

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.07.006

考虑碱性电解槽状态转换的风电制—储氢系统优化调度

郭小龙, 亢朋朋, 田 晨, 翟文辉

(国网新疆电力有限公司, 乌鲁木齐 830002)

摘要: 针对风电制—储氢系统的优化调度问题,提出了一种考虑碱性电解槽状态转换的日前出力优化调度模型。该模型以系统日收益最高为目标,结合分时电价,引入电解槽状态转换过程中的冷热启动成本和功率波动成本,满足各个设备动态运行约束及系统功率平衡约束条件,调用Gurobi求解器进行优化求解。采用实际的风电出力数据和电氢负荷数据,对3种典型日场景下的优化结果进行分析。算例表明:所建立的优化调度模型能够满足电氢负荷需求,合理调节电解槽的3种状态,显著降低电解槽功率波动幅度和系统总成本,验证了所提模型的有效性。

关键词: 风电制氢; 碱性电解槽; 状态转换; 典型日场景; 分时电价

Optimal Scheduling of Hydrogen Production-storage System from Wind Power Considering State Transition of Alkaline Electrolyzer

GUO Xiaolong, KANG Pengpeng, TIAN Chen, ZHAI Wenhui

(State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830002, China)

Abstract: For the optimal scheduling of Hydrogen production-storage system from wind power, an optimal day-ahead scheduling model based on the state transition of alkaline electrolyzer is proposed. The model takes the maximum daily revenue of the system as target. And in combination with TOU tariff, the cold and hot start-up cost and power fluctuation cost in the state conversion process of electrolyzer are introduced so to meet dynamic operation constraints of various equipment and power balance constraints of system and the Gurobi solver is used for optimization and solution. The actual wind power output data and Hydrogen load data are used to analyze the optimization results under three typical daily scenarios. The calculation example shows that the established optimization scheduling model can meet the demand for electricity and Hydrogen load, reasonably adjust the three states of the electrolyzer, significantly reduce the power fluctuation amplitude of electrolyzer electrolyzer and the total cost of the system as well as verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: Hydrogen production from wind power; alkaline electrolyzer; state transition; typical daily scenarios; TOU tariff

0 引言

随着全球气候问题日益严重,世界主要国家都在积极参与落实碳减排政策,力求实现“2050年CO₂净排放量降至0”的宏伟目标^[1-2]。在此背景下,推动以化石燃料为主导的传统能源系统向以新能源为主体的新型电力系统的转型,对实现电力脱碳和节

能环保有重大意义。与传统能源相比,氢气具有能量密度高、效率高、可再生、无污染等优势,被认为是未来最具潜力的能源载体^[3-5]。因此,加快氢能产业发展是助力中国实现碳达峰碳中和目标的重要路径,借助电解水制氢技术能有效实现可再生能源的高效转化和灵活消纳^[6-8]。

电解槽是电制氢系统最重要的组成部分,目前

收稿日期:2024-02-25; 修回日期:2024-04-28

基金项目:国网新疆电力有限公司项目(SGXJ0000TKJS2200547)。

Project Supported by State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd.(SGXJ0000TKJS2200547).

被广泛研究的电解槽有碱性电解槽(AE)、质子交换膜电解槽(PEM)和固体氧化物电解槽(SOEC)3种,其中碱性电解槽的技术最为成熟,获得广泛应用^[9-11]。近年来,学者们对质子交换膜电解槽也进行了大量研究,发现PEM电解槽具有比碱性电解槽更好的动态性能。尽管如此,碱性电解槽所具有的投资成本低、技术成熟度高两点优势使其更有利于大规模应用^[12]。

