

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240852

考虑电-氢混合储能电-热综合能源系统最优规划

黄元平, 苏睿, 何国彬, 罗宏波, 杨金新, 施铭涛, 李灵龙

(云南电网有限责任公司大理供电局, 云南 大理 671000)

摘要: 对电-热综合能源系统(electric heat integrated energy systems, EHIES)中设备进行合理的规划能够有效提高其运行经济性和稳定性。为此提出基于非支配性排序遗传算法 III (non-dominated sorting genetic algorithm III, NSGA-III)的 EHIES 多目标规划模型, 以规划成本、区域供热网(district heating network, DHN)节点供热温度波动和主动配电网(active distributed network, ADN)节点电压波动为目标函数, 采用以热定电的方法确定 EHIES 耦合设备的输出功率。此外, 设计基于 13 节点的 DHN 和 IEEE-33 标准测试节点的仿真实验, 并将优化后的 EHIES 配置方案重新代入仿真网络, 以验证配置结果能够提高 ADN 负荷的稳定性。实验结果表明, 与初始状态相比, 采用该配置方法 EHIES 的排放成本降低了 40.75%, DHN 供热温度波动降低了 9.37%, ADN 电压波动降低了 53.34%。
关键词: 电-热综合能源系统; 电-氢混合储能系统; 最优规划; NSGA-III 算法; 电压波动

Optimal planning of electric-heat integrated energy systems considering electric-hydrogen hybrid energy storage

HUANG Yuanping, SU Rui, HE Guobin, LUO Hongbo, YANG Jinxin, SHI Mingtao, LI Linglong
(Dali Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Dali 671000, China)

Abstract: Reasonable planning of equipment in electric-heat integrated energy systems (EHIES) can effectively improve both economic efficiency and operational stability. This paper proposes a multi-objective planning model for EHIES based on non-dominated sorting genetic algorithm III (NSGA-III), with planning cost, district heating network (DHN) node temperature fluctuation, and active distributed network (ADN) node voltage fluctuation as objective functions. A heat-determined electric dispatch method is employed to determine the output power of the coupling devices in EHIES. In addition, simulation experiments are designed using a 13-node DHN and the IEEE-33 standard test networks. The optimized EHIES configuration scheme is re-integrated into the simulation networks to verify its effectiveness in improving ADN load stability. Experimental results show that, compared with the initial state, the proposed configuration method reduces EHIES emission costs by 40.75%, DHN heating temperature fluctuations by 9.37%, and ADN voltage fluctuations by 53.34%.

This work is supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (No. YNKJXM20230337).

Key words: electric-heat integrated energy system; electric-hydrogen hybrid energy storage system; optimal planning; NSGA-III algorithm; voltage fluctuation

0 引言

为实现“双碳”目标, 缓解能源危机, 能源系统正在加速转型。由单一类型的子系统组成的传统供能系统存在碳排放高、能源利用率低的问题^[1-5]。并且在当前背景下, 主动配电网(active distributed

network, ADN)、区域供热网(district heating network, DHN)等多种关键基础设施的联系日益紧密, 发展综合能源系统(integrated energy system, IES)势在必行^[6-10]。

现有的研究多将 IES 视作能源枢纽, 通过耦合矩阵表征系统中的能量输入和输出关系, 考虑各子系统之间的能量平衡关系。为了实现 IES 低碳经济调度, 文献[11]采用主从博弈的方法提升 IES 的运行经济性, 同时得到多种供能设备的调度方案。文献

基金项目: 南方电网公司科技项目资助(YNKJXM20230337):
“多能互补低碳园区综合能源系统关键技术研究与应用”

[12]提出一种考虑风电消纳的含电转气和碳捕集系统(power to gas-carbon capture and storage, P2G-CCS)虚拟电厂优化调度方案。文献[13]考虑光热电站、电转气等设备建立 IES 模型, 并以系统运行成本最小为目标优化 IES 运行方式。文献[14]综合考虑高速公路服务区上的多种负荷需求, 采用融合遗传算法优化 IES 的总成本。文献[15]对天然气混氢园区中的电制氢设备进行优化配置, 以投资成本、运行成本和碳交易成本为目标, 优化电转氢设备的容量, 提高 IES 整体经济性。文献[16]考虑经济、供能可靠性及碳排放的 IES 容量规划方案, 但 IES 供能可靠性采用成本惩罚描述。

上述研究主要对 IES 运行问题进行了优化, 并以单一目标对 IES 中设备的容量进行规划, 但忽略了供能网络的稳定。IES 运行过程中涉及到热电联产机组(combined heat and power, CHP)等多种能源转换设备及分布式电源(distributed generation, DG)、电动汽车等新能源设备。目前以清洁能源为代表的分布式电源正在大面积普及, 其出力受天气因素影响较大。现有的研究表明, 在配电网中无序增配 DG 或者电动汽车充电站等设施会显著增加 ADN 的负荷, 降低稳定性^[17-20]。因此, IES 中的能源耦合设备对能量的消纳和输出会对 ADN 造成一定的影响。电力系统作为 IES 中最关键的能源耦合网络, 需要优先考虑其可靠性。其次需要保证电力系统和其他供能网络供能的经济性和用户用能的舒适性。

储能系统(energy storage system, ESS)能够凭借其高效的削峰填谷能力提高 ADN 运行的稳定性。电池储能系统(battery energy storage system, BESS)是使用最为广泛的 ESS, 在解决短时间尺度上平衡需求、平滑 DG 出力曲线和提高输电设施利用率等场景中有着重要作用。同时, 氢气储能系统(hydrogen energy storage system, HESS)是一种以氢气为储能介质的新型储能系统, 由储氢罐、电解池等结构组成。HESS 主要副产物为氢气和水, 具有无碳和高清洁性的特点。因此, 为了满足多能负荷下的平衡需求, 需要合理地配置 ESS。在现有的 IES 与 ESS 联合规划中, 文献[21]在 IES 中配置液态空气储能, 以多种混合成本为目标函数, 并基于混合整数线性规划模型进行求解, 得出了配置储能能够有效降低 IES 运行碳排放的结论。文献[22]提出含氢储能的 IES 热电优化模型, 以 IES 运行成本最低为目标函数, 优化 IES 系统各设备出力。文献[23]构建了双层优化模型, 上下层分别以 ESS 经济性最优和 IES 最优低碳运行为目标函数。文献[24]利用含有电-氢混合储能系统的 IES 提高太阳能的消纳, 以经济性

和环保性为目标函数进行优化, 实现能量的高效利用。上述文献在联合配置 ESS 和 IES 中多以经济指标和碳排放量为目标, 而忽略了设备接入网络所带来的影响。

本文提出了一种电-热综合能源系统(electric heat integrated energy system, EHIES)多目标优化配置模型。该模型综合考虑了各设备耦合运行对配置 EHIES 的影响, 采用非支配性排序遗传算法 III(non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA-III)优化 EHIES 中各个设备在对应供能网络的最优接入位置和接入容量, 目的在于提高 EHIES 的经济性和稳定性。本文在 DHN 中配置 CHP 机组、电热锅炉(electric boilers, EB)和燃气锅炉(gas-fired boilers, GB), 在已含有分布式电源的 ADN 中配置电-氢混合储能系统。以 EHIES 规划成本、DHN 节点供热温度波动和 ADN 节点电压波动为目标函数, 并采用以热定电的方法确定 EHIES 耦合设备的输出功率。此外, 本文设计了基于 13 节点的供热网和 IEEE-33 标准测试节点的仿真实验以验证该优化配置方法的有效性。

