

引用格式:任奕学,程鹏.计及柔性负荷和电解槽多工况组合运行的港口综合能源系统优化调度[J].南方能源建设,2025,12(3):67-77. REN Yixue, CHENG Peng. Optimal scheduling of port integrated energy system considering flexible loads and multi-operation mode combinations of electrolyzers [J]. Southern energy construction, 2025, 12(3): 67-77. DOI: 10.16516/j.ceec.2025-125.

计及柔性负荷和电解槽多工况组合运行的港口 综合能源系统优化调度

任奕学, 程鹏[✉]

(华北电力大学 国家能源交通融合发展研究院, 北京 102206)

摘要: [目的]随着能源领域的改革的不断深入,能源与交通的融合是港口多能流的未来发展趋势。引入多能柔性负荷的需求响应机制和电解槽变载启停特性已经成为港口综合能源系统(PIES)发展的必然趋势。[方法]基于PIES中多能流的耦合特性,同时根据港口用户侧的用能特性,将电、热、氢3种柔性负荷划分为可平移负荷、可转移负荷以及可削减负荷,建立了考虑电、热、氢负荷需求响应的PIES运行优化模型。在此模型考虑电解槽的运行特性,并提出多堆电解槽组合运行,并以经济成本为优化目标,并采用Yalmip工具箱和Gurobi求解器求解。求解得到负荷响应前后各能源网络的优化结果。[结果]算例结果表明,引入柔性负荷的港口综合能源系统实现了多能负荷的削峰填谷,使得用能曲线更加平稳,降低了2.28%的总成本,有利于提高经济效益。但由于风光资源的不确定性,柔性负荷会对电解槽运行阵列产生不定的影响。[结论]验证了结合柔性负荷和电解槽多工况组合运行所建的港口综合能源系统模型的可行性和实用性。

关键词: 港口综合能源系统; 氢能; 柔性负荷; 变载启停特性; 优化调度

DOI: 10.16516/j.ceec.2025-125

文章编号: 2095-8676(2025)03-0067-11

CSTR: 32391.14.j.ceec.2025-125

中图分类号: TK91; TK01+9



论文二维码

Optimal Scheduling of Port Integrated Energy System Considering Flexible Loads and Multi-Operation Mode Combinations of Electrolyzers

REN Yixue, CHENG Peng[✉]

(China Institute of Energy and Transportation Integrated Development, North China Electric Power University,
Beijing 102206, China)

Abstract: [Objective] As the reform in the energy sector continues to deepen, the integration of energy and transportation is the future development trend of multi-energy flows in ports. The introduction of demand response mechanisms for multi-energy flexible loads and the variable load start-stop characteristics of electrolyzers have become an inevitable trend in the development of port integrated energy systems (PIES). [Method] Based on the coupling characteristics of multi-energy flows in PIES and in accordance with the energy consumption characteristics of port users, three flexible loads of electricity, heat and hydrogen were classified into shiftable loads, transferable loads and reducible loads. An operation optimization model of PIES considering the demand response of electricity, heat and hydrogen loads was established. In this model, the operating characteristics of electrolyzers were considered, and the combined operation of multi-stack electrolyzers was proposed. With economic cost as the optimization goal, Yalmip toolbox and Gurobi solver were used to solve the model. Therefore, optimal results of each energy network before and after load response were obtained. [Result] The results of the case study show that the introduction of flexible loads in the port's integrated energy system has achieved peak shaving and valley filling of multi-energy loads, making the energy consumption curve more stable and reducing the total cost by 2.28%, which is beneficial

收稿日期: 2025-04-28 修回日期: 2025-05-09

基金项目: 国家重点研发计划资助项目“水运港-船多能源融合技术及集成应用”(2021YFB2601600)

to improving economic benefits. However, due to the uncertainty of wind and solar resources, flexible loads may have an uncertain impact on the operation array of electrolyzers. [Conclusion] The feasibility and practicality of the port integrated energy system model established by combining flexible loads and multi-operation mode combinations of electrolyzers have been verified.

Key words: port integrated energy systems; hydrogen energy; flexible load; variable load start-stop characteristic; optimal scheduling

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

港口作为能源与交通耦合的典型场景,承担了海运贸易和进出口工作,是非常典型的高能耗区域,存在着多种负荷类型^[1-2]。在港口电气化的趋势下,港口呈现极其复杂的能源-交通耦合特性^[3-4]。港口的灵活性负荷资源能够有效消纳可再生资源并且开发多能流空间,也是减少港口能源消耗与环境污染的重要途径^[5-6]。

港口综合能源系统(Port Integrated Energy Systems, PIES)通常涵盖电、氢、热等多种能源形式,通过各种耦合设备实现多能互补,在满足用户需求的前提下提高能源利用率^[7]。而绿氢能源和储能装置作为实现双碳目标的重要手段,在PIES中起到解决电网削峰填谷、可再生能源电力并网稳定性问题^[8]。

目前,PIES优化调度运行存在许多研究。文献[9]针对港口特有的岸电负荷精细化建模,研究其弹性响应机制,通过构建港船主从博弈模型,分析岸电服务费与船舶用能成本的动态博弈关系,实现负荷弹性与设备配置的协同优化。文献[10-11]考虑电转气-集装箱港口考虑了冷藏集装箱入港的物流过程,分析转运过程中断电时间对冷藏集装箱温度的影响,建立港口冷链能量需求模型,考虑可再生能源出力与岸电负荷的不确定性。文献[12]面向碳中和的港口综合能源系统中针对PIES系统,利用需求响应有效降低港口负荷峰值与运行成本并分析其影响,但未考虑其余负荷需求响应的影响。文献[13]提出一种考虑氢能多元利用的港口综合能源系统优化调度策略,并结合阶梯碳交易机制,构建电-热-冷-氢多能耦合的低碳经济模型有效减少了港口碳排放与运行成本,但仍未能考虑到实际氢负荷的需求响应。

另一方面,电解槽作为绿氢制备的核心设备,其频繁启停与低效工况容易导致寿命衰减,现有PIES优化调度运行的研究不只在氢能的柔性负荷调控上存在不足,对多电解槽阵列的多工况组合运行优化

的协同机制方面缺乏探索。

电解槽是电解水制氢技术的关键设备^[14-15],文献[16-17]考虑电解槽的运行效率随输入电功率变化呈非线性关系,建立了非固定效率能效的变工况模型。文献[18]针对大规模新能源制氢系统的优化运行和高弃电率的问题,建立了考虑电、氢负荷灵活性的多堆碱性电解槽优化运行模型,但未将柔性热负荷考虑其中。而文献[19-20]构建以氢能驱动、电-热为主体的综合能源系统,并且考虑对电解槽精细化建模,使用了考虑变载启停特性的质子交换膜(Proton Exchange Membrane, PEM)电解槽混合整数线性模型。但这些研究的场景都未应用于港口综合能源系统中。

