

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241210

考虑热储扩展碳排放流的多园区综合能源系统低碳经济调度

张 姝, 江洪辉, 臧天磊, 肖先勇

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 针对综合能源系统(integrated energy system, IES)中热储元件碳排放流刻画不精确以及多园区供需两侧的灵活性提升问题, 提出了一种考虑热储扩展碳排放流的多园区综合能源系统低碳经济调度方法。首先, 基于热储元件热耗散效应建立了热储扩展碳排放流模型。其次, 构建了多园区综合能源系统供需双响应低碳模型, 在园区供应侧考虑有机朗肯循环(organic Rankine cycle, ORC)实现热电联产(combined heat and power, CHP)机组热、电灵活输出响应, 需求侧考虑电、热、气负荷的可转移性与可替代性。最后, 形成了以上层电-气网络调度成本最低, 下层能量枢纽(energy hub, EH)的购能、碳交易、需求侧响应综合成本最小为目标的双层低碳经济调度策略。通过设置多个场景进行仿真分析, 结果显示该低碳经济调度策略使多园区综合能源系统的总运行成本降低了 3.51%, 碳排放量减少了 8.72%。

关键词: 多园区综合能源系统; 热储碳排放流模型; 有机朗肯循环; 供需灵活; 需求响应; 低碳经济调度

Low-carbon economic dispatch of multi-park integrated energy systems considering augmented carbon emission flow of thermal storage

ZHANG Shu, JIANG Honghui, ZANG Tianlei, XIAO Xianyong

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: To address the inaccurate characterization of thermal storage carbon emission flow in integrated energy systems (IES) and to enhance the flexibility of both supply and demand sides across multiple energy parks, this paper proposes a low-carbon economic dispatch method for multi-park IES, which considers the augmented carbon emission flow of thermal storage. First, based on the heat dissipation effect of thermal storage, an augmented carbon emission flow of thermal storage is established. Second, on the supply side, the organic Rankine cycle (ORC) is used to achieve flexible thermal and electrical output from combined heat and power (CHP) units, while on the demand side, the transferability and substitutability of electricity, heat, and gas loads are considered, to construct a dual-response low-carbon model of multi-park IES. Finally, a bi-level low-carbon economic dispatch strategy is formulated, aiming to minimize the upper-level electricity-gas network scheduling cost and the lower-level energy hub cost, which includes energy procurement, carbon trading, and demand-side response. Through scenario-based simulation analysis, the results demonstrate that the low-carbon economic dispatch strategy reduces the total operational cost of the multi-park IES by 3.51% and carbon emissions by 8.72%.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U2166209, No. 52007126 and No. 52377115).

Key words: multi-park integrated energy system; thermal storage carbon emission flow model; organic Rankine cycle; supply-demand flexibility; demand response; low-carbon economic dispatch

0 引言

综合能源系统(integrated energy system, IES)将电力、燃气、供热等多种能源环节有机结合, 通过

系统内多种能源之间的协调优化, 可以实现综合能源系统的低碳高效经济运行^[1-2]。文献[3]提出了一种基于一致性的综合能源系统低碳经济调度方法, 利用阶梯式碳交易机制和领导一致性算法对系统进行分布式调度。文献[4]提出了一种计及温控厌氧发酵和阶梯碳交易的农村综合能源低碳经济调度模型, 分析了碳交易基价和价格增长率对农村用能成本和

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U2166209, 52007126, 52377115); 四川省自然科学基金项目资助(2024NSFC0864)

碳排放的影响。但是,要实现综合能源的低碳经济调度,一方面需要提高系统多能互补特性,另一方面需要利用碳交易机制^[5-10]和需求响应机制,激活与释放系统原有的灵活性^[11]。

在低碳经济运行模型中,碳排放量是优化的重要评价指标之一。园区综合能源系统作为用能的终端,文献[12]认为对碳排放量的计量不应只针对源侧,而应当以“碳视角”审视整个能源流动过程,将碳排放责任通过“碳排放流”(carbon emission flow, CEF)模型分摊至负荷侧。文献[13]将电力系统碳排放流扩展到了综合能源系统,提出了包括电、气、热网与能量转换装置的碳排放流模型。但是,上述文献中并没有考虑储能元件的碳排放流模型,导致负荷侧碳排放计量忽略了储能所依附的碳排放量,造成储能元件释放能量时负荷侧碳排放量“虚低”,而存储能量时负荷侧碳排放量“虚高”的现象。文献[14]提出了电储能“荷碳率”(carbon-to-charge ratio, CTCR)的概念,建立了含电储的碳排放流模型。然而,在园区综合能源系统中,热储实现了热能供给在时间上的转移,提高了系统的经济性和低碳性,因此被广泛应用于综合能源系统中。热储元件与电储元件的储能介质不同,两者的工作特性也存在差异。文献[15]提出了背压式和抽凝式热电联产(combined heat and power, CHP)机组和储热罐的碳排放流模型,该储热罐碳排放流模型忽略了热耗散对碳流计算的影响,将会导致其碳流计算结果存在一定误差。因此,有必要进一步研究含热储元件的扩展碳排放流模型,利用园区综合能源系统碳排放信息的精确计量引导用户侧的用能行为,提升园区用能的减碳潜力。

随着园区综合能源系统用户的不断扩大,利用需求侧资源减排也成为重点^[16-17]。需求侧响应(demand response, DR)作为 IES 的灵活调控手段,利用多元负荷的综合 DR 能够进一步提升 IES 的灵活协调能力。文献[18]将需求响应作为微电网优化调度的重要手段,但仅考虑了电、气、热负荷在各自时间维度的灵活转移,忽视了多元负荷之间的可替代性。在多能供应侧的 CHP 机组可以通过调整运行工况,灵活地调节热、电功率的输出。文献[19]提出了一种考虑供需灵活双响应的 IES 优化运行策略,供应侧引入有机朗肯循环(organic Rankine cycle, ORC)实现了热电联产机组热、电输出的灵活响应。文献[20]考虑可再生能源的不确定性,提出了考虑供需双侧响应和碳交易的综合能源系统鲁棒调度模型。文献[21]考虑碳排放流和多元供需双响应机制,提出了包括燃气轮机、余热锅炉和有机朗

肯循环等零散的碳流模型。然而含有机朗肯循环的 CHP 机组是一个整体,需要提出一种考虑燃气轮机、余热锅炉和有机朗肯循环组合后的碳流模型,以便对该模型统一分析。因此,需要进一步研究含有机朗肯循环的 CHP 碳排放流模型以及在多园区场景下的低碳经济调度策略。综上所述,本文主要工作如下所述。

1) 构建了热储元件的扩展碳排放流模型。该模型计及了热储元件的热耗散影响,能够精确刻画热储内部“荷碳率”。

2) 提出了含有机朗肯循环的 CHP 碳排放流模型,实现了园区供应侧 CHP 多能转化过程的碳排放流计算。

3) 提出了考虑扩展碳排放流与供需灵活双响应的多园区 IES 双层优化调度模型,提升了多园区综合能源系统的低碳经济性。

1 含热储的综合能源系统扩展碳排放流模型

1.1 多园区综合能源系统框架

多园区综合能源系统框架如图 1 所示。上层系统由配电网和气网组成;下层系统由多个园区综合能源系统组成。本文园区综合能源系统通过能量枢纽的方式进行建模^[22]。能量枢纽内部元件主要考虑 CHP、热泵(heat pump, HP)、燃气锅炉(gas boiler, GB)、电转气设备(power to gas, P2G)、光伏、电储和热储等。其中,CHP 内部由燃气轮机(gas turbine, GT)、余热锅炉(waste heat boiler, WHB)、有机朗肯循环组成;能量枢纽(energy hub, EH)的输入端由电能和天然气两种能源形式组成,输出端由电负荷、气负荷和热负荷组成。

