

考虑需求响应与设备容量优化的电解铝综合能源系统 低碳经济运行

蒋超¹,唐若笠¹,李昕¹,张胤辰¹,张旭东¹,张瑞¹,潘廷哲²

(1. 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院,武汉 430070;2. 南方电网科学研究院
用电计量所,广州 510080)

摘要:为实现电解铝综合能源系统(integrated energy system, IES)的低碳经济运行,提出了一种考虑需求响应(demand response, DR)与设备容量优化的IES低碳经济运行策略。首先,构建了融合电、热能源形式的IES拓扑,并基于电、热负荷可转移特性,建立了其DR模型。在此基础上,构建了IES碳排放核算模型,并引入阶梯式碳交易机制进行碳排放约束。最后,以计及能源购买、设备运维、碳交易、设备投资和弃风弃光的综合成本为优化目标,构建以混合整数线性问题为描述形式的优化运行模型,并运用CPLEX进行求解。实验结果显示,优化目标考虑DR时,运行总成本和碳排放量分别下降了3.07%和1.17%。此外,在DR基础上进一步考虑设备容量优化后,运行总成本和碳排放量可额外下降0.39%和0.64%,同时保证了电解铝的产量。可见,所提方法可一定程度提高IES运行的经济性与环保性。

关键词:综合能源系统;需求响应;阶梯式碳交易;低碳经济;设备容量优化

Low-carbon economic operation of integrated energy system for electrolytic aluminum considering demand response and equipment capacity optimization

JIANG Chao¹, TANG Ruoli¹, LI Xin¹, ZHANG Yinchen¹, ZHANG Xudong¹,
ZHANG Rui¹, PAN Tingzhe²

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Electricity Measurement Institute, China Southern Power Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: In order to achieve the low carbon operation and economic benefits of integrated energy system (IES) in electrolytic aluminum, a low carbon economy operation strategy considering the demand response (DR) and equipment capacity optimization is proposed. First, an IES topology integrating electricity and heat energies is established, and a DR model is also established based on the transferability of electricity and heat loads. Then, the IES carbon emission accounting model is established, and a ladder-type carbon trading mechanism is introduced to implement the restriction of carbon emission. Finally, the optimization operation model is transformed in the form of mixed integer linear problem, which considers the comprehensive costs of energy purchase, equipment operation and maintenance, carbon trading, equipment investment and wind and light abandonment, and is solved by CPLEX. Experimental results show that when DR is considered, the total operation cost and carbon emissions are reduced by 3.07% and 1.17% respectively. In addition, after further considering the optimization of equipment capacity, the total operating cost and carbon emission can be additionally reduced by 0.39% and 0.64% respectively, while the production of electrolytic aluminum is ensured. As discussed above, the method proposed can improve the economy and environmental performance of IES operation to a certain extent.

Key words: integrated energy system; demand response; ladder-type carbon trading; low carbon economy; equipment capacity optimization

0 引言

“双碳”目标指引下,加快能源领域的绿色低碳转型并提升能源利用效率,已成为实现“双碳”目标的关键举措^[1-2]。电解铝在生产过程中能耗巨大,

且会排放大量温室气体^[3]。面对这一现状,在电解铝生产环节构建综合能源系统(integrated energy system, IES),能够推动能源结构向绿色低碳方向转型^[4-5]。

目前,针对IES的运行已有大量研究。文献[6]提出了一种IES电、热协同调度低碳经济模型,显著降低了系统碳排放。文献[7]通过优化IES中储能能

设备的充放电功率,实现了对可再生能源的消纳。文献[8]从需求响应(demand response, DR)角度出发,优化了用户负荷曲线,提高了可再生能源消纳水平。文献[9]在DR的基础上,以综合能效最高和系统运行成本最低为目标实现IES的优化运行。上述文献虽在设备运行功率调控的基础上引入了DR,但未考虑设备容量配置的优化,难以实现IES运行经济性的大幅提升。

为此,本文研究并提出了一种考虑DR和设备容量优化的IES低碳经济运行模型。首先,建立了DR模型;其次,构建了碳排放核算模型;最后,以IES运行总成本最低为目标,通过对比分析多个运行方案,验证了所提策略的有效性。

1 IES基本结构及模型

本文所提出的IES基本结构如图1所示。供能侧包括电网、风电机组(wind turbines, WT)、光伏阵列(photovoltaic, PV)和气网;能量枢纽侧包括电锅炉(electric boiler, EB)、热电联产(combined heating and power, CHP)、燃气锅炉(gas-fired boiler, GB)、电储能(electrical energy storage, EES)和热储能(heat energy storage, HES);需求侧主要包括电、热负荷。

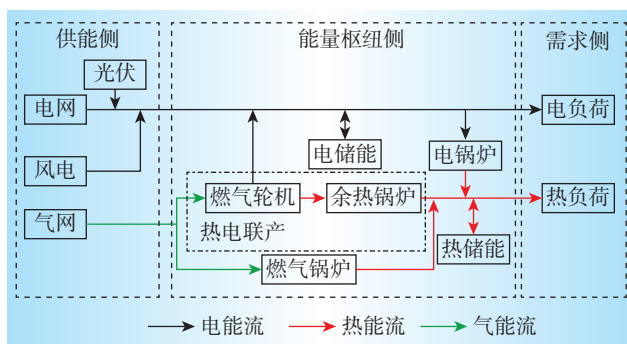


图1 IES基本结构

Fig. 1 Basic structure of IES

1.1 设备单元模型

1.1.1 EB模型

电锅炉被广泛应用于IES,其运行模型如下

$$P_{EB,h}(t) = \eta_{EB,h} P_{EB,e}(t) \quad (1)$$

式中: $P_{EB,h}(t)$ 为 t 时段EB的热功率, MW; $\eta_{EB,h}$ 为EB的制热效率, %; $P_{EB,e}(t)$ 为 t 时段EB消耗的电功率, MW。