在此背景下,文章提出一种计及柔性负荷与电解槽多工况组合的港口综合能源系统两阶段优化调度框架。首先,基于港口负荷特性(如岸电、冷链物流、氢燃料补给)构建电-热-氢柔性负荷模型,并引入可转移、可削减负荷的时空约束与补偿机制;其次,针对碱性电解槽阵列,设计多工况组合运行策略,结合风电/光伏出力波动特性,建立以经济成本最小为目标的优化调度模型,选取某港口进行算例分析;最后,通过混合整数规划方法求解多目标优化问题,得到各负荷需求响应和各能源网络的优化结果,从而验证所建模型的实用性和可行性。

1 港口综合能源系统模型

1.1 PIES 拓扑结构

港口是具有特殊拓扑结构的多能流密集型区域^[21],与园区、建筑群等区域都存在着能源的供应、转换、存储和使用等环节,其结构模型如图1所示。

该系统的供应侧包含了光伏、风电、上级电网和上级气网。供热单元由燃气锅炉(Gas Boiler, GB)、热电联产机组(Combined Heat and Power, CHP)构成,CHP包括燃气轮机(Gas Turbine, GT)、余热锅炉(Waste Heat Boiler, WHB);供氢设备由电解槽(ELec-

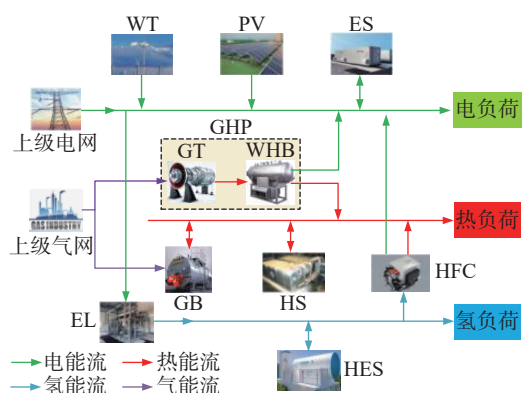


图1 港口综合能源系统运行架构

Fig. 1 Framework of port integrated energy systems

trolyzer, EL)、氢燃料电池(Hydrogen Fuel Cell, HFC)构成。存储环节由蓄电池(Electrical Storage, ES)、储热罐(Heat Storage, HS)和储氢罐(Hydrogen Energy Storage, HES)构成。

港口需求侧包括了日常的电、热、氢负荷,其中负荷分为基础负荷和柔性负荷。港口综合能源系统主要利用风光满足电、氢负荷需求,利用上级气网和氢燃料电池来满足热负荷需求。考虑了负荷的转移特性,实现负荷的削峰填谷。同时,鉴于实际场景中单台电解槽的容量较小,难以满足氢负荷需求,本文设置多台电解槽并联运行。

1.2 港口柔性负荷特性分析

在调度优化方面,可灵活调度的柔性负荷能够有效缓解供需矛盾、提高可再生能源利用率^[22-23]。柔性负荷可分为可平移负荷、可转移负荷和可削减负荷,其对应的约束条件见文献[24]。

1) 柔性电负荷特性分析

港口典型的柔性电负荷包括船舶岸电、起重机、冷藏集装箱、电动车辆充电桩、照明系统等。其中,冷藏集装箱可通过温度的设定来调整实现功率调节。而充电桩可通过分时充电策略转移负荷^[18]。

其中用电量较大的负荷是可转移电负荷的主要组成部分,可以安排其在夜间完成生产工作,避免在用电高峰期时增加电网的供电压力,削减峰谷差。

2) 柔性热负荷特性分析

港口典型的柔性热负荷主要涵盖工业、建筑、生活服务等领域。比如工业余热回收与间歇性工艺错峰运行,建筑供暖/热水系统利用储热罐或智能温控调节,餐饮、泳池等生活服务设施转移用能时段,农业温室预加热及区域热网协同调度。

3) 柔性氢负荷特性分析

港口典型的柔性氢负荷主要为氢燃料汽车,通过调节氢燃料汽车的加氢时间可以实现交通领域氢负荷的转移。由于港口制氢依赖于自然资源是否丰富以及电价波动的情况,在不影响港口的工业用氢的情况下,可以将部分氢负荷通过储氢罐转移至用氢低谷期^[18]。

2 能量转换设备数学模型

2.1 多堆 PEM 电解槽变工况模型

尽管碱性电解槽的技术成熟,成本较低,已实现商业化发展,但是 PEM 电解槽相比碱性电解槽其转换效率和调度灵活性更好。所以本文选取多堆 PEM 电解槽作为港口电制氢的设备,并根据 PEM 电解槽建立考虑变载启停特性的混合整数线性数学模型^[20]。

PEM 电解槽运行状态可分成停机模式、冷停机模式和工作模式,工作模式又可细分为低载状态、变载状态和过载状态。

1) 停机模式

PEM 电解槽在该模式下不制氢,PEM 能够在任意时刻迅速关停,不计停机时间。在该模式下一般需要 30 min ~ 1 h 才能完全启动。

2) 冷停机模式

PEM 电解槽在该模式下依旧不制氢,PEM 关闭但不停机,PEM 以较低功率待机维持控制。在该模式下需要 5 ~ 10 min 完成冷启动。

3) 工作模式

PEM 电解槽在该模式下制氢,氢气本身具有易爆的特性,为保证制氢安全,PEM 大部分时间应运行在变载状态(额定功率的 30% ~ 100%)。除此之外,PEM 运行在过载状态(额定功率的 100% ~ 150%)和低载状态(额定功率的 10% ~ 30%)的时间较少。这样的工作特性赋予了 PEM 调度的灵活性。

PEM 运行的 5 个工作状态以二进制变量表示:停机 I 、冷待机 S 、变载 L 、过载 R 和低载 V 。

由于本文设置的单位优化的时间尺度为 1 h,当冷启动的时间设置为 10 min 时,其冷启动时间小于单位优化的时间尺度,PEM 用电功率与产氢功率之间关系需要考虑冷启动过程中产氢功率的损失,二者关系由式(1)表示:

$$P'_{\text{PEM,H}_2,n} = \eta_{\text{PEM}}^{\text{H}_2} (P'_{\text{PEM,E},n} - S_n^t P_{\text{PEM}}^b) - \zeta_{\text{PEM}} W_n^t \quad (1)$$

式中:

$P'_{\text{PEM,H}_2,n}$ 和 $P'_{\text{PEM,E},n}$ ——第 n 个 PEM 在 t 时刻的产氢功率和用电功率(MW);

$\eta_{\text{PEM}}^{\text{H}_2}$ ——单个 PEM 的电氢转换效率;

P_{PEM}^b ——PEM 在冷待机时的待机功率(kW);