1.2 能量转换设备的碳排放流模型

能量转换设备的碳排放流模型构建需要对内部各个设备的 CEF 进行建模^[23]。能量转换设备分为单输入-单输出设备和单输入-多输出设备^[13]。

1.2.1 单输入-单输出设备碳排放流模型

对于单输入-单输出设备,如图 1 所示的电转气设备、燃气锅炉和热泵,碳排放流模型可以表示为

$$\rho_{i,t}^{\text{out}} = \frac{\rho_{i,t}^{\text{in}}}{\eta_i} \quad (1)$$

式中: $\rho_{i,t}^{\text{in}}$ 和 $\rho_{i,t}^{\text{out}}$ 分别为设备 i 在 t 时刻输入端和输出端的碳排密度(port carbon intensity, PCI); η_i 为设备 i 的转换效率。

1.2.2 含有机朗肯循环的 CHP 碳排放流模型

对于单输入-多输出设备,如图 1 中 CHP 装置,其内部由多个转换装置共同构成。以往的单输入-

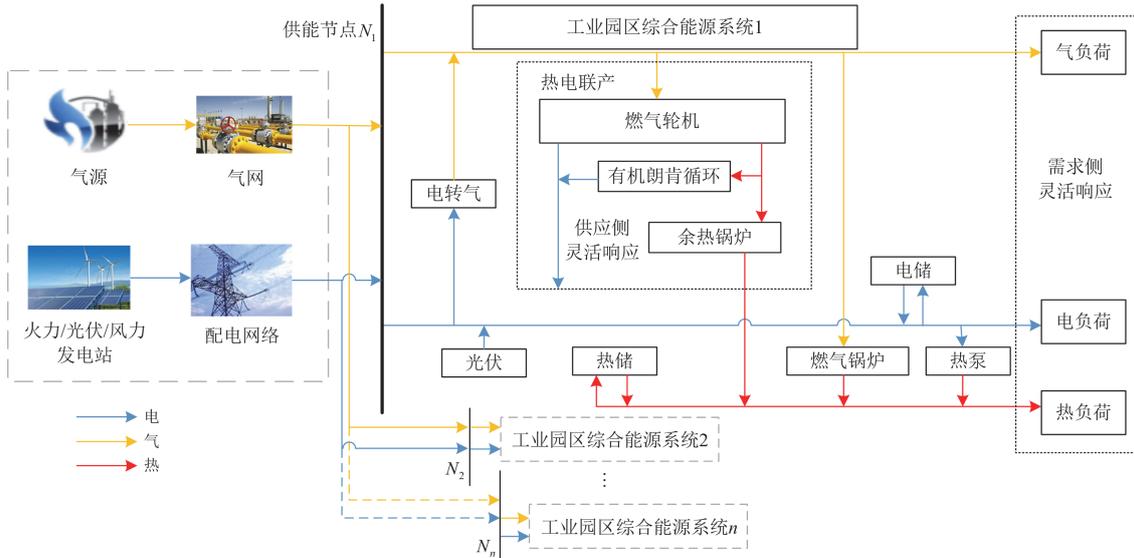


图 1 多园区综合能源系统框架

Fig. 1 Framework of multi-park integrated energy system

多输出设备碳排放流模型不能直接描述由多个转换装置共同构成的 CHP 的碳排放流模型, 因此提出含有有机朗肯循环的 CHP 碳排放流模型, 如式(2)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{e,t}^{\text{GT}} = \frac{\rho_{g,t}^{\text{GT}}}{2\eta_e^{\text{GT}}} \\ \rho_{h,t}^{\text{GT}} = \frac{\rho_{g,t}^{\text{GT}}}{2\eta_h^{\text{GT}}} \\ \rho_{e,t}^{\text{CHP}} = \frac{\rho_{e,t}^{\text{GT}} P_{e,t}^{\text{GT}} + \frac{\rho_{h,t}^{\text{GT}}}{\eta^{\text{ORC}}} P_{e,t}^{\text{ORC}}}{P_{e,t}^{\text{GT}} + P_{e,t}^{\text{ORC}}} \\ \rho_{h,t}^{\text{CHP}} = \frac{\rho_{h,t}^{\text{GT}}}{\eta^{\text{WHB}}} \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: $\rho_{g,t}^{\text{GT}}$ 、 $\rho_{e,t}^{\text{GT}}$ 、 $\rho_{h,t}^{\text{GT}}$ 分别为 t 时刻 GT 输入端天然气、输出端发电侧以及输出端制热侧的 PCI; η_e^{GT} 、 η_h^{GT} 分别为 GT 发电效率和热效率; $\rho_{e,t}^{\text{CHP}}$ 、 $\rho_{h,t}^{\text{CHP}}$ 分别为 t 时刻 CHP 输出端发电侧和输出端制热侧的 PCI; $P_{e,t}^{\text{GT}}$ 、 $P_{e,t}^{\text{ORC}}$ 分别为 t 时刻 GT 和 ORC 输出的电功率; η^{ORC} 、 η^{WHB} 分别为 ORC 和 WHB 的转换效率。

1.3 热储元件的碳排放流模型

如果园区综合能源系统中含有储能元件, 当储能存储能量时, 其会吸收一部分碳排放, 造成输出端电、热负荷的碳排率(carbon emission flow rate, CEFR)小于输入端的 CEFR; 而在储能释放能量时, 又可以将其视为一种特殊的供能元件, 需要提供其 PCI 作为边界条件以计算出能量枢纽的碳排放流。

因此, 文献[14]建立的扩展电储碳排放流模型中, 提出了储能 CTR 的概念, 表示电储单位电量中的碳排放量。电储碳排放流模型如式(3)所示。

$$\rho_t^{\text{es}} = \frac{\rho_{t-1}^{\text{es}} S_{t-1}^{\text{es}} E_{\text{es}} + c_t^{\text{es,cha}} - c_t^{\text{es,dis}}}{S_t^{\text{es}} E_{\text{es}}} \quad (3)$$

式中: ρ_t^{es} 为 t 时刻电储的 CTR; $c_t^{\text{es,cha}}$ 和 $c_t^{\text{es,dis}}$ 分别为 t 时刻电储充进或放出的碳排放量; S_t^{es} 为 t 时刻储能的荷电状态; E_{es} 为储能容量。

但是, 热储元件的储能介质与电储不同, 热储存储的能量受保温效果影响而产生损耗, 即在不考虑存储或放热时, 热储存储的能量也存在减少的趋势。而以往以电储为基础的储能碳排放流模型忽略了热储的热耗散效应, 认为在放热过程中热储内部 CTR 不变, 然而不变的 CTR 和有减少趋势的热储能量相乘得出热储存储的碳排放量比实际要少, 即依附在热耗散能量的碳排放没有分摊至负荷侧, 违背了调度周期碳排放守恒原则^[14], 因此有必要考虑热耗散效应建立适用于热储元件的碳排放流模型。热储的碳排放流模型需要考虑热储的工作状态, 即分为储热和放热过程。

在储热过程中, t 时刻充进热储的碳排放量为

$$c_t^{\text{HS,cha}} = P_t^{\text{cha}} \rho_t^{\text{cha}} \Delta t \quad (4)$$

式中: $c_t^{\text{HS,cha}}$ 为 t 时刻充进热储的碳排放量; P_t^{cha} 为 t 时刻热储存储的功率; ρ_t^{cha} 为 t 时刻热储连接节点的 PCI; Δt 为调度时间间隔。其中, 热负荷的来源为热电联产、燃气锅炉、热泵, 主要为气和电能的

消耗,因此储热过程热储连接节点的 PCI 定义如式(5)所示。

$$\rho_t^{\text{cha}} = \frac{\sum_{u=1}^U \rho_{u,t}^{\text{out}} P_{u,t} + \sum_{j=1}^J \rho_{j,t}^{\text{out}} P_{j,t}}{\sum_{u=1}^U P_{u,t} + \sum_{j=1}^J P_{j,t}} \quad (5)$$

