

基于新型电力系统的工业园区综合能源耦合优化运行方法研究

段梅梅, 黄奇峰, 庄重, 周承翰, 方凯杰, 黄艺璇
(国网江苏省电力有限公司营销服务中心, 南京 210000)

摘要: 新型电力系统的建设对我国电力需求侧资源响应提出更高要求。作为我国电力需求侧的主要用户, 工业负荷用电占比高、可调负荷潜力大, 且其负荷曲线受复杂工艺、工序过程影响; 另一方面, 作为我国能源行业转型必然趋势, 多能耦合将成为能源供给侧节能减排的重要手段。文章根据高耗能工业用户负荷聚类分析结果, 提取各工序、工艺下的负荷关键指标, 基于实际工业生产数据构建典型工艺过程用能模型, 预测计及工艺过程特性的工业负荷响应曲线, 以最小化日运行成本为目标, 针对工业负荷用能与产出状态, 提出基于新型电力系统的工业园区综合能源耦合优化运行模型, 比较不同的系统规划方案对运行成本的影响, 证明了所提模型的有效性。

关键词: 工业负荷; 综合能源; 需求侧响应; 新型电力系统

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2026.03.004

中图分类号: TM933

文献标识码: B

文章编号: 1001-1390(2026)03-0033-15

Research on integrated energy coupling optimization operation method of industrial park based on novel power system

DUAN Meimei, HUANG Qifeng, ZHUANG Zhong, ZHOU Chenghan, FANG Kaijie, HUANG Yixuan
(Marketing Service Center, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: The construction of novel power system puts forward higher requirements for resource response of power demand side in China. As the main user of power demand side in China, industrial load accounts for a high proportion of electricity consumption, has a large potential for adjustable load, and its load curve is affected by complex processes and procedures; on the other hand, as the inevitable trend of energy industry transition in China, integrated energy coupling will become an important method of energy saving and emission reduction on the energy supply side. According to the results of load clustering of high energy-consuming industrial users, this paper extracts the key indicators of load under each process and technology, constructs a typical process energy model based on actual industrial production data, and predicts the industrial load response curve considering the characteristics of the process. With the objective of minimizing the daily operation cost, an integrated energy coupling optimization operation model of industrial park based on novel power system is proposed for the industrial loads of energy consumption and output states. The effectiveness of the proposed model is demonstrated by comparing the impacts of different system planning scenarios on the operation cost.

Keywords: industrial load, integrated energy, response of demand side, novel power system

0 引 言

随着国家“双碳”目标的提出与新型电力系统的建设,高比例新能源并网已成为我国电力系统未来发展的必然趋势。而由于高比例新能源的出力

的间歇性、波动性,新型电力系统面临的供需平衡问题和风险发生重大变化,同时新能源规划与能源需求侧负荷特性密切相关,后者制约着新能源的发展速度、规模和利用效率。近年来,电力供需关系持续紧张,电力需求增长势头不减,电力缺口问题长期存在。面对新能源并网带来的不确定性及供

基金项目: 国网江苏省电力有限公司科技项目(J2023136)

需互动性的提升,应积极挖掘需求侧资源潜力,推动其与供给侧的自主协同匹配^[1]。

工业负荷是需求侧的主要用户,2020年-2022年中国工业行业总用电量占据全社会用电量的65%左右^[2]。虽然工业领域用电占比较高,但可调节负荷潜力大,针对基于新型电力系统的工业负荷需求侧响应,国内学者已有诸多研究。

文献[3]根据是否可调对工业热负荷进行精细化分类,同时以日前运行成本最小化为目标,建立条件风险价值模型,平衡其策略的安全性与经济性;文献[4]依据工业负荷的峰谷特性,对其分为三峰型、双峰型、平稳型及避峰型四类,同时与储能电池进行协调配合,构建了一个融合设备配置与调度优化的双层规划模型。文献[5]深入剖析了水泥企业的负荷特性,并据此创新性地提出了一种工业需求侧响应聚合器的结构设计。同时,该研究应用鲁棒优化方法,显著提升了需求侧响应的灵活性,有效降低了水泥行业能源成本。文献[6]研究了钢铁厂电弧炉负荷的需求侧响应潜力,通过对钢铁厂的数学建模实现可控变压器的优化调度。文献[7]在复合材料生产企业特性研究的基础上,发掘其需求侧响应潜力,创新设计了适用于复合材料行业特定生产流程的需求侧响应调控方案,实现了能源管理与生产效率提升之间的协同增效。文献[8]对传统K-means聚类算法进行优化,对工业负荷分类并提取相关特征曲线与参数。文献[9]设计了工业用户负荷削减与转移等方法,通过工业用户自备电厂参与需求侧响应,并与含风电场的多机组进行联合优化调度,提高风电消纳率的同时发挥了不同用户的需求侧响应潜力。

随着能源行业的发展与转型,综合能源耦合与高效集成已成为当今研究的核心议题。工业园区作为新型经济发展载体,因其高度聚集了包括冷、热、电、气在内的多元负荷类型,并具备优越的多能源综合利用条件,成为探索多能耦合系统的典型应用场景。文献[10]以工业园区为研究对象,分析了工业园区综合能源系统的各参与主体合作博弈行为,在此基础上提出了各主体成本分摊和收益分配方法;文献[11]提出能源互联网概念的理解与剖析;文献[12]首先建立工业园区的用能模型,将其纳入含有风光储的工业园区中联合调度,优化发电方案、提升能效;文献[13]以工业互联网为基础,提

出了智能用电互动模式通用架构与智能用电的互动模式应用场景;文献[14]提出了适用于工业园区的指标评价体系;文献[15]考虑工业园区内冷、热、电多能互补特性,提出工业用户、上级电网与园区内冷热电联产机组的互动机制。文献[16]以能源集线器理论为基础,建立不同耦合模式下的电力网与燃气网模型,并提出了相关混合能源计算方法。文献[17]以实际电厂为例,提出了多能直供运营模式,以电厂收益最大为目标优化机组参数与运行方案。

工业负荷与居民负荷、商业负荷不同,工业负荷大多具有冲击性,且易受工业生产中复杂工序、工艺过程影响,具有时变非线性、强参数摄动、生产隐私性强等特点,难以实时获得工业用户内部工序、工艺运行态势,同时,工业负荷的功率随着工况的不同而变化,比如,电解铝企业的铸造机、银锭铸造机、轧机组等均随着时间以及工况的不同功率不断变化。同时,工业园区内多种能源类型往往联系紧密,需求量逐渐上升的同时受具体工艺、工序流程影响较大,使得工业园区负荷特性复杂,对园区内部的能量运行管理及调度策略提出了更为严苛的要求。

因此,以涵盖风、光、储的综合能源系统为对象,研究工业领域典型工艺用能、产出建模方法,充分挖掘工业领域可调节负荷资源以完成用户负荷侧资源灵活监控与管理,实现其综合能源耦合优化运行,解决新型电力系统供需平衡资源不足问题,以达到发电侧与需求侧之间的实时动态平衡是减少化石资源消耗,是尽早实现“碳中和、碳达峰”目标的重要手段。

1 工业园区综合能源耦合系统架构

文章提出基于新型电力系统的工业园区综合能源耦合系统主体架构如图1所示。

在能源供给侧,由上级电网和本地光伏(photo-voltaic, PV)、风电机组(wind turbines, WT)参与供电,考虑到工业领域需求侧的天然气需求,设置外部气源点向系统供给天然气;多能耦合部分是系统的关键环节,热电联产机组(combined heat and power, CHP)、热泵(heat pump, HP)和燃气锅炉(gas boiler, GB)互相耦合;本地与外部的供能设备与电、热、气储能协同调度,为不同场景下的能源需求保证电、热、气供应,实现工业园区综合能源耦合系统的优化运行。

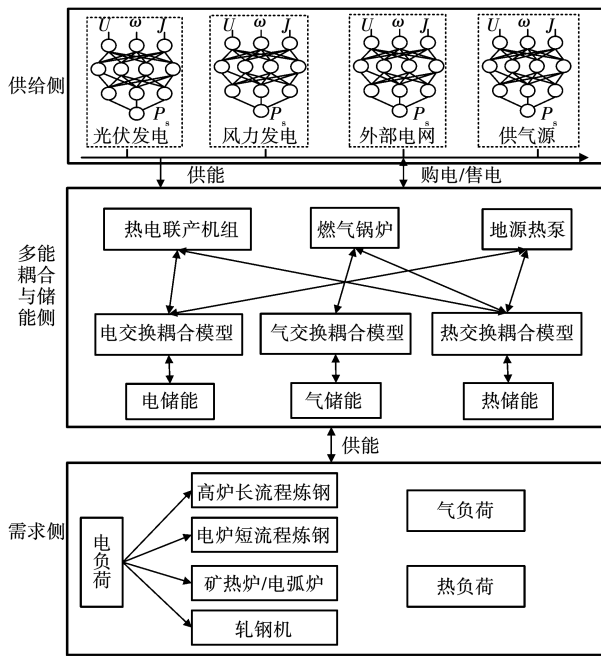


图 1 工业园区综合能源耦合系统架构
Fig. 1 Integrated energy coupling structure for industrial park

2 工业园区综合能源系统数学模型

2.1 需求侧典型工业过程特性分析与用能模型

作为传统的高耗能用电大户,钢铁工业负荷的功率特性一直表现出强烈的波动性,对电网造成严重污染。文章以钢铁工业为例,结合其生产环节中的典型工艺过程,分析各类负荷的相关用能行为,建立不同类型负荷的功率特性模型。