1 EHIES 模型

本文研究的 EHIES 具体模型如图 1 所示。该模型在 DHN 侧配置了 CHP 机组、EB 和 GB, 在 ADN 侧考虑 DG 的情况下配置了电-氢混合储能系统。本文中的电能主要由可再生能源和上级电网供给, 热能由电热耦合设备产出, 天然气全部由外部购买。

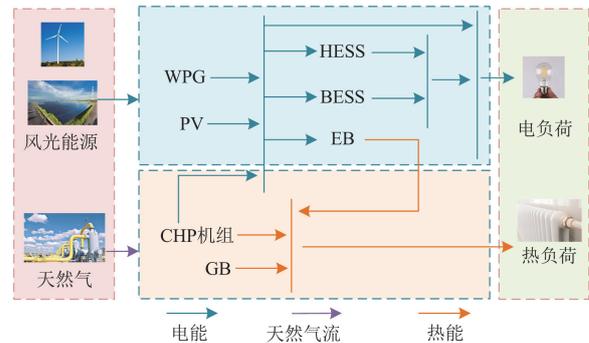


图 1 EHIES 结构示意图

Fig. 1 EHIES structure diagram

1.1 ADN 设备

1.1.1 DG 模型

在 EHIES 中配置光伏(photovoltaics, PV)和风力发电(wind power generation, WPG)能从一定程度上降低系统的碳排放, 二者的输出功率分别为

$$P_{PV} = P_{st} \cdot \frac{I_{ac}}{I_{st}} \cdot [1 + \alpha_T (T_{ac} - T_{st})] \quad (1)$$

$$P_{\text{WPG}} = \begin{cases} 0, & v < v_{\text{cn}} \text{ 或 } v > v_{\text{ct}} \\ P_{\text{WPG}}^{\text{R}} \cdot \frac{v - v_{\text{cn}}}{v_{\text{R}} - v_{\text{cn}}}, & v_{\text{cn}} \leq v < v_{\text{R}} \\ P_{\text{WPG}}^{\text{R}}, & v_{\text{R}} \leq v \leq v_{\text{ct}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{pv} 和 P_{st} 分别为 PV 的实际输出功率和标准状态(太阳辐照度 $I_{\text{st}} = 1000 \text{ W/m}^2$, 温度 $T_{\text{st}} = 25^\circ\text{C}$) 下的输出功率; T_{ac} 和 I_{ac} 分别为实际工作状态下的温度和太阳辐照度; α_{T} 为功率温度系数; P_{WPG} 、 $P_{\text{WPG}}^{\text{R}}$ 分别为 WPG 的实际输出功率和额定功率; v 、 v_{R} 、 v_{cn} 和 v_{ct} 分别为 WPG 的实际风速、额定风速、切入风速和切出风速。

1.1.2 BESS 模型

本文中 BESS 以锂电池作为储能介质, 其自放电系数非常小, 可以忽略不计^[24], 具体充放电模型如式(3)所示。

$$\begin{cases} E_{\text{B}}^i(t+1) = E_{\text{B}}^i(t) + P_{\text{B,cha}}^i(t) \cdot \eta_{\text{cha}} \cdot \Delta t, \text{ 充电时} \\ E_{\text{B}}^i(t+1) = E_{\text{B}}^i(t) - \frac{P_{\text{B,dis}}^i(t) \cdot \Delta t}{\eta_{\text{dis}}}, \text{ 放电时} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $E_{\text{B}}^i(t)$ 为第 i 台 BESS 在 t 时刻的容量; $P_{\text{B,cha}}^i(t)$ 、 $P_{\text{B,dis}}^i(t)$ 分别为第 i 台 BESS 在 t 时刻的充、放电功率; η_{cha} 、 η_{dis} 分别为 BESS 充、放电效率; Δt 表示一个时间段。

1.1.3 HESS 模型

电解槽(electrolytic cell, EC)、储氢罐(hydrogen storage tank, HST)和燃料电池(fuel cell, FC)共同组成了 HESS。具体数学模型如式(4)所示。

$$\begin{cases} m_{\text{HST}}^i(t+1) = m_{\text{HST}}^i(t) + \frac{P_{\text{EC}}^i(t) \cdot \Delta t}{\eta_{\text{h}}/\eta_{\text{EC}}}, \text{ 充电时} \\ m_{\text{HST}}^i(t+1) = m_{\text{HST}}^i(t) - \frac{P_{\text{FC}}^i(t) \cdot \Delta t}{\eta_{\text{h}}\eta_{\text{FC}}}, \text{ 放电时} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $m_{\text{HST}}^i(t)$ 为 t 时刻第 i 个 HST 存储的氢气的质量; $P_{\text{EC}}^i(t)$ 为 t 时刻第 i 个 EC 消耗的电功率; $P_{\text{FC}}^i(t)$ 为 t 时刻第 i 个 FC 的输出功率; η_{h} 、 η_{EC} 、 η_{FC} 分别为氢气的热值常数、EC 的转换效率和 FC 的发电效率。

1.2 DHN 设备

$$\begin{cases} H_{\text{CHP}}(t) = \eta_{\text{ter}} \cdot \eta_{\text{wr}} \cdot P_{\text{CHP}}(t) \\ H_{\text{EB}}(t) = \eta_{\text{EB}} \cdot P_{\text{EB}}(t) \\ H_{\text{GB}}(t) = \eta_{\text{GB}} \cdot V_{\text{GB}}(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $H_{\text{CHP}}(t)$ 、 $H_{\text{EB}}(t)$ 、 $H_{\text{GB}}(t)$ 分别为 CHP 机组、

EB 和 GB 在 t 时刻输出的热功率; η_{ter} 、 η_{wr} 分别为 CHP 机组的热电比和余热回收系数; η_{EB} 、 η_{GB} 分别为 EB 和 GB 的热转换效率; $P_{\text{CHP}}(t)$ 为 t 时刻 CHP 机组输出的电功率; $P_{\text{EB}}(t)$ 为 t 时刻 EB 消耗的电功率; $V_{\text{GB}}(t)$ 为 t 时刻 GB 消耗天然气的体积。

1.3 供热系统能流计算

在供热系统中, 负荷节点消耗的热功率由节点质量流率、节点供热温度和节点回热温度决定, 计算方法如式(6)所示。

$$H^n = c_p \cdot m_q^n \cdot (T_s^n - T_r^n) \quad (6)$$

式中: n 为 DHN 节点号; H 为节点消耗的热功率; c_p 为水的比热容; m_q^n 为节点 n 质量流率, 单位为 kg/s ; T_s^n 、 T_r^n 分别为节点 n 供热温度和节点回热温度。

在负荷节点消耗热功率后, 热媒温度下降, 负荷节点处的回热温度与出口温度(T_o)相等。其余节点的回热温度则受到节点质量流率和水温的影响, 计算方法如式(7)所示。

$$(\sum m_{\text{out}}^n) T_{\text{out}}^n = \sum (m_{\text{in}}^n \cdot T_{\text{in}}^n) \quad (7)$$

式中: m_{in}^n 、 m_{out}^n 分别为流入、流出节点 n 的质量流率; T_{in}^n 、 T_{out}^n 分别为流入、流出节点 n 的热媒温度。