式中: $\rho_{u,t}^{\text{out}}$ 、 $\rho_{j,t}^{\text{out}}$ 分别表示耗气产热转换设备 u 和耗电产热转换设备 j 的热能输出端口在 t 时刻的 PCI; $P_{u,t}$ 、 $P_{j,t}$ 分别表示耗气产热转换设备 u 和耗电产热转换设备 j 在 t 时刻输出的热功率; U 、 J 分别表示园区耗气产热转换设备的数量和耗电产热转换设备的数量。

$$\rho_t^{\text{HS,cha}} = \frac{P_{t-1} \rho_{t-1}^{\text{HS}} + c_t^{\text{HS,cha}}}{P_{t-1} - P_t^{\text{Loss}} + P_t^{\text{cha}}} \quad (6)$$

式中: $\rho_t^{\text{HS,cha}}$ 为储热过程中热储内部 t 时刻的 CTR; P_{t-1} 为 $t-1$ 时刻热储存储的功率; ρ_{t-1}^{HS} 为热储 $t-1$ 时刻的 CTR; P_t^{Loss} 为调度时间间隔 Δt 内热储的热耗散功率。

在放热过程中,热储放出的碳排放量为

$$c_t^{\text{HS,dis}} = P_t^{\text{dis}} \rho_{t-1}^{\text{HS}} \Delta t \quad (7)$$

式中: $c_t^{\text{HS,dis}}$ 为 t 时刻热储放出的碳排放量; P_t^{dis} 为 t 时刻热储释放的功率。

$$\rho_t^{\text{HS,dis}} = \frac{P_{t-1} \rho_{t-1}^{\text{HS}} - c_t^{\text{HS,dis}}}{P_{t-1} - P_t^{\text{Loss}} - P_t^{\text{dis}}} \quad (8)$$

式中: $\rho_t^{\text{HS,dis}}$ 为放热过程中 t 时刻热储内部的 CTR。

因此,放热过程热储连接节点的 PCI 为

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{\text{CO}_2,q,t} = \begin{cases} 0, & 0 \leq C_{\text{CO}_2,q,t} < x_{\min}(i) \\ \lambda_1 (C_{\text{CO}_2,q,t} - x_{\min}(i)), & x_{\min}(i) \leq C_{\text{CO}_2,q,t} < x_{\text{ave}}(i) \\ \lambda_1 (x_{\text{ave}}(i) - x_{\min}(i)) + \lambda_2 (C_{\text{CO}_2,q,t} - x_{\text{ave}}(i)), & x_{\text{ave}}(i) \leq C_{\text{CO}_2,q,t} < x_{\max}(i) \\ \lambda_1 (x_{\text{ave}}(i) - x_{\min}(i)) + \lambda_2 (x_{\max}(i) - x_{\text{ave}}(i)) + \lambda_3 (C_{\text{CO}_2,q,t} - x_{\max}(i)), & C_{\text{CO}_2,q,t} \geq x_{\max}(i) \end{cases} \\ C_{\text{CO}_2,q,t} = \rho_{r,t} L_{r,t} + [(1-\alpha)c_t^{\text{HS,dis}} - \alpha c_t^{\text{HS,cha}}] + [(1-\beta)c_t^{\text{es,dis}} - \beta c_t^{\text{es,cha}}], \quad \alpha, \beta \in \{0,1\} \end{array} \right. \quad (12)$$

式中: $E_{\text{CO}_2,q,t}$ 为园区 q 在 t 时刻的碳交易成本; $C_{\text{CO}_2,q,t}$ 为园区 q 在 t 时刻的碳排放量; r 表示 EH 输入端负荷类型,即电能与气能, $r \in \{\text{e}, \text{g}\}$; $\rho_{r,t}$ 为负荷 r 在 t 时刻 EH 输入端的 PCI; $L_{r,t}$ 为负荷 r 在 t 时刻注入 EH 输入端的负荷; α 、 β 为取值 0 或 1 的常数,若热储放热,则 $\alpha=0$,若热储储热,则 $\alpha=1$,若电储放热,则 $\beta=0$,若电储储热,则 $\beta=1$;

$$\rho_t^{\text{dis}} = \frac{\sum_{u=1}^U \rho_{u,t}^{\text{out}} P_{u,t} + \sum_{j=1}^J \rho_{j,t}^{\text{out}} P_{j,t} + P_t^{\text{dis}} \rho_t^{\text{HS,dis}}}{\sum_{u=1}^U P_{u,t} + \sum_{j=1}^J P_{j,t} + P_t^{\text{dis}}} \quad (9)$$

式中: ρ_t^{dis} 为放热过程热储连接节点的 PCI。

文献[12]指出碳势这一概念与上述 PCI 与 CTR 具有相同的量纲,都表示碳排放量与电量之间的比值。因此后文统一使用碳势对上述两个物理量进行表述。

2 多园区综合能源系统供需双响应低碳模型

2.1 基于 Shapley 值的碳排放责任分摊方法

由于各园区所在节点位置、消耗能源数量等不同,导致分摊到的碳排放责任以及承担的碳排放责任成本不同。文献[11]将碳排放责任分摊问题转化为经典的成本分摊问题,采用 Shapley 值可计算得到每个园区所分摊的碳排放责任,如式(10)所示。

$$x_q = \sum_{S \subseteq N/q} \omega(S) (c(S \cup \{q\}) - c(S)) \quad (10)$$

$$\omega(S) = \frac{(n-|S|)! (|S|-1)!}{n!} \quad (11)$$

式中: x_q 为园区 q 所分摊的碳排放责任量; S 为子联盟; N 为园区总数; $c(S)$ 表示子联盟 S 所分摊的碳排放责任量; $c(S \cup \{q\}) - c(S)$ 表示园区 q 并入子联盟 S 时产生的边际作用; $\omega(S)$ 为该子联盟 S 发生的概率; n 为园区的总数; $|S|$ 是子联盟 S 的园区个数。根据碳排放责任边际作用的最大值 $x_{\max}(i)$ 、最小值 $x_{\min}(i)$ 以及平均值 $x_{\text{ave}}(i)$ 制定阶梯碳交易模型,如式(12)所示。

λ_1 、 λ_2 和 λ_3 为 3 档碳交易单价^[18]。

2.2 综合能源系统供需灵活双响应模型

2.2.1 需求侧灵活响应模型

图 1 中包含电、热、气 3 种负荷,考虑同类型负荷内部具备需求侧灵活响应能力,将任意负荷划分为 3 部分:固定型负荷、可转移型负荷及替代型负荷,即

$$P_{k,\text{Load}}(t) = P_{k,\text{Load}}^s(t) + P_{k,\text{Load}}^p(t) + P_{k,\text{Load}}^c(t) \quad (13)$$

式中: $P_{k,Load}(t)$ 表示第 k 种负荷 t 时刻的功率;

$P_{k,Load}^s(t)$ 、 $P_{k,Load}^p(t)$ 、 $P_{k,Load}^c(t)$ 分别表示第 k 种负荷 t 时刻的固定型负荷、可转移型负荷和替代型负荷。

2.2.2 供应侧灵活响应模型

在 CHP 内部, GT 输出的热功率一部分经由 WHB 提供给热负荷, 一部分经由 ORC 进行余热发电。ORC 与 GT、WHB 配合可以构成热、电功率灵活输出的 CHP, 进而实现供应侧 CHP 的热、电灵活响应。各设备模型如式(14)所示。

$$\begin{cases} P_{e,t}^{GT} = \eta_c^{GT} P_{g,t}^{GT} \\ P_{h,t}^{GT} = \eta_h^{GT} P_{g,t}^{GT} = P_{h,t}^{WHB,in} + P_{h,t}^{ORC} \\ P_{e,t}^{ORC} = \eta_{ORC} P_{h,t}^{ORC} \\ P_{h,t}^{WHB,out} = \eta_{WHB} P_{h,t}^{WHB,in} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $P_{g,t}^{GT}$ 表示 t 时刻输入 GT 的气功率; $P_{h,t}^{WHB,in}$ 、 $P_{h,t}^{ORC}$ 分别表示 t 时刻输入到 WHB、ORC 的热功率; $P_{h,t}^{WHB,out}$ 、 $P_{e,t}^{ORC}$ 分别表示 t 时刻 WHB 输出的热功率和 ORC 输出的电功率; η_{ORC} 表示 ORC 的转换效率; η_{WHB} 表示 WHB 的转换效率。CHP 热、电灵活响应模型如式(15)所示。

$$\begin{cases} P_{e,t}^{CHP} = P_{e,t}^{GT} + P_{e,t}^{ORC} \\ P_{h,t}^{CHP} = P_{h,t}^{WHB,out} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $P_{h,t}^{CHP}$ 、 $P_{e,t}^{CHP}$ 分别为 CHP 输出的热功率和电功率。