钢铁制造流程涉及众多设备且各具能效优化空间,其生产负荷包括炼钢、精炼及轧制等多个核心环节。炼钢环节综合考虑高炉长流程炼钢与电炉短流程炼钢,精炼环节综合考虑矿热炉与电弧炉,轧钢环节由轧钢机完成,以及包含制氧机、鼓风机、传送机等其他负荷建模。

2.1.1 高炉长流程炼钢

在高炉长流程炼钢过程中,电能用于驱动高炉内送风设备、布料设备等运行,煤与铁矿在高炉中发生还原反应,产生粗钢,并伴随煤气作为副产物。据此,建立高炉长流程炼钢模型如下^[18-19]:

$$\begin{cases} K_{lp} = q_{lp,coal} \cdot W_{coal} \\ K_{lp} = q_{lp,Fe} \cdot W_{Fe} \\ K_{lp} = e_{lp} \cdot P_{lp} \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_{lp} 为典型高炉炼钢过程中的 1 h 内粗钢产出量/t; W_{coal} 和 W_{Fe} 分别为典型高炉炼钢过程中 1 h 内

的煤炭、铁矿石消耗量/t; P_{lp} 为典型高炉炼钢过程中的 1 h 耗电量/kWh; $q_{lp,coal}$ 、 $q_{lp,Fe}$ 和 e_{lp} 分别为典型高炉炼钢过程中生产 1 t 粗钢需要的煤炭量、铁矿量和电能,如表 1 所示。

表 1 长、短流程炼钢消耗资源参数

Tab. 1 Resource consumption parameters for long and short process steelmaking

损耗项目	吨钢消耗值	
	长流程炼钢	短流程炼钢
铁矿石/t	1.65	—
废钢/t	—	1.1
电耗/kWh	150	400
煤耗/t	0.5	—

2.1.2 电炉短流程炼钢

在典型电炉短流程炼钢过程中,通过电炉内的电极,电能转化为热能并直接作用于废钢,使其熔化并精炼成粗钢。据此,电炉短流程炼钢模型如下^[18-19]:

$$\begin{cases} K_{dp} = q_{dp,sFe} \cdot W_{sFe} \\ K_{dp} = e_{dp} \cdot P_{dp} \end{cases} \quad (2)$$

式中: K_{dp} 为典型电炉炼钢过程中 1 h 内粗钢产出量/t; W_{sFe} 为典型电炉炼钢过程中 1 h 内废钢消耗量/t; P_{dp} 为典型电炉炼钢过程中 1 h 内耗电量/kWh; $q_{dp,sFe}$ 和 e_{dp} 为典型电炉炼钢过程中生产 1 t 粗钢消耗的废钢量和电能。

2.1.3 矿热炉

矿热炉主要用于钢铁及铁合金的冶炼过程,其工作原理是通过电极与炉料间产生电弧来实现放热冶炼。在矿热炉电气系统中,高压母线电压 U_{SAF-AH} 经变压器得到适用于矿热炉工作的低压侧电压 U_{SAF} ,其大小可由变压器变比调节。

$$U_{SAF} = \frac{U_{SAF-AH}}{k_{SAF}} \quad (3)$$

式中: k_{SAF} 为矿热炉专用变压器变比。

矿热炉的负荷特性可以简化为电压源 U_{SAF} 与串联连接的短网等效阻抗 Z_{line} 和电弧等效阻抗 Z_{arc} 。其中,短网等效阻抗通常认定为常数,而电弧等效阻抗在某一瞬时状态下可分解为静态电阻 R_{arc} 和静态电抗 X_{arc} 。

电弧等效阻抗中的静态电阻值与静态电抗值之间存在着显著的相关联系^[20]。通过对实际生产数据进行回归分析,可确立如下关联关系:

$$X_{arc} = a_1 R_{arc}^2 + a_2 R_{arc} + a_3 \quad (4)$$

式中: a_1 、 a_2 、 a_3 为回归分析的拟定系数。

矿热炉工作过程中,其有功功率 P_{SAF} 、无功功率 Q_{SAF} 可由式(5)、式(6)分别计算得到,可通过变压器变比调节:

$$P_{SAF} = \frac{(R_{line} + R_{arc}) U_{SAF}^2}{(R_{line} + R_{arc})^2 + (X_{line} + X_{arc})^2} \quad (5)$$

$$Q_{SAF} = \frac{(X_{line} + X_{arc}) U_{SAF}^2}{(R_{line} + R_{arc})^2 + (X_{line} + X_{arc})^2} \quad (6)$$

2.1.4 电弧炉

电弧炉在钢铁生产流程中承担着与矿热炉相似的核心职责,即通过高温加热和有效除杂手段将铁水、废钢及混合物转化为高品质钢液。当电炉开启供电后,操作人员会逐步降低电极位置直至电极与炉料间形成足以击穿空气的电位差并诱发电弧现象;此刻,电弧炉的功率将在短时间内迅猛提升至预先设定的稳定功率级别。然而,在实际冶炼流程中,受炉膛温度起伏、材料状态变换等因素左右,电弧炉运行时的功率曲线呈现出一种蕴含丰富高频震荡特点的“波动带状”特性。

待熔炼过程完成后,操作员会逐步提升电极位置以熄灭电弧,并迅速断开供电,确保停炉操作在数秒内高效完成。为此,定义一个时间函数 $PLF(t)$ 来精确描述整个冶炼周期内电弧炉的动态功率变化情况,该函数图形可在图 2 中直观呈现。

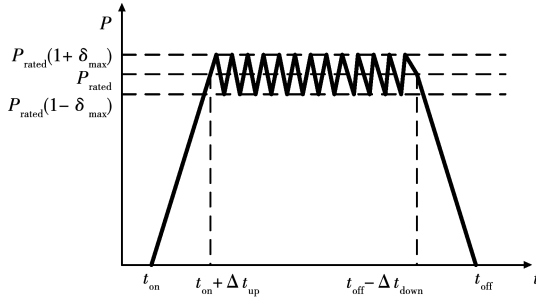


图 2 电弧炉生产功率波形

Fig. 2 Power waveform of electric arc furnace production

$$P_{LF}(t) = \begin{cases} 0, & t \leq t_{on} \\ \frac{P_{rated}}{\Delta t_{up}}(t - t_{on}), & t_{on} \leq t \leq t_{on} + \Delta t_{up} \\ P_{rated}(1 + \delta(t)), & t_{on} + \Delta t_{up} \leq t \leq t_{off} - \Delta t_{down} \\ \frac{P_{rated}}{\Delta t_{down}}(t_{off} - t), & t_{off} - \Delta t_{down} \leq t \leq t_{off} \\ 0, & t_{off} \leq t \end{cases} \quad (7)$$

式中: t_{on} 表示电弧炉高温加热过程中的通电起弧时刻; Δt_{up} 表示电弧炉在高温加热过程中从起弧时刻达到稳定加热额定功率时刻所需的时长,通常为 5 s ~ 10 s; t_{down} 为操作人员在达到电弧炉加热工艺所需温度后下令关停电弧炉到功率降低到电弧炉功率为 0 所需的时长, Δt_{down} 通常不大于 10 s; t_{off} 为电弧炉彻底断电时刻; P_{rated} 为电弧炉运行时的额定功率; $\delta(t)$ 是一个在 $(-\delta_{max}, +\delta_{max})$ 之间随机生成的时间值,用以表示电弧炉在升温加热过程中达到稳态运行后可能遭遇的随机功率波动,根据电弧炉工艺过程实际工况,一般可将 δ_{max} 设置为 5% ~ 20%。

在针对同一台电弧炉的实际运行分析时,可以视典型钢铁工艺过程中的具体情境将式(7)中的升温 and 降温时间变量 Δt_{up} 和 Δt_{down} , 以及额定功率 P_{rated} 和最大功率波动幅度 δ_{max} 均视为固定不变的数值。这样一来,对于这台特定电弧炉在某一时间段内的工作表现,仅需提供该工艺过程时段内电弧炉启动与停止的确切时序数据,即 t_{on} 和 t_{off} 的时间序列,就能有效地描绘出它在此整个生产周期内所呈现的功率变化曲线特征。

2.1.5 轧钢机

轧钢负荷作为电动机负载的一种特殊形态,其核心职能在于驱动钢坯的塑性变形过程。当钢坯初始进入轧制阶段时,轧机承载的功率输出呈现显著跃升态势;而在钢坯完成轧制、脱离轧机作用范围之际,该轧机系统的瞬时功率消耗则急剧回落。

在典型的轧钢流水线上,轧机系统通常被划分为粗轧和精轧两个阶段。其中,粗轧设备采用可逆式工作模式,经过一系列交错往复的奇数次轧制过程后,钢坯会通过单台粗轧机完成初步成型;而精轧机组则构成连续作业区,相当于单次粗轧流程,钢坯仅需一次性通过即进入后续处理环节。如图 3(a) 所示,钢坯首先经历粗轧阶段 R_1 , 随后在粗轧机 R_2 中经历 5 次往复变形(分别标记为 $R_2(1)$ 至 $R_2(5)$), 之后被输送至由 F_1 至 F_7 组成的七台精轧机组,依次高速通过,至此完成了一块钢坯完整的轧制工艺流程。

在上述生产流程中,每当钢坯经过一台轧机时,都会导致瞬时功率的显著变化。以制作一块中厚钢板为例,整个生产过程中各阶段对应的功率波动情况可通过图 3(b) 所示的功率波形直观展现。

