

文章编号: 1006-2467(2024)06-0863-09

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.507

考虑热力系统等效储能特性的低碳园区 储能容量优化配置

陈 晖¹, 何耿生¹, 刘昱良², 曾红梅¹, 张世旭², 李姚旺²

(1. 南方电网能源发展研究院有限责任公司, 广州 510700;

2. 清华四川能源互联网研究院, 成都 610213)

摘要: 低碳发展目标下, 配置储能是保证低碳园区安全、经济运行, 降低碳排放量的关键手段. 为解决当前低碳园区中碳排放计算不准确、等效储能资源利用不充分的问题, 提出了基于碳排放流理论的电网动态排放因子计算方法, 实现了园区用电间接碳排放的精确计量; 然后, 充分考虑园区中的可用等效储能资源, 提出了一种考虑热力系统等效储能特性的储能容量优化配置模型, 并采用大 M 法对模型中的非线性约束进行了等价转换. 最后, 基于算例系统进行了仿真分析, 仿真结果验证了所提模型的正确性和有效性.

关键词: 低碳; 储能系统; 优化配置; 碳排放流; 间接碳排放

中图分类号: TM732

文献标志码: A

Capacity Allocation Strategy of Energy Storage in Low-Carbon Park Considering Equivalent Energy Storage Characteristics of Thermal System

CHEN Hui¹, HE Gengsheng¹, LIU Yuliang², ZENG Hongmei¹

ZHANG Shixu², LI Yaowang²

(1. Energy Research Institute of China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510700, China;

2. Tsinghua Sichuan Energy Internet Research Institute, Chengdu 610213, China)

Abstract: Under the low-carbon development goal, energy storage allocation is the key measure to ensure the safe and economic operation of low-carbon parks, and to reduce carbon emissions. To solve the problems of inaccurate carbon emission calculation and insufficient utilization of equivalent energy storage resources in low-carbon parks, this paper proposes a dynamic emission factor calculation method based on the carbon emission flow theory, which realizes the accurate measurement of indirect carbon emissions from park electricity consumption. Then, taking into account the available equivalent energy storage resources in the park, it proposes an energy storage capacity optimization allocation model considering the equivalent energy storage characteristics of thermal system, and uses the big M method to equivalently transform the nonlinear constraints in the model. Finally, it conducts simulation analysis based on a case system to verify the correctness and effectiveness of the proposed model.

收稿日期: 2022-12-09 修回日期: 2023-03-21 录用日期: 2023-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(71701087)资助项目

作者简介: 陈 晖(1985-), 研究员, 从事能源战略与政策研究.

通信作者: 刘昱良, 硕士, 从事低碳电力技术研究; E-mail: liuyul@tsinghua-eiri.org.

Keywords: low carbon; energy storage system; optimization configuration; carbon emission flow; indirect carbon emissions

“双碳”目标发布以来,为实现由化石能源向低碳清洁能源的转型,国内多地陆续出台相关政策,鼓励建设分布式清洁能源发电,大力打造低碳用能园区^[1].但在低碳园区中,风电、光伏等清洁能源发电形式具有很强的间歇性和随机性,导致出现弃风、弃光现象,对园区电力系统的安全、经济运行带来巨大挑战^[2].

储能具备很强的灵活调节能力,能很好地应对可再生能源带来的不确定性,因此,配置储能是提升园区运行经济性的关键手段.文献[3]中以投资运行成本以及碳排放为优化目标,提出了低碳园区氢储能优化配置模型.文献[4]中针对用户侧储能经济容量优化配置问题,考虑了储能的收益和风险,提出了基于投资组合理论的储能两阶段经济优化配置模型.文献[5]中以最小化碳排放成本、能源购置成本、设备投资运维成本和可再生能源弃电成本为目标,建立了储能优化配置模型,实现了园区低碳经济运行.但以上针对低碳用能园区储能配置的相关研究中,仅对新增储能容量进行了经济配置,未考虑园区中本身存在的沉睡型储能资源.实际上,园区供热系统具有作为广义储能资源并为电力系统提供等效储能的能力^[6].因此,考虑由供热系统提供等效储能服务可以进一步优化储能充放电行为,有效降低园区储能配置使用成本,提升其运行经济效益.

此外,碳排放的准确计算是指导储能优化配置的关键因素.但现有研究中对于低碳园区用电间接碳排放大多采用平均排放因子的方法进行计算,无法精确反映隐含在电力中的间接碳排放责任,也无法指导园区中的储能系统的低碳优化配置.为准确计量和分析电力系统中的间接碳排放,文献[7]中提出了碳排放流分析理论,其将间接碳排放与有功功率耦合,通过电网有功功率的溯源实现了间接碳排放的追踪.文献[8-9]中进一步对比分析了电力系统中碳排放流和电力潮流的差别和联系,然后在此基础上提出了电力系统碳排放流的基本计算方法.通过碳排放流分析理论可以厘清电力系统全环节碳排放的流动与分布情况,从而实现电力用户用电间接碳排放的精确分析,优化储能充放电行为.然而,上述文献中碳排放因子的计算空间尺度过小,碳排放责任分摊的区域公平性考虑不足.

针对上述问题,本文提出了一种考虑热力系统

等效储能特性的低碳园区储能容量优化配置方法.首先分析了现有用电间接碳排放计算方法的不足,然后基于碳排放流分析理论,提出了园区所在区域电网供电动态碳排放因子的计算方法,实现了园区用电间接碳排放的精准计量.在此基础上,本文综合考虑了热力系统的等效储能能力,提出了园区储能容量优化配置模型,并进一步采用大M法对模型中的非线性项进行了线性变换.最后,通过算例分析验证了所提模型和方法的正确性和有效性.