ζ_{PEM} ——PEM 在冷启动时产氢的惩罚系数, 用作量化冷启动过程中产氢功率的损失。

PEM 从冷待机模式切换至工作模式时, 二进制变量 W 为 1, 满足式(2)中的约束。

$$\begin{cases} W_n^t \leq S_n^{t-1} \\ W_n^t \leq L_n^t + R_n^t + V_n^t \\ W_n^t \geq S_n^{t-1} + L_n^t + R_n^t + V_n^t - 1 \end{cases} \quad (2)$$

同时, PEM 的用电功率也可以通过 5 个二进制变量的约束来实现电解槽不同工况之间的切换, 如式(3)所示。

$$\begin{cases} P'_{\text{PEM,E},n} \geq S_n^t P_{\text{PEM}}^b + 0.3 L_n^t P_{\text{PEM}}^e + R_n^t P_{\text{PEM}}^e + 0.1 V_n^t P_{\text{PEM}}^e \\ P'_{\text{PEM,E},n} \leq S_n^t P_{\text{PEM}}^b + L_n^t P_{\text{PEM}}^e + 1.5 R_n^t P_{\text{PEM}}^e + 0.3 V_n^t P_{\text{PEM}}^e \end{cases} \quad (3)$$

式中:

P_{PEM}^e ——PEM 的额定功率(kW), 当上述的二进制变量为 1 时, 表示电解槽处于该状态, 并且以上的二进制变量还需满足以下逻辑约束。

$$-I_n^{t-2} + I_n^{t-1} - I_n^t \leq 0 \quad (4)$$

$$\begin{cases} V_n^t + R_n^t + L_n^t + S_n^t + I_n^{t-1} - 1 \leq Y_n^t \\ V_n^{t-1} + R_n^{t-1} + L_n^{t-1} + S_n^{t-1} + I_n^t - 1 \leq Z_n^t \end{cases} \quad (5)$$

$$V_n^t + R_n^t + L_n^t + S_n^t + I_n^t = 1 \quad (6)$$

$$\sum_{\tau=t}^{t+T_{\text{Rmax}}-1} R_n^{\tau} \leq T_{\text{Rmax}} \quad (7)$$

$$\sum_{\tau=t}^{t+T_{\text{Vmax}}-1} V_n^{\tau} \leq T_{\text{Vmax}} \quad (8)$$

式中:

T_{Rmax} 和 T_{Vmax} ——PEM 电解槽允许连续运行过载、低载状态的最长时间, 本文均设置为 2 h。

二进制变量 Y 为 1 时表示电解槽从停机模式切换至工作模式, 为 0 时表示电解槽处于其他状态; 二进制变量 Z 为 1 时表示为从工作模式切换至停机模式, 为 0 时表示电解槽处于其他状态。式(4)、式(5)分别为电解槽启停约束和启停间隔约束; 式(6)为运

行状态互斥约束, 使得各个二进制变量能够独立运行; 而式(7)和式(8)分别为过载与低载的运行最长时间限制约束。

2.2 可调热电比热电联产单元模型

港口中的热电联产单元由 HFC 和 CHP 一同组成。HFC 通过燃烧供给侧提供的氢气进行供电和供热, 并且改变散热循环水流速与氢气输入速率, 使得氢燃料电池根据实时电热负荷的需求灵活地调节热电比, 其数学模型为:

$$\begin{cases} P'_{\text{HFC,H}} + P'_{\text{HFC,E}} = \eta_{\text{HFC}} P'_{\text{HFC,H}_2} \\ P_{\text{HFC,H}_2}^{\min} \leq P'_{\text{HFC,H}_2} \leq P_{\text{HFC,H}_2}^{\max} \\ -\Delta P_{\text{HFC,H}_2}^{\max} \leq P_{\text{HFC,H}_2}^{t+1} - P'_{\text{HFC,H}_2} \leq \Delta P_{\text{HFC,H}_2}^{\max} \\ K_{\text{HFC}}^{\min} \leq \frac{P'_{\text{HFC,H}}}{P'_{\text{HFC,E}}} \leq K_{\text{HFC}}^{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中:

η_{HFC} ——氢燃料电池的能量转换效率(MW);

$P'_{\text{HFC,H}_2}$ —— t 时刻 HFC 的用氢功率(MW);

$\Delta P_{\text{HFC,H}_2}^{\max}$ ——HFC 最大爬坡功率(MW);

$P'_{\text{HFC,H}}$ 、 $P'_{\text{HFC,E}}$ —— t 时刻 HFC 的产热、产电功率(MW);

$P_{\text{HFC,H}_2}^{\max}$ 、 $P_{\text{HFC,H}_2}^{\min}$ ——HFC 的用氢功率的上、下限(MW);

$K_{\text{HFC}}^{\max}$ 和 $K_{\text{HFC}}^{\min}$ ——HFC 热电比灵活性调节的上、下限。

CHP 机组燃烧天然气进行热电联供, 其通过控制汽轮机的抽气比例和进气导叶角度, 也能够实现灵活性调节热电比。

$$\begin{cases} P'_{\text{CHP,H}} + P'_{\text{CHP,E}} = \eta_{\text{CHP}} P'_{\text{CHP,G}} \\ P_{\text{CHP,G}}^{\min} \leq P'_{\text{CHP,G}} \leq P_{\text{CHP,G}}^{\max} \\ -\Delta P_{\text{CHP,G}}^{\max} \leq P_{\text{CHP,G}}^{t+1} - P'_{\text{CHP,G}} \leq \Delta P_{\text{CHP,G}}^{\max} \\ K_{\text{CHP}}^{\min} \leq \frac{P'_{\text{CHP,H}}}{P'_{\text{CHP,E}}} \leq K_{\text{CHP}}^{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中:

η_{CHP} ——热电联产机组的能量转换效率;

$P'_{\text{CHP,G}}$ —— t 时刻 CHP 的用气功率(MW);

$P'_{\text{CHP,H}}$ 、 $P'_{\text{CHP,E}}$ —— t 时刻 CHP 的产热、产电功率(MW);

$P_{\text{CHP,G}}^{\max}$ 、 $P_{\text{CHP,G}}^{\min}$ ——CHP 用气功率上、下限(MW);

$\Delta P_{\text{CHP,G}}^{\max}$ ——CHP 最大爬坡功率(MW);

$K_{\text{CHP}}^{\max}$ 和 $K_{\text{CHP}}^{\min}$ ——CHP 热电比灵活性调节的上、下限。

其余设备单元如燃气锅炉、通用储能单元建模过程见文献[19]。

3 港口综合能源系统优化调度模型

3.1 目标函数

本文设计的港口综合能源系统综合考虑了各运行设备的运行维护成本、电网购电和气网购气的购能成本、弃风弃光成本以及柔性负荷的补偿成本,以最小化总成本作为目标函数。

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \quad (11)$$

式中:

C ——系统运行总成本(元);

C_1 ——各运行设备的运维成本(元);