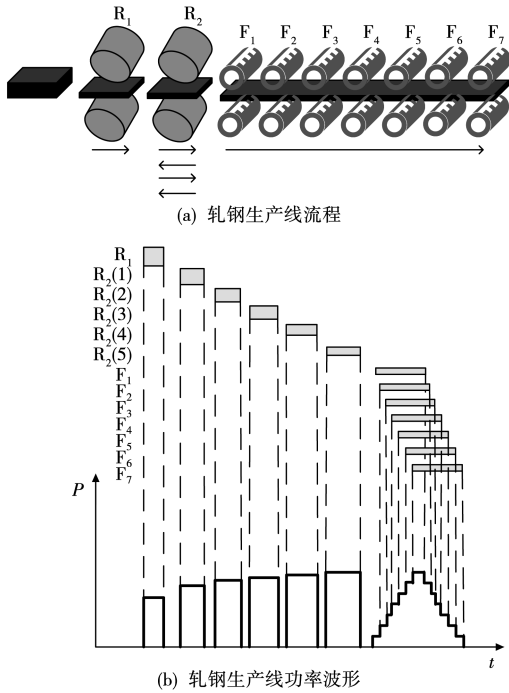


图 3 轧钢机负荷功率

Fig. 3 Power of steel rolling production

为清晰揭示整条轧钢生产线功率波动的内在规律,此处我们采用一个以时间 t 为自变量的简化门控函数模型来表达单台轧钢设备负荷的瞬时功率变化特征:

$$P_{\text{roll}}(t, t_0, \Delta t, a) = \begin{cases} a, & t_0 \leq t \leq t_0 + \Delta t \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $P_{\text{roll}}(t, t_0, \Delta t, a)$ 代表轧钢机轧钢过程中一块钢坯通过单一轧机所生成的瞬时功率;其中, t_0 标志着轧钢机轧钢过程中钢坯开始进入轧机的瞬间时刻;而 Δt 则是钢坯完全穿过轧机所需的持续时间,同时, a 则代表了轧机在这段时间 Δt 内的平均功率输出。将 Δt 和 a 共同视为反映轧机特性的关键参数。值得注意的是,在对同批次产品的连续轧制过程中,无论哪块钢坯穿越同一台轧机,其穿越时间 Δt 及平均功率 a 均可被视为相对恒定的数值。

现设定钢铁生产场景中包含 n_{steel} 块钢坯、 n_{rough} 台粗轧设备以及 n_{finish} 台精轧设备,其中每台第 i 号粗轧机拥有 k_i 道次的轧制工艺。为精确刻画整个轧钢流程中的功率变化特征,对于任意一台执行 k_i 道次轧制工艺的第 i 号粗轧机,在其对首块钢坯进行轧制时所产生的瞬时功率变化曲线 $P_{R_{1,i}}(t)$,如式(9)所示:

$$P_{R_{1,i}}(t) = \sum_{j=1}^{k_i} P_{\text{roll}}(t, t_{R_{ij}}, \Delta t_{R_{ij}}, a_{R_{ij}}) \quad (9)$$

式中: R_{ij} 为典型钢铁工艺过程中钢坯第 j 次进入第 i 台粗略轧钢机的时刻; $\Delta t_{R_{ij}}$ 为典型钢铁工艺过程中钢坯第 j 次通过第 i 台粗略轧钢机耗费的时长; $a_{R_{ij}}$ 为钢坯第 j 次通过第 i 台粗轧机的平均功率。第 1 块钢坯通过 n_{rough} 台粗略轧钢机并且完成典型钢铁工艺过程中所需的粗轧过程产生的功率波形 $P_{R_1}(t)$ 可用式(10)表示:

$$P_{R_1}(t) = \sum_{i=1}^{n_{\text{rough}}} P_{R_{1,i}}(t) \quad (10)$$

同理可得在典型钢铁工艺过程中,第 i 台精轧机在精密轧制第 1 块钢坯时所需的功率 $P_{F_{1,i}}(t)$ 如式(11)所示:

$$P_{F_{1,i}}(t) = P_{\text{roll}}(t, t_{F_i}, \Delta t_{F_i}, a_{F_i}) \quad (11)$$

式中: F_i 为过程控制下的钢铁工艺过程中钢坯进入第 i 台精密轧钢机的时刻; Δt_{F_i} 为钢坯通过第 i 台精密轧钢机耗费的时长; a_{F_i} 为钢坯通过第 i 台精密轧钢机的平均功率。

根据以上公式可进一步推断出第 1 块钢坯通过 n_{finish} 台精密轧钢机并完成钢铁工艺所需的精密轧钢过程所需产生的功率 $P_{F_1}(t)$ 如式(12)所示:

$$P_{F_1}(t) = \sum_{i=1}^{n_{\text{finish}}} P_{F_{1,i}}(t) \quad (12)$$

则 n_{steel} 块钢坯完成所有典型钢铁生产工序所必需的钢坯粗轧钢时的功率 $P_{R_{\text{total}}}(t)$ 和精密轧钢工序的功率 $P_{F_{\text{total}}}(t)$ 分别如式(13)和式(14)所示:

$$P_{R_{\text{total}}}(t) = P_{R_1}(t) + P_{R_2}(t) + \dots + P_{R_{n_{\text{steel}}}}(t) = P_{R_1}(t) + P_{R_1}(t - \Delta T_{R_2}) + \dots + P_{R_1}(t - \Delta T_{R_{n_{\text{steel}}}}) = P_{R_1}(t) + \sum_{i=2}^{n_{\text{steel}}} P_{R_1}(t - \Delta T_{R_i}) \quad (13)$$

$$P_{F_{\text{total}}}(t) = P_{F_1}(t) + P_{F_2}(t) + \dots + P_{F_{n_{\text{steel}}}}(t) = P_{F_1}(t) + P_{F_1}(t - \Delta T_{F_2}) + \dots + P_{F_1}(t - \Delta T_{F_{n_{\text{steel}}}}) = P_{F_1}(t) + \sum_{i=2}^{n_{\text{steel}}} P_{F_1}(t - \Delta T_{F_i}) \quad (14)$$

由式(13)和式(14)相加可得 n_{steel} 块钢坯在典型钢铁生产工序中完成系统分配的轧钢作业的功率 $P_{R_{F_{\text{total}}}}(t)$ 如式(15)所示:

$$P_{R_{F_{\text{total}}}}(t) = P_{R_{\text{total}}}(t) + P_{F_{\text{total}}}(t) = P_{R_1}(t) + \sum_{i=2}^{n_{\text{steel}}} P_{R_1}(t - \Delta T_{R_i}) + P_{F_1}(t) + \sum_{i=2}^{n_{\text{steel}}} P_{F_1}(t - \Delta T_{F_i}) \quad (15)$$

2.1.6 稳定负荷

在钢铁行业中,诸如水泵、鼓风机、除尘机及传送带等辅助设备通常表现出较小的功率波动性,在

未经人工干预下的中短期运行过程中,其功率输出可视为相对恒定。因此,对于典型钢铁生产工序时,系统内部含有的其他负荷 $P_s(t)$,可以通过如下公式予以近似描述:

$$P_s(t) = (1 + \delta_s(t))P_{srated} \quad (16)$$

式中: P_{srated} 代表了其他类型负荷正常运行时功率总和的额定值; $\delta_s(t)$ 则是一个取值在 $(-\delta_{smax}, +\delta_{smax})$ 区间内的随机变量,它反映了这类负荷在运行过程中可能发生的随机功率波动程度。鉴于其他类负荷在中短期时段内表现出相对稳定的特性,故可将 δ_{smax} 设定为额定功率的 5% 作为其最大波动幅度。

2.2 供能侧综合能源系统建模

在研究综合能源系统耦合优化运行的过程中,构建精准的单元模型是至关重要的环节。在本研究中,着重探讨的供能单元涵盖了多元能源耦合转换与存储的一系列核心设备,不仅限于电加热锅炉、热电联产系统、燃气燃烧锅炉,还包括了电能储存装置、针对热能的存储设备以及针对气体的天然气储能系统等关键元素。基于已经构建的工业园区综合能源系统的基础架构及工业负荷模拟,本章节将对其核心原理予以提炼归纳。

2.2.1 热电联产机组模型

热电联产系统的核心架构围绕微型燃气轮机与余热回收锅炉构建,其工作原理在于借助天然气在高温环境下的高效燃烧驱动微燃发电机组以满足电力负荷要求。其在运行过程中需要重点考虑能源效率以及负荷需求,以实现能源的高效利用和降低企业的能源成本。该过程中产生的额外热量可以通过余热锅炉进行收集并转化为可供热的热能资源以提高能源利用效率。因此,本文采用热电转换模型来描述其内在的动态特性,在未考虑外界条件对整机性能的影响时,其数学模型如下:

$$H_{CHP}(t) = \eta_h^C P_{CHP}^{ele}(t) / \eta_e^C \quad (17)$$

$$P_{CHP}^{ele, min} \leq P_{CHP}^{ele}(t) \leq P_{CHP}^{ele, max} \quad (18)$$

$$-R_{CHP} \leq P_{CHP}^{ele}(t) - P_{CHP}^{ele}(t-1) \leq R_{CHP} \quad (19)$$

式中: $H_{CHP}(t)$ 是 CHP 机组在 t 时刻的产热量;CHP 机组的制热效率系数以 η_h^C 表示;其电功率输出范围界定在最小值 $P_{CHP}^{ele, min}$ 和最大值 $P_{CHP}^{ele, max}$ 之间;而单位时间内的电功率变化速率上限则由参数 R_{CHP} 体现。