此外, 管道的起点和终点之间的热媒温度关系如式(8)所示。

$$T_{\text{end}}^p - T_e = (T_{\text{start}}^p - T_e) \cdot e^{-\frac{\lambda L_p}{c_p m_p}} \quad (8)$$

式中: T_{end}^p 、 T_{start}^p 分别为管道 p 的末端温度和首端温度; T_e 为管道所处位置的环境温度; L_p 为管道 p 的长度; m_p 为管道 p 的质量流率; λ 为管道单位长度的总传热系数。

根据式(6)一式(8)可计算得到供热系统中所有节点和管道的质量流率、供热温度、回热温度及出口温度。

2 EHIES 规划模型

2.1 目标函数

2.1.1 EHIES 规划成本

EHIES 规划成本由各个设备的总投资成本(total configuration cost, TC)、维护成本(maintenance cost, MC)、运行成本(operation cost, OC)、污染物排放成本(pollutant emission cost, PC)和替换成本(replacement cost, RC)组成, 如式(9)所示。

$$\min f_1 = c_{\text{TC}} + c_{\text{MC}} + c_{\text{OC}} + c_{\text{RC}} + c_{\text{PC}} \quad (9)$$

式中: f_1 为第一个目标函数, 表示 EHIES 规划成本;

c_{TC} 为总投资成本; c_{MC} 为维护成本; c_{OC} 为运行成本; c_{RC} 为替换成本; c_{PC} 为污染物排放成本。

其中, PV 和 WPG 设备为 ADN 既有设备, 不参与规划。因此, ADN 侧设备仅需要考虑 ESS 的最优规划。

1) 总投资成本

$$\begin{cases} c_{TC} = c_{TC}^{DHN} + c_{TC}^{ESS} \\ c_{TC}^{DHN} = \sum_{a=1}^{N_a^{DHN}} [\beta_{CRF}^{DHN,a} \cdot \sum_{i=1}^{N_{a,i}^{DHN}} (c_{E,a,i}^{DHN} \cdot E_{a,i}^{DHN})] \\ c_{TC}^{ESS} = \sum_{a=1}^{N_a^{ESS}} [\beta_{CRF}^{ESS,a} \cdot \sum_{i=1}^{N_{a,i}^{ESS}} (c_{E,a,i}^{ESS} \cdot E_{a,i}^{ESS} + c_{P,a,i}^{ESS} \cdot P_{a,i}^{ESS})] \end{cases} \quad (10)$$

式中: c_{TC}^{DHN} 、 c_{TC}^{ESS} 分别为 DHN 和 ESS 的总投资成本; $N_{a,i}^{DHN}$ 、 $N_{a,i}^{ESS}$ 分别为 DHN 和 ESS 中安装的第 a 类设备中, 编号为 1 至 i 设备的总数量; N_a^{DHN} 、 N_a^{ESS} 分别为 DHN 和 ESS 中安装的第 a 类设备数量; $E_{a,i}^{DHN}$ 、 $E_{a,i}^{ESS}$ 分别为该设备的额定容量; $P_{a,i}^{ESS}$ 为 ESS 的额定功率; $c_{E,a,i}^{DHN}$ 、 $c_{E,a,i}^{ESS}$ 分别表示该设备的单位容量成本; $c_{P,a,i}^{ESS}$ 为该设备的单位功率成本; $\beta_{CRF}^{DHN,a}$ 、 $\beta_{CRF}^{ESS,a}$ 分别为 DHN 和 ESS 中第 a 类设备资本回收系数。

2) 维护成本

$$\begin{cases} c_{MC} = c_{MC}^{DHN} + c_{MC}^{ESS} \\ c_{MC}^{DHN} = \sum_{a=1}^{N_a^{DHN}} (\beta_{MC}^{DHN,a} \cdot T_{DHN}^a \cdot \sum_{i=1}^{N_{a,i}^{DHN}} P_{a,i}^{DHN}) \\ c_{MC}^{ESS} = \beta_{MC}^{ESS} \cdot c_{TC}^{ESS} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\beta_{MC}^{DHN,a}$ 为 DHN 中第 a 类设备的维护成本系数; β_{MC}^{ESS} 为 ESS 的维护成本系数; T_{DHN}^a 为 DHN 中第 a 类设备的工作时间; $P_{a,i}^{DHN}$ 为 DHN 中安装的第 a 类设备第 i 台的工作总功率。

3) 运行成本

$$\begin{cases} c_{OC} = c_{OC}^{DHN} + c_{OC}^{ESS} \\ c_{OC}^{DHN} = \sum_{t=1}^T [c_{br}^{DHN} \cdot H_{br}^{DHN}(t) + c_q^{DHN} \cdot H_q^{DHN}(t)] \\ c_{OC}^{ESS} = \sum_{t=1}^T [c_{buy}^{ESS} \cdot P_{buy}^{ESS}(t) - c_{sell}^{ESS} \cdot P_{sell}^{ESS}(t)] \end{cases} \quad (12)$$

式中: c_{OC}^{DHN} 和 c_{OC}^{ESS} 分别为 DHN 和 ESS 的 OC 成本; T 为总运行时间; c_{br}^{DHN} 、 c_q^{DHN} 分别为 DHN 设备补燃和弃热的单位功率成本; $H_{br}^{DHN}(t)$ 、 $H_q^{DHN}(t)$ 分别为 t 时刻 DHN 设备补燃和弃热功率; c_{buy}^{ESS} 、 c_{sell}^{ESS} 分别为 ESS 向电网购电和售电的单位功率成本; $P_{buy}^{ESS}(t)$ 、 $P_{sell}^{ESS}(t)$ 分别为 t 时刻 ESS 向电网购电和售电的功率。

4) 替换成本

在 ESS 的使用周期中, 需要对其关键设备进行

替换以保证 ESS 正常工作, 例如 BESS 的锂电池组等。

$$c_{RC} = \left[\sum_{n=1}^{N_{lc}^{ESS}} \left(\frac{1-\omega}{1-\gamma} \right)^n \right] \cdot c_{TC}^{ESS} \quad (13)$$

式中: N_{lc}^{ESS} 为 ESS 在生命周期内部件更换次数; ω 为年成本下降率; γ 为折现率。

5) 污染物排放成本

DHN 的运行过程中会向大气排放污染气体, 主要成分为氮氧化物、二氧化硫和二氧化碳。由于硫化物在污染气体中占比极少, 因此本文不作考虑。具体排放成本如式(14)所示。

$$\begin{aligned} c_{PEC} = \sum_{t=1}^T [& (c_{NO_x}^{GB} \cdot \beta_{NO_x}^{GB} + c_{CO_2}^{GB} \cdot \beta_{CO_2}^{GB}) \cdot H_{GB}(t) + \\ & (c_{NO_x}^{CHP} \cdot \beta_{NO_x}^{CHP} + c_{CO_2}^{CHP} \cdot \beta_{CO_2}^{CHP}) \cdot H_{CHP}(t) + \\ & (c_{NO_x}^{buy} \cdot \beta_{NO_x}^{buy} + c_{CO_2}^{buy} \cdot \beta_{CO_2}^{buy}) \cdot H_{buy}(t)] \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $c_{NO_x}^{GB}$ 、 $c_{NO_x}^{CHP}$ 和 $c_{NO_x}^{buy}$ 分别为 GB、CHP 和购热功率所排放氮氧化物的单位价格; $c_{CO_2}^{GB}$ 、 $c_{CO_2}^{CHP}$ 和 $c_{CO_2}^{buy}$ 分别为 GB、CHP 和购热功率所排放二氧化碳的单位价格; $\beta_{NO_x}^{GB}$ 、 $\beta_{NO_x}^{CHP}$ 和 $\beta_{NO_x}^{buy}$ 分别为 GB、CHP 和购热功率所排放氮氧化物的排放系数; $\beta_{CO_2}^{GB}$ 、 $\beta_{CO_2}^{CHP}$ 和 $\beta_{CO_2}^{buy}$ 分别为 GB、CHP 和购热功率所排放二氧化碳的排放系数; $H_{GB}(t)$ 、 $H_{CHP}(t)$ 、 $H_{buy}(t)$ 分别为 t 时刻 GB、CHP 输出的热功率和购买的热功率。