1.1.2 CHP模型

CHP机组由GT和WHB构成。GT通过燃烧天然气进行发电,排出的余热由WHB回收用于供热,其运行模型如下

$$P_{CHP,e}(t) = \eta_{GT,e} L_{NG} G_{CHP,g}(t) \quad (2)$$

$$H_{GT}(t) = (1 - \eta_{GT,e} - \eta_{GT,loss}) G_{CHP,g}(t) L_{NG} \quad (3)$$

$$P_{CHP,h}(t) = \eta_{WHB} H_{GT}(t) \quad (4)$$

式中: $P_{CHP,e}(t)$ 为 t 时段CHP输出的电功率, MW; $\eta_{GT,e}$ 为GT的发电效率, %; $G_{CHP,g}(t)$ 为 t 时段CHP消耗的天然气的量, m^3 ; L_{NG} 为天然气低热值, 取 $9.7kWh/m^3$; $H_{GT}(t)$ 为 t 时段GT输出的余热功率, MW; $\eta_{GT,loss}$ 为GT的热损耗率, %; $P_{CHP,h}$ 为 t 时段CHP输出的热功率, MW; η_{WHB} 为WHB的能量转换效率, %。

1.1.3 GB模型

GB通过燃烧天然气进行供热,其运行模型如下

$$P_{GB,h}(t) = \eta_{GB,h} L_{NG} G_{GB,g}(t) \quad (5)$$

式中: $P_{GB,h}(t)$ 为 t 时段GB输出的热功率, MW; $\eta_{GB,h}$ 为GB的制热效率, %; $G_{GB,g}(t)$ 为 t 时段GB消耗的天然气的量, m^3 。

1.1.4 储能模型

EES和HES可通过统一的运行模型进行表示如下

$$W_i(t+1) = (1 - \sigma_i) W_i(t) + \left(\eta_{i,c} P_{i,c}(t) - \frac{P_{i,d}(t)}{\eta_{i,d}} \right) \Delta t \quad (6)$$

式中: i 为储能设备类型, $i \in \{EES, HES\}$; σ_i 为储能 i 的自损耗系数; $W_i(t+1)$ 为 $t+1$ 时段储能 i 的容量, MW; $\eta_{i,c}$ 和 $\eta_{i,d}$ 分别为储能 i 的充能效率和放能效率, %; $P_{i,c}(t)$ 和 $P_{i,d}(t)$ 分别为 t 时段储能 i 的充能功率和放能功率, MW; Δt 为时间间隔, h。

1.2 电解铝用户模型

1.2.1 电力特性模型

电解铝是一种典型的电解类负荷,生产流程如图2所示。

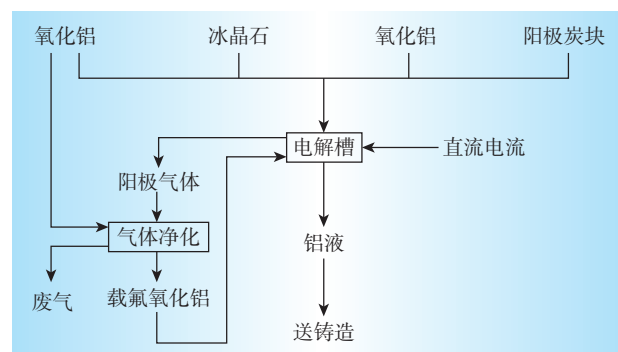


图2 电解铝生产流程

Fig. 2 Production flow of electrolytic aluminum

电解铝负荷的直流部分为主要耗电环节,其基本外特性如下^[10]

$$V_B(t) = I_d(t)R + E \quad (7)$$

式中: $V_B(t)$ 为电解槽 t 时段的直流电压, V; $I_d(t)$ 为电解槽 t 时段的直流电流, A; R 为负荷直流侧等效电

阻, Ω ; E 为负荷直流侧反电动势, V。

电解铝的功率特性可表示为

$$P_{AL}(t) = V_B(t)I_d(t) = V_B(t)\left(\frac{V_B(t) - E}{R}\right) \quad (8)$$

式中: $P_{AL}(t)$ 为电解铝负荷在 t 时段消耗的电功率, MW。

1.2.2 电解铝产量模型

电解铝的吨铝直流电耗可表示为^[11]

$$W(t) = 2980 \frac{V_B(t)}{\eta_{ea}} \quad (9)$$

式中: $W(t)$ 为 t 时段的吨铝直流电耗, kWh/tAL; η_{ea} 为电流效率, %。

根据计算出的吨铝直流电耗, 可求得电解铝产量如下所示

$$P(t) = \frac{P_{AL}(t)}{W(t)} \quad (10)$$

式中: $P(t)$ 为 t 时段的电解铝产量, t。

1.3 DR 模型

在 DR 模式下, 用户可根据能源价格实现负荷在时间上的转移和中断。但由于电解铝生产受严苛恒温热平衡约束, 需全年 8 760 h 连续运行, 因此将其归为可转移型负荷^[12]。电解铝用户的 DR 表示式如下

$$P_K(t) = P_K^f(t) + \Delta P_K^t(t) \quad (11)$$

式中: $P_K(t)$ 为 t 时段负荷 K 的数值, MW; K 为负荷类型, $K \in \{AL, H\}$; $P_K^f(t)$ 为 t 时段负荷 K 转移前的数值, MW; $\Delta P_K^t(t)$ 为 t 时段负荷 K 的转移量, MW。