2.2.2 燃气锅炉模型

燃气锅炉作为一种耦合气热能流的核心转换装置,在综合能源系统运作中扮演着关键角色。它通过高效利用天然气资源来满足各类热负荷需求,

具备运行安全、环保且成本效益显著的特点,有力促进了系统内气热能量交换的紧密耦合关系。其常用的数学模型表达式为:

$$H_{CHP}(t) = \eta_h^C P_{CHP}^{ele}(t) / \eta_e^C \quad (20)$$

$$P_{CHP}^{ele, min} \leq P_{CHP}^{ele}(t) \leq P_{CHP}^{ele, max} \quad (21)$$

$$-R_{CHP} \leq P_{CHP}^{ele}(t) - P_{CHP}^{ele}(t-1) \leq R_{CHP} \quad (22)$$

式中: $P_{GB}^{gas}(t)$ 、 $Q_{GB}(t)$ 和 L_A 分别表示于瞬时 t 内,燃气锅炉的天然气能量输入功率、对应的气体流量参数以及天然气的单位体积低热值; $P_{GB}^{heat}(t)$ 、 η_{GB} 和 $H_{GB}(t)$ 分别表示在 t 时刻,系统中燃气锅炉的瞬时热功率输出、气-热能量转换效能以及实际累计产生的热量总量。

2.2.3 地源热泵

地源热泵作为一款以电能驱动,能够汲取地下恒温能源进行高效制暖和制冷的设备,其在能效表现上超越了燃气锅炉与吸收式制冷机,并且在运行过程中无任何污染物排放。已知地源热泵的冷暖效率易受季节性因素显著影响,而在常规日间工况下相对恒定。为此,本文将地源热泵的制冷性能系数设定为不变数值以进行研究^[21]。

$$H_{HP}(t) = \eta_{HP}^h P_{HP}^h(t) \quad (23)$$

$$P_{HP}^{h, min} \leq P_{HP}^h(t) \leq P_{HP}^{h, max} \quad (24)$$

式中: $P_{HP}^h(t)$ 为地源热泵的耗电量; η_{HP}^h 为热泵的制热效率系数; $P_{HP}^{h, min}$ 和 $P_{HP}^{h, max}$ 分别指示了该热泵系统运行时的最低与最高电功率阈值; $H_{HP}(t)$ 为地源热泵的制热量。

2.2.4 电储能模型

针对日内电价波动的精密适应性管理,借助优化充放电策略来调谐电网运行的稳定状态,并同步实现削峰填谷功能,旨在深层次地削减整体电力系统的运营成本。这一过程可以式(25)表示:

$$E_{ES}(t) = E_{ES}(t-1) + \left[\eta_{store}^{ele} P_{store}^{ele}(t) - \frac{P_{release}^{ele}(t)}{\eta_{release}^{ele}} \right] \Delta t \quad (25)$$

式中: t 及前一时刻 $t-1$ 所积累的电能存量分别以变量 $E_{ES}(t)$ 和 $E_{ES}(t-1)$ 表示。在同一瞬时 t 内,储能单元的充放电动态由其充电功率 $P_{store}^{ele}(t)$ 、放电功率 $P_{release}^{ele}(t)$ 以及相对应的双向效率参数——即充电效率 η_{store}^{ele} 与放电效率 $\eta_{release}^{ele}$ 来刻画。

2.2.5 热储能模型

在综合能源系统中,热储能装置扮演着关键角色,其主要功能在于通过调蓄产热机组的输出波动性。储能装置能适应新能源机组功率输出的波动

性,在电价变化时通过优化调度实现系统运营成本的有效缩减。其关键物理特性涵盖了存储容量、能量吸收与释放性能以及热效率等方面。对应的数学模型通常采用以下公式予以表述:

$$H_{HS}(t) = H_{HS}(t-1) + \left[\eta_{store}^{heat} P_{store}^{heat}(t) - \frac{P_{release}^{heat}(t)}{\eta_{release}^{heat}} \right] \Delta t \quad (26)$$

式中: $H_{HS}(t)$ 和 $H_{HS}(t-1)$ 分别表示在 t 时刻以及 $t-1$ 时刻热储能所储存的热量; $P_{store}^{heat}(t)$ 、 $P_{release}^{heat}(t)$ 、 η_{store}^{heat} 、 $\eta_{release}^{heat}$ 分别表示系统中热储能设备在 t 时刻的储热功率和放热功率,以及系统中热储能设备在 t 时刻的储热效率以及放热效率。

2.2.6 气储能模型

气储能作为综合能源系统中关键的储能手段之一,其价值在于通过科学调度实现天然气的有效储存。当面临气源供应短期波动或用气需求达到峰值时,储能设备可依据需求灵活释气以应对气负荷峰值及供能设施瞬时有用气需求,借此有效压低整体运营成本。数学模型常采用如下表达形式来描述这一过程。

$$Q_{GS}(t) = Q_{GS}(t-1) + \left[\frac{\eta_{store}^{gas} P_{store}^{gas}(t)}{L_A} - \frac{P_{release}^{gas}(t)}{\eta_{release}^{gas} L_A} \right] \Delta t \quad (27)$$

式中: $Q_{GS}(t)$ 和 $Q_{GS}(t-1)$ 分别表示与天然气设备连接的储能设备在 t 时刻以及 $t-1$ 时刻所储存的天然气容量; $P_{store}^{gas}(t)$ 、 $P_{release}^{gas}(t)$ 、 η_{store}^{gas} 和 $\eta_{release}^{gas}$ 分别表示在 t 时刻,与天然气连接的储能设备存储的功率、与天然气连接的储能设备释放的功率、与天然气连接的储能设备的功率存储效率以及释放效率。

2.2.7 储能设备约束条件

储能设备的容量约束为:

$$\begin{cases} E_{ES}^{\min} \leq E_{ES}(t) \leq E_{ES}^{\max} \\ H_{HS}^{\min} \leq H_{HS}(t) \leq H_{HS}^{\max} \\ Q_{GS}^{\min} \leq Q_{GS}(t) \leq Q_{GS}^{\max} \end{cases} \quad (28)$$

储能设备的功率约束为:

$$\begin{cases} S_s(t) P_{smin} \leq P_{store}(t) \leq S_s(t) P_{smax} \\ S_r(t) P_{rmin} \leq P_{release}(t) \leq S_r(t) P_{rmax} \end{cases} \quad (29)$$

式中: t 为基于电、热、气储能系统功率约束的共性特征,采用统一符号来表征各自在时间 t 内的功率约束条件。其中, $P_{store}(t)$ 和 $P_{release}(t)$ 代表储能设备在瞬时 t 的充电和放电功率;而上限及下限阈值则分别由变量 P_{smin} 、 P_{smax} 、 P_{rmin} 、 P_{rmax} 描述;与此同时,

$S_s(t)$ 和 $S_r(t)$ 则反映了储能装置在该时刻正在进行的充/放电状态。

储能设备的充放状态约束为:

$$\begin{cases} S_s(t) = \{0, 1\} \\ S_r(t) = \{0, 1\} \end{cases} \quad (30)$$

$$0 \leq S_s(t) + S_r(t) \leq 1 \quad (31)$$

2.3 工业园区综合能源耦合优化运行建模

2.3.1 目标函数

文中构建了一种优化模型,其核心在于运用价格激励措施来调整新能源机组运行,并致力于最小化整个综合能源系统每日的运营总成本。该目标函数整合了五个关键成本构成要素:首先是外部天然气资源采购的成本;其次是与外电网购电过程中产生的交换费用;再次是系统内部各设备单元维护保养的支出;紧接着是可控发电机组启动阶段的成本投入;最后是针对新能源机组实施的价格激励策略所带来的附加成本考量^[22]。因此,在构筑此目标函数时,全面考虑不同能效状态下的量化表现,包括用能状态、产出状态^[23-24],目标函数表达形式如下:

$$\min C = C_{CHP}^{gas} + C_{GB}^{gas} + C_{GRD} + C_{ME} - I_{PS} \quad (32)$$

式中: C_{CHP}^{gas} 、 C_{GB}^{gas} 、 C_{GRD} 、 I_{PS} 分别表示一天内天然气消耗成本、与电网交互过程中的购售电费用以及新能源激励政策下因采用可再生能源发电而获得的收益。

1) 系统购买外部天然气费用

$$C_{CHP}^{gas} = \sum_{t=1}^T C_{GAS} P_{CHP}^{gas}(t) \Delta t \quad (33)$$

$$C_{GB}^{gas} = \sum_{t=1}^T C_{GAS} P_{GB}^{gas}(t) \Delta t \quad (34)$$

式中: T 表示系统运行的整体调度时段总数;天然气单价以及在时间 t 时刻热电联产系统(CHP)和燃气锅炉消耗天然气产生的实时功率分别由特定变量 C_{GAS} 、 $P_{CHP}^{gas}(t)$ 代表;同时,调度周期的基本时间单元也有 Δt 体现。

2) 系统与外部电网购售交互费用

$$C_{GRD} = \sum_{t=1}^T [C_{BG}(t) P_{BG}(t) - C_{SG}(t) P_{SG}(t)] \Delta t \quad (35)$$

式中: $C_{BG}(t)$ 、 $P_{BG}(t)$ 、 $C_{SG}(t)$ 和 $P_{SG}(t)$ 分别表示在 t 时刻,系统向电网购电电价、购电功率、向电网售电电价以及售电功率。

3) 系统机组设备维护费用

$$C_{ME} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N C_i^{MC} P_i(t) \quad (36)$$

式中: N 为各机组种类的数量; C_i^{MC} 表示设备 i 的单位维护成本; $P_i(t)$ 表示设备 i 在 t 时刻的输出功率。在公式中, N 代表系统内各类设备的总数; C_i^{MC} 表征了设备 i 每单位输出能量所需的维护成本; 而 $P_i(t)$ 则表示在时间 t 时点上, 设备 i 的实际功率输出值。