C_2 ——向电网购电、气网购气的购能成本(元);

C_3 ——弃风弃光惩罚成本(元);

C_4 ——港口用户侧多能柔性负荷优化的补偿成本(元)。

1)各运行设备的运维成本

$$C_1 = \sum_{t=1}^T \sum_i^I \rho_{i,om} P'_{i,\alpha} \quad (12)$$

式中:

I ——所有设备的台数;

i ——具体的设备编号;

$\rho_{i,om}$ ——设备 i 的单位运维成本(元/kWh);

$P'_{i,\alpha}$ —— t 时刻设备输出功率(MW),其中 α 为负荷功率种类, $\alpha \in \{E, H, H_2\}$, E, H, H_2 为港口电、热、氢负荷。

2)购能成本

$$C_2 = \sum_{t=1}^T c_{grid} P'_{grid,E} + c_{gas} P'_{gas,G} \quad (13)$$

式中:

c_{grid} ——单位电价(元/kWh);

c_{gas} ——单位气价(元/kWh);

$P'_{grid,E}$ 、 $P'_{gas,G}$ —— t 时刻购电和购气功率(MW)。

3)弃风弃光惩罚成本

$$C_3 = \sum_{t=1}^T c_{WT,CUT} P'_{WT,CUT} + c_{PV,CUT} P'_{PV,CUT} \quad (14)$$

式中:

$c_{wt,cut}$ 、 $c_{pv,cut}$ ——单位弃风惩罚成本和单位弃光惩罚成本(元/kWh);

$P'_{WT,CUT}$ 、 $P'_{PV,CUT}$ —— t 时刻弃风功率和弃光功率(MW)。

4)柔性负荷优化补偿成本

$$C_4 = C_{shift} + C_{tran} + C_{cut} \quad (15)$$

式中:

C_{shift} 、 C_{tran} 和 C_{cut} ——可平移负荷补偿费用、可转移负荷补偿费用和可削减负荷补偿费用(元)。

$$\begin{cases} C_{shift} = c_{cost}^{shift} \sum_{v=1}^T P'_{v,\alpha}^{shift} \\ C_{tran} = c_{cost}^{tran} \sum_{v=1}^T P'_{v,\alpha}^{tran} \\ C_{cut} = c_{cost}^{cut} \sum_{v=1}^T P'_{v,\alpha}^{cut} \end{cases} \quad (16)$$

式中:

c_{cost}^{shift} 、 c_{cost}^{tran} 和 c_{cost}^{cut} ——负荷平移补偿系数、负荷转移补偿系数和负荷削减补偿系数(元/kWh);

$P'_{v,\alpha}^{shift}$ 、 $P'_{v,\alpha}^{tran}$ 和 $P'_{v,\alpha}^{cut}$ ——以 1 h 为单位调度时间,第 α 种负荷在时段 v 平移、转移和削减的功率(MW)。

3.2 约束条件

1)购电及购气约束

$$\begin{cases} 0 \leq P'_{grid,E} \leq P_{grid,E}^{max} \\ 0 \leq P'_{gas,G} \leq P_{gas,G}^{max} \end{cases} \quad (17)$$

式中:

$P_{grid,E}^{max}$ 、 $P_{gas,G}^{max}$ ——系统购电、购气最大值(MW)。

2)风电、光伏出力约束

$$\begin{cases} 0 \leq P'_{WT,E} \leq P_{WT,E}^{max} \\ 0 \leq P'_{PV,E} \leq P_{PV,E}^{max} \end{cases} \quad (18)$$

式中:

$P'_{WT,E}$ 、 $P'_{PV,E}$ —— t 时刻风电实时调度出力(MW)和光伏实时调度出力(MW);

$P_{WT,E}^{max}$ 、 $P_{PV,E}^{max}$ —— t 时刻风电出力和光伏出力的最大值(MW)。

3)功率平衡约束

$$\sum_{n=1}^N P'_{PEM,H_2,n} + P'_{L,E} = P'_{grid,E} + P'_{ES,E} + P'_{CHP,E} + P'_{WT,E} + P'_{PV,E} \quad (19)$$

$$P'_{L,H} = P'_{HFC,H} + P'_{HS,H} + P'_{CHP,H} + P'_{GB,H} \quad (20)$$

$$P'_{HFC,H_2} + P'_{L,H_2} = \sum_{n=1}^N P'_{PEM,H_2,n} + P'_{HES,H_2} \quad (21)$$

式中:

$P'_{L,E}$ 、 $P'_{L,H}$ 和 P'_{L,H_2} —— t 时刻的电、热和氢负荷 (MW)。

4)各设备单元运行约束见 2.1 节和 2.2 节。

5)柔性负荷约束见文献 [24]。

4 算例分析

4.1 算例设置

本文以图 1 所示的 PIES 运行结构为研究对象,选取某港口风光自然资源和电、热、氢负荷功率典型场景如图 2 所示。电解槽阵列由 5 个 PEM 并联组成,额定功率 P_{PEM}^e 取 300 kW,冷待机功率 P_{PEM}^b 取 30 kW。能源耦合设备参数与储能设备参数如表 1~表 2 所示,而各设备的运维成本系数如表 3 所示。

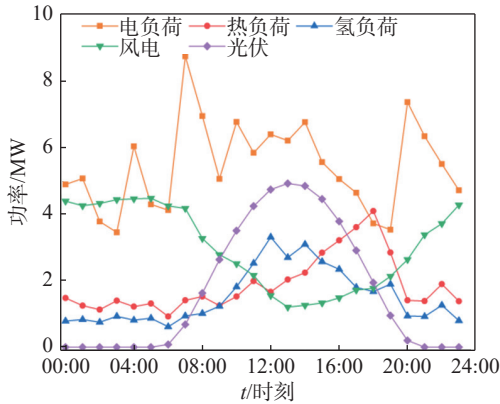


图 2 风光出力及日负荷曲线

Fig. 2 Curves of PV/wind power output and load

表 1 能源耦合设备参数

Tab. 1 Parameters of energy coupling equipment

设备类型	能量转换效率/%	容量/MW	爬坡约束/%
CHP	92	5	20
HFC	83	0.5	20
GB	95	0.8	20

算例中的能源价格为分时电价和固定气价。电价的峰、谷、平时段分布如下:峰时段为 12:00—14:00, 19:00—22:00;平时段为 8:00—11:00, 15:00—18:00;谷时段为 0:00—7:00, 23:00—24:00。各时段的购电价格为:峰时段 1.08 元/kWh;平时段 0.73 元/kWh;谷时段 0.36 元/kWh。天然气全时段价格为 0.45 元/kWh。