1 低碳园区用电间接碳排放计算方法

低碳园区的碳排放包括直接碳排放和间接碳排放.其中,直接碳排放是指由于化石能源燃烧或化学反应过程直接排向大气的碳排放,而间接碳排放是指外购电力中隐含的碳排放责任.为实现园区用电间接碳排放的精准计量,从而科学指导园区储能系统优化配置,本节分析了当前用电碳计量方法的不足,并进一步提出了基于碳排放流理论的低碳园区精准用电碳排放计量方法.

1.1 用电碳计量现状

目前,国内外普遍采用联合国政府间气候变化委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)提出的排放因子法核算行业企业用电间接碳排放量,即以活动数据乘排放因子得到碳排放量^[10],如下式所示:

$$E_{\text{total}} = A\bar{E} \quad (1)$$

式中: E_{total} 表示总用电间接碳排放量; A 表示活动水平,即用电量; \bar{E} 表示电网平均碳排放因子,即单位电量对应的间接碳排放量.

电网平均碳排放因子由大空间范围、长时间尺度的电网排放和统调数据计算得到,如下式所示:

$$\bar{E}_i = \frac{E_{\text{dir}}^i + \sum_{j \in J_{\text{grid}}} (\bar{E}_j Q_{j,i}) + \sum_{k \in K_{\text{cty}}} (\bar{E}_k Q_{k,i})}{Q_i + \sum_{j \in J_{\text{grid}}} Q_{j,i} + \sum_{k \in K_{\text{cty}}} Q_{k,i}} \quad (2)$$

式中: \bar{E}_i 表示区域电网 i 的电网平均碳排放因子; \bar{E}_j 表示区域电网 j 的电网平均碳排放因子; \bar{E}_k 表示国家 k 的电网平均碳排放因子; E_{dir}^i 表示区域电网 i 内的年发电直接碳排放量; Q_i 表示区域电网 i 的年发电量; $Q_{j,i}$ 表示区域电网 j 向区域电网 i 年净出口

的电量; $Q_{k,i}$ 表示国家 k 向区域电网 i 年净出口的电量; J_{grid} 为区域电网集合; K_{cty} 为国家集合。

碳排放因子是反映用电间接碳排放强度的关键参数,也是将电力系统碳排放责任从发电侧传递到用户侧的关键信号。采用电网平均碳排放因子计算用电间接碳排放量,其方法简单、结果可信,因此得到了较为广泛的应用。但平均排放因子法依赖于历史统计数据,难以反映当前系统实际情况,排放因子的发布也存在一定的滞后性。此外,不同地区的装机结构、不同时段清洁电源占比都存在显著不同,而平均排放因子难以体现电力碳排放时空差异性,也难以对用户用电行为进行引导优化。随着碳计量实时性和精确性要求的逐步提高,平均排放因子法难以满足未来的发展需要。

1.2 基于碳排放流理论的动态碳排放因子计算方法

电力用户的间接用电碳排放量应该与其消费电能的来源相关,因此,电能的溯源是实现电力系统碳排放合理分摊的关键。相关学者将碳排放视为虚拟网络流,提出了电力系统碳排放流理论^[7]。碳排放流理论将发电侧在发电过程中产生的直接碳排放等效视为随有功潮流注入电网,并跟随有功潮流定向流动。因此,通过追踪碳排放流即可全面分析和把握电力系统全环节用电碳排放信息。

碳排放流追踪法的核心思想是比例共享原则,即不同注入支路潮流和发电潮流在同一节点汇集后,先“均匀混合”再分配到每条流出支路,每条流出支路的碳流密度等于该节点的碳排放因子。

以电力系统中任一节点 n 为例,其动态用电碳排放因子计算公式如下:

$$\left. \begin{aligned} e_n &= \frac{\sum_{i \in K_n^{\text{in}}} \rho_i P_i}{\sum_{i \in K_n^{\text{in}}} P_i} \\ \rho_j &= e_n, \quad \forall j \in K_n^{\text{out}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: e_n 表示节点 n 的动态用电碳排放因子; ρ_i 表示注入线路 i 的碳流密度; ρ_j 表示流出线路 j 的碳流密度; P_i 表示注入线路 i 的有功功率; K_n^{in} 和 K_n^{out} 分别表示节点 n 的流入线路集合和流出线路集合。节点注入和流出情况如图 1 所示。

基于比例共享原则和不同类型电源的注入,即可得到全系统节点的动态用电碳排放因子矩阵:

$$\mathbf{E}_N = (\mathbf{P}_N - \mathbf{P}_B^T)^{-1} \mathbf{P}_G^T \mathbf{E}_G \quad (4)$$

式中: \mathbf{P}_N 表示节点有功通量矩阵; \mathbf{P}_B 表示支路潮流分布矩阵; \mathbf{P}_G 表示机组注入分布矩阵; \mathbf{E}_G 表示机组