4) 新能源激励机制收入^[25]

$$I_{PS} = \sum_{t=1}^T [I_{PVS} P_{PV}(t) + I_{WTS} P_{WT}(t)] \Delta t \quad (37)$$

在本文所构建的综合能源系统框架下, 针对风力发电与光伏发电等新能源设备的激励机制设计, 聚焦于运用价格激励这一核心策略, 对其开展深入且具体的优化探究如上所示。 $P_{PV}(t)$ 、 $P_{WT}(t)$ 分别表示在 t 时刻的实际风光出力功率, I_{PVS} 、 I_{WTS} 分别表示光伏与风电出力的单位激励收入。

2.3.2 约束条件

本研究构建的优化模型, 其约束条件涵盖了多元平衡要素, 包括但不限于电力、热量及气体负荷的平衡限制^[25], 与外部电网间的购电与售电功率交互阈值制约, 可控发电机组性能参数约束, 以及机组输出功率的爬坡速率限制^[26]。此外, 储能设备的操作约束同样重要, 但此部分已在前文已阐述, 此处不再赘述。

1) 系统电力平衡约束

$$P_{BG}(t) + P_{CHP}^{ele}(t) + P_{PV}(t) + P_{WT}(t) = P_{SG}(t) + P_{LOAD}(t) + E_{ES}(t) + E_{ES}(t-1) \quad (38)$$

式中: $P_{LOAD}(t)$ 、 $P_{CHP}^{ele}(t)$ 、 $P_{BG}(t)$ 、 $P_{SG}(t)$ 、 $P_{PV}(t)$ 、 $P_{WT}(t)$ 和 $E_{ES}(t)$ 分别表示在 t 时刻, 系统的电负荷需求、热电联产机组产生的电功率、从电网购入的电功率、向电网售出的电功率、光伏机组产生的电功率、风电机组产生的电功率以及电储能设备存储电力。

2) 系统热平衡约束

$$H_{load}(t) = H_{HP}(t) + H_{CHP}(t) + H_{GB}(t) + H_{HS}(t-1) - H_{HS}(t) \quad (39)$$

式中: t 为在时间 t 节点上, 系统热负荷需求、地源热泵输出热量、热电联产 (CHP) 机组产生的能量、燃气锅炉的供热功率以及当前时刻热储能装置中储存的热量, 分别由变量 $H_{load}(t)$ 、 $H_{HP}(t)$ 、 $H_{CHP}(t)$ 、 $H_{GB}(t)$ 和 $H_{HS}(t)$ 表示; 而前一时刻 ($t-1$), 热储能设备所存储的热量则通过 $H_{HS}(t-1)$ 参数加以量化体现。

3) 系统的气负荷平衡约束

$$Q_{load}(t) = Q_{source}(t) - Q_{GB}(t) + Q_{GS}(t-1) - Q_{GS}(t) \quad (40)$$

式中: $Q_{load}(t)$ 和 $Q_{source}(t)$ 分别表示在 t 时刻, 系统的气负荷需求、气源点出气量。

4) 气源点约束

$$0 \leq Q_{source} \leq Q_{smax} \quad (41)$$

式中: Q_{smax} 表示气源点出气量最大值。

5) 系统与外部电网购售交互功率约束:

$$\begin{cases} P_{Bmin}(t) \leq P_{BG}(t) \leq P_{Bmax}(t) \\ P_{Smin}(t) \leq P_{SG}(t) \leq P_{Smax}(t) \end{cases} \quad (42)$$

式中: 在时间 t 内, 系统从电网汲取的电能存在下限阈值与上限限制, 分别由变量 $P_{Bmin}(t)$ 和 $P_{Bmax}(t)$ 表征; 同时, 在同一时间节点上, 系统向电网回馈电力资源时亦遵循一定的功率交易区间, 其最小可售回电力额度和最大允许交易功率则通过 $P_{Smin}(t)$ 和 $P_{Smax}(t)$ 来界定。

3 算例分析

3.1 算例设置

本章聚焦于我国北方某钢铁产业的能源管理实践, 确立了以完整日间周期 (24 h) 作为核心调度维度, 并细分至每 1 h 的时间区间进行精细化调控分析。风光互补能源系统的预测功率输出曲线在图 4 中展现, 系统与外部电网的购售电价详情, 以及系统内部各设备单元的具体参数配置, 分别以图形和表格形式呈现于图 5 与表 2 中。尤为指出的是, 系统从气源点购买天然气的成本换算依据天然气热值标准 (GHV 为 35.54 MJ/m³), 经折算后的等效价格为 0.35 元/kWh。另外, 图 6 与图 7 则展示了轧钢生产线及电弧炉在仿真模拟状态下的功率波形表现结果。

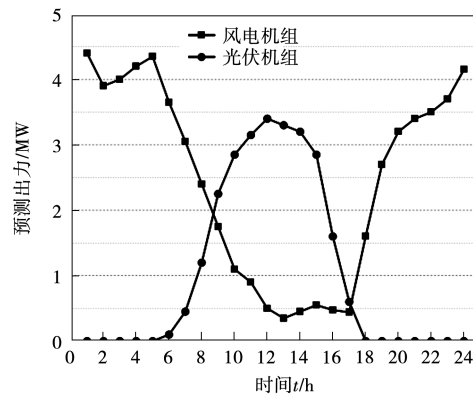


图 4 风光机组预测出力

Fig. 4 Forecast power curves of WT and PV units

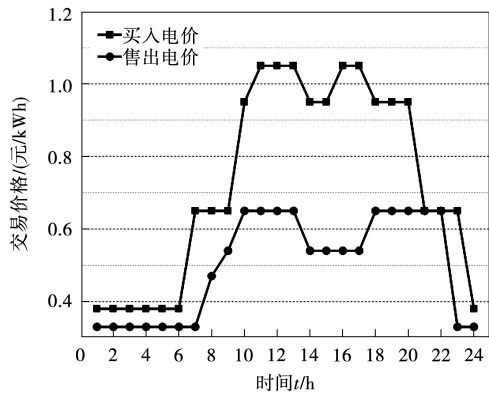


图 5 与外部电网交易价格

Fig. 5 Price curves for transactions with external grids

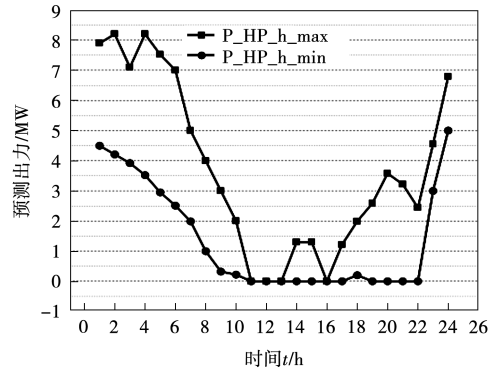


图 6 热泵出力上下限曲线

Fig. 6 Heat pump output upper-lower limit curve

表 2 供能设备参数

Tab. 2 Power-supply units parameters

设备	参数	参数意义	数值
新能源设备	C_{GAS}	天然气单价	0.35 元/kWh
	I_{PVS}	单位光伏出力 功率激励收入	0.1 元/kWh
	I_{WTS}	单位风电出力 功率激励收入	0.15 元/kWh
	C_{PV}^{MC}	光伏维护成本	0.23 元/kW
	C_{WT}^{MC}	风机维护成本	0.23 元/kW
燃气锅炉	L_A	天然气低热值	9.7
	η_{GB}	气热转换效率	0.31
	C_{GB}^{MC}	维护成本	0.18 元/kW
热泵	η_{HP}	制热效率系数	0.95
	C_{HP}^{MC}	维护成本	0.1 元/kW
储能设备	$\eta_{store}^{ele}/\eta_{release}^{ele}$	电储能充/放电效率	0.9/0.9
	$\eta_{store}^{heat}/\eta_{release}^{heat}$	热储能储/放热效率	0.9/0.9
	$\eta_{store}^{gas}/\eta_{release}^{gas}$	气储能储/放气效率	0.95/0.95
	E_{ES}^{max}	电储能容量	30 MWh
	H_{HS}^{max}	热储能容量	30 MWh
	Q_{GS}^{max}	气储能容量	30 MWh
	P_{smax}	储能单次充放电限制	5 MW
	E_{ES}^0	电储能初始电量	10 MWh
	H_{HS}^0	热储能初始量	0 MWh
	Q_{GS}^0	气储能初始量	0 MWh
CHP 机组	C_{ES}^{MC}	电储能维护成本	0.001 8 元/kW
	C_{HS}^{MC}	热储能维护成本	0.001 6 元/kW
	C_{GS}^{MC}	气储能维护成本	0.001 7 元/kW
	η_h^c	制热效率系数	0.85
	η_e^c	发电效率系数	0.31
系统与电网交易功率限制	$P_{CHP}^{ele, min}/P_{CHP}^{ele, max}$	单次输出最大、 最小电功率	0.3/2.3 MW
	R_{CHP}	爬坡率	0.4 MW
	C_{CHP}^{MC}	维护成本	0.15 元/kW
系统与电网交易功率限制	P_{Bmin}/P_{Bmax}	购电最小/大功率	0/10 MW
	P_{Smin}/P_{Smax}	售电最小/大功率	0/10 MW