2.1.2 DHN 供热质量

本文采用 DHN 的节点供热温度偏差描述供热质量, 如式(15)所示。

$$\min f_2 = \sum_{n=1}^{N_{day}} \sum_{i=1}^{N_{node}} \sqrt{\sum_{t=1}^T [T_s^{n,i}(t) - T_s^{st}(t)]^2} / N_{day} \quad (15)$$

式中: f_2 为第二个目标函数, 表示 DHN 供热质量; N_{day} 为典型日数量; N_{node} 为 DHN 节点数量; $T_s^{n,i}$ 为第 n 个典型日内第 i 个节点的供热温度; T_s^{st} 为标准节点供热温度, 本文取 100 °C。

2.1.3 ADN 节点电压波动

$$\min f_3 = \sum_{n=1}^{N_{day}} \sum_{i=1}^{N_{node}} \sqrt{\sum_{t=1}^T \frac{[U^{n,i}(t) - \bar{U}^{n,i}]^2}{T-1}} / N_{day} \quad (16)$$

式中: f_3 为第三个目标函数, 表示 ADN 节点电压波动; $U^{n,i}$ 为第 n 个典型日内第 i 个节点的电压; $\bar{U}^{n,i}$ 为第 n 个典型日内第 i 个节点的平均电压。

2.2 约束条件

2.2.1 负荷平衡约束

$$\begin{cases} H_{load} = H_{CHP} + H_{EB} + H_{GB} + H_{buy} \\ P_{load} = P_{ESS} + P_{PV} + P_{WPG} + P_{buy}^{ESS} - P_{sell}^{ESS} \end{cases} \quad (17)$$

式中： H_{load} 、 P_{load} 分别为 EHIES 中的热负荷和电负荷； P_{ESS} 为 ESS 输出功率。

2.2.2 节点电压约束

$$U_{\min}^i \leq U^i \leq U_{\max}^i \quad (18)$$

式中： U_{\max}^i 、 U_{\min}^i 分别为节点 i 电压的上、下限。

2.2.3 设备安装约束

在 ADN 中，1 号节点为 ADN 首位节点，该节点是与上级电网的连接点，该节点不配置任何设备。此外，同一类型的 ESS 不会配置在同一节点。

3 NSGA-III

NSGA-III 通过引入大量分布在决策空间中的参考点维持种群的多样性。该算法能够更有效地平衡种群多样性和算法收敛能力之间的关系。NSGA-III 在解决非线性多目标优化问题时能够得到高质量且更广泛的 Pareto 解集^[25]。具体步骤如下所述。

1) 依据优化问题设置决策变量的上下限并初始化种群。

2) 选择参考点，选择方法如式(19)所示。

$$J = \begin{pmatrix} M + p - 1 \\ p \end{pmatrix} \quad (19)$$

式中： J 为参考点； M 为目标函数数量； p 为决策空间的分区个数。

3) 将初始种群进行多层次排序，并对各层级中的种群按非支配程度进一步排序。

4) 从各个层级中选择父代解通过交叉变异操作生成下一代种群，这些种群组成新的子代种群。

5) 对子代种群个体进行归一化，基于欧氏距离计算个体与参考点之间的距离并确定关联度，并填充小生境。

6) 保留非支配排序首位的个体，其数量不超过外部归档集最大容量。

4 决策方法

为了避免因决策者主观因素造成的决策失误，本文采用基于熵权法的灰靶决策从 NSGA-III 的 Pareto 解集中得到最佳折衷解^[26]，具体步骤如下。

1) 建立样本矩阵 \mathbf{X}

$$\mathbf{X} = (x_i^j)_{n \times m} \quad (20)$$

式中： x_i^j 为来自样本矩阵 \mathbf{X} 的第 i 个解的第 j 个适应度函数值； n 表示解的数量； m 表示决策目标的数量。

2) 计算靶心向量

利用算子 r_i 和样本矩阵 \mathbf{X} 得到决策矩阵 \mathbf{Y} 。

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_i^j, i = 1, 2, \dots, m \quad (21)$$

决策矩阵 \mathbf{Y} 计算公式为

$$\mathbf{Y} = \frac{r_i - x_i^j}{\max \left\{ \max_{1 \leq i \leq n} \{x_i^j\} - r_i, r_i - \min_{1 \leq i \leq n} \{x_i^j\} \right\}} \quad (22)$$

基于式 (22)，将决策矩阵 \mathbf{Y} 中 $y_i^0 = \min \{y_i^j | 1 \leq i \leq n\}$ ， $j = 1, 2, \dots, m$ 定义为靶心。

3) 熵值、权重及靶心距离计算

$$E_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n \left[\frac{x_i^j}{\sum_{j=1}^n x_i^j} \ln \left(\frac{x_i^j}{\sum_{j=1}^n x_i^j} \right) \right] \quad (23)$$

$$\omega_i = (1 - E_i) / \sum_{i=1}^m (1 - E_i) \quad (24)$$

式中： E_i 、 ω_i 分别为第 i 个解的熵值和权重。基于得到的权重值 ω_i ，并利用马氏距离计算各解到靶心的距离，如式(25)所示。

$$M_D^i = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (y_i^j - y^0)^T \Sigma^{-1} (y_i^j - y^0)} \quad (25)$$

式中： M_D^i 为第 i 个解对应的马氏距离； y_i^j 为决策矩阵中第 i 行、第 j 列的元素； Σ 为协方差矩阵； y^0 为灰靶的靶心。

在 NSGA-III 的 Pareto 解集中的每组解均可视为一种独立的解决策略。依据马氏距离对每组解进行排序，选取最接近灰靶靶心的解作为最佳折衷解^[27]。

综上，基于 NSGA-III 的 EHIES 多目标优化模型求解流程如图 2 所示。图 2 中： k 为迭代次数； k_{\max} 为最大迭代次数。

5 算例分析

5.1 仿真实验测试系统

本文基于 13 节点的 DHN 系统与扩展 IEEE-33 节点测试系统设计仿真实验对模型进行验证，并在 ADN 中接入了两组 DHN 系统。ADN 既有设备的安装位置和安装容量如表 1 所示。测试系统的拓扑结构如图 3 所示。此外，本文根据 EHIES 优化配置情况设计了 3 种场景。场景 1：ADN 运行和 DHN 独立运行，DHN 中未接入 EB 和 GB；场景 2：仅优化配置 DHN 设备，DHN 设备无序接入 ADN 运行；场景 3：完全优化配置 EHIES，并在 ADN 侧接入 ESS 运行。