可转移型负荷在调度周期内进行时间维度上的转移, 对其进行建模, 如式(12)所示

$$\begin{cases} \Delta P_K^t(t) = A_K^{t, in}(t)P_K^{t, in}(t) - A_K^{t, out}(t)P_K^{t, out}(t) \\ A_K^{t, in}(t) + A_K^{t, out}(t) \leq 1 \\ \sum_{t=1}^T \Delta P_K^t(t) = 0 \\ \Delta P_{K, min}^t(t) \leq \Delta P_K^t(t) \leq \Delta P_{K, max}^t(t) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $A_K^{t, in}(t)$ 和 $A_K^{t, out}(t)$ 为二进制变量, 分别为 t 时段负荷 K 中可转移型负荷的转入、转出参数; $\Delta P_K^{t, in}(t)$ 和 $\Delta P_K^{t, out}(t)$ 分别为 t 时段负荷 K 中可转移型负荷的转入、转输出功率, MW; $\Delta P_{K, max}^t(t)$ 和 $\Delta P_{K, min}^t(t)$ 分别为 t 时段负荷 K 中可转移型负荷的转移上、下限, MW。

2 IES 碳排放模型

2.1 碳排放配额模型

2.1.1 设备碳排放配额模型

设备侧的碳排放源主要有: 上级煤电机组、CHP、GB。碳排放配额模型可表示为

$$\begin{cases} E_E = E_{E, buy} + E_{CHP} + E_{GB} \\ E_{E, buy} = \alpha_E^* \sum_{t=1}^T P_{E, buy}(t) \\ E_{CHP} = \alpha_H^* \sum_{t=1}^T (\alpha_{E, h} P_{CHP, e}(t) + P_{CHP, h}(t)) \\ E_{GB} = \alpha_H^* \sum_{t=1}^T P_{GB, h}(t) \end{cases} \quad (13)$$

式中: E_E 、 $E_{E, buy}$ 、 E_{CHP} 、 E_{GB} 分别为设备侧、上级电网购电、CHP、GB 的碳排放配额, kg; α_E^* 、 α_H^* 分别为产生单位电功率、热功率的碳排放配额系数, kg/kWh; $\alpha_{E, h}$ 为电、热功率转换系数; T 为调度周期, h。

2.1.2 电解铝用户碳排放配额模型

电解铝用户的碳排放配额可表示如下

$$E_{EA} = \sum_{t=1}^T E_p(t) = \sum_{t=1}^T \eta_p P(t) \quad (14)$$

式中: E_{EA} 为电解铝用户的碳排放配额, kg; $E_p(t)$ 为 t 时段电解槽的碳排放配额, kg; η_p 为电解槽的碳排放配额分配基准值。

2.2 实际碳排放模型

2.2.1 设备实际碳排放模型

IES 主要设备的实际碳排放模型可表示如下

$$\begin{cases} E_{E, a} = E_{E, buy, a} + E_{CHP, a} + E_{GB, a} \\ E_{E, buy, a} = \alpha_E \sum_{t=1}^T P_{E, buy}(t) \\ E_{CHP, a} = \alpha_H \sum_{t=1}^T (\alpha_{E, h} P_{CHP, e}(t) + P_{CHP, h}(t)) \\ E_{GB, a} = \alpha_H \sum_{t=1}^T P_{GB, h}(t) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $E_{E, a}$ 、 $E_{E, buy, a}$ 、 $E_{CHP, a}$ 、 $E_{GB, a}$ 分别为设备侧、上级电网购电、CHP、GB 的实际碳排放, kg; α_E 、 α_H 分别为产生单位电功率、热功率的实际碳排放系数, kg/kWh。

2.2.2 电解铝用户实际碳排放模型

电解铝生产过程主要包括运输工具等燃料燃烧的 CO_2 排放、炭阳极消耗的 CO_2 排放以及电解槽阳极效应的全氟化碳排放等^[13]。

(1) 燃料燃烧

$$E_{燃烧} = \sum_{i=1}^n \left(A_{LH, i} N_{C, i} C_{C, i} C_{OR, i} \times \frac{44}{12} \right) \quad (16)$$

式中: $E_{燃烧}$ 为燃料燃烧产生的 CO_2 排放量, t; $A_{LH, i}$ 为第 i 种燃料的平均低位发热量, GJ/t; $N_{C, i}$ 为第 i 种燃料的净消耗量, t; $C_{C, i}$ 为第 i 种燃料的单位热值含碳量, t/GJ; $C_{OR, i}$ 为第 i 种燃料的碳氧化率, %。

(2) 炭阳极消耗

炭阳极消耗的碳排放建模如下

$$E_{炭阳极} = C_{A, 炭阳极} P \quad (17)$$

$$C_{A, 炭阳极} = N_{C, 炭阳极} (1 - S_{炭阳极} - A_{炭阳极}) \times \frac{44}{12} \quad (18)$$

式中： $E_{\text{原材料}}$ 为炭阳极消耗导致的 CO_2 排放量，t； $C_{\text{A,炭阳极}}$ 为炭阳极消耗的 CO_2 排放因子，t/tAL； $N_{\text{C,炭阳极}}$ 为吨铝炭阳极净耗，t/tAL； $S_{\text{炭阳极}}$ 和 $A_{\text{炭阳极}}$ 分别为炭阳极平均硫含量和灰分含量。

(3) 阳极效应

阳极效应产生的碳排放建模如下

$$E_{\text{PFC}} = (6\,500 \times EF_{\text{CF}_4} + 9\,200 \times EF_{\text{C}_2\text{F}_6}) \times P \quad (19)$$

式中： E_{PFC} 为阳极效应过程导致的二氧化碳的排放量，t；6 500和9 200分别为 CF_4 和 C_2F_6 的温室效应折算值； EF_{CF_4} 和 $EF_{\text{C}_2\text{F}_6}$ 分别为阳极效应过程的 CF_4 和 C_2F_6 的排放因子，t/tAL。