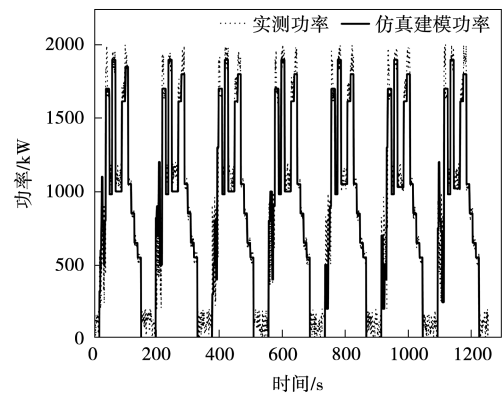


图 7 轧钢生产线负荷建模功率与实际功率对比

Fig. 7 Comparison of modeling and actual power for steel rolling lines load

热泵系统运行时出力上下限曲线如图 6 所示。图中分别指示了该热泵系统在不同时间段里的最低与最高电功率阈值,可以看出热泵系统运行时电功率阈值波动较大。因此在分析系统的热负荷需求时,需要将热泵的耗电量 $P_{HP}^h(t)$ 维持在阈值内,以实现系统的动态热平衡。

为验证本文优化模型有效性,设置以下 4 种典型场景,对比分析多能耦合系统的不同结构对系统日运行成本的影响。分别考虑是否接入可再生能源与 CHP 机组,场景设置如表 3 所示。

表 3 算例场景设置

Tab. 3 Different settings of scenarios

场景	可再生能源	CHP 机组
1	×	×
2	√	×
3	×	√
4	√	√

3.2 典型工业过程建模精度分析

3.2.1 电弧炉与轧钢生产线负荷波形精度分析

以某钢铁企业特定轧钢生产线及电弧炉的实际运行数据为例,通过对这些详实数据的精密分析与精确识别,成功确定每块钢坯进入粗轧与精轧阶段的确切时间节点,并将其有序整合为时间序列输入式(15),进而构建出各轧线在生产过程中的动态功率变化波形。同样地,通过深入挖掘该企业电弧炉的实际操作记录,可精准捕捉到电弧炉启动和停止的关键时刻,并将之融入时间序列输入式(8)中,从而构建出反映电弧炉实际功率波动特征的仿真波形。图 7 与图 8 分别展示了轧钢生产线与电弧炉仿真实验所得到的波形结果。

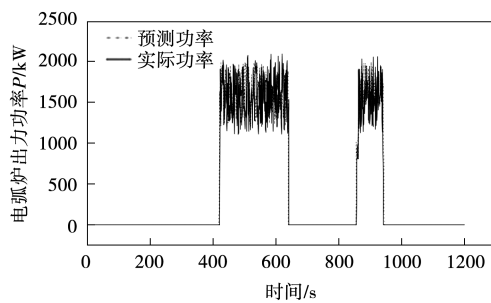


图 8 电弧炉负荷建模功率与实际对比

Fig. 8 Comparison of modeling and actual power for electric arc furnace load

3.2.2 钢铁工业总负荷功率特性建模精度分析

基于上节 1 200 s 内的轧钢生产线与电弧炉负荷,将其扩展至一天 24 h,结合高炉长流程炼钢、电炉短流程炼钢、矿热炉与稳定负荷建模,形成 24 h 内钢铁工业总电负荷模型,与实测数据对比如图 9 所示。

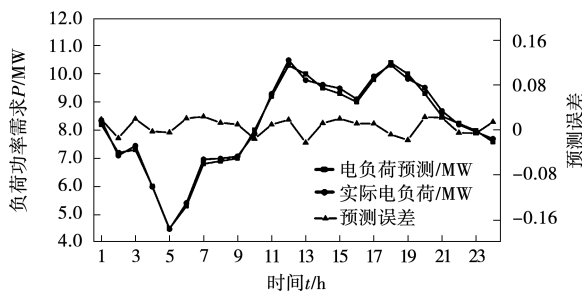


图 9 钢铁行业总电负荷建模功率与实际对比

Fig. 9 Comparison of modeling and actual power for total electrical load of the steel industry

由图 10 可见,预测精度在 $\pm 4\%$ 以内。图 11 为预测电负荷模型具体组成。

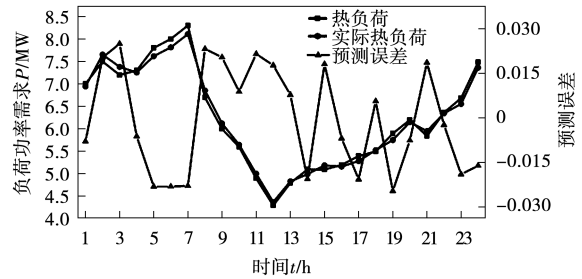


图 10 钢铁行业总热负荷建模功率与实际对比
Fig. 10 Comparison of modeling and actual power for total heat load of the steel industry

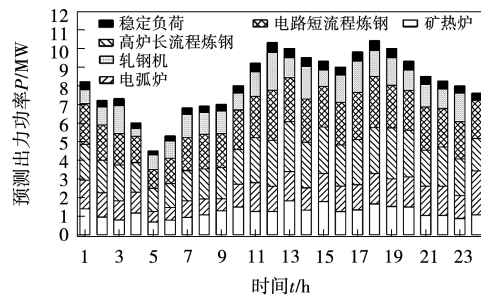


图 11 钢铁行业电负荷建模功率组成

Fig. 11 Modeling power composition of electrical loads in the steel industry

3.3 综合能源系统运行方案分析

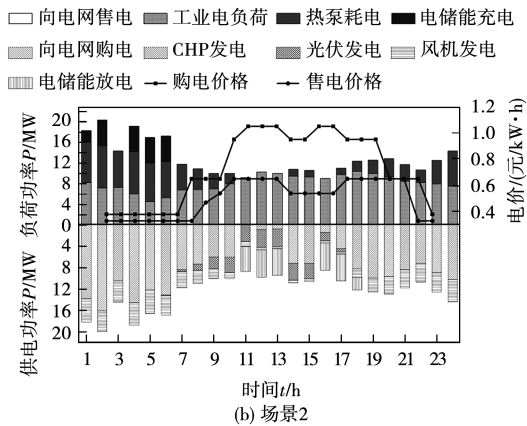
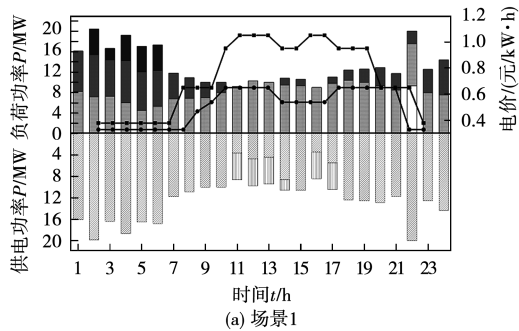
基于 3.2 节所提的负荷时序模型预测结果,本节提出相应的综合能源系统运行方案。通过分析不同场景下负荷需求的变化,用以灵活调度能源供应、实现负荷平衡和优先级调度,并节约能源成本,仿真结果验证了所提调度方案的有效性,具体算例分析如下。

以 3.2.2 节中的钢铁工业总功率特性曲线为电负荷,上述 4 个场景下的电平衡曲线如图 12 所示。随着可再生能源与 CHP 机组的逐步接入,供电功率来源由场景 1 中单一的自上层电网购电逐渐多元化,至场景 4 时本地的风电与光伏发电资源、CHP 机组发电与自上层电网购电共同承担供给负荷任务。

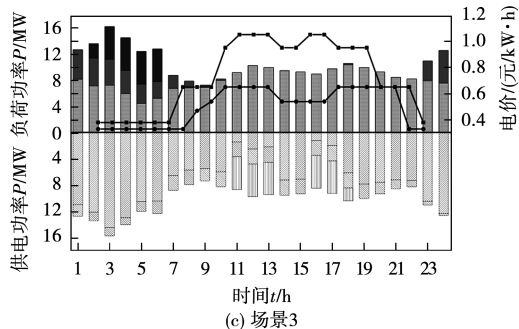
动态电价的价格激励机制作用可体现于各场景的供电方案选择与储电设备充放电策略。在电价较高的 9:00 - 21:00 阶段,系统尽可能多地采用本地的 CHP 机组发电与储电设备放电以满足电力

负荷,而尽可能少地购入上层电网电力以减少供应成本;而在电价较低的其余时段(如 0:00 - 7:00),储电设备将在此时储存自上层电网购入的电力,并在电价较高的时段放电,从而实现总体负荷由用电高峰时段向用电低谷时段的转移。而由于新能源激励机制的存在,本地可再生能源的接入不仅可以减少本该由上层电网/CHP 机组发电带来的购电/气成本,还能带来额外的激励收入,因此在场景 2、场景 4 中可再生能源实际发电量与其上限预测值相同,最大程度利用本地风光资源、降低弃风弃光率,从而进一步减少系统运行成本。

□ 向电网售电 ■ 工业电负荷 ■ 热泵耗电 ■ 电储能充电
 □ 向电网购电 ■ CHP发电 ■ 光伏发电 ■ 风机发电
 □ 电储能放电 → 购电价格 → 售电价格



□ 向电网售电 ■ 工业电负荷 ■ 热泵耗电 ■ 电储能充电
 □ 向电网购电 ■ CHP发电 ■ 光伏发电 ■ 风机发电
 □ 电储能放电 → 购电价格 → 售电价格



□ 向电网售电 ■ 工业电负荷 ■ 热泵耗电 ■ 电储能充电
 □ 向电网购电 ■ CHP发电 ■ 光伏发电 ■ 风机发电
 □ 电储能放电 → 购电价格 → 售电价格