同时,单位弃风惩罚成本 $c_{wt,cut}$ 为 0.06 元/kWh;单位弃光惩罚成本 $c_{pv,cut}$ 为 0.13 元/kWh。

表 2 储能设备参数

Tab. 2 Parameters of energy storage equipment

设备类型	容量/MW	容量下限/%	容量上限/%
ES	15	20	90
HS	10	20	90
HES	10	20	90

表 3 设备运维成本系数

Tab. 3 Cost coefficient of equipment operation and maintenance

设备类型	运维成本系数/[元·(MWh) ⁻¹]
WT	10
PV	20
CHP	45
GB	45
EL	35
HFC	25
ES	18
HS	15
HES	16

需求侧的电负荷由基础电负荷、可平移电负荷 1、可平移电负荷 2、可转移电负荷和可削减电负荷组成。热负荷由基础热负荷、可平移热负荷和可削减热负荷组成。氢负荷由基础氢负荷、可平移氢负荷和可转移氢负荷组成。柔性负荷参数如表 4~表 6 所示。

表 4 柔性负荷参数 (1)

Tab. 4 Flexible load parameters (1)

类型	t_d/h	$t_{sf-} \sim t_{sf+}$	$c_{cost}^{shift}/[元·(MWh)^{-1}]$
可平移电负荷1	2	2:00—19:00	200
可平移电负荷2	2	9:00—23:00	200
可平移热负荷	5	1:00—14:00	100
可平移氢负荷	5	2:00—23:00	100

表 5 柔性负荷参数 (2)

Tab. 5 Flexible load parameters (2)

类型	T_{min}^{tran}/h	$P_{min}^{tran} \sim P_{max}^{tran}/MW$	$t_{sf-} \sim t_{sf+}$	$c_{cost}^{tran}/[元·(MWh)^{-1}]$
可转移电负荷	3	0.35 ~ 0.87	1:00—14:00	100
可转移氢负荷	2	0.04 ~ 0.17	2:00—23:00	100

采用部分电氢柔性负荷作为港口用能设备的典型负荷,以代表港口场景的特征。其中可平移电负

表 6 柔性负荷参数 (3)
Tab. 6 Flexible load parameters (3)

类型	$T_{\min}^{\text{cut}}/\text{h}$	$T_{\max}^{\text{cut}}/\text{h}$	$N_{\max}/\text{次}$	$c_{\text{cost}}^{\text{cut}}/[\text{元}\cdot(\text{MWh})^{-1}]$
可削减电负荷	2	5	8	400
可削减热负荷	2	5	8	200

荷 1 和可平移电负荷 2 分别对应实际港口场景在 12:00—13:00 时间段与 20:00—21:00 时间段的桥吊、起重机等部分港区用电负荷和冷藏箱用电负荷;可转移电负荷对应了港口场景可灵活变化的岸电负荷;可平移氢负荷对应了港口场景在 11:00—15:00 时间段的氢动力集卡、氢动力叉车、氢动力空箱堆高机等用氢负荷;可转移氢负荷则对应港口中的氢燃料汽车负荷。

本文设置了以下 2 种方案:

方案 1: 不考虑电、热、氢负荷中的柔性负荷, 并采用多堆 PEM 电解槽多工况组合运行。

方案 2: 考虑电、热、氢负荷中柔性负荷, 并采用多堆 PEM 电解槽多工况组合运行。

4.2 运行成本结果分析

通过 Matlab 平台优化调度分析, 并采用 Yalmip 工具箱与 Gurobi 求解器进行求解, 2 种不同方案的系统运行成本对比如表 7 所示。由于方案 1 未考虑到柔性负荷的作用, 故不计及其补偿成本。由表 7 可知, 方案 1 下的购能成本和设备运维成本均高于方案 2, 方案 2 的购能成本、运维成本仅为方案 1 的 81.77% 和 96.05%; 虽然方案 2 相较方案 1 多出了 3872.7 元的补偿成本, 但是总成本较方案 1 降低了 2.28%。

表 7 系统运行成本结果
Tab. 7 Result of system operating cost

方案	购能成本	弃风弃光成本	运维成本	补偿成本	总成本
1	24 732.93	0	2 103.20	0	26 836.13
2	20 331.46	0	2 020.17	3 872.70	26 224.33

综上所述, 合理地引入柔性负荷加入港口综合能源系统的调度中, 有利于提升实际的经济效益。

4.3 柔性负荷对系统运行的影响

通过优化调度后, 可得到 2 种方案优化后柔性电、热、氢负荷的分布情况, 如图 3 所示。

图 3 中, 对于电负荷, 能够明显地观察到在 2:00—

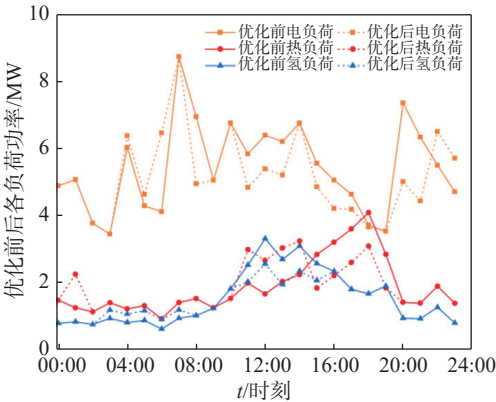


图 3 方案 1、方案 2 各负荷曲线对比

Fig. 3 Comparison of the load curves of Scheme 1 and Scheme 2

6:00 的时间段, 电价处于谷时段, 所以柔性负荷转移、平移后的电负荷、氢负荷都有一定的升高; 反之, 在 12:00—13:00 时间段, 电价处于峰时段, 优化后的电负荷、氢负荷也有明显降低。由于 7:00 时刻风光资源的不足, 同时电价处于谷时段, 所以这一时刻电负荷并没有进行转移。

在此基础上, 分析算例中设置的港口典型设备的柔性负荷。其中 12:00—13:00 时段与 20:00—21:00 时段的可平移电负荷发挥了作用, 这代表实际港口场景中的桥吊、起重机等部分港区用电负荷和冷藏箱用电负荷通过蓄电池实现负荷的平移实现港口综合能源系统的灵活性运行; 同时, 港口的岸电负荷灵活地根据电价从 15:00—17:00 时段转移到 4:00—6:00 时段。

而在 11:00—15:00 时段的港口场景的氢动力集卡、氢动力叉车、氢动力空箱堆高机等用氢负荷能够配合港口的储氢罐灵活地平移到 3:00—7:00 的时段, 实现氢负荷的削峰填谷。而氢燃料汽车用氢负荷作为可转移氢负荷, 也同样根据分时电价灵活地调节了 11:00—15:00 时段的整体氢负荷, 使电解槽在该时段更加稳定高效地运行。

同时, 由于电力调度会尽量减少从电网购电, 燃气轮机基本处于满发状态, 系统会优先利用燃气轮机的热出力满足热负荷需求, 并由储热罐来进行热能补充, 热负荷通过储热设备实现热负荷的削峰填谷。