3 多园区综合能源系统双层低碳经济调度模型

单一园区综合能源系统需求侧响应无论在时间和容量尺度上, 都有其局限性。而在大规模园区互联的背景下, 多个园区协同提供需求侧响应能力, 能够有效提供多园区综合能源系统总体调节能力和调节经济性^[24]。

3.1 上层调度模型

3.1.1 目标函数

上层模型以 IES 调度成本最小为目标, 包括电厂总燃料成本 f_c 和天然气开采成本 f_g , 具体目标函数为

$$\min F_1 = f_c + f_g \quad (16)$$

其中

$$f_c = \sum_{t=1}^T \sum_{o=1}^O (a_o P_{G,o,t}^2 + b_o P_{G,o,t} + c_o) \quad (17)$$

$$f_g = \sum_{t=1}^T \sum_{\sigma=1}^V \rho_{\sigma} Q_{\sigma,t} \quad (18)$$

式中: a_o 、 b_o 、 c_o 为电厂 o 的发电系数; $P_{G,o,t}$ 为电厂 o 在 t 时刻的发电功率; ρ_{σ} 为天然气井 σ 单位开采价格; $Q_{\sigma,t}$ 为天然气井 σ 在 t 时刻的开采量; O 和 V 分别为系统的总发电厂数和气井数; $T = 24$ 。

3.1.2 供能网络约束

供能网络约束包括电网潮流约束和气网约束。电网潮流约束^[25]包括输电线路约束、机组出力约束、相角约束和节点功率平衡约束。气网约束^[9]主要考虑节点供需平衡约束、节点压力约束、气网管道约束和气源约束。

3.2 下层调度模型

3.2.1 目标函数

下层模型以 EH 购能成本、碳交易成本和需求响应补偿成本之和最小为目标函数, 目标函数如下。

$$\min F_2 = f_{EH,e} + f_{EH,g} + f_{co_2} + f_{DR} \quad (19)$$

$$f_{EH,e} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{I_{EH}} \lambda_{e,t} P_{cl,i,t} \quad (20)$$

$$f_{EH,g} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{I_{EH}} \lambda_{g,t} Q_{cl,i,t} \quad (21)$$

$$f_{co_2} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{I_{EH}} E_{co_2,i,t} \quad (22)$$

$$f_{DR} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{I_{EH}} \sum_{k=1}^3 (\delta_p |P_{k,Load}^p(t)| + \delta_c |P_{k,Load}^c(t)|) \quad (23)$$

式中: I_{EH} 为系统 EH 数量; $f_{EH,e}$ 为 EH 总购电成本; $f_{EH,g}$ 为 EH 总购气成本; f_{co_2} 为碳交易成本; f_{DR} 为 DR 补偿成本; $\lambda_{e,t}$ 和 $\lambda_{g,t}$ 分别为 t 时刻 EH 购电和购气单价; $P_{cl,i,t}$ 和 $Q_{cl,i,t}$ 分别为 t 时刻 EH 的电网和气网联络线功率, 下层模型将 $P_{cl,i,t}$ 和 $Q_{cl,i,t}$ 传递给上层; $E_{co_2,i,t}$ 为园区 i 在 t 时刻的碳交易成本; δ_p 、 δ_c 分别为可转移型负荷、替代型负荷参与 DR 的单位补偿系数。

3.2.2 能量枢纽约束

利用 EH 模型能将园区中的能量转换过程建模为一个具有多个输入输出端口的单元, EH 模型^[22]如式(24)所示。

$$L = P - CI \pm SW \quad (24)$$

式中: L 、 P 、 C 、 I 、 S 和 W 分别为输出矩阵、输入矩阵、耦合矩阵、设备矩阵、储能转换矩阵和储能充放矩阵, 其约束参考文献[10]。

3.2.3 碳交易和需求响应约束

碳交易约束由式(10)一式(12)表示, 需求响应约束由式(13)一式(15)表示。

3.2.4 模型求解

本文的两阶段低碳优化调度模型求解流程如图 2 所示, 运用分段线性化将上述模型转化为混合整数线性模型, 利用 CPLEX 进行优化求解, 模型线性化处理过程见附录 A。

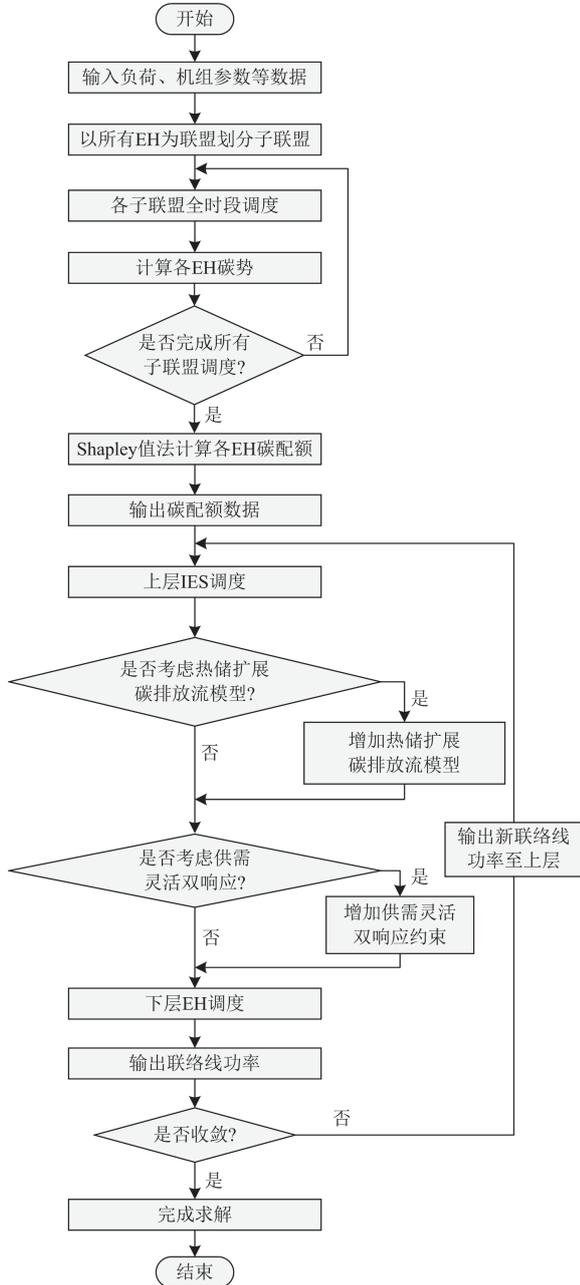


图 2 模型求解流程图

Fig. 2 Model solving flowchart

4 算例分析

本文采用 6 节点电网、6 节点天然气网和 3 个 EH 组成的 IES 进行算例分析^[26]。系统结构图如附录 B 图 B1 所示。EH 基础数据曲线如附录 B 图 B2

所示, EH_1 的参数基准值如附录 B 表 B1 所示, EH_2 和 EH_3 负荷为 EH_1 的 $1/2^{[10]}$, 各设备参数如附录 B 表 B2—表 B4 所示, 设置阶梯碳交易区间单价分别为 40、60、90 元/t, 分时电价与气价参考文献[19]。以 24 h 为周期, 以 1 h 为步长进行仿真, 设置 4 个场景。

场景 1: 不考虑热储扩展碳排放流的 IES 低碳经济调度;

场景 2: 考虑热储扩展碳排放流的 IES 低碳经济调度;

场景 3: 不考虑热储扩展碳排放流、考虑供需灵活双响应的 IES 低碳经济调度;