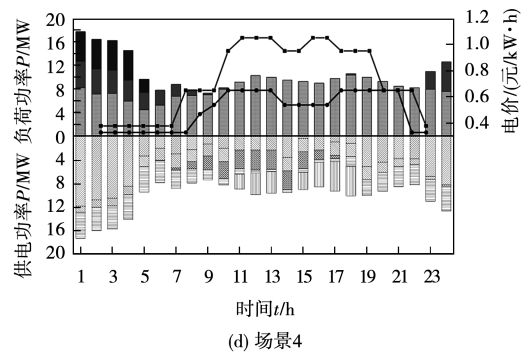
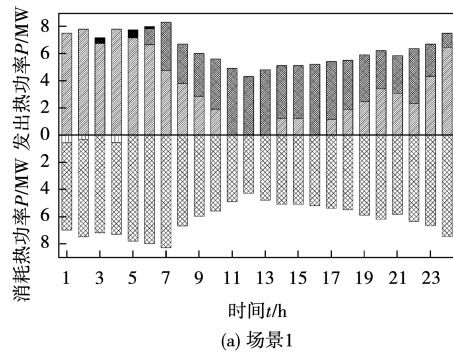


图 12 不同场景下的电平衡曲线

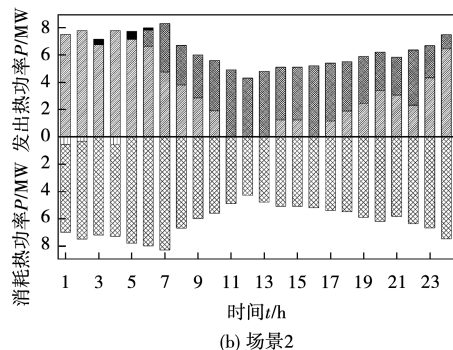
Fig. 12 Electrical balance curves for different scenarios

如图 13 所示,在不同场景下的热平衡曲线中,场景 1、场景 2 与场景 3、场景 4 对比可得,CHP 机组的接入将大幅度改变供热曲线,对照图 12 (c)、(d),CHP 发电量随时间的变化趋势与图 13 (c)、(d)中 CHP 供热量的变化趋势相同。

■ 热泵产热 ■ CHP产热 ■ 燃气锅炉产热
 ■ 热储能放热 ■ 工业热负荷 ■ 热储能吸热



■ 热泵产热 ■ CHP产热 ■ 燃气锅炉产热
 ■ 热储能放热 ■ 工业热负荷 ■ 热储能吸热



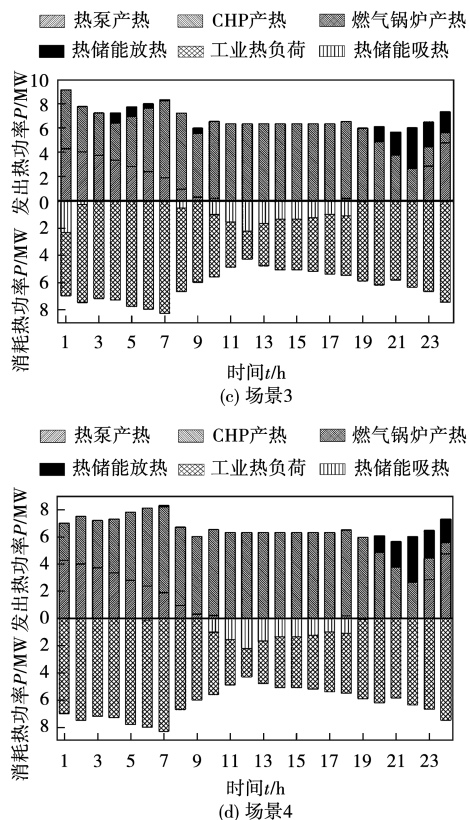


图 13 不同场景下的热平衡曲线

Fig. 13 Heat balance curves for different scenarios

如前所述,为适应 9:00—21:00 的高电价,场景 3、场景 4 中 CHP 发电量达到最大值 2.3 MW/h,由此带来的过剩的供热量储存至储热设备中,并在稍后的热负荷高峰放出。同理可解释场景 3 与场景 4 在 0:00 时储热设备策略的不同,由于场景 4 中可再生能源接入发电,此时的其 CHP 发电量低于场景 3,因此图 13(c)中 0:00 时将储存 CHP 多余的产热量。

另一方面,在没有 CHP 作为供热源之一的场景 1、场景 2 中,热泵产热与燃气锅炉产热以电价高低为标准呈现互补趋势。由于热泵是将电能转化为热能,其产热量在受到其热泵设备本身最大出力限制的同时,也受到电价高低的影响,双重因素作用下热泵产热量在电价高时段(10:00—16:00)较低;而天然气价格稳定,直接燃烧天然气产热的燃气锅炉将作为热泵的供热补充设备满足系统中的总体热负荷。

图 14 展示了不同场景下的气平衡曲线。对应图 8(a)、(b),场景 1、场景 2 中除占大部分的工业气负荷外,还有少量燃气锅炉耗气。在场景 3、场景 4 中,由于 CHP 设备的接入存在 CHP 消耗天然气量,而由于 CHP 与热泵产热已足够满足热负荷,燃气锅炉不再消耗天然气以达到热平衡。

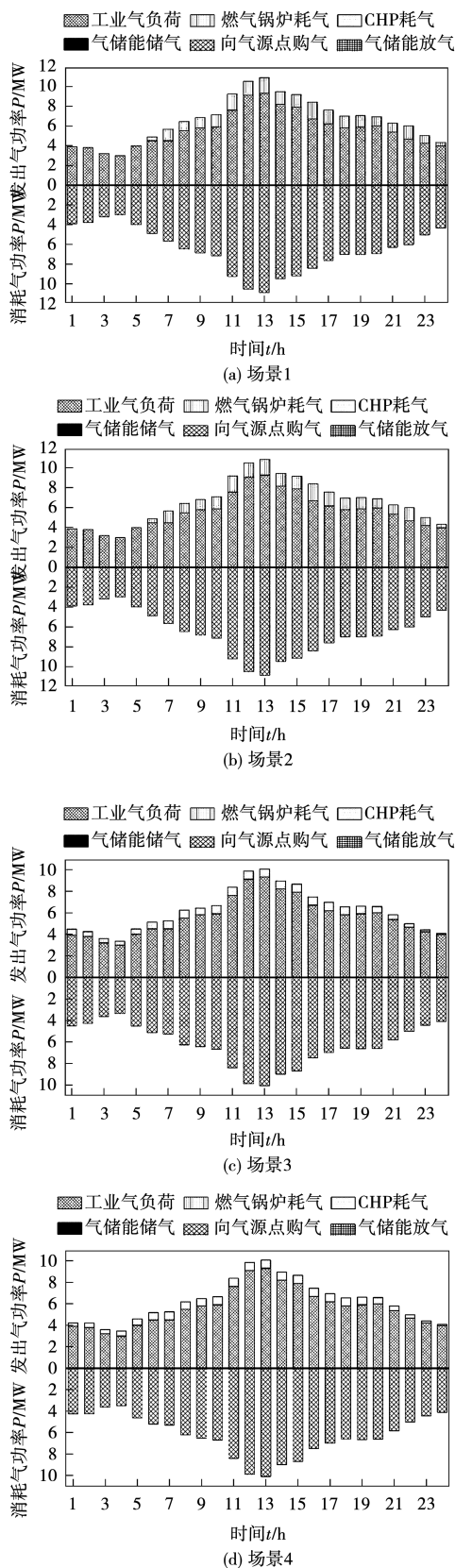


图 14 不同场景下的气平衡曲线

Fig. 14 Gas balance curves for different scenarios

不同场景下的各项成本对比如表4所示。

表4 不同场景的成本对比

Tab. 4 Comparison of costs for different scenarios

	场景1	场景2
CHP 购气成本/元	0	0
燃气锅炉购气成本/元	74 200	74 200
与电网交易净成本/元	172 097.31	114 990.00
机组发电维护成本/元	23 730	42 972.95
新能源激励收入/元	0	11 302.25
气源点购气成本/元	54 915.93	54 915.93
总成本/元	324 943.24	275 776.64
总成本与场景4 对比	+90.20%	+61.42%
	场景3	场景4
CHP 购气成本/元	48 794.94	48 794.94
燃气锅炉购气成本/元	0	0
与电网交易净成本/元	107 055.06	48 709.66
机组发电维护成本/元	13 092.98	32 335.93
新能源激励收入/元	0	11 302.25
气源点购气成本/元	168 942.99	52 296.85
总成本/元	337 885.98	170 835.15
总成本与场景4 对比	+97.78%	—

由表4 可对比得出,通过新能源激励机制,场景3、场景4 中系统运行成本降低的同时,可再生能源消纳率得到提高;另一方面,通过接入 CHP 机组,场景2、场景4 中能源得到充分利用,与电网交易净成本大幅降低。综合而言,同时接入可再生能源与 CHP 机组的场景4 最适于系统运行,在此场景下进行能源供应的优化调度,将实现系统最优运行。而与场景4 相比,其他三个场景的运行总成本将分别增加90.20%、61.42%、97.78%,从而验证了本文所提出的工业园区多能耦合优化运行系统的有效性。

4 结论

文章首先针对工业领域需求侧响应资源,分析了当前我国高耗能工业用户侧的用能特性,建立了钢铁生产行业中的各工序用能模型;其次,构建了一套工业园区综合能源系统耦合运行基础框架,并在这一过程中详细列举了该系统中常见的供能设备类型,如风电、光伏发电设备、微型燃气轮机、地源热泵、电制冷机、蓄电池等。同时,针对这些设备在实际运作中的功能关联性,进一步解析和明确了各类型能源在耦合系统内流动与转化过程中的相互依存与互动关系;以计及典型工业过程特性的负荷响应曲线为基础,以日运行成本最低为目标,提出了工业园区综合能源系统耦合优化运行方案。