综上，电解铝用户的实际碳排放模型为

$$E_{\text{EA,a}} = E_{\text{燃烧}} + E_{\text{原材料}} + E_{\text{PFC}} \quad (20)$$

式中： $E_{\text{EA,a}}$ 为电解铝用户的实际碳排放量，t。

2.3 碳交易成本模型

2.3.1 IES的碳交易量

综合设备和电解铝用户的碳排放配额、实际碳排放量，可得电解铝IES的碳交易量，如下所示

$$E_{\text{IES,b}} = E_{\text{E,a}} + E_{\text{EA,a}} - E_{\text{E}} - E_{\text{EA}} \quad (21)$$

2.3.2 碳交易成本

阶梯式碳交易模型可表示为

$$C_{\text{CO}_2} = \begin{cases} \lambda E_{\text{IES,b}} & E_{\text{IES,b}} \leq d \\ \lambda(1+\beta)(E_{\text{IES,b}} - d) + \lambda d & d < E_{\text{IES,b}} \leq 2d \\ \lambda(1+2\beta)(E_{\text{IES,b}} - 2d) + (2+\beta)\lambda d & 2d < E_{\text{IES,b}} \leq 3d \\ \lambda(1+3\beta)(E_{\text{IES,b}} - 3d) + (3+3\beta)\lambda d & 3d < E_{\text{IES,b}} \leq 4d \\ \lambda(1+4\beta)(E_{\text{IES,b}} - 4d) + (4+6\beta)\lambda d & 4d < E_{\text{IES,b}} \leq 5d \\ \lambda(1+5\beta)(E_{\text{IES,b}} - 5d) + (5+10\beta)\lambda d & 5d < E_{\text{IES,b}} \end{cases} \quad (22)$$

式中： C_{CO_2} 为碳交易成本，元； λ 为碳交易价格，元/kg； β 为价格增长幅度； d 为碳排放量区间长度，kg。

3 IES运行模型

3.1 目标函数

本文综合考虑能源购买成本 C_{BUY} 、设备运维成本 C_{OPE} 、碳交易成本 C_{CO_2} 、折算至每天的设备投资成本 C_{INV} 和弃风弃光惩罚成本 C_{DG} ，IES目标函数如下

$$\min C = C_{\text{BUY}} + C_{\text{OPE}} + C_{\text{CO}_2} + C_{\text{INV}} + C_{\text{DG}} \quad (23)$$

(1) 能源购买成本

$$C_{\text{BUY}} = \sum_{t=1}^T \psi(t) P_{\text{E,buy}}(t) + \sum_{t=1}^T \varphi(t) P_{\text{G,buy}}(t) \quad (24)$$

式中： $\psi(t)$ 和 $\varphi(t)$ 分别为 t 时段的电价和气价，元/kWh； $P_{\text{G,buy}}(t)$ 为 t 时段向气网的购气功率，MW。

(2) 设备运维成本

$$C_{\text{OPE}} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_M} C_{\text{M,j}} |P_j(t)| \quad (25)$$

式中： N_M 为IES内设备总数； $C_{\text{M,j}}$ 为第 j 种设备的单位维护成本，元/kW； $P_j(t)$ 为 t 时段第 j 种设备的功率，MW。

(3) 碳交易成本

碳交易成本计算如式(22)所示。

(4) 折算至每天的设备投资成本

$$C_{\text{INV}} = \sum_j \frac{C_j W_j}{365} \frac{r(1+r)^{N_j}}{(1+r)^{N_j} - 1} \quad (26)$$

式中： C_j 为第 j 种设备的单位容量投资成本，元/kW； W_j 为第 j 种设备的待配置容量，MW； N_j 为第 j 种设备的使用年限； r 为折现率，%。

(5) 弃风弃光惩罚成本

$$C_{\text{DG}} = \sum_{t=1}^T \chi_{\text{DG}} (P_{\text{WT,cut}}(t) + P_{\text{PV,cut}}(t)) \quad (27)$$

式中： χ_{DG} 为单位弃风弃光功率惩罚成本，元/kWh； $P_{\text{WT,cut}}(t)$ 、 $P_{\text{PV,cut}}(t)$ 分别为 t 时段的弃风、弃光功率，MW。

3.2 约束条件

(1) 风电功率约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{WT}}(t) \leq \eta_{\text{WT}} W_{\text{WT}} \\ 0 \leq W_{\text{WT}} \leq W_{\text{WT},0} \end{cases} \quad (28)$$

(2) 光伏功率约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{PV}}(t) \leq \eta_{\text{PV}} W_{\text{PV}} \\ 0 \leq W_{\text{PV}} \leq W_{\text{PV},0} \end{cases} \quad (29)$$

式中： $P_{\text{PV}}(t)$ 为 t 时段的光伏功率，MW； η_{PV} 为光伏预测功率因子； W_{WT} 为光伏系统容量，MW； $W_{\text{WT},0}$ 为光伏系统初始容量，MW。

(3) CHP运行约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{CHP,e}}(t) \leq W_{\text{CHP}} \\ \kappa_{\text{CHP,e}}^{\text{down}} W_{\text{CHP}} \leq P_{\text{CHP,e}}(t) - P_{\text{CHP,e}}(t-1) \leq \kappa_{\text{CHP,e}}^{\text{up}} W_{\text{CHP}} \\ 0 \leq W_{\text{CHP}} \leq W_{\text{CHP},0} \end{cases} \quad (30)$$