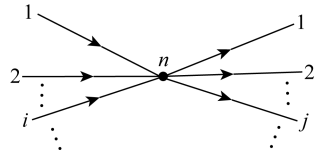


图 1 节点 n 的碳排放流

Fig. 1 Carbon emission flow of node n

碳势向量。

通过碳排放流计算即可得到系统中各节点的动态用电碳排放因子。考虑到碳排放责任分摊的公平性,需要根据实际需求调整动态排放因子的空间分辨率,使得同一区域内电力用户的动态排放因子相同。低碳园区所在区域动态碳排放因子的计算公式如下:

$$e_p^{\text{re}} = \frac{\sum_{q \in Z} e_q P_{L,q}}{\sum_{q \in Z} P_{L,q}} \quad (5)$$

式中: e_p^{re} 表示区域 p 的动态用电碳排放因子; Z 表示区域 p 中包含节点的集合; $P_{L,q}$ 表示节点 q 的有功负荷; e_q 表示节点 q 的动态用电碳排放因子。

根据电网潮流数据开展碳排放流计算,然后再通过式(4)~(5)即可求得低碳园区所在区域电网的动态用电碳排放因子,从而实现低碳园区用电间接碳排放的精准计量。

2 考虑热力系统等效储能能力的低碳园区系统

2.1 低碳园区系统架构

本文以包含热力系统的低碳园区为研究对象,低碳园区系统架构如图 2 所示。园区中包含光伏发电系统、热电联产(CHP)机组。园区中由热电联产机组、网供电、储能系统和分布式光伏提供电能,热电联产机组提供热能。

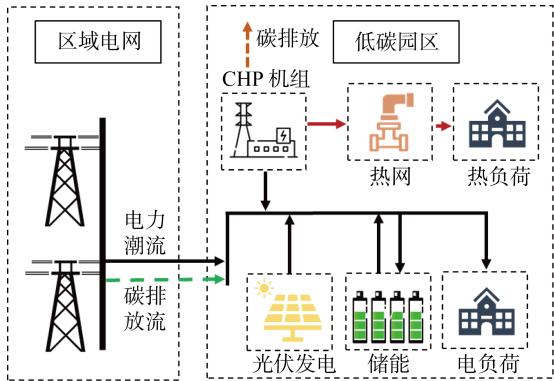


图 2 低碳园区系统架构

Fig. 2 Architecture of low-carbon park

2.2 热力系统等效储能特性分析

与电力系统源随荷动、发用平衡的特性不同,热力系统中热源通过热介质向热用户传递热能,并且存在较大的传输时延.因此,热力管网具备一定的被动储热能力,使得热源和热用户之间不需要满足发、用实时平衡的刚性约束,具有比较强的灵活性.

相对于背压式热电联产机组,抽汽式热电联产机组可调节范围更大,其运行范围如图 3 所示.图中:阴影区域为 CHP 机组运行范围;A、B、C、D、E 为临界运行点.但为优先满足系统热负荷,热电联产机组通常工作在“以热定电”的运行方式下,导致其出力调节范围有限,不利于系统中可再生能源的消纳.

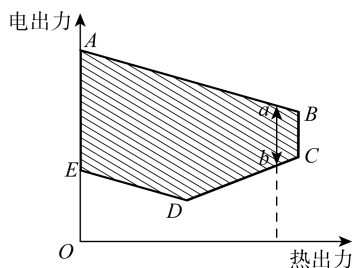


图 3 CHP 机组出力范围

Fig. 3 Output range of CHP unit

因此,可以利用热力系统的等效储能特性,通过提前调节热电联产机组的热出力来提高热电联产机组的电出力可调节空间.如图 4 所示,提前增加 CHP 机组热出力以降低当前时刻的热出力需求,从而将电出力运行范围曲线从 ab 平移至 cd , 增加系统调节能力.通过此种方式可以有效提高热电联产机组的电出力可调节空间,增加系统的可再生能源消纳能力并降低储能的配置需求和成本.

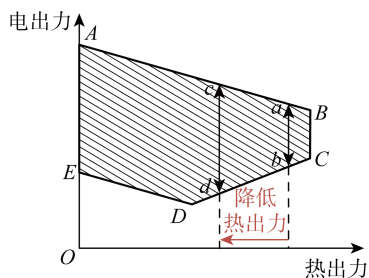


图 4 降低热出力后 CHP 机组出力范围

Fig. 4 Output range of CHP unit after reducing thermal output

3 低碳园区储能容量优化配置模型

3.1 目标函数

考虑热力系统等效储能特性的低碳园区储能容

量优化配置模型目标函数为配置储能电站后日均运行成本最小,其中,低碳园区的日均运行成本包括网供电购电成本、储能日均投资运行成本、CHP 机组运行成本和碳排放成本.目标函数具体表达式如下:

$$\min C_{\text{sys}} \quad \left. \begin{aligned} C_{\text{sys}} &= C_{\text{ES}}^{\text{inv}} + C_{\text{ES}}^{\text{om}} + C_{\text{CHP}}^{\text{om}} + C_{\text{pur}} + C_{\text{cb}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: C_{sys} 表示低碳园区的日均运行成本; $C_{\text{ES}}^{\text{inv}}$ 表示储能的日均投资成本; $C_{\text{ES}}^{\text{om}}$ 表示储能的日均运行维护成本; $C_{\text{CHP}}^{\text{om}}$ 表示 CHP 机组的日均运行维护成本; C_{pur} 表示电网购电成本; C_{cb} 表示系统碳排放成本.