现有文献通常采用碱性电解槽的经验模型,假设无论电解槽温度如何,功率—氢气转化率都恒定。文[13]基于传统热力学和电化学理论,建立了一种先进的碱性电解槽动态模型,该模型可以预测电解槽电压、产氢量、效率和工作温度。文[14]在此基础上考虑了碱性电解槽的开关特性,建立了一种包含启停两种状态的电解槽动态模型。文[15]建立的电解水模型既考虑了产氢流量与耗电功率的非线性关系,又考虑了启停过程状态转换耗时耗能特性。然而,上述模型都未考虑电解槽的待机状态,针对新能源制氢系统,电解槽的操作灵活性不足。文[16]考虑了包括待机状态在内的3种工作状态和可变的工作温度,实现了碱性电解槽的灵活运行,但未考虑与电解槽启停操作相关的成本,经济性不足。

国内外学者围绕含氢综合能源系统优化调度展开了诸多研究。文[17-19]考虑系统经济性、风电消纳量以及环境污染,对含制氢储能的风电—气综合能源进行日前经济调度,结果显示系统具有良好的经济性和环保性。文[20-21]考虑储能购售分时价格的影响,以储能经济效益最大、能量损耗最小以及储能调度参与下微网与外网间功率波动最小为目标,建立储能多目标优化调度模型,达到经济性、高效性、平稳性的统一效果。文[22]提出了一个先进的技术经济模型,用于计算大型兆瓦制氢站的最优调度,并结合西班牙的具体商业案例,从而使兆瓦级的电解设施盈利最多。文[23-24]考虑电解水制氢设备运行功率和效率之间的关系,即功率越高,制氢速率越快。但效率实际是由高到低变化的,因此提出了综合调度优化策略,以实现整体收益最大化。综上所述,目前风电制—储氢系统优化调度重在体现经济性的目标函数和约束条件的建立,设备层面的建模有所不足,缺少制—储氢系统必备的压缩机等装置。而且很多研究都是在简单运行场景下进行,均未考虑电解槽和其他设备的协同运行。对于风电制—储氢系统而言,风机、电解槽和其余设备的协同运行需考虑复杂多变运行场景的影响。

针对上述问题,在当前风电制—储氢系统建模研究的基础上,考虑碱性电解槽的生产、待机和停机3种状态,计及风电出力的波动性,结合分时电价和用户侧电氢负荷需求,以日前电氢交易总收益最高为优化目标,建立了考虑电解槽状态转换特性的风电制—储氢系统优化调度模型。此模型相较于传统的优化调度模型,强调设备之间的协调运行,针对变化的风电出力和电氢负荷能够灵活调整电解槽状态,降低电解槽功率波动,避免不同典型日下非必要的冷热启动造成的额外成本。最后,通过对3种典型日场景算例的仿真分析验证了所提模型的有效性。

1 风电制—储氢系统建模

风电制—储氢系统的结构见图1。风机、碱性电解槽、公用电网和电力负荷通过变流器连接到母线上。碱性电解槽消耗电能并产生氢气,氢气被压缩储存到储氢罐中以供氢负荷使用。

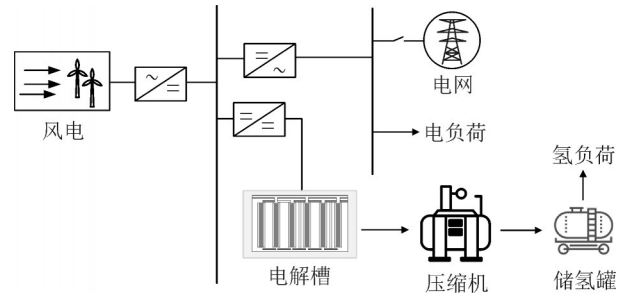


图1 风电制—储氢系统

Fig. 1 Hydrogen production-storage system from wind power

1.1 碱性电解槽模型

1.1.1 考虑状态转换特性的产氢模型

在上述提出的风电制—储氢系统中,碱性电解槽在有效利用间歇性风电方面起到至关重要的作用。本节将建立碱性电解槽的等效线性模型,以确保当风电输出功率波动时碱性电解槽能够灵活调控自身状态。