本文采用 NSGA-III 对 EHIES 中设备进行优化配置。在同一测试环境下，将多目标蜉蝣算法^[28] (multi-objective mayfly algorithm, MOMA) 和多目标

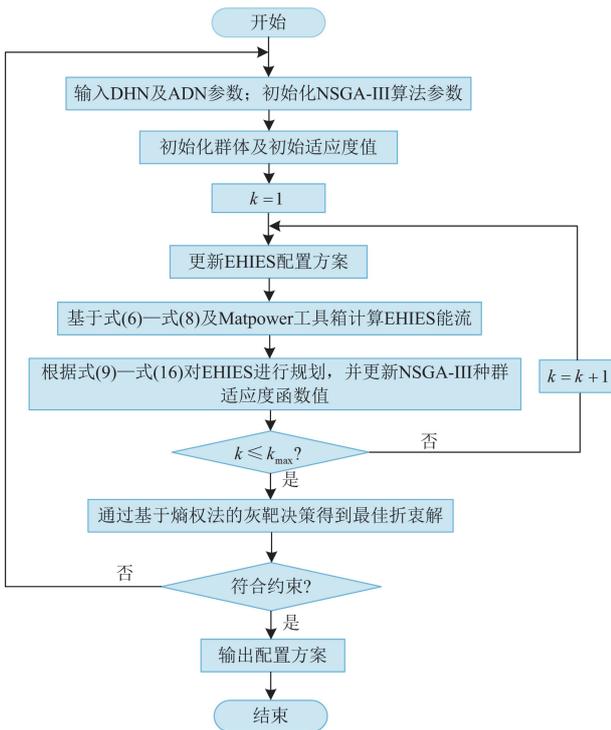


图2 基于NSGA-III的EHIES多目标优化模型求解流程
Fig. 2 EHIES multi-objective optimization model solving process based on NSGA-III

表1 ADN设备参数

Table 1 ADN equipment parameters

设备名称	节点	容量/MW
PV	8	0.9
	24	
WPG	17	1.0
	31	

表2 场景1和场景2优化结果

Table 2 Optimization results of Case 1 and Case 2

场景	算法	参数		
		供热温度波动/(°C/天)	ADN电压波动/(p.u./天)	排放成本/(元/天)
场景1	—	7.82	0.333	48 634
	NSGA-III	7.091	0.318	23 222
场景2	MOAHA	12.902	0.308	17 808
	MOMA	7.229	0.312	27 932

从表2中可以看出, 在场景2中对DHN设备的接入情况进行优化后, NSGA-III和MOMA算法均能使DHN供热温度波动降低。而MOAHA则将优化重点放在了ADN, 以牺牲供热温度为代价大幅降低ADN的节点电压波动。并且表2中数据表明, 通过接入无污染排放的EB能够降低DHN的碳排放成本。此外, 在DHN接入ADN后, ADN为EB提

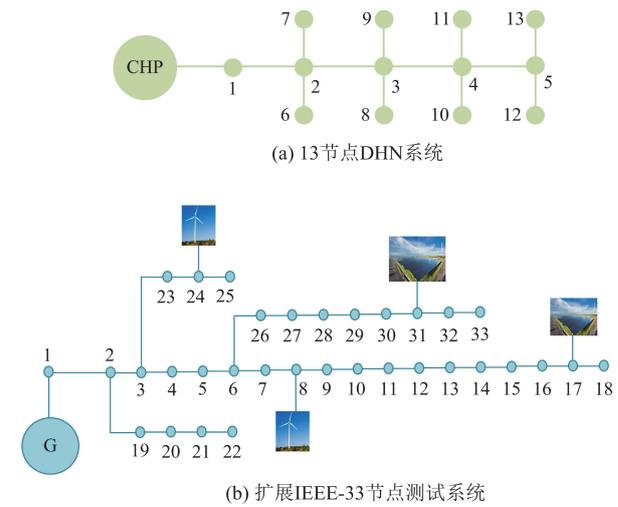


图3 测试系统拓扑结构

Fig. 3 Topology of the test system

人工蜂鸟算法^[29](multi-objective artificial hummingbird algorithm, MOAHA)作为对比算法以验证NSGA-III在解决优化配置EHIES问题上的优越性。其中, 种群数量、最大迭代次数、最大外部归档集分别设置为50、300、50。所有算例均在Matlab 2023a平台上运行。此外, 在仿真过程中假设热能和电能的传输是瞬时; 假设除模型中提及的损耗外无其他任何损耗。

5.2 基于不同场景下的结果分析

表2对比了场景1与场景2的优化结果, 其中场景2的数据显示, 在场景2中随着DHN设备的接入, 系统负荷水平和电压水平发生了变化。但电压水平相对负荷水平变化较小, 这是因为ADN负荷受到DHN的影响相对于电压更大, 变化更明显。

供电能支撑, 消纳了部分来自PV和WPG的波动性功率, 使得配电网的电压波动有大幅度降低。

进一步地, 表3与附表A1、表A2汇总了场景3下3种算法的优化结果及ADN、DHN配置方案, 并通过对比表2和表3中数据可以看出, 将DHN设备合理地接入ADN并配置ESS后, DHN供热温度波动进一步降低。并且配置ESS使得ADN电压

波动得到了大幅下降。而 ESS 的接入势必会存在向上级电网购电的情况,这也导致了排放成本的增加。但与场景 1 相比,排放成本已经有明显下降。这表

明合理配置 EHIES 中各项设备能够提高 EHIES 的经济性和稳定性。

表 3 场景 3 优化结果

Table 3 Optimization results of Case 3

算法	目标函数			排放成本/(元/天)	排放成本占比/%
	总配置成本/(元/天)	供热温度波动/($^{\circ}$ C/天)	ADN 电压波动/(p.u./天)		
NSGA-III	400 562.17	7.090	0.155	28 814	7.19
MOAHA	330 228.77	10.987	0.225	24 800	7.51
MOMA	467 746.54	7.145	0.235	31 746	6.79

5.3 算法性能分析

图 4 为经过优化后 DHN 的日平均供热温度曲线。图 5 为 3 种场景下不同算法优化得到的 ADN 节点平均电压曲线。结合图 4、图 5 和表 3 中的数据可以看出,MOAHA 算法得到 EHIES 总配置成本最低,但其供热温度波动最高,且相比于场景 1 的初始状态提高了 28.82%,这显然是不可取的。相比于场景 1,NSGA-III 的供热温度波动降低了 9.37%,ADN 电压波动降低了 53.34%,排放成本降低了 40.75%。