式中： W_{CHP} 为CHP容量，MW； $\kappa_{\text{CHP,e}}^{\text{up}}$ 、 $\kappa_{\text{CHP,e}}^{\text{down}}$ 分别为CHP爬坡上、下限，%； $W_{\text{CHP},0}$ 为CHP初始容量，MW。

(4) GB运行约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{GB,h}}(t) \leq W_{\text{GB}} \\ \kappa_{\text{GB,h}}^{\text{down}} W_{\text{GB}} \leq P_{\text{GB,h}}(t) - P_{\text{GB,h}}(t-1) \leq \kappa_{\text{GB,h}}^{\text{up}} W_{\text{GB}} \\ 0 \leq W_{\text{GB}} \leq W_{\text{GB},0} \end{cases} \quad (31)$$

式中： W_{GB} 为GB容量，MW； $\kappa_{\text{GB,h}}^{\text{up}}$ 、 $\kappa_{\text{GB,h}}^{\text{down}}$ 分别为GB爬坡上、下限，%； $W_{\text{GB},0}$ 为GB初始容量，MW。

(5) EB运行约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{EB,h}}(t) \leq W_{\text{EB}} \\ \kappa_{\text{EB,h}}^{\text{down}} W_{\text{EB}} \leq P_{\text{EB,h}}(t) - P_{\text{EB,h}}(t-1) \leq \kappa_{\text{EB,h}}^{\text{up}} W_{\text{EB}} \\ 0 \leq W_{\text{EB}} \leq W_{\text{EB},0} \end{cases} \quad (32)$$

式中: W_{EB} 为EB容量, MW; $\kappa_{EB,h}^{up}$ 、 $\kappa_{EB,h}^{down}$ 分别为EB爬坡上、下限, %; $W_{EB,0}$ 为EB初始容量, MW。

(6) 储能运行约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,c}(t) \leq \gamma_{i,c} B_{i,c}(t) W_i \\ 0 \leq P_{i,d}(t) \leq \gamma_{i,d} B_{i,d}(t) W_i \\ \nu_{i,min} W_i \leq W_i(t) \leq \nu_{i,max} W_i \\ B_{i,c}(t) + B_{i,d}(t) \leq 1 \\ W_i(0) = W_i(T) \\ 0 \leq W_i \leq W_{i,0} \end{cases} \quad (33)$$

式中: $\gamma_{i,c}$ 和 $\gamma_{i,d}$ 分别为储能 i 最大充放倍率, %; W_i 为储能 i 总容量, MW; $B_{i,c}(t)$ 和 $B_{i,d}(t)$ 为二进制变量, 分别表示储能 i 在 t 时段充放状态参数; $\nu_{i,max}$ 、 $\nu_{i,min}$ 分别为储能 i 荷电状态的上、下限, %; $W_{i,0}$ 为储能 i 初始容量, MW。

(7) 购电功率约束

$$0 \leq P_{E,buy}(t) \leq P_{E,buy}^{max} \quad (34)$$

式中: $P_{E,buy}^{max}$ 为向上级电网购电的最大功率, MW。

(8) 购气功率约束

$$0 \leq P_{G,buy}(t) \leq P_{G,buy}^{max} \quad (35)$$

式中: $P_{G,buy}^{max}$ 为向上级气网购气的最大功率, MW。

(9) 电功率平衡约束

$$P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{E,buy}(t) + P_{CHP,c}(t) + P_{EES,d}(t) = P_{EB,c}(t) + P_{EES,c}(t) + P_{AL}(t) \quad (36)$$

式中: $P_{EES,c}(t)$ 和 $P_{EES,d}(t)$ 分别为 t 时段EES的充放功率, MW。

(10) 热功率平衡约束

$$P_{CHP,h}(t) + P_{GB,h}(t) + P_{EB,h}(t) + P_{HES,d}(t) = P_{HES,c}(t) + P_H(t) \quad (37)$$

4 算例分析

4.1 基础数据

本文以24 h为调度周期, 调度时间尺度为1h, IES内风电、光伏的预测功率因子及电、热负荷曲线的预测功率如附录图1所示。电解铝电流效率曲线如附录图2所示。分时电价与气价如附录表1所示。IES中各设备参数如附录表2所示, 储能参数如附录表3所示。碳排放模型参数参考文献[14], 电解铝相关参数参考文献[15—16], 单位弃风、弃光

功率惩罚成本 χ_{DG} 为0.2元/kWh。

为对比本文所提模型的优越性, 设置以下3种方案开展对比分析。

(1) 方案1: 不考虑DR和容量优化。

(2) 方案2: 考虑DR, 不考虑容量优化。

(3) 方案3: 考虑DR和容量优化。

上述3种方案的运行结果对比如表1所示。

4.2 DR效益分析

4.2.1 运行优化结果分析

以方案1、2来对比分析DR对IES运行产生的影响。由表1可知, 方案2的总成本相比于方案1降低了3.07%, 碳排放量降低了1.17%。虽然实施DR后, 结合图1电解铝电流效率曲线和式(7)—式(10)进行计算, 产量相应减少11.43 t。然而, 节省的总成本远高于产量下降带来的利润损失。方案1与方案2的电、热负荷调度结果分别如图3、图4所示。