场景 4: 考虑热储扩展碳排放流和供需灵活双响应的 IES 低碳经济调度。

4.1 热储扩展碳排放流模型

4.1.1 碳配额计算

基于 Shapley 值法, 以 $\{EH_1\}$ 、 $\{EH_2\}$ 、 $\{EH_3\}$ 、 $\{EH_1, EH_2\}$ 、 $\{EH_2, EH_3\}$ 、 $\{EH_1, EH_3\}$ 为 6 个子联盟, 计算得到 3 个园区 24 h 的碳配额如图 3 所示。

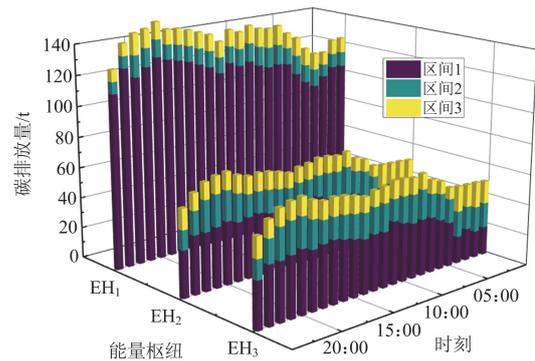


图 3 各 EH 碳排放配额区间图

Fig. 3 Chart of EH carbon emission allowance intervals

图 4 为各 EH 电负荷的 24 h 碳势分布, 3 个园区 (EH_1 、 EH_2 、 EH_3) 的碳势趋势基本相同。 EH_1 的碳势明显高于另外两个园区, 这主要是因为其电、热负荷均高于 EH_2 、 EH_3 。此外, EH_1 的热负荷中有一部分来自于热泵耗电, 加剧了 EH_1 的电负荷需求, 从而导致 EH_1 的平均碳势高于 EH_2 、 EH_3 。

4.1.2 热储碳排放流模型的影响分析

图 5 对比分析了考虑和不考虑热储扩展碳排放流模型下的园区碳排放量。考虑热储碳排放流模型的园区碳排放量在热储放热时段高于不考虑该模型的场景, 例如 01:00—02:00 时段以及 21:00—24:00 时段热储放热, 而在热储储热时段低于不考虑该模型的场景, 例如 11:00—17:00 时段。这是因为加入热储碳排放流模型后, 在热储存储热能时段, 依附于

存储的热能碳排放不计入园区的碳排放中,而在热储释放热能时段,将释放热能碳排放计入园区的碳排放。可以发现,在考虑热储碳排放模型后,碳排放流随热储热能的存储和释放的流向被有效刻画,对园区不同时刻的碳排放量计算起到纠正作用,并实现了精确计算。

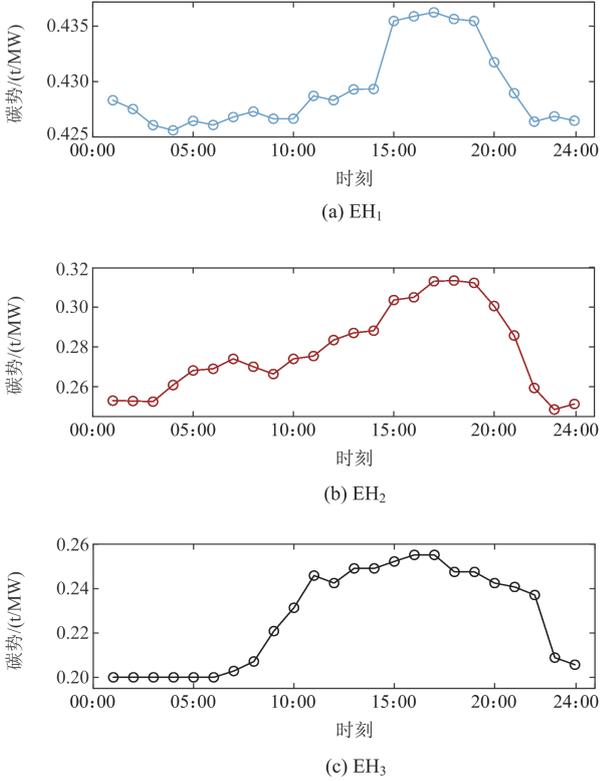


图 4 三园区的电负荷碳势

Fig. 4 EHs' electric load carbon emission intensity

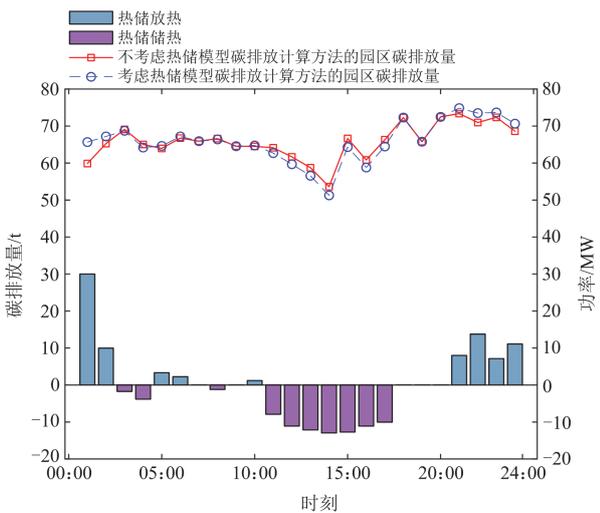


图 5 EH₃ 热储工作状况及园区碳排放量

Fig. 5 Work status of thermal storage and carbon emissions of EH₃

4.1.3 热储扩展碳排放流模型效益

4 个场景调度结果分析如表 1 所示。

对比场景 1 和场景 2 验证考虑热储碳排放流模型对园区优化起碳减排作用。图 6 为场景 2 中 EH₃ 的热储工作状况图。可以看出,加入热储扩展碳排放流模型的园区优化,表现为在热储连接节点碳势偏低时段储存热能,在碳势偏高时段释放热能。相当于加入该热储扩展碳排放流模型后,热储将低碳势热能供给热负荷高碳势时段,替代了部分高碳势热能消耗,降低热负荷的碳排放量。

表 1 各场景下层系统成本

Table 1 Lower-level system cost of each scenario

场景	总成本/元	购电成本/元	购气成本/元	碳交易成本/元	DR 补偿成本/元	碳排放量/t
1	2 735 526	1 706 774	563 941	464 811	0	7923
2	2 729 883	1 703 940	567 922	458 021	0	7816
3	2 641 204	1 470 339	729 417	431 019	10 429	7459
4	2 639 421	1 466 020	739 578	422 769	11 054	7232

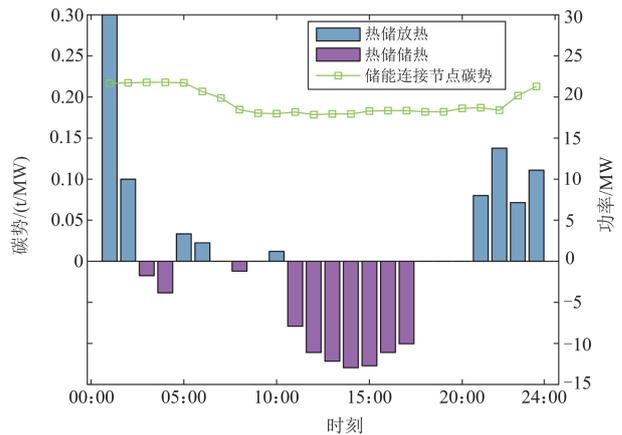


图 6 场景 2 中 EH₃ 热储工作状况

Fig. 6 Work status of thermal storage of EH₃ in scenario 2

热储模型连接节点碳势具有夜间时段偏高,白天时段偏低的特点,这是由于园区的热能主要来源于 HP、GB 与 CHP 产热,而热储碳排放流模型连接节点碳势受到这 3 个转换装置转换功率的大小及该时刻的输入端电能、气能碳势的影响。造成连接节点碳势夜间偏高、白天偏低的主要原因是夜间用电处于低谷时段,系统通过 HP 设备将电能转换为热能以满足夜间的负荷高峰,这部分电能碳势高于天然气供应节点,导致热储模型连接节点碳势也偏高,而白天时段用电处于高峰时段,流向 HP 的电功率减少,HP 的产热比重逐渐减少,这导致连接节点的碳势白天偏低。而在热负荷需求方面,热负荷夜间时段高峰、白天时段低谷这一特点促使热