对比 3 条优化前后的负荷曲线可知, 柔性负荷总体呈现出港口用能高峰期向用能谷、平时段的转

移的趋势,缓解了高峰期的供能压力;并且在港口风光资源匮乏的时间段能够灵活地结合该时刻的电价格来做出是否转移负荷的判断,保证了系统优化调度的经济性。

4.4 柔性负荷对电解槽阵列运行的影响

采用方案 1~方案 2 的电解槽组合运行的各阵列运行工况如图 4~图 5 所示。分析各个电解槽的电功率沿时间变化的趋势可以发现,电解槽大多数

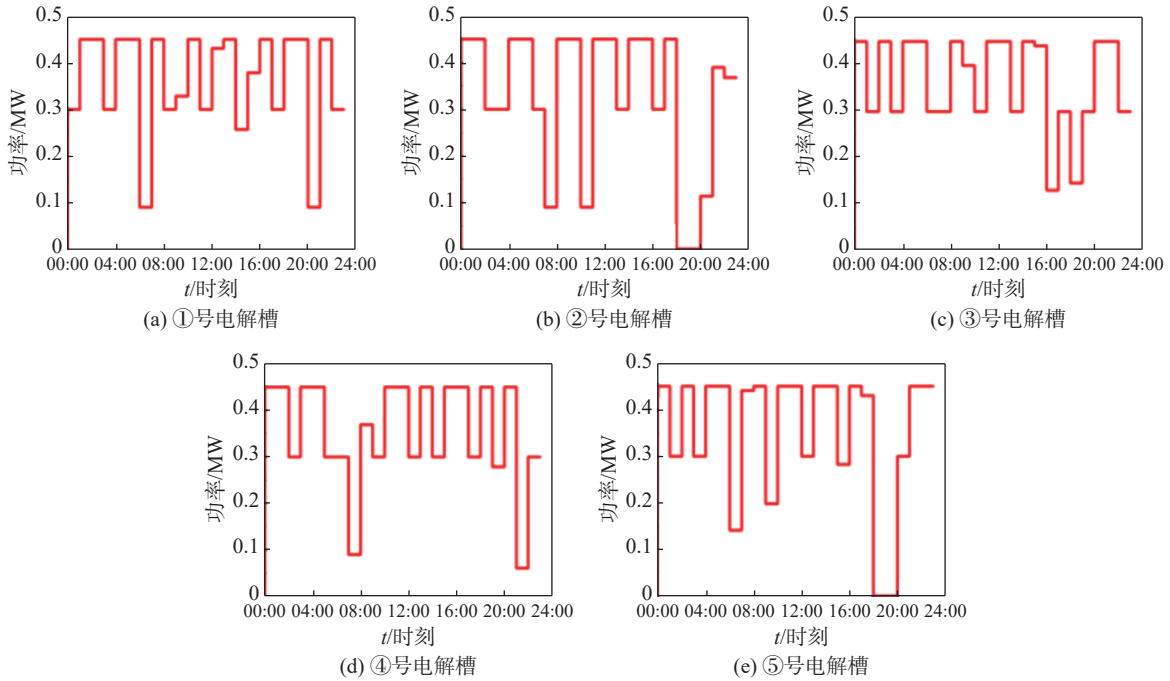


图 4 方案 1 电解槽阵列运行工况

Fig. 4 Scheme 1: operating condition of electrolyzer array

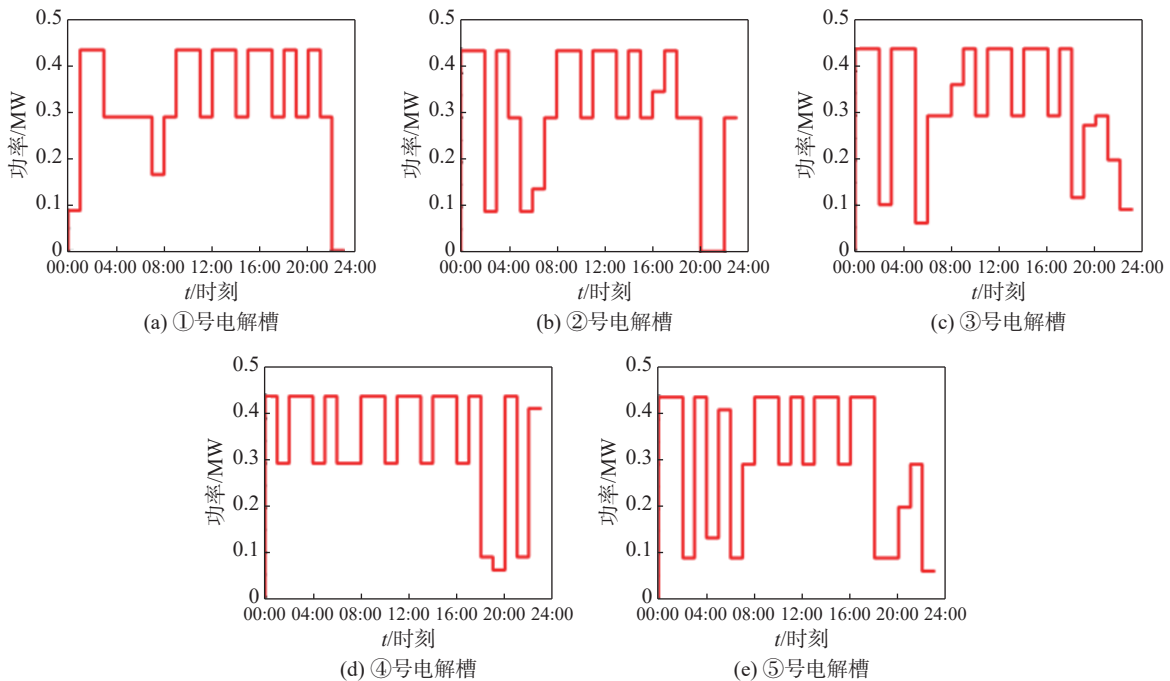


图 5 方案 2 电解槽阵列运行工况

Fig. 5 Scheme 2: operating condition of electrolyzer array

时刻运行在变载状态,在满足能源和价格波动的基础上尽可能维持电解槽阵列的工况。在方案1下,在整个周期内,②号电解槽和⑤号电解槽在18:00—20:00时段出现了停机现象;而方案2下①号电解槽在22:00—24:00时段、②号电解槽在20:00—23:00时段出现了停机现象。

在柔性负荷的波动下,在风光资源不足的时间段电解槽出现低载状态次数变得更多和停机状态出现的时长变得更长。可见在风光资源匮乏的时间段柔性负荷的波动会使电解槽阵列的工况频繁变化,不利于电解槽阵列的稳定运行,可能会影响电解槽阵列的使用寿命。而在风光资源充足的时间段,方案2相较方案1电解槽阵列在变载最大出力与过载状态之间切换,积极消纳了更多的风光资源;方案2下的电解槽阵列运行工况相较方案1下的电解槽阵列运行更加稳定。