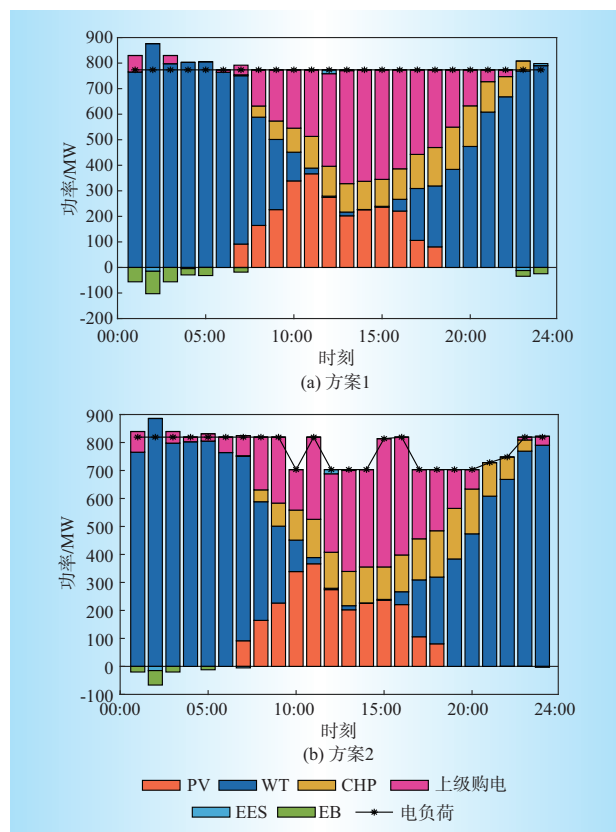


图3 方案1与方案2的电功率平衡

Fig. 3 Electricity power balance in scenarios 1 and 2

表1 方案1-3的运行结果

Table 1 Operation results of scenarios 1-3

方案	总成本/万	购电成本/万	购气成本/万	设备运维成本/万	碳交易成本/万	折算至每天的设备投资成本/万	弃风弃光成本/万	碳排放量/t	电解铝产量/t
1	1 102.77	392.34	240.73	200.39	74.17	194.95	0.19	10 143.22	1 228.00
2	1 068.97	341.71	257.01	201.23	74.07	194.95	0	10 025.00	1 216.57
3	1 064.59	361.45	246.12	198.42	73.04	185.56	0	9 960.11	1 216.46

由图3可见,方案2考虑DR后,在电价低谷时段01:00—07:00和23:00—24:00,系统的电负荷曲线有所升高。CHP运行成本高于购电成本,提升了电网的购电量以满足电负荷需求。此外,EB功率减少,EES储电功率较大。

在时段08:00—22:00,方案2中系统的电负荷曲线整体呈降低趋势。由于此时段购电成本高于CHP运行成本,故系统增加了对CHP的使用,EES并进行放电,从而减少系统购电成本。

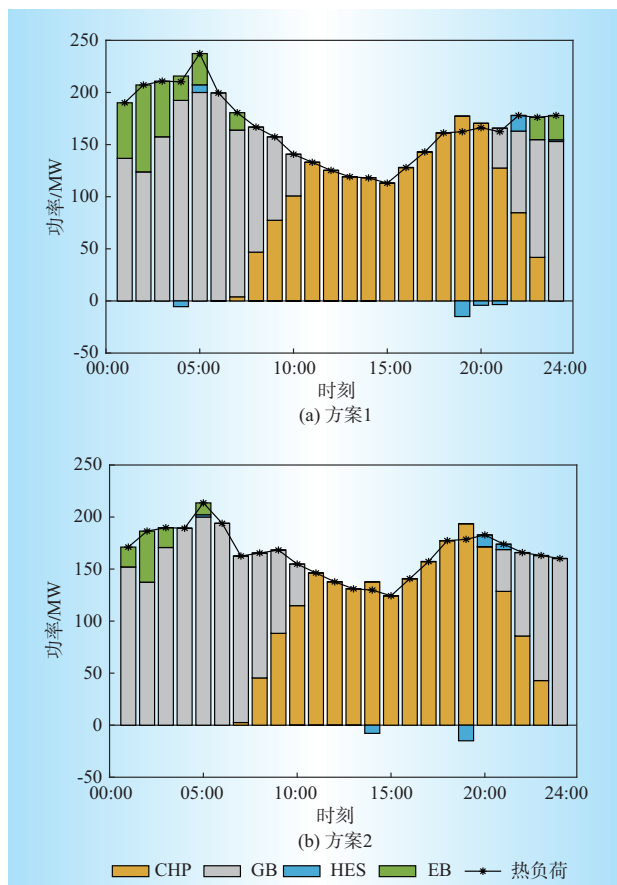


图4 方案1与方案2的热功率平衡

Fig. 4 Heat power balance in scenarios 1 and 2

由图4可见,两种方案在用热高峰时段01:00—08:00和22:00—24:00,系统都是优先利用效率更高的GB供热。方案2考虑DR后,在用热高峰时段,系统的热负荷曲线降低,故减少了对CHP的使用。在时段09:00—21:00,由附录图3可以看出,方案2减少了向电网的购电量,增加了对CHP的使用,进而一定程度上提升系统运行的经济性。

4.2.2 负荷曲线波动分析

进一步地,通过方案1、2对比分析DR对负荷波动性的影响。考虑DR前后用户的电、热负荷曲线如图5所示。由图5可见,在电价低谷时段可转移型负荷的转入将电负荷曲线抬高,用户的热负荷也发生转移,进而使热负荷曲线降低。同时,电负荷