各项成本的详细表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} C_{\text{ES}}^{\text{inv}} &= \frac{1}{365} (f_{\text{ES}}^{\text{cap}} E_{\text{ES}} + f_{\text{ES}}^{\text{pwr}} P_{\text{ES}}) \frac{r(1+r)^{T_{\text{ES}}}}{(1+r)^{T_{\text{ES}}} - 1} \\ C_{\text{ES}}^{\text{om}} &= \alpha_{\text{om}} h_{\text{ES}} \\ C_{\text{CHP}}^{\text{om}} &= \sum_{t \in T} m_{\text{CHP}} (\varphi_{\text{CHP}}^{\text{p}} P_{\text{CHP},t} + \varphi_{\text{CHP}}^{\text{h}} H_{\text{CHP},t}) \\ C_{\text{pur}} &= \sum_{t \in T} P_{\text{grid},t} Q_{\text{grid},t} \\ C_{\text{cb}} &= \sum_{t \in T} e_{\text{grid},t} P_{\text{grid},t} + \sum_{t \in T} k_{\text{CHP}} \left(P_{\text{CHP},t} + \frac{H_{\text{CHP},t}}{\delta_{\text{H-E}}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: $f_{\text{ES}}^{\text{cap}}$ 表示储能单位容量配置成本; $f_{\text{ES}}^{\text{pwr}}$ 表示储能单位功率配置成本; E_{ES} 表示储能配置容量; P_{ES} 表示储能配置功率; r 表示折现率; T_{ES} 表示储能使用寿命; α_{om} 表示储能系统单位运行时间的运行与维护成本; h_{ES} 表示储能系统运行时间; T 表示典型日所有时段的集合; m_{CHP} 表示 CHP 机组的燃料成本系数; $\varphi_{\text{CHP}}^{\text{p}}$ 表示 CHP 机组的发电燃料消耗系数; $\varphi_{\text{CHP}}^{\text{h}}$ 表示 CHP 机组的发热燃料消耗系数; $P_{\text{CHP},t}$ 和 $H_{\text{CHP},t}$ 分别表示时段 t 的 CHP 机组电出力和热出力; $P_{\text{grid},t}$ 表示时段 t 的电网购电功率; $Q_{\text{grid},t}$ 表示时段 t 的电网购电价格; $e_{\text{grid},t}$ 表示时段 t 的区域电网动态间接碳排放因子,可以通过上文提出的基于碳排放流理论的动态碳排放因子计算方法计算获取; k_{CHP} 表示 CHP 机组碳排放系数; $\delta_{\text{H-E}}$ 表示 CHP 机组热电转换系数.

3.2 约束条件

3.2.1 系统电功率平衡约束 系统应该时刻保持发、用电平衡,具体约束如下式所示:

$$P_{\text{grid},t} + P_{\text{PV},t} + P_{\text{ESg},t} + P_{\text{CHP},t} = P_{\text{load},t} + P_{\text{ESc},t} \quad (8)$$

式中: $P_{\text{PV},t}$ 、 $P_{\text{ESg},t}$ 分别表示时段 t 的光伏上网功率、储能发电功率; $P_{\text{load},t}$ 、 $P_{\text{ESc},t}$ 分别表示时段 t 的负荷功率和储能放电功率.

3.2.2 CHP 机组运行约束 CHP 机组在运行时电出力和热出力相互关联,并且电出力、热出力和燃料消耗均存在上、下限.具体约束如下式所示:

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{CHP},t} &\geq r_{\text{CHP}} H_{\text{CHP},t} \\ \underline{F}_{\text{CHP}} &\leq \varphi_{\text{CHP}}^{\text{p}} P_{\text{CHP},t} + \varphi_{\text{CHP}}^{\text{h}} H_{\text{CHP},t} \leq \bar{F}_{\text{CHP}} \\ \underline{H}_{\text{CHP}} &\leq H_{\text{CHP},t} \leq \bar{H}_{\text{CHP}} \\ \underline{P}_{\text{CHP}} &\leq P_{\text{CHP},t} \leq \bar{P}_{\text{CHP}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: r_{CHP} 表示 CHP 机组电出力和热出力关联系数; \bar{F}_{CHP} 、 $\underline{F}_{\text{CHP}}$ 分别表示 CHP 机组燃料消耗上、下限; \bar{H}_{CHP} 、 $\underline{H}_{\text{CHP}}$ 分别表示 CHP 机组热出力上、下限; \bar{P}_{CHP} 、 $\underline{P}_{\text{CHP}}$ 分别表示 CHP 机组电出力上、下限。

3.2.3 热力系统约束

(1) 热力系统的管道热平衡约束. 节点 k 的供水水温与热源节点的供水水温、管道等效隔热系数和环境温度相关, 而回水水温则与热源节点回水水温、管道等效隔热系数、环境温度和各节点质量流量相关, 并且均需要考虑传输延时. 而热功率则与供、回水水温相关. 具体约束如下式所示:

$$\left. \begin{aligned} c_{k,t}^{\text{sup}} &= \zeta_k c_{0,t-\tau_k}^{\text{sup}} + (1 - \zeta_k) c_{\text{amb}} \\ c_{k,t}^{\text{ret}} &= \frac{1}{m_0} \sum_{k \in K_{\text{net}}} m_k [\zeta_k c_{0,t-\tau_k}^{\text{ret}} + (1 - \zeta_k) c_{\text{amb}}] \\ H_{k,t}^{\text{L}} &= c_w m_k (c_{k,t}^{\text{sup}} - c_{k,t}^{\text{ret}}) \\ H_{\text{CHP},t} &= c_w m_0 (c_{0,t}^{\text{sup}} - c_{0,t}^{\text{ret}}) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: k 表示第 k 个供热网络节点; 0 表示热源节点; K_{net} 表示所有供热网络节点的集合; $c_{k,t}^{\text{sup}}$ 表示节点 k 在时段 t 的供水水温; $c_{k,t}^{\text{ret}}$ 表示节点 k 在时段 t 的回水水温; ζ_k 表示节点 k 的供热管道等效隔热系数; τ_k 表示节点 k 的供热管道传输延时; c_{amb} 表示环境温度; m_k 表示流过节点 k 供热管道的质量流量; c_w 表示水的比热容; $H_{k,t}^{\text{L}}$ 表示节点 k 在时段 t 的热负荷。