5 结论

本章根据港口的柔性负荷特性和能源转换设备,形成了计及柔性负荷和电解槽多工况组合运行的港口综合能源系统,建立了以最小化总成本,包括各运行设备的运行维护成本、电网购电和气网购气的购能成本、弃风弃光成本以及柔性负荷的补偿成本,为目标函数的港口综合能源系统模型。该模型重点在于研究柔性负荷模块和多堆PEM电解槽变工况模型以及运行系统本身之间的关系。

通过选取某港口进行算例分析,实施柔性负荷调整后,总成本降低了2.28%,购能成本节省了17.79%,设备运维成本减少了3.95%,验证了所建模型的经济性和可行性。

模型运行结果表示引入柔性负荷模块的港口综合能源系统能够实现多能负荷的削峰填谷,使得用能曲线更加平稳,有利于提高经济效益。但在风光资源匮乏的情况下,柔性负荷的引入有可能会使电解槽组合的运行工况频繁变动,不利于电解槽的使用寿命;相反,风光资源充足时,引入柔性负荷会使电解槽运行更加稳定。

参考文献:

- [1] 袁裕鹏,许朝远,李娜,等.港口多能源融合系统综述[J].*交通运输工程学报*,2024,24(4):83-103. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2024.04.007.
 - [2] 唐道贵,柯耀,张乾能,等.港口实景下大型风电机组工程化设计分析[J].*南方能源建设*,2024,11(1):64-72. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.1.07.
 - [3] 王晴勤,温国标.基于交能融合的分布式海上风电选址与布置[J].*南方能源建设*,2024,11(2):59-67. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.06.
 - [4] 侯慧,谢应彪,赵波,等.能源与交通耦合的港口多能微网优化调度综述[J].*电力自动化设备*,2025,45(3):50-63. DOI: 10.16081/j.epae.202412035.
 - [5] 韩子娇.风-光-氢耦合系统协调控制与运行经济性研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2024. DOI: 10.27322/d.cnki.gsgyu.2024.000064.
 - [6] 徐晓健,刘大壮,王霓,等.“风光氢储”多能源融合系统港船综合应用适应性研究[J].*交通节能与环保*,2024,20(3):55-61. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6478.2024.03.012.
 - [7] 杨瑞,李响,周垣孜,等.港船多能源融合技术体系构建与运行模式研究[J].*交通节能与环保*,2024,20(2):39-44. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6478.2024.02.008.
- YUAN Y P, XU C Y, LI N, et al. Review on multi-energy integration systems in ports [J]. *Journal of traffic and transportation engineering*, 2024, 24(4): 83-103. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2024.04.007.
- TANG D G, KE Y, ZHANG Q N, et al. Engineering design analysis of large-scale wind turbine in a port [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(1): 64-72. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.1.07.
- WANG Q Q, WEN G B. Site selection and layout of distributed offshore wind power based on energy and transportation integration [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(2): 59-67. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.06.
- HOU H, XIE Y B, ZHAO B, et al. Review of optimal scheduling for port multi-energy microgrid with energy and transportation coupling [J]. *Electric power automation equipment*, 2025, 45(3): 50-63. DOI: 10.16081/j.epae.202412035.
- HAN Z J. Coordinated control and operation economy of wind-photovoltaic-hydrogen coupled system [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2024. DOI: 10.27322/d.cnki.gsgyu.2024.000064.
- XU X J, LIU D Z, WANG N, et al. Adaptability study of "wind-solar-hydrogen-energy storage" in port-ship multi-energy integration system [J]. *Transport energy conservation & environmental protection*, 2024, 20(3): 55-61. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6478.2024.03.012.
- YANG R, LI X, ZHOU Y Z, et al. Analysis of construction and operating mode of multi energy integration technology system for port ship [J]. *Transport energy conservation & environmental protection*, 2024, 20(2): 39-44. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6478.2024.02.008.