碱性电解槽的工作电压受工作电流和槽内温度的影响,电解反应所需的最小槽电压仅与槽内温度有关^[25]。由此建立电解过程表达式为:

$$P_t^{AE,in} = I_t^{AE} U_t^{AE} (I_t^{AE}, T_t^{AE}) \quad (1)$$

$$P_t^{AE} = I_t^{AE} U_m (T_t^{AE}) \quad (2)$$

$$Q_t^{AE} = P_t^{AE,in} - P_t^{AE} \quad (3)$$

式(1)-(3)中: $P_t^{AE,in}$ 为电解槽的输入功率; P_t^{AE} 为电解槽运行功率; I_t^{AE} 为电解槽的工作电流; U_t^{AE} 为电解槽的工作电压; T_t^{AE} 为电解槽温度; U_m 为电

解反应所需的最小槽电压; Q_t^{AE} 为电解反应产生的热量。

由于上述方程都非线性,该模型不能直接应用于调度问题,因此需要对该模型进行线性化。为使调度计算足够精确,考虑到技术经济指标,将电解槽模型纳入生产、待机和停机状态^[26-28]。

1)生产状态。电解槽的输入功率范围从最小运行到满功率运行。较低电流密度下生产的氧气中的氢气浓度会达到爆炸极限下限(4.1%),而高于额定电流密度时会损害电堆材料,因此不能违反操作限制。目前技术允许的最小负载通常为额定负荷的10%,负载限制构成了优化模型的硬约束。

2)待机状态。电解槽处于待机备用状态时,不产生氢气,但需要辅机系统提供电力来维持电解槽内特定的温度和压力。恢复生产状态需要消耗能量,只需要几秒钟。

3)停机状态。系统停机时需经过降电流、断电、排气卸压以及降温后停止碱液循环等系列操作,此外整个系统(电解槽、冷却、纯化和压缩单元)必须经过净化,一般充入氮气,排出设备的空气并检测设备气密性,通常需要30~60 min 机组才能重新启动运行。

基于上述阐述,使用3个二进制变量来表示碱性电解槽的工作状态:生产状态 p_t^b 、待机状态 s_t^b 、空闲状态 h_t^b 。并另外使用3个二进制变量表示电解槽两种启动过程和关机过程:热启动 H_s 、冷启动 C_s 、关机 Z ,3种状态之间的相互转换见图2。

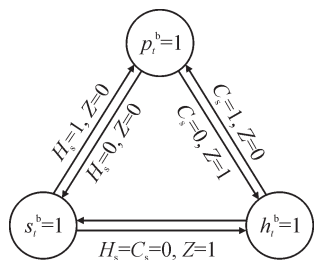


图2 电解槽运行状态示意图

Fig. 2 Schematic diagram of running state of electrolyzer

$$p_t^b = \begin{cases} 1 & \text{生产} \\ 0 & \text{非生产} \end{cases} \quad (4)$$

$$s_t^b = \begin{cases} 1 & \text{待机} \\ 0 & \text{非待机} \end{cases} \quad (5)$$

$$h_t^b = \begin{cases} 1 & \text{停机} \\ 0 & \text{非停机} \end{cases} \quad (6)$$

$$H_s = p_t^b s_{t-1}^b \quad (7)$$

$$C_s = p_t^b h_{t-1}^b \quad (8)$$

由此得到表征电解槽功率和生成热量的线性方程为:

$$P_t^{\text{AE}} = (\alpha_p p_t^b + \beta_p s_t^b) P_t^{\text{AE}, \text{in}} + \gamma_p T_t^{\text{AE}} \quad (9)$$

$$Q_t^{\text{AE}} = (\alpha_Q p_t^b + \beta_Q s_t^b) P_t^{\text{AE}, \text{in}} + \gamma_Q T_t^{\text{AE}} \quad (10)$$

式(9)、(10)中, α_p 、 α_Q 、 β_p 、 β_Q 、 γ_p 、 γ_Q 为线性工作系数^[29]。

碱性电解槽产氢速率 v_{H_2} 为

$$v_{\text{H}_2} = \frac{0.89 \eta_{\text{AE}} P_t^{\text{AE}}}{H_{\text{LHV}}} \quad (11)$$