(2) 热力系统中供水和回水温度的变化范围约束, 表达式如下:

$$\begin{aligned} \underline{c}^{\text{sup}} &\leq c_{k,t}^{\text{sup}} \leq \bar{c}^{\text{sup}} \\ \underline{c}^{\text{ret}} &\leq c_{k,t}^{\text{ret}} \leq \bar{c}^{\text{ret}} \end{aligned}$$

其中: \bar{c}^{sup} 、 $\underline{c}^{\text{sup}}$ 分别表示供水水温的上、下限; \bar{c}^{ret} 、 $\underline{c}^{\text{ret}}$ 分别表示回水水温的上、下限。

3.2.4 储能系统运行约束 储能系统在运行中需要满足充放电功率约束和容量约束, 表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} u_{\text{ESc},t} + u_{\text{ESg},t} &\leq 1 \\ u_{\text{ESc},t} \underline{P}_{\text{ESc}} &\leq P_{\text{ESc},t} \leq u_{\text{ESc},t} \bar{P}_{\text{ESc}} \\ u_{\text{ESg},t} \underline{P}_{\text{ESg}} &\leq P_{\text{ESg},t} \leq u_{\text{ESg},t} \bar{P}_{\text{ESg}} \\ S_{\text{ES},t} &= S_{\text{ES},t-1} + \eta_{\text{ESc}} P_{\text{ESc},t} - P_{\text{ESg},t} / \eta_{\text{ESg}} \\ \underline{S}_{\text{ES}} &\leq S_{\text{ES},t} \leq \bar{S}_{\text{ES}} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: $u_{\text{ESc},t}$ 、 $u_{\text{ESg},t}$ 分别表示时段 t 的储能充、放电状态变量; \bar{P}_{ESc} 、 $\underline{P}_{\text{ESc}}$ 分别表示储能充电功率上、下限; \bar{P}_{ESg} 、 $\underline{P}_{\text{ESg}}$ 分别表示储能放电功率上、下限; $S_{\text{ES},t}$ 表示时段 t 的储能容量大小; η_{ESc} 、 η_{ESg} 分别表示储能充、放电效率; \bar{S}_{ES} 、 $\underline{S}_{\text{ES}}$ 分别表示储能容量上、下限。

3.3 模型线性化处理

从上述低碳园区储能容量优化配置模型中可以看出, 储能系统的运行约束会受储能配置结果影响, 因此模型存在着非线性问题. 为避免求解过程中出现非线性项, 本文采用大 M 法对非线性项进行线性化处理. 大 M 法又称惩罚法, 其原理是在模型引入人工变量 M (M 为一近似无穷大常数) 将非线性规划问题转化为混合整数线性规划问题. 利用大 M 法处理后的表达式^[11]如下:

$$\left. \begin{aligned} \underline{P}_{\text{ESc}} + (u_{\text{ESc},t} - 1)M &\leq P_{\text{ESc},t} \\ P_{\text{ESc},t} &\leq \bar{P}_{\text{ESc}} + (1 - u_{\text{ESc},t})M \\ -u_{\text{ESc},t}M &\leq P_{\text{ESc},t} \leq u_{\text{ESc},t}M \\ \underline{P}_{\text{ESg}} + (u_{\text{ESg},t} - 1)M &\leq P_{\text{ESg},t} \\ P_{\text{ESg},t} &\leq \bar{P}_{\text{ESg}} + (1 - u_{\text{ESg},t})M \\ -u_{\text{ESg},t}M &\leq P_{\text{ESg},t} \leq u_{\text{ESg},t}M \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

引入 M 后, 当储能处于充电状态, 即 $u_{\text{ESc},t} = 1$,

$u_{\text{ESg},t} = 0$ 时, 式(12)约束变为 $\underline{P}_{\text{ESc}} \leq P_{\text{ESc},t} \leq \bar{P}_{\text{ESc}}$ 和 $P_{\text{ESg},t} = 0$; 当储能处于放电状态, 即 $u_{\text{ESc},t} = 0$,

$u_{\text{ESg},t} = 1$ 时, 式(12)约束变为 $\underline{P}_{\text{ESg}} \leq P_{\text{ESg},t} \leq \bar{P}_{\text{ESg}}$ 和 $P_{\text{ESc},t} = 0$. 可以看出, 经过大 M 法处理后的约束与原始约束完全等价, 且其中的非线性项被转换为线性项, 降低了模型的求解难度。

考虑到线性化处理后的低碳园区储能容量优化配置模型混合整数线性规划问题, 因此本文选择采用商业优化软件 IBM ILOG CPLEX 对其求解。

4 算例分析

4.1 算例系统参数

本文算例系统选取我国某省内某一低碳园区为研究对象, 系统中包含分布式光伏、热电联产机组和 6 节点热力系统, 系统结构图如图 5 所示. 图中: D0~D5 为供热网络节点; HL1~HL3 为供热网络热负荷. 6 节点热力系统的中供水水温范围为 70~90 °C, 回水水温范围为 40~60 °C, D3、D4 和 D5 的传输延时分别为 1 h、30 min 和 30 min. 其余参数详见文献[12].