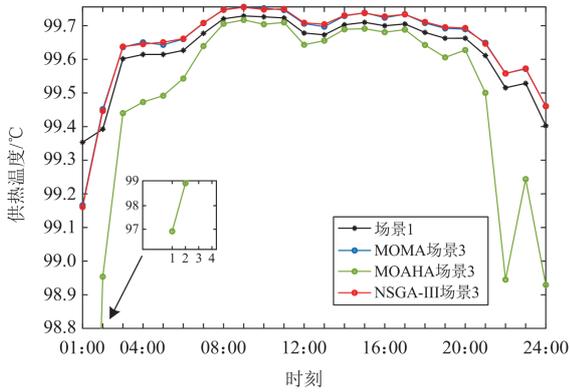
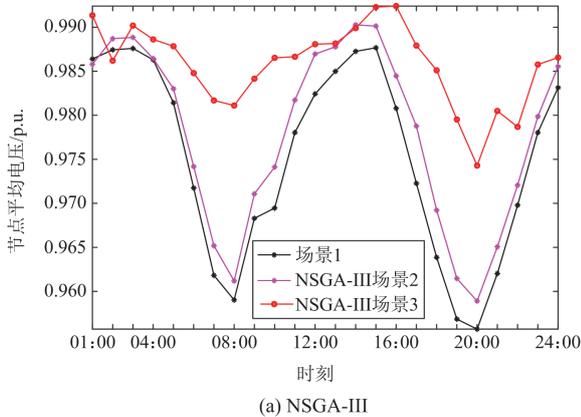
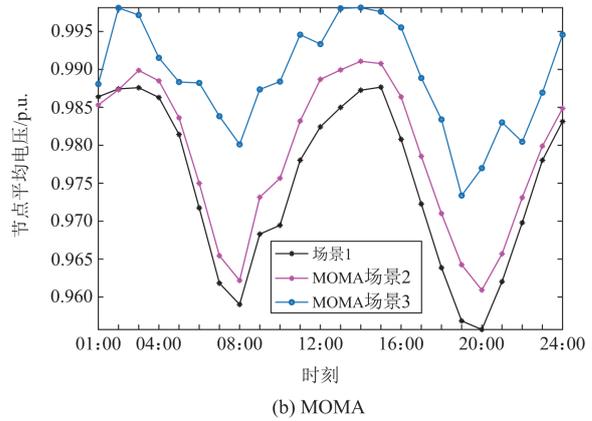


图 4 DHN 日平均供热温度曲线

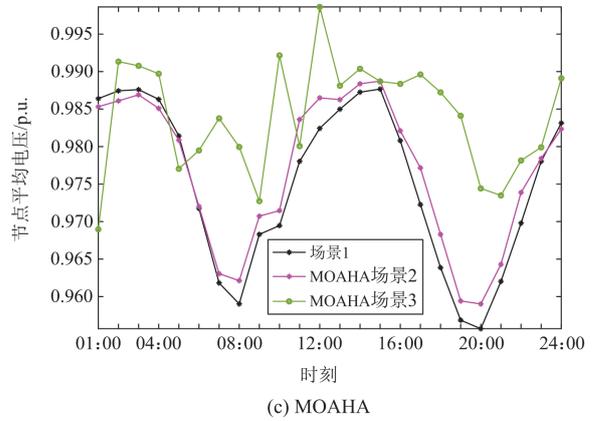
Fig. 4 DHN daily average heating temperature curve



(a) NSGA-III



(b) MOMA



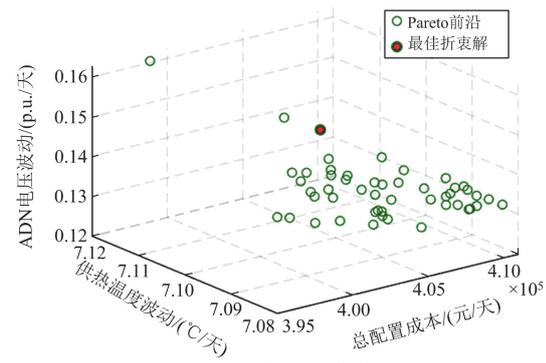
(c) MOAHA

图 5 3 种场景下 ADN 平均节点电压曲线

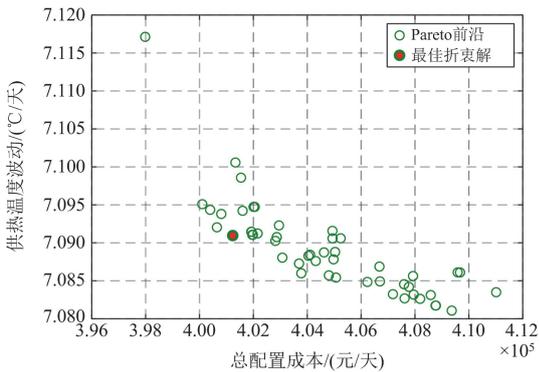
Fig. 5 ADN average bus voltage curve in three scenarios

而 MOMA 的总配置成本、供热温度波动、ADN 电压波动及排放成本均高于 NSGA-III。图 5(a)和图 5(b)中的曲线表明,NSGA-III 的节点平均电压波动幅度更小,且值更接近于 1.0 p.u.。这表明 NSGA-III 算法的优化性能更好。

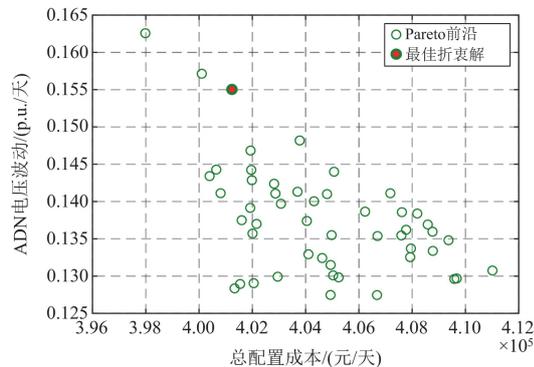
图 6 为 NSGA-III 的 Pareto 分布。从图 6 中可以看出,NSGA-III 能够得到分布均匀的 Pareto 前沿,并且具有非常好的收敛性。



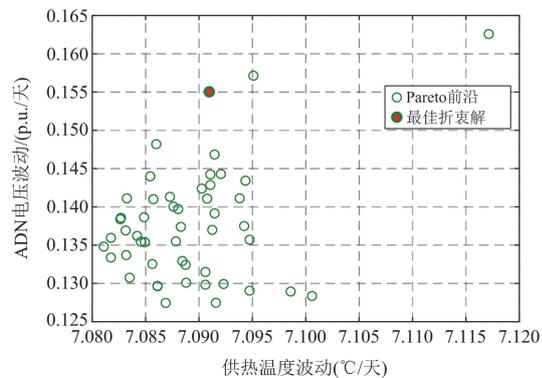
(a) 三维Pareto分布



(b) 总配置成本与供热温度波动关系分布



(c) 总配置成本与ADN电压波动关系分布



(d) 供热温度波动与ADN电压波动关系分布

图6 NSGA-III的Pareto分布图

Fig. 6 Pareto distribution diagram of NSGA-III

5.4 配置结果验证

本文将得到的EHIES配置结果代入仿真模型中计算,以验证配置结果能够提高ADN负荷的稳定性。图7为ADN净负荷水平。图8为ESS一天内充放电功率。从图7中可以看出,在DHN设备优化接入后,ADN净负荷水平有明显的下降,这表明两种功能网联合运行能够增加源荷匹配度。