曲线在电价峰时段降低,热负荷曲线在电价峰时段和平时段升高,热负荷曲线峰谷差降低了28.18%。

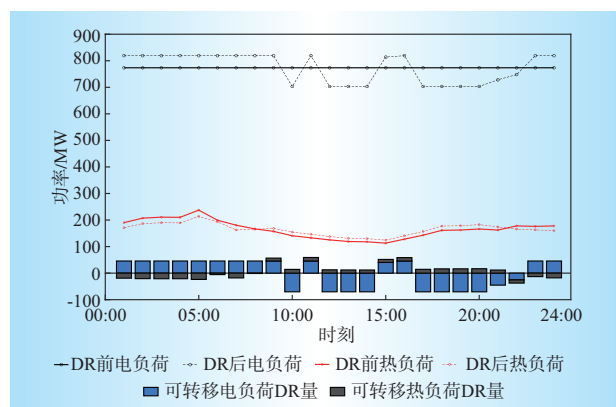


图5 DR前后的负荷曲线

Fig. 5 Load curves before and after DR

4.3 设备容量优化分析

方案3在IES的优化运行中,加入了设备的容量优化。由表1可知,方案3相比于方案2的设备投资成本降低了4.83%。方案2与方案3的设备容量对比如图6所示。

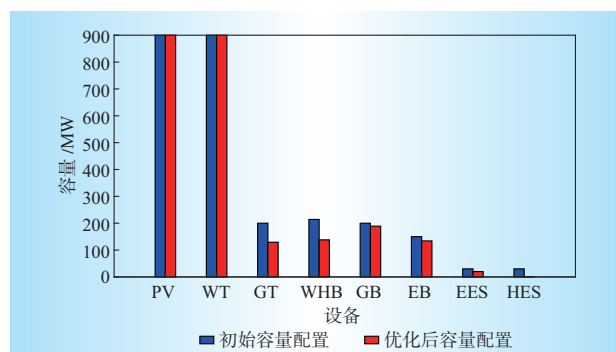


图6 方案2与方案3的设备容量优化对比

Fig. 6 Comparison of equipment capacity optimization in scenarios 1 and 2

由图6可见,方案3在考虑设备容量优化后,除PV和WT外的其余设备容量均有所减小。DR的实施可以平滑用户的用能曲线,设备运行的功率波动更小,因此方案3的设备容量配置规模更低。

5 结束语

本文以实现电解铝IES优化运行为目标,构建了融合电、热能源的IES拓扑架构,并建立了DR模型。在此基础上,通过引入阶梯式碳交易机制对碳排放进行约束。

仿真实验结果表明:DR的实施使IES的运行总成本和碳排放量分别下降了3.07%和1.17%,并同时实现了用电负荷的“削峰填谷”,且热负荷峰谷差也

降低了28.18%。此外,进一步优化设备的容量后,IES运行总成本和碳排放量可分别额外下降0.39%与0.64%,可在保证电解铝产量的前提下,有效提升IES的运行经济性与环保性。D

附录见本刊网络版(<http://dsm.ijournals.cn>)。

参考文献:

- [1] JIA Y, WAN C, CUI W, et al. Peer-to-peer energy trading using prediction intervals of renewable energy generation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 14(2): 1454-1465.
- [2] WOON K S, PHUANG Z X, TALER J, et al. Recent advances in urban green energy development towards carbon emissions neutrality[J]. Energy, 2023, 267: 126502.
- [3] SOVACOO B K, GRIFFITHS S, KIM J, et al. Climate change and industrial f-gases: a critical and systematic review of developments, sociotechnical systems and policy options for reducing synthetic greenhouse gas emissions[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 141: 110759.
- [4] 马恺,袁至,李骥.考虑综合需求响应及绿证-碳交易机制的能源系统低碳经济调度[J].电力需求侧管理, 2024, 26(3): 69-75.
MA Kai, YUAN Zhi, LI Ji. Low carbon economic dispatch of energy system considering integrated demand response and green certificate-carbon trading mechanism[J]. Power Demand Side Management, 2024, 26(3): 69-75.
- [5] 田璧源,刘倩汝,戚红艳,等.阶梯分时碳价下考虑能流-碳流耦合的综合能源园区优化调度[J].电力需求侧管理, 2024, 26(6): 37-43.
TIAN Biyuan, LIU Qianru, QI Hongyan, et al. Optimal dispatch of PIES considering energy carbon flow coupling under carbon trading mechanism[J]. Power Demand Side Management, 2024, 26(6): 37-43.
- [6] 李正茂,张峰,梁军,等.含电热联合系统的微电网运行优化[J].中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3569-3576.
LI Zhengmao, ZHANG Feng, LIANG Jun, et al. Optimization on microgrid with combined heat and power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3569-3576.
- [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, KUI 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] QIN J, WAN Y, YU X, et al. Consensus-based distributed coordination between economic dispatch and demand response[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 10(4): 3709-3719.
- [9] 卢佳富,梁宁,徐慧慧,等.动态碳-绿证交易交互机制下多综合能源系统协调优化调度[J].电力系统自动化, 2025, 49(9): 52-60.
- LU Jiafu, LIANG Ning, XU Huihui, et al. Coordinated optimal dispatch of multiple integrated energy systems under dynamic carbon-green certificate trading interaction mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(9): 52-60.
- [10] XU J, LIAO S, SUN Y, et al. An isolated industrial power system driven by wind-coal power for aluminum productions: a case study of frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 30(1): 471-483.
- [11] 廖思阳,司甜芳,徐箭,等.面向调频辅助服务的电解铝负荷调频容量投标策略[J].电力系统自动化, 2025, 49(15): 54-64.
LIAO Siyang, SI Tianfang, XU Jian, et al. Bidding strategy for frequency regulation capacity of electrolytic aluminum loads oriented to frequency regulation ancillary service[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(15): 54-64.
- [12] 岳晓宇,廖思阳,付立军,等.计及电解铝高耗能负荷调控和火电深调的高比例风电系统分层优化策略[J].电网技术, 2024, 48(8): 3186-3196.
YUE Xiaoyu, LIAO Siyang, FU Lijun, et al. Hierarchical optimization strategy of high-penetration wind power system considering electrolytic aluminum energy-intensive load regulation and deep peak shaving of thermal power[J]. Power System Technology, 2024, 48(8): 3186-3196.
- [13] 罗丽芬,周云峰,李昌林,等.某电解铝企业的碳排放核算方案[J].有色冶金节能, 2019, 35(4): 47-50.
LUO Lifen, ZHOU Yunfeng, LI Changlin, et al. Accounting scheme for carbon emission of an electrolytic aluminum enterprise[J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2019, 35(4): 47-50.
- [14] 杨佳霖,赵鹏翔,窦真兰,等.计及经济性与可靠性的综合能源系统优化调度[J].供用电, 2024, 41(1): 90-99.
YANG Jialin, ZHAO Pengxiang, DOU Zhenlan, et al. Optimal scheduling of integrated energy systems considering economy and reliability[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(1): 90-99.
- [15] 蒋雪怡,徐箭,廖思阳,等.考虑工业用户响应意愿差异性的工业园区多类型负荷协同平抑风电功率波动控制方法[J].武汉大学学报(工学版), 2022, 55(9): 876-885.
JIANG Xueyi, XU Jian, LIAO Siyang, et al. Coordinated control scheme of multi-type loads for wind power fluctuation in industrial parks considering the difference in response willingness of industrial users[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55(9): 876-885.
- [16] 王立鑫.余热回收利用技术在电解铝净化烟气管道上的应用[J].甘肃冶金, 2021, 43(5): 13-15, 19.
WANG Lixin. The application of waste heat recovery technology in flue gas pipeline of electrolytic aluminum purification[J]. Gansu Metallurgy, 2021, 43(5): 13-15, 19.