1.1.2 热力学模型

上述1.1.1节建立的线性模型表明温度对电解槽功率有影响,由于电解槽在不同的状态下温度会发生变化,因此建立表征碱性电解槽热能平衡的热力学模型为

$$C_h \frac{dT_t^{\text{AE}}}{dt} = Q_t^{\text{AE}} - Q_t^{\text{loss}} - Q_t^{\text{rec}} \quad (12)$$

式(12)中: C_h 为电堆的热容; Q_t^{loss} 为自然冷却造成的热损失; Q_t^{rec} 为回收的热量。

自然冷却造成的热损失 Q_t^{loss} 为

$$Q_t^{\text{loss}} = \frac{1}{R_t} (T_t^{\text{AE}} - T_a) \quad (13)$$

式(13)中: R_t 为电堆与环境之间等效的热阻; T_a 为环境温度。

为估算碱性电解槽温度,假设在单位时间段内热量的产生和传递效率都一致,建立准稳态热模型为

$$T_{t+1}^{\text{AE}} = T_t^{\text{AE}} + \frac{\Delta t}{C_h} (Q_t^{\text{AE}} - Q_t^{\text{rec}} - Q_t^{\text{loss}}) \quad (14)$$

式(14)中, Δt 为单位时间段。

1.2 储氢罐模型

当下,存储氢气的方式多种多样,按照氢气的存在形式大体可分为3种方式:高压气态、低温液态和固态储氢。其中,高压气态储氢方式技术难度低、设备结构简单、投资成本低廉、经济性好,因此文中的储氢环节采用高压气态储氢方式,落实到设备层面可以体现为储氢罐的建模。储氢罐氢气质量平衡为

$$M_{t+1}^{\text{HST}} = M_t^{\text{HST}} + p_t^b v_{\text{H}_2} \Delta t - H_t^{\text{load}} \quad (15)$$

式(15)中, M_t^{HST} 、 M_{t+1}^{HST} 分别为单位时间段前后储氢罐中氢气的质量。

1.3 压缩机模型

由于氢气一般是在高压下储存和运输的,因此压缩机是必不可少的设备。假设压缩过程是绝热的,则压缩机的功耗 P_t^{comp} 为

$$P_t^{\text{comp}} = \frac{RT_t^{\text{AE}}}{2(\gamma-1)\eta_c} \left[\left(\frac{p_{c,\text{out}}}{p_{c,\text{in}}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] v_{\text{H}_2} \quad (16)$$

式(16)中: γ 为氢气的等熵指数; η_c 为压缩机的

机械效率; $p_{c,in}$ 和 $p_{c,out}$ 分别为压缩机入口和出口处氢气的压力。

2 风氢系统优化调度模型

为了提高风能的利用率, 保证风电并网的安全性以及经济性, 将构建风电制—储氢系统日前调度策略, 通过电网协调控制综合系统各单元的运行状态, 降低电网的总电力交易成本, 进一步保证用户侧负荷的需求。风电制—储氢系统的前日优化调度流程见图3。