园区的典型日 24 h 光伏出力曲线如图 6 所示; 外购电的典型日 24 h 电价曲线如图 7 所示; 园区典

型日的电负荷和热负荷曲线如图 8 所示. 系统碳排放成本为 50 元/t, 配置储能类型为铅酸蓄电池, 其

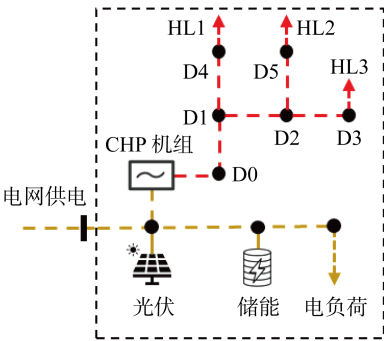


图 5 算例系统结构

Fig. 5 Architecture of test system

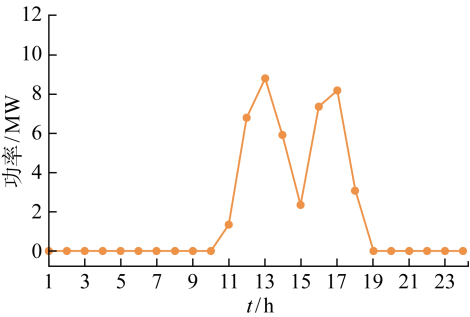


图 6 典型日光伏出力曲线

Fig. 6 Curve of typical solar photovoltaic output

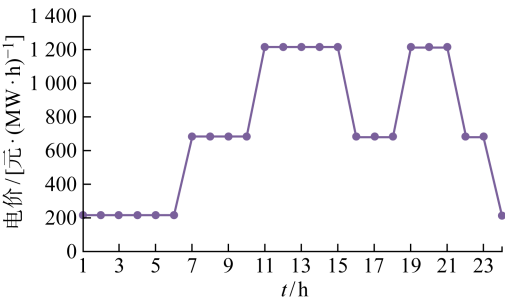


图 7 电价曲线

Fig. 7 Curve of electricity price

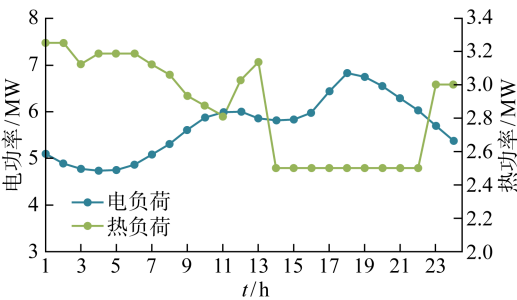


图 8 典型日负荷曲线

Fig. 8 Curves of typical daily load

单位容量成本为 100 万元/(MW·h), 单位功率成本为 120 万元/MW, 折现率为 8%, 储能使用寿命为 10 a. CHP 机组的碳排放因子 k_{CHP} 取 1.102, 即 CO_2 排放量为 1.102 t/(MW·h), 其余主要参数^[13]如表 1 所示.

表 1 CHP 机组参数

Tab. 1 Parameters of CHP unit

参数	取值
r_{CHP}	0.85
$\overline{F}_{\text{CHP}}/\text{m}^3$	18
$\underline{F}_{\text{CHP}}/\text{m}^3$	3
$m_{\text{CHP}}/(\text{元} \cdot \text{m}^{-3})$	71.4
$\varphi_{\text{CHP}}^{\text{p}}/[\text{m}^3 \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	2.4
$\varphi_{\text{CHP}}^{\text{h}}/[\text{m}^3 \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	0.95
$\overline{P}_{\text{CHP}}/\text{MW}$	4.5
$\underline{P}_{\text{CHP}}/\text{MW}$	0.85

4.2 园区所在区域动态碳排放因子计算

为精确计算园区所在区域的动态用电碳排放因子和用电间接碳排放量, 从而指导储能的低碳、经济配置, 本文基于中国某省级电网某日的实际潮流数据开展园区所在区域动态碳排放因子仿真计算.

省级电网省内的电力主要来源包括: ① 本地发电, 其中煤电是最主要的供能来源, 此外还包括燃气、垃圾发电、风电、光伏等电源类型; ② 区外送电, 区外来电主要包括内蒙古送入、山西送入、安徽送入和三峡水电送入等. 系统潮流数据来自 D5000 调控系统, 时间断面间隔为 1 h. 各类型机组的典型发电碳排放因子如表 2 所示.

表 2 各类型机组的典型发电碳排放因子

Tab. 2 Typical carbon emission factors for various types of power generator

机组类型	碳排放因子取值
超超临界 1 000 MW 级机组	0.793 8
超超临界 600 MW 级机组	0.806 7
超临界 600 MW 级机组	0.838 5
亚临界 300 MW 级机组	0.887 5
亚临界循环流化床 300 MW 级机组	0.917 1
超高压及以下机组	0.936 3
燃气机组	0.378 9
垃圾发电	1.108
沼气发电	0.23

根据省内发电机组出力数据、系统潮流数据、区外来电数据、各区域电力负荷数据、系统拓扑关系等,结合 1.2 节中给出的碳排放流计算方法,可以计算得到该省的动态用电碳排放因子.应用本文所提区域碳排放因子计算方法得到的该省份动态用电碳排放因子曲线如图 9 所示.