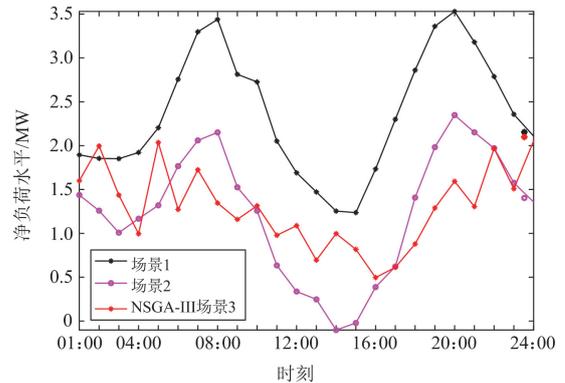
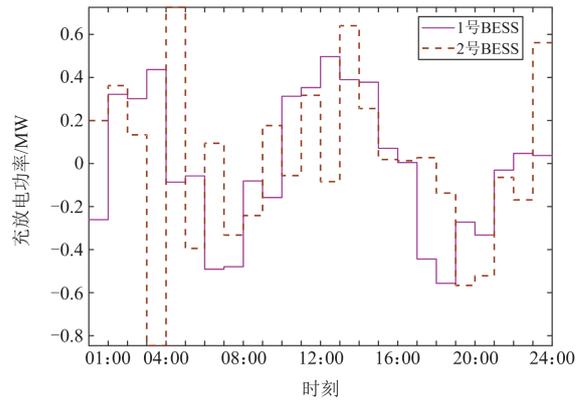
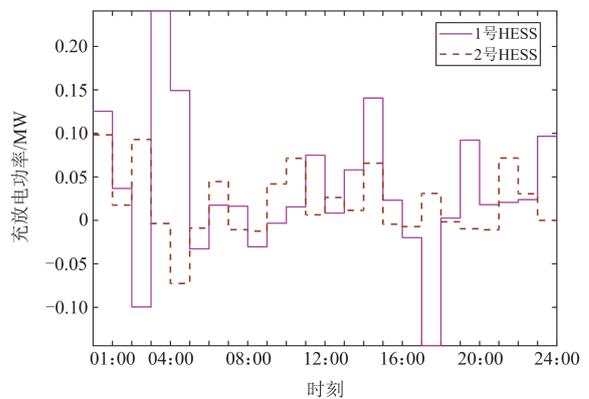


图7 ADN净负荷水平

Fig. 7 ADN net load level



(a) BESS充放电功率



(b) HESS充放电功率

图8 ESS充放电功率

Fig. 8 ESS charging and discharging power

而经过优化后的配置方案能够有效改善系统的净负荷水平,有效发挥 ESS 的削峰填谷能力,使得净负荷水平曲线更平缓。相较于场景 2,场景 3 下的净负荷水平方差从 0.519 下降到 0.205,降幅达 60.5%。并且这一点也能从图 7 中得到验证,在净负荷水平较高的 06:00—09:00,ESS 处于放电状态,以满足负荷需求,而在净负荷水平较低的 11:00—16:00,ESS 处于充电状态,以消纳 ADN 中剩余的电能,保证 ADN 负荷水平的稳定。

6 结论

本文提出了基于 NSGA-III 的 EHIES 多目标最优规划模型。该模型以总配置成本、DHN 供热温度波动和 ADN 电压波动为目标,运用 NSGA-III 对 EHIES 中设备的接入位置和接入容量进行了优化,并采用基于熵权法的灰靶决策得出最佳折衷解。仿

真实验结果表明,与 MOAHA 和 MOMA 相比,NSGA-III 能对 EHIES 进行最优配置。经过 NSGA-III 优化的场景 3 相较于场景 1 排放成本降低了 40.75%,DHN 供热温度波动降低了 0.733 °C/天,ADN 电压波动降低了 0.178 p.u./天;相较于场景 2,在保证 DHN 供热温度无明显波动的情况下进一步降低了 ADN 电压波动,降幅达到 51.23%,并能够得到更为合适的总配置成本。此外,仿真实验结果表明本文提出的优化配置方案能够有效提高 EHIES 的运行经济性和稳定性。本文所提模型能够为小型的 EHIES 提供一个可靠的规划模型,在工程上解决部分 EHIES 规划难的问题。

在未来的研究中将考虑将天然气网络和氢气网络加入模型中,进一步探讨电-热-气-氢综合能源系统最优规划方法。

附录 A

表 A1 ADN 设备配置结果

Table A1 ADN equipment configuration results

算法	BESS						HESS							
	#1			#2			#1			#2				
	节点	额定容量/MW	额定功率/MW	节点	额定容量/MW	额定功率/MW	节点	电解槽额定功率/MW	储氢罐额定容量/kg	燃料电池额定容量/MW	节点	电解槽额定功率/MW	储氢罐额定容量/kg	燃料电池额定功率/MW
NSGA-III	17	3.158	0.557	23	4.834	0.846	21	0.241	17.921	0.144	15	0.098	13.014	0.073
MOAHA	7	4.677	0.990	30	7.830	0.982	27	0.607	22.117	0.226	32	0.542	25.932	0.203
MOMA	12	2.828	0.492	26	3.998	0.683	18	0.099	6.167	0.058	8	0.261	17.680	0.104

表 A2 DHN 设备配置结果

Table A2 DHN equipment configuration results

算法	DHN 设备								
	CHP 机组(DHN 节点固定为 1)				EB			GB	
	ADN 节点		额定容量/MW	DHN 节点	ADN 节点		额定功率/MW	DHN 节点	额定功率/MW
	#1	#2	#1		#2	#1	#2		
NSGA-III	21	28	1.015	6	24	13	0.476	7	0.495
MOAHA	33	21	1.049	6	26	32	0.499	11	0.499
MOMA	13	19	1.172	6	21	28	0.444	6	0.437

参考文献

[1] 牛焕娜,王青林,袁嘉兴,等.基于三层博弈的社区综合能源系统电热交易策略[J].电力系统保护与控制,2024,52(5):25-37.
NIU Huanna, WANG Qinglin, YUAN Jiaying, et al. Heat-electricity trading decisions of a community integrated energy system based on three-layer game theory[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(5): 25-37.

[2] 高建伟,张艺,高芳杰,等.农业综合能源系统多场景置信间隙决策低碳调度[J].电力建设,2024,45(5):105-117.

GAO Jianwei, ZHANG Yi, GAO Fangjie, et al. Low-carbon scheduling for multi-scenario confidence gap decision making for integrated energy systems in agriculture[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(5): 105-117.

[3] 刘钊,郭子豪,申安,等.考虑冷热电灵活性负荷需求响应的区域综合能源系统运行优化[J].南方能源建设,2024,11(6):153-163.
LIU Zhao, GUO Zihao, SHEN An, et al. Optimization of regional integrated energy system operation considering flexible load demand response for cooling, heating and