对比算例证明,在不接入可再生能源与综合能源耦合设备时,系统运行成本将大幅增加。CHP 联合机组发电通过利用可再生能源接入,相比于其他3 种场景运行总成本分别节约 90.20%、61.42%、97.78%。本文所提模型可在实现系统协调经济运行的同时,减少能源消耗、提高可再生能源消纳率,整体成本可节约不低于 60%。为基于新型电力系统的工业园区综合能源系统耦合优化运行提供了理论依据。

参考文献

- [1] 程元, 饶尧, 丁胜. 工业领域电力需求侧可调节负荷潜力分析[J]. 能源工程, 2023, 43(1): 72-78.
CHENG Yuan, RAO Yao, DING Sheng. Analysis of demand-side adjustable load potential of electric power in industrial sector[J]. Energy Engineering, 2023, 43(1): 72-78.
- [2] 中国电力企业联合会. 中国电力统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
China Electricity Council. China electric power statistics yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [3] 王昀, 谢海鹏, 孙啸天. 计及激励型综合需求响应的电-热综合能源系统日前经济调度[J]. 电工技术学报, 2021, 36(9): 1926-1934.
WANG Yun, XIE Haipeng, SUN Xiaotian, et al. Day ahead economic dispatch of electric thermal integrated energy system considering incentive comprehensive demand response[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(9): 1926-1934.
- [4] 胡泉, 徐国栋, 尚策, 等. 工业园区参与调峰的电池储能-需求响应联合规划[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 116-123.
HU Xiao, XU Guodong, SHANG Ce, et al. Joint planning of battery energy storage demand response of industrial park participating in peak shaving[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 116-123.
- [5] GOLMOHAMADI H, KEYPOUR R, BACK-JENSEN B, et al. Robust self-scheduling of operational processes for industrial demand response aggregators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(2): 1387-1395.
- [6] ZHANG X, HUG G, HARJUNKOSKI I. Cost-effective scheduling of steel plants with flexible EAFs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(1): 239-249.
- [7] 朱宇超, 甘春江, 陈堃, 等. 面向复合材料生产工序的电力自动化设备可调节负荷需求响应策略研究[J]. 电

- 力需求侧管理, 2022, 24(1): 63-67.
- ZHU Yuchao, GAN Chunjiang, CHEN Kun, et al. Research on demand response strategy of adjustable load for composite production process[J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(1): 63-67.
- [8] 徐磊, 杨秀, 张美霞. 基于数据挖掘的工业用户用电行为分析[J]. 电测与仪表, 2017, 54(16): 68-74.
- XU Lei, YANG Xiu, ZHANG Meixia. Industrial users of electricity behavior analysis based on data mining[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(16): 68-74.
- [9] 杨昆, 杨涵庚, 夏能弘, 等. 联合工业及中小型用户需求响应的日前调度优化研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(11): 107-112.
- YANG Kun, YANG Hangeng, XIA Nenghong. Research on day-ahead scheduling optimization considering the demand response of industry and small and medium-sized users[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(11): 107-112.
- [10] 高瑞阳, 王新宝, 高娴, 等. 考虑灵活性资源和多能共享的低碳区域综合能源系统联盟-配电网博弈优化调度[J]. 南方电网技术, 2024, 18(2): 77-88.
- GAO Ruiyang, WANG Xinbao, GAO Xian, et al. Optimal dispatching of low-carbon regional integrated energy system alliance and distribution network game considering flexible resources and multi energy sharing[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(2): 77-88.
- [11] 崔茗莉, 冯天天, 刘利利. 双碳目标下区块链与可再生能源的融合发展研究[J]. 智慧电力, 2024, 52(2): 17-24.
- CUI Mingli, FENG Tiantian, LIU Lili. Integration and development of blockchain and renewable energy under double carbon target[J]. Smart Power, 2024, 52(2): 17-24.
- [12] 张佳辉, 张洪福, 牛玉广, 等. 考虑新能源出力不确定性的风-光-柴-储系统调度策略[J]. 电测与仪表, 2024, 61(3): 20-25.
- ZHANG Jiahui, ZHANG Hongfu, NIU Yuguang, et al. Dispatching strategy of wind-solar-diesel-battery hybrid power generation considering renewable energy output uncertainty[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(3): 20-25.
- [13] 朱群波, 郝思鹏. 基于运行成本的园区综合能源系统优化调度[J]. 电测与仪表, 2024, 61(2): 34-40.
- ZHU Qunbo, HAO Sipeng. Collaborative optimal dispatching of integrated energy system in industrial park[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(2): 34-40.
- [14] 马桂华. 广西工业园区低碳评价指标体系研究[D]. 桂林: 桂林广西师范学院, 2017.
- MA Guihua. Industrial park study on low-carbon evaluation index system of Guangxi[D]. Guilin: Guangxi Normal University, Guilin, 2017.
- [15] 姜子卿, 郝然, 艾苹. 基于冷热电多能互补的工业园区互动机制研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 260-268.
- JIANG Ziqing, HAO Ran, AI Ping. Interaction mechanism of industrial park based on multi-energy complementation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 260-268.
- [16] 徐宪东, 贾宏, 靳小龙, 等. 区域综合能源系统电/气/热混合潮流算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3634-3642.
- XU Xiandong, JIA Hong, JIN Xiaolong, et al. Study on hybrid heat-gas-power flow algorithm for integrated community energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3634-3642.
- [17] 王乾, 王彬, 方建勇, 等. 工业园区多能直供运营模式案例研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 268-276.
- WANG Qian, WANG Bin, FANG Jianyong, et al. Case study of multi-energy direct supply operationmode in industrial park[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 268-276.
- [18] 上官方钦, 殷瑞钰, 李煜, 等. 论中国发展全废钢电炉流程的战略意义[J]. 钢铁, 2021, 56(8): 86-92.
- SHANGGUAN Fangqin, YIN Ruiyu, LI Yu, et al. Discussion on strategic significance of developing full scrap EAF process in China[J]. Iron & Steel, 2021, 56(8): 86-92.
- [19] 李晶, 王新江, 潘宏涛. 钢铁工业长流程和短流程的比较分析[N]. 世界金属导报, 2018-12-28(B02).
- LI Jing, WANG Xinjiang, PAN Hongtao. Comparative analysis of long and short processes in the steel industry [N]. World Metal Herald, 2018-12-28(B02).
- [20] KOEHLE S. Effects on the electrical energy consumption of arc furnace steelmaking[J]. European Electric Steel Congress, 1992(4): 55.
- [21] 朱霄珣, 刘占田, 薛劲飞, 等. 计及柔性负荷参与的综合能源系统优化调度[J]. 太阳能学报, 2023, 44(9): 29-38.
- ZHU Xiaoxun, LIU Zhantian, XUE Jinfei, et al. Optimal scheduling of integrated energy system with flexible load participation[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2023, 44(9): 29-38.

[22] 王威, 李润秋, 张鹭, 等. 计及多类型电储能的综合能源系统优化运行对比分析研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(2): 110-116, 123.
WANG Wei, LI Runqiu, ZHANG Lu, et al. Comparative analysis and research on optimal operation of the integrate-energy system considering multi-type electrical storage [J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(2): 110-116, 123.

[23] 蒋超凡. 面向工业园区的综合能源系统日前优化运行研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2020.
JIANG Chaofan. Research on day-ahead optimal operation of integrated energy system in industrial parks[D]. North China Electric Power University (Beijing), 2020.

[24] 蒋超凡, 艾欣. 计及多能耦合机组不确定性的综合能源系统运行优化模型研究[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2843-2854.
JIANG Chaofan, AI Xin. Integrated energy system operation optimization model considering uncertainty of multi-energy coupling units[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2843-2854.

[25] 涂夏哲, 徐箭, 廖思阳, 等. 考虑过程控制的钢铁工业负荷用能行为分析与功率特性建模[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(2): 114-120.
TU Xiazhe, XU Jian, LIAO Siyang, et al. Process Controlling based energy consumption behavior analysis and power characteristic modeling for iron and steel industry [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42

(2): 114-120.

[26] 赵海祺, 董树锋, 南斌, 等. 考虑电炉短流程的钢铁工业园区综合能源系统低碳运行模式分析[J]. 电力建设, 2023, 44(6): 23-32.
ZHAO Haiqi, DONG Shufeng, NAN Bin, et al. Analysis of low carbon operating models in steel industrial community integrated energy system considering electric arc furnace short process [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(6): 23-32.

收稿日期: 2024-03-29; 修回日期: 2024-06-12

作者简介:

段梅梅(1986—),女,硕士,高级工程师,研究方向为需求响应、智能用电与量测。E-mail:cbadmm@163.com

黄奇峰(1968—),男,教授级高级工程师,研究方向为电力需求侧管理及智能量测。
E-mail:13951086036@126.com

庄重(1977—),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力供需互动,负荷资源潜力评估。E-mail:leon_cz@126.com

周承翰(1998—),男,通信作者,硕士,助理工程师,研究方向为电力需求响应。E-mail:jsepc_zhouch@163.com

方凯杰(1993—),男,硕士,中级工程师,研究方向为工业工序互动。E-mail:fangkj@js.sgcc.com.cn

黄艺璇(1993—),女,硕士,中级工程师,研究方向为电能柔性调控。E-mail:huangyixuan_0304@163.com

(编辑 杜景飞)