储在白天时段存储热能、夜间时段释放热能以满足热负荷需求，减少系统总成本。因此造成了在园区优化中，热储碳排放流模型在碳势偏低时段储存热能，在碳势偏高时段释放热能，以低碳势热能替代高碳势热能消耗，降低热负荷碳排放量。

图 7 为场景 1 和场景 2 的 EH_3 热储流向负荷侧碳排放量。可以看到，考虑热储扩展碳排放流模型的园区优化有更低的碳排放。图 7 场景 2 相较于场景 1，热储流向热负荷侧碳排放量降低了 7.97%。热储额定容量的大小限制了其白天时段存储低碳势热能的能力，因此如果采用更大额定容量的热储将带来更多的碳减排效益。由表 1 可见，场景 2 碳排放量比场景 1 降低了 107 t，占系统总碳排放量的 1.35%。

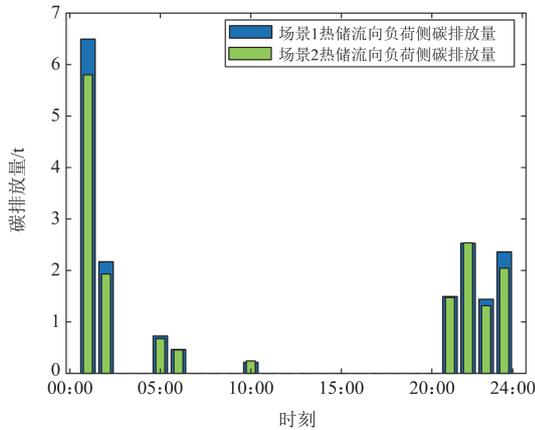


图 7 两种场景热储流向负荷侧碳排放量

Fig. 7 Comparison of carbon emissions from thermal storage to load side in two scenarios

4.2 供需灵活双响应效益分析

4.2.1 供应侧灵活响应分析

图 8 为场景 3 中 EH_1 的 GT 输出的热功率流向图。可以看到，在夜间热功率流向 WHB 供给热负荷，此时热负荷处于用能高峰期；而在白天热功率流

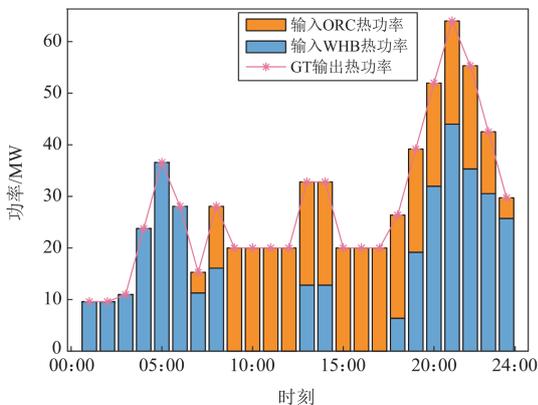


图 8 GT 输出的热功率流向图

Fig. 8 Thermal power flow diagram of GT output

向 ORC 供给电负荷，此时电负荷处于用能高峰期，热负荷需求相对较低；19:00—22:00 时段热负荷与电负荷都处于用能高峰期，GT 输出的热功率同时流向 ORC 与 WHB，但流向电负荷的热功率逐渐减少。

4.2.2 需求侧灵活响应效益

图 9 为场景 3 中 EH_1 的需求侧响应结果。由于园区内白天光伏产电，为了尽可能地消纳光伏发电，同时受到分时电价的影响，将白天的一部分电负荷需求转移到夜间，由此对电负荷起到了一定削峰填谷的效果。

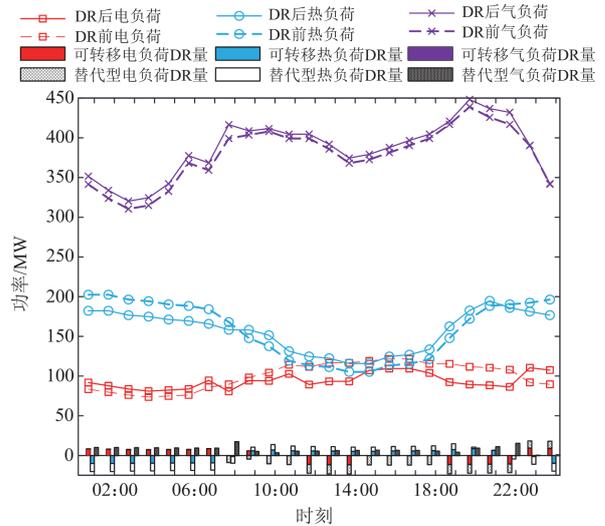


图 9 场景 3 中 EH_1 的需求侧响应结果

Fig. 9 Demand response of EH_1 in scenario 3

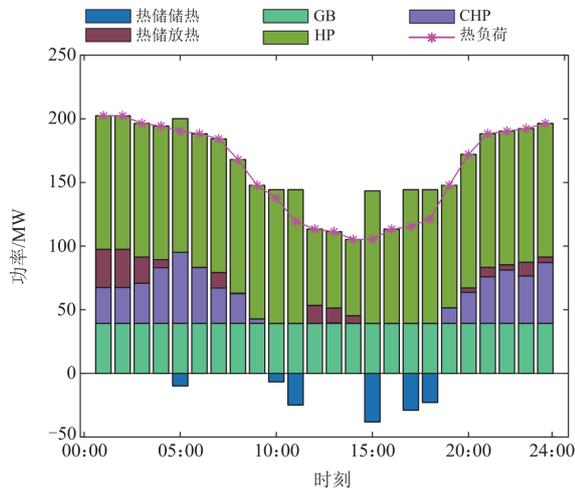
夜间热负荷需求较高，白天时段的需求相对较低，若夜间时段大量消耗电能和气能以满足较高的热负荷需求，将使得系统夜间长期处于高碳排放状态，阶梯碳价收取高额碳排放成本，因此系统将夜间的一部分热负荷需求转移到白天时段。

从气负荷的 DR 可知，园区提高了天然气的消耗量。一方面，气网相对电网碳排放强度较低，气负荷需求的增加进一步提高了系统的低碳性。另一方面，由于气价低于电价，并且若将天然气通过转换转换为电、热负荷，会产生一定的损耗，因此系统直接用气负荷替代了一部分的电、热负荷，造成了气负荷需求的整体提高。

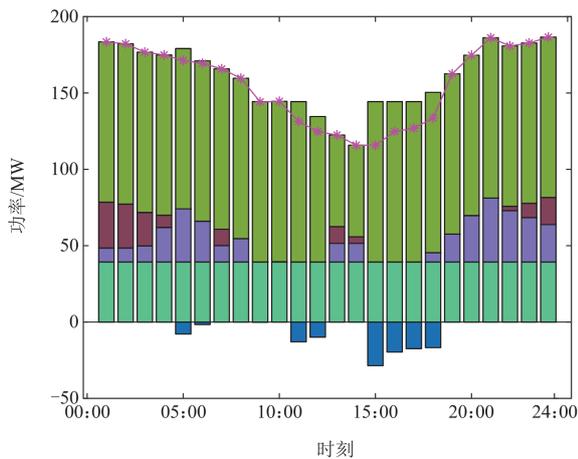
4.2.3 供需双侧灵活响应效益

图 10 和图 11 分别为场景 2 和场景 4 中 EH_1 的热功率和气功率平衡图。可以看出，场景 4 经过供需灵活双响应后，电、热负荷分别由各自的高峰时段转移到低谷时段。通过减少白天时段的电负荷需求可以减少高电价带来的高购电成本。在白天时段，