- [8] 张杰, 罗雪鹏. 液氢制-储-运-加关键技术发展现状及展望 [J]. *发电技术*, 2024, 45(5): 888-898. DOI: [10.12096/j.2096-4528.pgt.24019](https://doi.org/10.12096/j.2096-4528.pgt.24019).
ZHANG J, LUO X P. Development Status and Prospect of Key Technologies for Liquid Hydrogen Production-Storage-Transportation-Refueling [J]. *Power generation technology*, 2024, 45(5): 888-898. DOI: [10.12096/j.2096-4528.pgt.24019](https://doi.org/10.12096/j.2096-4528.pgt.24019).
- [9] 赵景茜, 米翰宁, 程昊文, 等. 考虑岸电负荷弹性的港区综合能源系统规划模型与方法 [J]. *上海交通大学学报*, 2021, 55(12): 1577-1585. DOI: [10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.293](https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.293).
ZHAO J Q, MI H N, CHENG H W, et al. A planning model and method for an integrated port energy system considering shore power load flexibility [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2021, 55(12): 1577-1585. DOI: [10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.293](https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.293).
- [10] 周思怡, 杨欢红, 黄文焘, 等. 集装箱港口综合能源系统日前-日内两阶段滚动优化调度 [J]. *上海交通大学学报*, 2024, 58(9): 1357-1369. DOI: [10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.016](https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.016).
ZHOU S Y, YANG H H, HUANG W T, et al. Two-stage day-ahead and intra-day rolling optimization scheduling of container integrated port energy system [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2024, 58(9): 1357-1369. DOI: [10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.016](https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.016).
- [11] 张紫阳, 周雪松, 李佳琪, 等. 考虑电转气和冷藏集装箱的港口综合能源系统优化运行 [J/OL]. *天津理工大学学报*, 2024: 1-8(2024-12-04) [2025-04-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1374.N.20241204.1011.002.html>.
ZHANG Z Y, ZHOU X S, LI J Q, et al. Optimization operation of port integrated energy system considering power to gas and refrigerated containers [J/OL]. *Journal of Tianjin University of Technology*, 2024: 1-8(2024-12-04) [2025-04-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1374.N.20241204.1011.002.html>.
- [12] 方斯顿, 赵常宏, 丁肇豪, 等. 面向碳中和的港口综合能源系统(一): 典型系统结构与关键问题 [J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(1): 114-134. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.212120](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.212120).
FANG S D, ZHAO C H, DING Z H, et al. Port integrated energy systems toward carbon neutrality (part I): typical topology and key problems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(1): 114-134. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.212120](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.212120).
- [13] 郭焱, 周森, 韩冰. 考虑氢能利用的港口综合能源系统低碳经济优化调度 [J/OL]. *电力系统及其自动化学报*, 2024: 1-10(2024-09-04) [2025-04-28]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001519>.
GUO Y, ZHOU M, HAN B. Low-carbon economic optimal dispatch of integrated port energy system considering utilization of hydrogen energy [J/OL]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2024: 1-10(2024-09-04) [2025-04-28]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001519>.
- [14] 赵东, 何山, 韩璐, 等. 离网型制氢系统典型短路故障分析及协同保护 [J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(21): 60-70. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.240057](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.240057).
ZHAO D, HE S, HAN L, et al. Typical short-circuit fault analysis and cooperative protection of an off-grid hydrogen production system [J]. *Power system protection and control*, 2024, 52(21): 60-70. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.240057](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.240057).
- [15] 杨胜, 樊艳芳, 侯俊杰, 等. 可再生能源 ALK-PEM 联合制氢系统多时间尺度优化运行策略 [J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(3): 68-80. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.240512](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.240512).
YANG S, FAN Y F, HOU J J, et al. Multi-time scale optimization strategy of a renewable energy ALK-PEM combined hydrogen production system [J]. *Power system protection and control*, 2025, 53(3): 68-80. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.240512](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.240512).
- [16] 邓杰, 姜飞, 王文烨, 等. 考虑电热柔性负荷与氢能精细化建模的综合能源系统低碳运行 [J]. *电网技术*, 2022, 46(5): 1692-1702. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1373](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1373).
DENG J, JIANG F, WANG W Y, et al. Low-carbon optimized operation of integrated energy system considering electric-heat flexible load and hydrogen energy refined modeling [J]. *Power system technology*, 2022, 46(5): 1692-1702. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1373](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1373).
- [17] 朱兰, 王吉, 唐晓军, 等. 计及电转气精细化模型的综合能源系统鲁棒随机优化调度 [J]. *电网技术*, 2019, 43(1): 116-125. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2018.1895](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2018.1895).
ZHU L, WANG J, TANG L J, et al. Robust stochastic optimal dispatching of integrated energy systems considering refined power-to-gas model [J]. *Power system technology*, 2019, 43(1): 116-125. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2018.1895](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2018.1895).
- [18] 田雪沁, 冯亚杰, 袁铁江, 等. 考虑电氢负荷柔性的多堆电解槽优化运行 [J]. *电网技术*, 2025, 49(1): 84-92. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1885](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1885).
TIAN X Q, FENG Y J, YUAN T J, et al. Optimal operation of multi alkaline electrolyzers considering flexible electrical and hydrogen load [J]. *Power system technology*, 2025, 49(1): 84-92. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1885](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1885).
- [19] 胡俊杰, 童宇轩, 刘雪涛, 等. 计及精细化氢能利用的综合能源系统多时间尺度鲁棒优化策略 [J]. *电工技术学报*, 2024, 39(5): 1419-1435. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.222335](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.222335).
HU J J, TONG Y X, LIU X T, et al. Multi-time-scale robust optimization strategy for integrated energy system considering the refinement of hydrogen energy use [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2024, 39(5): 1419-1435. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.222335](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.222335).
- [20] VARELA C, MOSTAFA M, ZONDERVAN E. Modeling alkaline water electrolysis for power-to-x applications: a scheduling approach [J]. *International journal of hydrogen*

energy, 2021, 46(14): 9303-9313. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2020.12.111](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.111).

- [21] 曲琪, 滕菲, 郭禹辛, 等. 考虑算力需求的港口综合能源系统分布式能源管理 [J]. *综合智慧能源*, 2025, 47(1): 42-50. DOI: [10.3969/j.issn.2097-0706.2025.01.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.2097-0706.2025.01.006).

QU Q, TENG F, GUO Y X, et al. Distributed energy management of port integrated energy system considering computing power demands [J]. *Integrated intelligent energy*, 2025, 47(1): 42-50. DOI: [10.3969/j.issn.2097-0706.2025.01.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.2097-0706.2025.01.006).

- [22] 伏绍鑫, 张路, 唐翰峰, 等. 考虑柔性电热负荷的区域综合能源系统低碳经济调度 [J]. *电力科技与环保*, 2023, 39(5): 417-428. DOI: [10.19944/j.eplep.1674-8069.2023.05.007](https://doi.org/10.19944/j.eplep.1674-8069.2023.05.007).

FU S X, ZHANG L, TANG H F, et al. Low-carbon economic dispatch of community integrated energy system considering flexible electric heating load [J]. *Electric power technology and environmental protection*, 2023, 39(5): 417-428. DOI: [10.19944/j.eplep.1674-8069.2023.05.007](https://doi.org/10.19944/j.eplep.1674-8069.2023.05.007).

- [23] 薛开阳, 楚瀛, 凌梓, 等. 考虑柔性负荷的综合能源系统低碳经济优化调度 [J]. *可再生能源*, 2019, 37(8): 1206-1213. DOI: [10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2019.08.016](https://doi.org/10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2019.08.016).

XUE K Y, CHU Y, LING Z, et al. Low-carbon economic optimal dispatch of integrated energy system considering flexible load [J]. *Renewable energy resources*, 2019, 37(8): 1206-1213. DOI: [10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2019.08.016](https://doi.org/10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2019.08.016).

- [24] 刘蓉晖, 李子林, 杨秀, 等. 考虑用户侧柔性负荷的社区综合能源系统日前优化调度 [J]. *太阳能学报*, 2019, 40(10): 2842-2850. DOI: [10.19912/j.0254-0096.2019.10.018](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.2019.10.018).

LIU R H, LI Z L, YANG X, et al. Optimal dispatch of community integrated energy system considering user-side flexible load [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2019, 40(10): 2842-2850. DOI: [10.19912/j.0254-0096.2019.10.018](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.2019.10.018).

作者简介:



任奕学

任奕学 (第一作者)

1999-, 男, 硕士, 主要研究方向为新能源交通融合和电气化交通 (e-mail) 120232201550@ncepu.edu.cn。



程鹏

程鹏 (通信作者)

BRID: 06603.00.95718

1988-, 男, 华北电力大学能源电力创新学院副研究员, 博士生导师, 主要研究方向为新能源并网分析与变流控制、交通自治能源系统集成与控制 (e-mail) p.cheng@ncepu.edu.cn。

项目简介:

项目名称 国家重点研发计划资助项目“水运港-船多能源融合技术及集成应用”(2021YFB2601600)

承担单位 宁波舟山港集团有限公司

项目概述 项目主要研究我国港区“风、光、储、氢”等多能源融合系统网络构架; 研究不同负荷及特征各异能源的捕获、变换与控制技术; 研究港-船多能源融合系统与港区负荷的匹配与优化控制技术。

主要创新点 (1) 解决港区绿能供需两侧双随机状态下多能融合系统能量/功率平衡调控机理等科学问题, 在此基础上实现潮流优化控制和协调控制; (2) 运用综合能源系统的概念建立港口多能源系统的数学模型, 形成与自然禀赋相适应的港区“风、光、储、氢”等多能源融合系统。

(编辑 徐嘉铖)