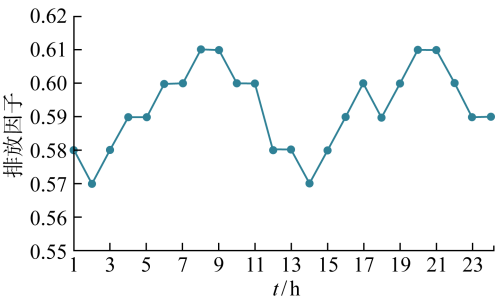


图 9 动态碳排放因子曲线

Fig. 9 Curve of dynamic carbon emission factor

4.3 园区储能优化配置

为验证本文所提考虑热力系统等效储能特性的低碳园区储能容量优化配置模型的有效性,设置以下几种场景进行对比分析.

场景 1 不配置储能系统,不考虑热力系统的等效储能能力.

场景 2 配置储能,不考虑热力系统的等效储能能力.

场景 3 配置储能,考虑热力系统的等效储能能力.

各场景下的系统规划结果如表 3 所示.

对比场景 1 和场景 2 的结果可以看出,配置一定容量的储能后,系统日均运行成本从 42 871.3 元降低至 37 084.1 元,下降了 5 787.2 元.此外,储能的加入增加了 10.85 MW · h 的新能源消纳量,降低了 6.33 t 的园区碳排放量.对比场景 2 和场景 3

表 3 规划结果

Tab. 3 Planning results

场景	规划结果				
	储能配置功率/MW	储能配置容量/(MW · h)	系统日均运行成本/元	碳排放量/t	弃风电量/(MW · h)
1	—	—	42 871.3	188.83	18.55
2	2.17	9.17	37 084.1	182.50	7.70
3	2.33	9.17	36 236.9	178.04	3.45

的结果可以看出,考虑热力系统等效储能能力之后,系统的日均运行成本进一步降低至 36 236.9 元,另外,碳排放量和弃风电量也均有所降低.

各场景下的园区电网运行结果如图 10~12 所示,其中储能功率为负时表示其当前工作于充电工况.

对比图 10 和图 11 可知,配置储能之后,储能系统会在电价较低和光伏大发的时段进行充电,并在电价较高的时段向园区提供电能,以减少该时段的电网购电量.通过此种方式,可以有效增加园区的光伏消纳量,并且降低电网购电成本,使园区的运行经济性得以提升.对比图 11 和图 12 可知,考虑热力系统的等效储能能力之后,CHP 机组的电出力可调节空间明显增大,使得弃光时段(12:00—17:00)的 CHP 机组电出力可以被进一步压低,从而增加系统的光伏消纳能力,提升系统运行经济性.

图 13 为场景 2 和场景 3 下的热力系统运行结果.可以看出,相对于场景 2,场景 3 中考虑了热力系统的等效储能能力,因此在系统出现弃光之前,CHP 机组提前调高了自身热出力,以降低弃光时段

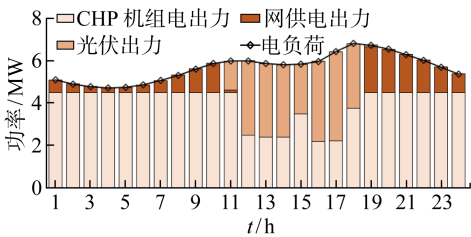


图 10 场景 1 下园区电网运行结果

Fig. 10 Operation results of power grid in Scenario 1

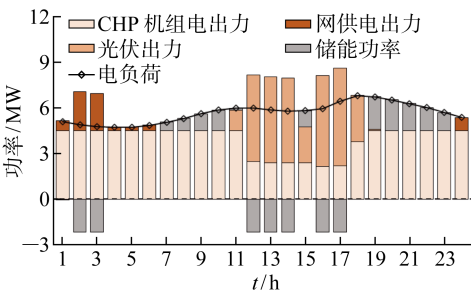


图 11 场景 2 下园区电网运行结果

Fig. 11 Operation results of power grid in Scenario 2

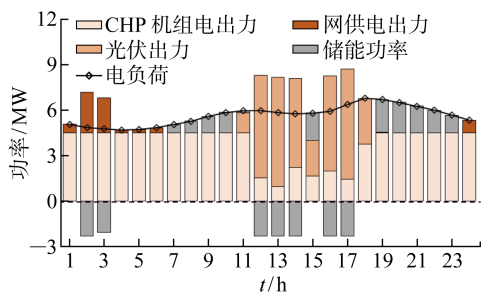


图 12 场景 3 下园区电网运行结果

Fig. 12 Operation results of power grid in Scenario 3

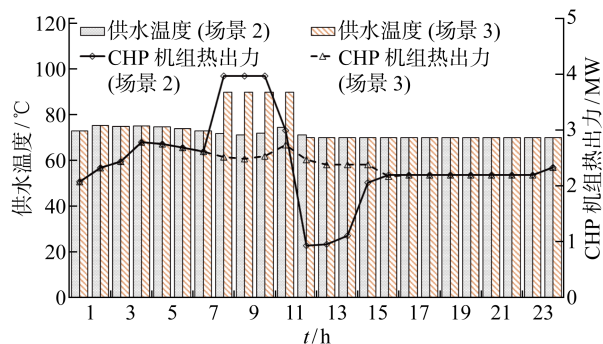


图 13 场景 2 和场景 3 下热力系统运行结果

Fig. 13 Operation results of thermal system in Scenario 2 and 3

的热功率需求。通过此种方式可以有效增加弃光时段 CHP 机组的电出力下调空间,提升系统光伏消纳量。

5 结论

首先通过碳排放流理论实现了园区网供电间接碳排放的精准计算,然后,充分考虑了低碳园区中热力系统的等效储能特性,提出了一种低碳园区储能容量优化配置方法,最后对本文所提方法进行了算例验证,所得结论如下:

(1) 配置储能可以在一定程度上提升低碳园区可再生能源消纳水平,达到节能、降碳和提升经济效益的效果。此外,利用园区中热力系统具备的能量存储特性,将其作为广义储能资源引入到多能源云储能模式中,可以盘活低碳园区中的沉睡型储能资源,为低碳园区提供储能服务,并进一步优化储能充放电行为,降低园区储能使用成本,提升其运行经济效益。

(2) 碳排放流理论可以厘清电力系统全环节碳排放的流动与分布情况,通过碳排放流理论计算园区所在区域的动态排放因子,可以实现园区用电间接碳排放的精确分析,从而进一步实现储能充放电

行为优化,降低碳排放的同时增加园区运行效益。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家能源局关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见[EB/OL]. (2022-02-10)[2022-11-07]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202202/t20220210_1314511.html?code=&state=123. National Development and Reform Commission. Opinions of the National Energy Administration on improving the institutional mechanisms and policy measures for the green and low-carbon transformation of energy[EB/OL]. (2022-02-10)[2022-11-07]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202202/t20220210_1314511.html?code=&state=123.
- [2] 张敏, 王金浩, 常潇, 等. 考虑可再生能源不确定性的热-电耦合微能源系统多目标鲁棒规划方法[J]. 中国电力, 2021, 54(4): 119-129. ZHANG Min, WANG Jinhao, CHANG Xiao, *et al.* A multi-objective robust planning method for thermal-electrical coupling micro-energy system considering the uncertainty of renewable energy[J]. *Electric Power*, 2021, 54(4): 119-129.
- [3] 熊宇峰, 陈来军, 郑天文, 等. 考虑电热气耦合特性的低碳园区综合能源系统氢储能优化配置[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 31-38. XIONG Yufeng, CHEN Laijun, ZHENG Tianwen, *et al.* Optimal configuration of hydrogen energy storage in low-carbon park integrated energy system considering electricity-heat-gas coupling characteristics[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(9): 31-38.
- [4] 周立立, 向月, 陈凌天. 基于风险-收益分析的用户侧储能容量经济配置研究[J]. 中国电力, 2021, 54(9): 187-197. ZHOU Lili, XIANG Yue, CHEN Lingtian. Research on economic allocation of user-side energy storage capacity based on risk-benefit analysis[J]. *Electric Power*, 2021, 54(9): 187-197.
- [5] LIU X. Research on optimal placement of low-carbon equipment capacity in integrated energy system considering carbon emission and carbon trading[J]. *International Journal of Energy Research*, 2022, 46(14): 20535-20555.
- [6] 李姚旺, 张宁, 张世旭, 等. 面向电力系统的多能源云储能模式: 基本概念与研究展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2179-2190. LI Yaowang, ZHANG Ning, ZHANG Shixu, *et al.* Multi-energy cloud energy storage for power sys-

tems; Basic concepts and research prospects[J]. **Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering**, 2023, 43(6): 2179-2190.

[7] 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.

ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qian Yao, *et al.* Preliminary theoretical investigation on power system carbon emission flow[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2012, 36(7): 38-43.

[8] 周天睿,康重庆,徐乾耀,等. 电力系统碳排放流的计算方法初探[J]. **电力系统自动化**, 2012, 36(11): 44-49.

ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qian Yao, *et al.* Preliminary investigation on a method for carbon emission flow calculation of power system[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2012, 36(11): 44-49.

[9] 周天睿,康重庆,徐乾耀,等. 碳排放流在电力网络中分布的特性与机理分析[J]. **电力系统自动化**, 2012, 36(15): 39-44.

ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qian Yao, *et al.* Analysis on distribution characteristics and mechanisms of carbon emission flow in electric power network[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2012, 36(15): 39-44.

[10] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [EB/OL]. (2020-07-01) [2022-08-19]. http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006_gl/index.html.

[11] 蔡杰,张松岩,杜治,等. 含光热集热模块的先进绝热压缩空气储能系统容量配置策略[J]. **电力自动化设备**, 2020, 40(7): 165-176.

CAI Jie, ZHANG Songyan, DU Zhi, *et al.* Capacity allocation strategy of advanced adiabatic compressed air energy storage system with solar thermal collector module[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2020, 40(7): 165-176.

[12] LU S, GU W, MENG K, *et al.* Thermal inertial aggregation model for integrated energy systems[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2019, 35(3): 2374-2387.

[13] 张磊,罗毅,罗恒恒,等. 基于集中供热系统储热特性的热电联产机组多时间尺度灵活性协调调度[J]. **中国电机工程学报**, 2018, 38(4): 985-998.

ZHANG Lei, LUO Yi, LUO Hengheng, *et al.* Scheduling of integrated heat and power system considering multiple time-scale flexibility of CHP unit based on heat characteristic of DHS[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2018, 38(4): 985-998.

(本文编辑:王 一 凡)