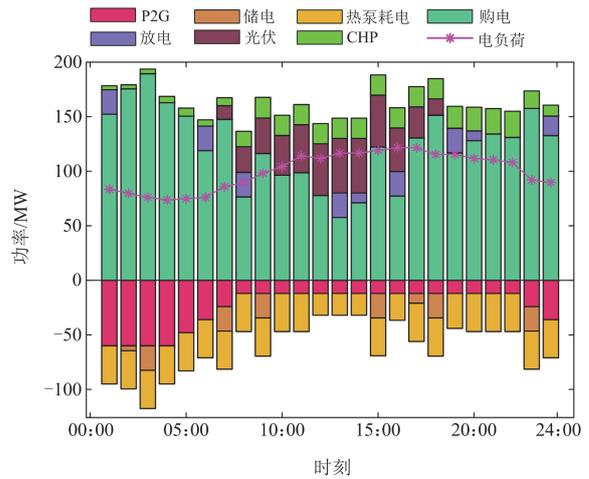
由于 CHP 可以灵活调节热、电输出, 因此可以通过提高 CHP 的发电量来满足电负荷需求, 以进一步减少白天高电价时的购电成本; 在夜间时段, 系统的部分热负荷由电负荷替代, 此时电负荷碳势偏低, 增加夜间时段电负荷需求在实现上层能量传输网络风电消纳的同时, 减少能源转换带来的梯级损耗。此外, 园区内部的光伏发电被完全消纳, 进一步降低白天高电价时段的购电需求。由表 1 可知, 场景 3 相较于场景 1, 系统总成本减少 10.48 万元, 碳排放量降低 5.86%。对比场景 3 和场景 4, 场景 4 碳排放相较于场景 3 减少了 227 t, 占系统总碳排放量的 3.04%。另外场景 4 提高了气能在白天时段对电能的可替代型负荷, 减少白天高碳势电能的消耗, 由此减少了系统碳排放量, 可见热储扩展碳排放流模型在供需灵活双响应的场景下表现出了更好的降碳效果。场景 4 相较于场景 1, 系统总成本减少 9.61



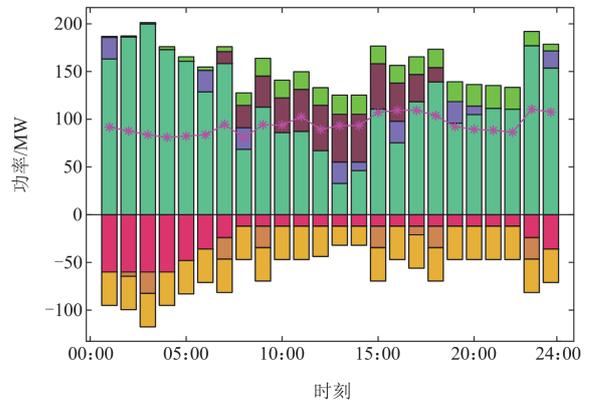
(a) 场景2



(b) 场景4

图 10 两种场景 EH₁ 的热功率平衡图Fig. 10 Thermal power balance diagram of EH₁ in two scenarios

(a) 场景2



(b) 场景4

图 11 两种场景 EH₁ 的电功率平衡图Fig. 11 Electric power balance diagram of EH₁ in two scenarios

万元, 占系统总成本的 3.51%, 碳排放量减少 691 t, 占系统总碳排放量的 8.72%。

5 结论

本文提出了一种考虑热储扩展碳排放流的多园区综合能源系统低碳经济调度方法。构建了热储元件的碳排放模型以及考虑有机朗肯循环的 CHP 碳排放模型; 同时引入了供需灵活双响应机制, 提出了多园区的供需双响应低碳经济调度模型, 通过算例分析后得出以下结论:

1) 所构建的热储扩展碳排放流模型能够有效刻画碳排放流随热储热能的存储和释放的流向, 实现对园区热储各时刻碳排放量的精确计算。

2) 所提出的扩展碳排放流模型与供需灵活双响应机制结合的多园区综合能源系统低碳经济调度策略, 显著降低了碳排放量和总成本, 有效促进了系统的低碳经济运行。

后续工作将以本文提出的模型为基础，重点关注可再生能源和负荷的不确定性问题，通过建立多时间尺度优化模型减少可再生能源和多能源负荷的不确定性带来的影响，提高所述调度模型的鲁棒性。此外园区相互之间的碳配额交易和多能互济对调度的影响也值得进一步研究，通过构建用能密集园区或丰富可再生能源园区以进一步提升园区与园区之间的能源互济，促进系统低碳经济调度。

附录 A

对式(16)的平方项进行分段线性化处理，步骤如下所述。

步骤 1: 取 $Q+1$ 个分段点 $[r_1, r_2, \dots, r_{Q+1}]$ ，将原函数划分为 Q 个区间，并保证其精度。

步骤 2: 添加 Q 个二进制型辅助变量 $[z_1, z_2, \dots, z_Q]$ 与 $Q+1$ 个连续型辅助变量 $[w_1, w_2, \dots, w_{Q+1}]$ ，并满足式(A1)。

$$\begin{cases} z_1 + z_2 + \dots + z_Q = 1 \\ w_1 + w_2 + \dots + w_{Q+1} = 1 \\ w_1 \leq z_1, w_2 \leq z_1 + z_2, \dots, w_Q \leq z_{Q-1} + z_Q, w_{Q+1} \leq z_Q \end{cases} \quad (A1)$$

步骤 3: 将非线性函数替换为线性表达式。

$$\begin{cases} P_{G,o,t} = \sum_{q=1}^{Q+1} w_q r_q \\ f_e = \sum_{q=1}^{Q+1} w_q f_e(r_q) \end{cases} \quad (A2)$$

式(12)所示的阶梯式碳交易成本已经是分段函数表达式，可省略上述步骤 1，结合步骤 2 与步骤 3 进行线性转换。

附录 B

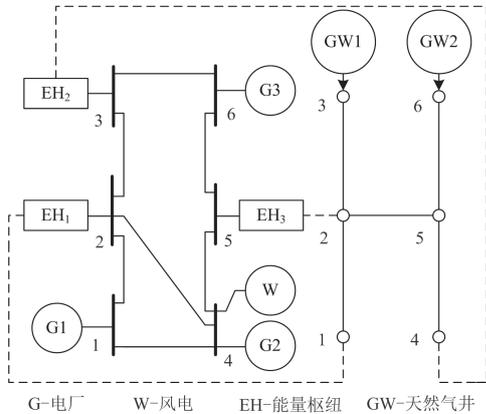


图 B1 IES 结构图

Fig. B1 IES structure diagram

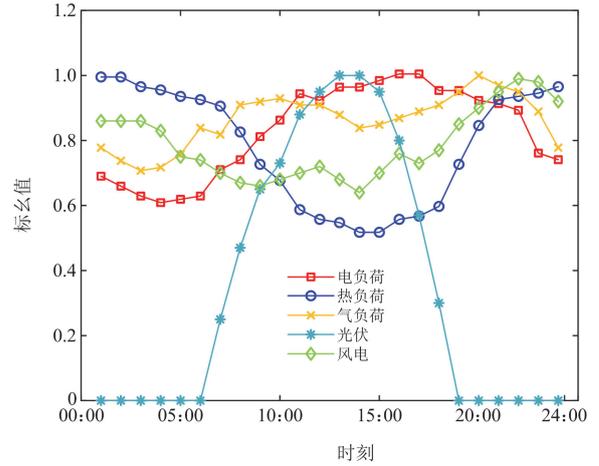


图 B2 EH 基础数据曲线

Fig. B2 EH basic data curve

表 B1 参数基准值

Table B1 Parameter reference value

参数	MW				
	电负荷	气负荷	热负荷	风电	光伏
基准值	121.6	439.5	202.46	20	50

表 B2 各机组参数

Table B2 Parameters of each unit

机组	出力		燃料成本系数			碳排放强度/ (kg/MW)
	上限/ MW	下限/ MW	a/ (元/MW ²)	b/ (元/MW)	c/元	
G1	500	50	0.012	160	55	800
G2	100	10	0.023	210	50	600
G3	80	20	0.068	200	60	400

表 B3 各气井参数

Table B3 Parameters of each gas well

气井	开采		成本系数/ (元/MW)	碳排放强度/ (kg/MW)
	上限/ MW	下限/ MW		
GW1	1200	1000	185	200
GW2	600	500	175	200

表 B4 EH 设备参数

Table B4 EH equipment parameters

设备	转换系数	功率上限/MW	功率下限/MW
P2G	0.6	60	12
HP	2.0	100	20
GB	0.8	80	40
GT	电: 0.2 热: 0.7	80	12
WHB	0.95	60	0
ORC	0.8	20	0

参考文献

[1] 贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 198-207.

- JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207.
- [2] MA Huan, CHEN Qun, HU Bo, et al. A compact model to coordinate flexibility and efficiency for decomposed scheduling of integrated energy system[J]. Applied Energy, 2021, 258.
- [3] 贺文, 陈珍萍, 胡伏原, 等. 基于一致性的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 42-53.
- HE Wen, CHEN Zhenping, HU Fuyuan, et al. Consensus-based low-carbon economic dispatching of integrated energy systems[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 42-53.
- [4] 王守文, 叶金根, 徐丽洁, 等. 计及温控厌氧发酵和阶梯碳交易的农村综合能源低碳经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 88-97.
- WANG Shouwen, YE Jingen, XU Lijie, et al. Rural comprehensive energy low-carbon economic dispatch taking into account temperature controlled anaerobic fermentation and ladder carbon trading[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 88-97.
- [5] 陈锦鹏, 胡志坚, 陈颖光, 等. 考虑阶梯式碳交易机制与电制氢的综合能源系统热电优化[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 48-55.
- CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Yingguang, et al. Thermoelectric optimization of integrated energy system considering ladder-type carbon trading mechanism and electric hydrogen production[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 48-55.
- [6] 张笑演, 熊厚博, 王楚通, 等. 基于最优出力区间和碳交易的园区综合能源系统灵活经济调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 72-83.
- ZHANG Xiaoyan, XIONG Houbo, WANG Chutong, et al. Flexible economic dispatching of park-level integrated energy system based on optimal power output interval and carbon trading[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 72-83.
- [7] 朱晔, 兰贞波, 隗震, 等. 考虑碳排放成本的风光储多能互补系统优化运行研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 127-133.
- ZHU Ye, LAN Zhenbo, WEI Zhen, et al. Research on optimal operation of wind-PV-ES complementary system considering carbon emission cost[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 127-133.
- [8] 李贵君, 赵兴勇, 刘昊炆, 等. 考虑梯级碳交易机制和电转气两阶段运行的综合能源系统优化[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(3): 331-340.
- LI Guijun, ZHAO Xingyong, LIU Haoyang, et al. Integrated energy system optimization considering cascading carbon trading mechanism and two-stage operation of power-to-gas[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(3): 331-340.
- [9] 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.
- [10] 张翰林, 汪睿哲, 刘友波, 等. 考虑源荷碳势耦合的电力系统双层低碳经济调度[J]. 电力建设, 2023, 44(12): 28-42.
- ZHANG Hanlin, WANG Ruizhe, LIU Youbo, et al. Two-stage low-carbon economic scheduling of power system considering source-load carbon intensity coupling[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12): 28-42.
- [11] 周全, 冯冬涵, 徐长宝, 等. 负荷侧碳排放责任直接分摊方法的比较研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 153-159.
- ZHOU Quan, FENG Donghan, XU Changbao, et al. Methods for allocating carbon obligation in demand side: a comparative study[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 153-159.
- [12] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 电力系统碳排放流分析理论初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 38-43, 85.
- ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qianyao, et al. Preliminary theoretical investigation on power system carbon emission flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 38-43, 85.
- [13] CHENG Y H, ZHANG N, WANG Y, et al. Modeling carbon emission flow in multiple energy systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 3562-3574.
- [14] 张笑演, 王槽裕, 黄蕾, 等. 考虑扩展碳排放流和碳交易议价模型的园区综合能源优化调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 34-46.
- ZHANG Xiaoyan, WANG Luyu, HUANG Lei, et al. Optimal dispatching of park-level integrated energy system considering augmented carbon emission flow and carbon trading bargain model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 34-46.
- [15] 李沅, 陆帅, 顾伟, 等. 考虑热动态的综合能源系统碳排放流建模与分析[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(7): 205-213.

LI Yuan, LU Shuai, GU Wei, et al. Modelling and analysis of carbon emission flow for integrated energy system considering thermal dynamic[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(7): 205-213.

[16] 彭春华, 刘兵, 左丽霞, 等. 计及分类需求响应的孤岛微网并行多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 60-68.

PENG Chunhua, LIU Bing, ZOU Lixia, et al. Parallel multi-objective optimal dispatch of island micro-grid considering load classified demand response[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 60-68.

[17] 贡韞韵, 董海鹰, 马志程, 等. 考虑需求响应与光热电站参与的多源系统优化经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 140-149.

YUN Yunyun, DONG Haiying, MA Zhicheng, et al. Optimization economic dispatch of a multi-source system considering the participation of demand response and concentrating solar power plant[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 140-149.

[18] 孙毅, 胡亚杰, 郑顺林, 等. 考虑用户响应特性的综合需求响应优化激励策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1402-1413.

SUN Yi, HU Yajie, ZHENG Shunlin, et al. Integrated demand response optimization incentive strategy considering users' response characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1402-1413.

[19] 陈锦鹏, 胡志坚, 陈嘉滨, 等. 考虑阶梯式碳交易与供需灵活双响应的综合能源系统优化调度[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3094-3106.

CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Jiabin, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering ladder-type carbon trading and flexible double response of supply and demand[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3094-3106.

[20] 毕锐, 王孝淦, 袁华凯, 等. 考虑供需双侧响应和碳交易的氢能综合能源系统鲁棒调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 122-132.

BI Rui, WANG Xiaogan, YUAN Huakai, et al. Robust dispatch of a hydrogen integrated energy system considering double side response and carbon trading mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 122-132.

[21] 余洋, 吴千, 霍宇航, 等. 计及自适应阶梯碳势-碳价与供需双响应基于主从博弈的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电网技术, 2024, 48(7): 2702-2714.

YU Yang, WU Qian, HUO Yuhang, et al. Low-carbon economic dispatch for integrated energy system based on Stackelberg game considering adaptive stepped carbon potential-carbon price and dual response of supply and demand[J]. Power System Technology, 2024, 48(7): 2702-2714.

[22] GEIDL M, KOEPPPEL G, FAVRE-PERROD P, et al. Energy hubs for the future[J]. IEEE Power Energy Magazine, 2007, 5(1): 24-30.

[23] 陈厚合, 茅文玲, 张儒峰, 等. 基于碳排放流理论的电力系统源-荷协调低碳优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 1-11.

CHEN Houhe, MAO Wenling, ZHANG Rufeng, et al. Low-carbon optimal scheduling of a power system source-load considering coordination based on carbon emission flow theory[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 1-11.

[24] ZHANG Menglin, WU Qiuwei, WEN Jinyu, et al. Two-stage stochastic optimal operation of integrated electricity and heat system considering reserve of flexible devices and spatial-temporal correlation of wind power[J]. Applied Energy, 2020, 275.

[25] 张伊宁, 何宇斌, 晏鸣宇, 等. 计及需求响应与动态气潮流的电-气综合能源系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(20): 1-8.

ZHANG Yining, HE Yubin, YAN Mingyu, et al. Optimal dispatch of integrated electricity-natural gas system considering demand response and dynamic natural gas flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 1-8.

[26] 丁煜蓉, 陈红坤, 吴军, 等. 计及综合能效的电-气-热综合能源系统多目标优化调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(2): 64-73.

DING Yurong, CHEN Hongkun, WU Jun, et al. Multi-objective optimal dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system considering comprehensive energy efficiency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(2): 64-73.

收稿日期: 2024-09-06; 修回日期: 2024-12-12

作者简介:

张 姝(1988—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为配电网保护与故障定位、电力负荷特性与建模、电力扰动分析; E-mail: ZS20061621@163.com

江洪辉(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为综合能源系统低碳运行; E-mail: j510019568@163.com

臧天磊(1986—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为综合能源系统运行优化、能源信息物理系统安全分析与主动防护。E-mail: zangtianlei@scu.edu.cn

(编辑 魏小丽)