作者简介:

蒋超(2001),男,重庆万州人,硕士研究生,研究方向为电力需求响应。

(责任编辑 水 鹤)

附录

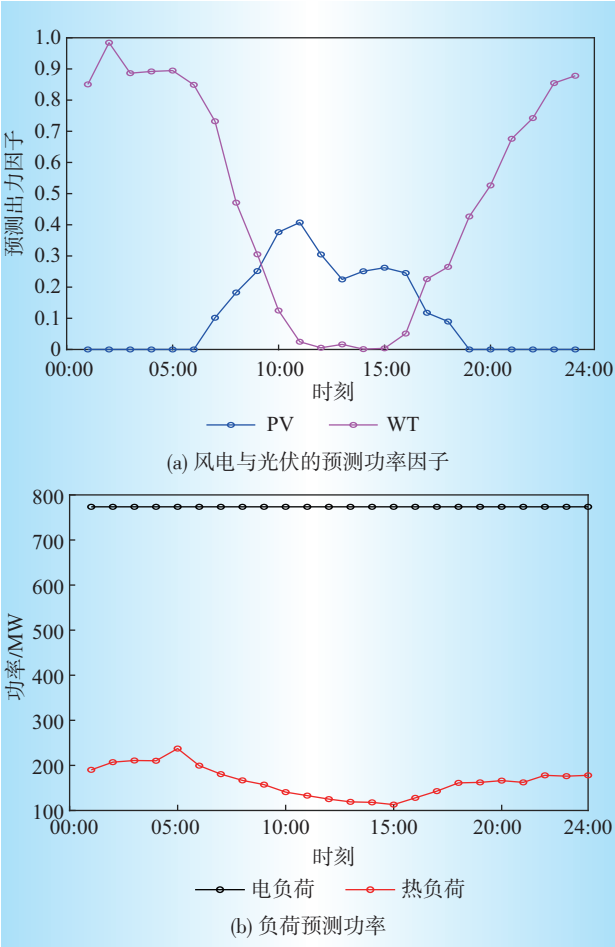


图1 可再生能源与负荷的预测功率
Fig. 1 Forecasting output of renewable energy and loads

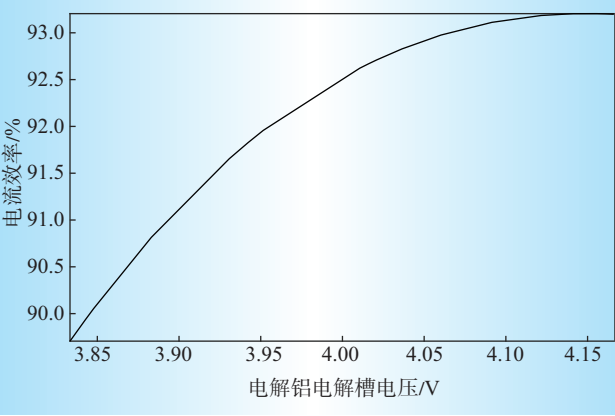


图2 电解铝电流效率
Fig. 2 Current efficiency of electrolytic aluminum

表1 分时电价与气价
Table 1 Time-of-use electricity price and natural gas price
元/kWh

时段	购电电价	气价
01:00—07:00, 23:00—24:00	0.48	0.35
08:00—11:00, 15:00—18:00	0.88	0.35
12:00—14:00, 19:00—22:00	1.10	0.35

表2 设备参数
Table 2 Equipment parameters

设备	WT	PV	GT	WHB	GB	EB
初始安装容量/ MW	900	900	200	214	200	150
能量转换效率/%			电:35 热:50	75.00	0.95	0.95
爬坡约束/%			20	20	20	20
投资建设成本/ (元·kW ⁻¹)	4 000	4 000	4 000	1 000	1 000	500
运行寿命/年	20	25	20	20	18	20
单位维护成本/ (元·kW ⁻¹)	0.08	0.11	0.15	0.15	0.15	0.20

表3 储能系统参数
Table 3 Energy storage parameters

设备	EES	HES
初始安装容量/MW	30	30
最大充、放倍率%	50、50	50、50
最小、最大荷电状态/%	20、90	20、90
投资建设成本/(元·kW ⁻¹)	600	50
运行寿命/年	10	10
单位维护成本/(元·kW ⁻¹)	0.10	0.10