- power[J]. *Southern Energy Construction*, 2024, 11(6): 153-163.
- [4] 王利猛, 刘雪梦, 李扬, 等. 阶梯式碳交易机制下考虑需求响应的综合能源系统低碳优化调度[J]. *电力建设*, 2024, 45(2): 102-114.
WANG Limeng, LIU Xuemeng, LI Yang, et al. Low-carbon optimal dispatch of integrated energy system considering demand response under the tiered carbon trading mechanism[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(2): 102-114.
- [5] 李欣, 陈英彰, 李涵文, 等. 考虑碳交易的电-热综合能源系统两阶段鲁棒优化低碳经济调度[J]. *电力建设*, 2024, 45(6): 58-69.
LI Xin, CHEN Yingzhang, LI Hanwen, et al. Two-stage robust optimization of low-carbon economic dispatch for electricity-thermal integrated energy system considering carbon trade[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(6): 58-69.
- [6] 郭杰, 吴杰康, 洪明志, 等. 综合能源系统碳交易优化调度模型[J]. *供用电*, 2023, 40(11): 94-104.
GUO Jie, WU Jiekang, HONG Mingzhi, et al. Optimal scheduling model of carbon trading in integrated energy system[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(11): 94-104.
- [7] 杨博, 李玉林, 孙一心, 等. 基于博弈论的微电网电力交易综述[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 48(3): 105-118.
YANG Bo, LI Yulin, SUN Yixin, et al. A critical review of microgrid power trading based on game theory[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science)*, 2023, 48(3): 105-118.
- [8] YANG Bo, YU Lei, CHEN Yixuan, et al. Modelling, applications, and evaluations of optimal sizing and placement of distributed generations: a critical state-of-the-art survey[J]. *International Journal of Energy Research*, 2021, 45(3): 3615-3642.
- [9] YANG Bo, LI Jiale, SHU Hongchun, et al. Recent advances of optimal sizing and location of charging stations: a critical overview[J]. *International Journal of Energy Research*, 2022, 46: 17899-17925.
- [10] 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.
- [11] 张虹, 张瑞芳, 周建丞, 等. 基于主从博弈和混合碳政策的园区综合能源系统低碳经济调度[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(9): 9-17.
ZHANG Hong, ZHANG Ruifang, ZHOU Jiancheng, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system in campus based on Stackelberg game and hybrid carbon policy[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2023, 44(9): 9-17.
- [12] 朱庆, 林慧婕, 张宇峰. 考虑风电消纳的含 P2G-CCS 虚拟电厂优化调度[J]. *智慧电力*, 2023, 51(4): 77-83.
ZHU Qing, LIN Huijie, ZHANG Yufeng. Optimal scheduling of virtual power plants with P2G-CCS considering wind power consumption[J]. *Smart Power*, 2023, 51(4): 77-83.
- [13] 董海鹰, 贲毓韵, 马志程, 等. 计及多能转换及光热电站参与的综合能源系统低碳优化运行[J]. *电网技术*, 2022, 44(10): 3689-3700.
DONG Haiying, BEN Yuyun, MA Zhicheng, et al. Low-carbon optimal operation of integrated energy system considering multi-energy conversion and concentrating solar power plant participation[J]. *Power System Technology*, 2022, 44(10): 3689-3700.
- [14] 李杰, 高爽, 袁博兴, 等. 采用融合遗传算法的高速公路服务区综合能源系统优化调度研究[J]. *西安交通大学学报*, 2024, 58(5): 200-211.
LI Jie, GAO Shuang, YUAN Boxing, et al. Research on optimal dispatching of integrated energy system in expressway service area based on GA-SQP algorithm[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2024, 58(5): 200-211.
- [15] 岑增光, 耿斌, 高明海, 等. 考虑天然气混氢的园区综合能源系统电制氢优化配置[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(2): 55-64.
CEN Zengguang, GENG Bin, GAO Minghai, et al. Optimal configuration of P2H in the park integrated energy system consider natural gas mixed with hydrogen[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(2): 55-64.
- [16] 陈勇, 肖雷鸣, 王井南, 等. 基于场景扩充的低碳综合能源系统高可靠性容量规划方法[J]. *综合智慧能源*, 2024, 46(4): 24-33.
CHEN Yong, XIAO Leiming, WANG Jingnan, et al. High-reliability capacity planning method for integrated energy systems with low-carbon emissions based on scenario expansion[J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2024, 46(4): 24-33.
- [17] LI Jiale, YANG Bo, HUANG Jianxiang, et al. Optimal planning of electricity-hydrogen hybrid energy storage system considering demand response in active distribution network[J]. *Energy*, 2023, 273.
- [18] 韩一鸣, 贺彬, 杨博, 等. 考虑行驶特性的电动汽车充

电站联合电储能系统最优规划[J/OL]. 上海交通大学学报: 1-29[2024-04-14]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.629>.

HAN Yiming, HE Bin, YANG Bo, et al. Optimal planning of electric vehicle charging stations combined with battery energy storage systems considering driving characteristics[J/OL]. Journal of Shanghai Jiaotong University: 1-29[2024-04-14]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.629>.

[19] YANG Bo, WANG Junting, CAO Pulin, et al. Classification, summarization and perspectives on state-of-charge estimation of lithium-ion batteries used in electric vehicles: a critical comprehensive survey[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 39.

[20] 李嘉乐, 杨博, 胡袁炜骥, 等. 考虑需求侧响应的电-氢混合储能系统选址定容[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3698-3714.

LI Jiale, YANG Bo, HU Yuanweiji, et al. Location and capacity planning of electricity hydrogen hybrid energy storage system considering demand response[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3698-3714.

[21] 黄思远, 王晨, 梁婷, 等. 液态空气储能耦合综合能源系统热电联储联供优化配置研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(6): 1929-1939.

HUANG Siyuan, WANG Chen, LIANG Ting, et al. Research on optimal configuration for integrated energy system with liquid air energy storage combined heat and power supply[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(6): 1929-1939.

[22] 初壮, 赵蕾, 孙健浩, 等. 考虑热能动态平衡的含氢储能的综合能源系统热电优化[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 1-12.

CHU Zhuang, ZHAO Lei, SUN Jianhao, et al. Thermoelectric optimization of an integrated energy system with hydrogen energy storage considering thermal energy dynamic balance[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 1-12.

[23] 李金航, 佟曦, 陈衡, 等. 含多类型储能的综合能源系统低碳经济运行双层优化方法研究[J]. 动力工程学报, 2024, 44(3): 498-508.

LI Jinhang, TONG Xi, CHEN Heng, et al. Research on two layer optimization method for low carbon and economic operation of integrated energy system with multiple types of energy storage[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(3): 498-508.

[24] 王永利, 向皓, 郭璐, 等. 面向多能互补的分布式光伏与电氢混合储能规划优化研究[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 564-576.

WANG Yongli, XIANG Hao, GUO Lu, et al. Research on planning optimization of distributed photovoltaic and electro-hydrogen hybrid energy storage for multi-energy complementarity[J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 564-576.

[25] YANG Yuqing, BREMNER S, MENICTAS C, et al. Modelling and optimal energy management for battery energy storage systems in renewable energy systems: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 167.

[26] DEB K, JAIN H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2014, 18(4): 577-6011.

[27] 杨欢红, 王洁, 邵能灵, 等. 基于灰靶决策和多目标布谷鸟算法的微电网分布式电源鲁棒优化[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 20-27.

YANG Huanhong, WANG Jie, TAI Nengling, et al. Robust optimization of distributed generation in a microgrid based on grey target decision-making and multi-objective cuckoo search algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 20-27.

[28] ZERVOUDAKIS K. Multiobjective Mayfly optimization algorithm — MATLAB central file exchange[EB/OL]. [2024-04-07]. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/85653-multiobjective-mayfly-optimization-algorithm>.

[29] ZHAO Weiguo, ZHANG Zhenxing, MIRJALILI S, et al. An effective multi-objective artificial hummingbird algorithm with dynamic elimination-based crowding distance for solving engineering design problems[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2022, 398.

收稿日期: 2024-07-04; 修回日期: 2024-10-11

作者简介:

黄元平(1990—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为电网规划; E-mail: 1203691910@qq.com

苏睿(1994—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为配电网规划; E-mail: 357272999@qq.com

施铭涛(1994—), 男, 通信作者, 本科, 工程师, 研究方向为电网规划. E-mail: 1132672500@qq.com

(编辑 魏小丽)