chain and carbon trading mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1614-1626.
- [16] 颜宁, 马广超, 李相俊, 等. 基于季节性碳交易机制的园区综合能源系统低碳经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(3): 918-931.  
YAN Ning, MA Guangchao, LI Xiangjun, et al. Low-carbon economic dispatch of park integrated energy system based on seasonal carbon trading mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(3): 918-931.
- [17] 崔杨, 邓贵波, 曾鹏, 等. 计及碳捕集电厂低碳特性的含风电电力系统源-荷多时间尺度调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(16): 5869-5886.  
CUI Yang, DENG Guibo, ZENG Peng, et al. Multi-time scale source-load dispatch method of power system with wind power considering low-carbon characteristics of carbon capture power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 5869-5886.
- [18] 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.
- [19] 贾东强. 计及不确定性的微电网多时间尺度能量管理策略研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2022.
- [20] LIU Shengchun, SONG Liying, WANG Tieying, et al. Negative carbon optimal scheduling of integrated energy system using a non-dominant sorting genetic algorithm[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 291.
- [21] ZHAO Naixin, GU Wenbo. Low-carbon planning and optimization of the integrated energy system considering lifetime carbon emissions[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 82.
- [22] ZHANG Yan, MENG Fanlin, WANG Rui, et al. Uncertainty-resistant stochastic MPC approach for optimal operation of CHP microgrid[J]. Energy, 2019, 179: 1265-1278.
- [23] ZHOU Yixing, MIN Chunhua, WANG Kun, et al. Optimization of integrated energy systems considering seasonal thermal energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 71.
- [24] 马燕峰, 骆泽榕, 赵书强, 等. 基于改进蒙特卡洛混合抽样的含风光电力系统风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 75-83.  
MA Yanfeng, LUO Zerong, ZHAO Shuqiang, et al. Risk assessment of a power system containing wind power and photovoltaic based on improved Monte Carlo mixed sampling[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 75-83.
- [25] CHENG Zhiping, JIA Dongqiang, LI Zhongwen, et al. Multi time scale energy management for microgrid using expected scenario oriented stochastic optimization[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2022, 30.
- [26] WANG Yongli, WANG Huan, MENG Xiao, et al. Considering the dual endogenous-exogenous uncertainty integrated energy multiple load short-term forecast[J]. Energy, 2023, 285.
- [27] TANG Zao, LIU Jia, NI Jielong, et al. Power prediction of wind farm considering the wake effect and its boundary layer compensation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(6): 19-29.

收稿日期: 2025-03-25; 修回日期: 2025-07-29

作者简介:

程志平(1974—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为微电网协调控制、电机系统驱动与控制; E-mail: zpcheng@zzu.edu.cn

穆玉皓(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统能量优化调度; E-mail: 1870410997@qq.com

李忠文(1989—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 河南省优青, 研究方向为新型电力系统、微电网、电力电子、新能源并网发电和分布式控制。E-mail: lzw@zzu.edu.cn

(编辑 张颖)