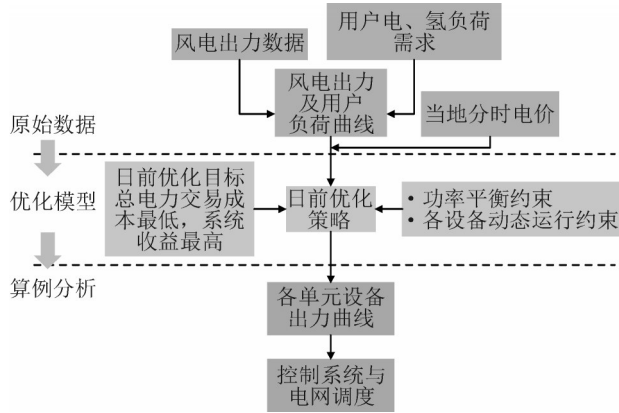


图3 日前优化调度流程图

Fig. 3 Optimal day-ahead dispatch flowchart

2.1 目标函数

以碱性电解槽的3种状态(生产、待机和停机)为决策变量, 目标函数为系统收益最大, 即

$$\max C = C_5 - (C_1 + C_2 + C_3 + C_4) \quad (17)$$

式(17)中: C 为日收益; C_5 为售氢收入; C_1 为投资成本; C_2 为运行维护成本; C_3 为退化成本; C_4 为购电成本。

1) 投资成本。系统投资成本由碱性电解槽和辅机设备的价格构成^[30], 文中不考虑碱性电解槽和辅机设备单价的波动。

$$C_1 = \sum_{t=1}^n (P_t^{\text{AE}} c_t^{\text{AE}} + P_t^{\text{AE}} c_t^{\text{AS}}) \quad (18)$$

式(18)中: P_t^{AE} 为 t 时刻电解槽功率; c_t^{AE} 为碱性电解槽折算到每小时的价格; c_t^{AS} 为除电解槽外其余设备折算到每小时的价格。

2) 运行维护成本

$$C_2 = \lambda \sum_{t=1}^n (P_t^{\text{AE}} c_t^{\text{AE}} + P_t^{\text{AE}} c_t^{\text{AS}}) \quad (19)$$

式(19)中, λ 为运行维护成本系数。

3) 退化成本。退化成本由两个变量组成: 与碱性电解槽开关状态相关的退化成本, 以及电解槽自身功率波动产生的退化成本^[29]。其中, 电解槽热启动和冷启动所需的电能不同, 进而导致两种启动状

态的退化成本有所不同, 即

$$C_3 = \sum_{t=1}^n (c_{\text{HS}} H_s + c_{\text{CS}} C_s + c_{\text{deg}} P_t^{\text{AE,fluc}}) \quad (20)$$

式(20)中: c_{HS} 为电解槽热启动成本; c_{CS} 为电解槽冷启动成本; c_{deg} 为电解槽功率波动导致的单位退化成本; H_s 、 C_s 分别为表征电解槽进行热启动和冷启动的二元变量; $P_t^{\text{AE,fluc}}$ 为电解槽功率波动量。

4) 购电成本

$$C_4 = \sum_{t=1}^n P_t^{\text{grid}} c_t^{\text{price}} \quad (21)$$

式(21)中, c_t^{price} 为 t 时刻电价。

5) 售氢收入

$$C_5 = \sum_{t=1}^n H_t^{\text{load}} c_t^{\text{H}_2} \quad (22)$$

式(22)中: H_t^{load} 为 t 时刻氢负荷; $c_t^{\text{H}_2}$ 为 t 时刻氢气价格。

2.2 约束条件

2.2.1 电解槽约束

首先, 碱性电解槽的槽内温度应一直处于合理的范围内。

$$s_t^b T_s + p_t^b T_{\min}^{\text{AE}} \leq T_t^{\text{AE}} \leq s_t^b T_s + p_t^b T_{\max}^{\text{AE}} \quad (23)$$

其次, 电解槽功率在停机状态下应为0, 待机状态下为恒定的常数, 生产状态下处于允许的范围内, 即:

$$p_t^b P_{\min}^{\text{AE}} + s_t^b P_s \leq P_t^{\text{AE}} \leq p_t^b P_{\max}^{\text{AE}} + s_t^b P_s \quad (24)$$

$$P_s = \beta_p s_t^b P_t^{\text{AE,in}} + \gamma_p T_t^{\text{AE}} \quad (25)$$

式(24)、(25)中: $P_{\max}^{\text{AE}}$ 、 $P_{\min}^{\text{AE}}$ 为电解槽处于生产状态时功率允许的上下限; P_s 为电解槽待机时的功率。

再次, 电解槽的3种状态不能同时出现。

$$p_t^b + s_t^b + h_t^b = 1 \quad (26)$$

另外, 电解槽不允许从停机状态切换到待机状态。

$$h_{t-1}^b + s_t^b \leq 1 \quad (27)$$

最后, 还应该考虑电解槽功率的爬坡限制, 即

$$-RD \leq P_t^{\text{AE,fluc}} \leq RU \quad (28)$$

式(28)中, RU 、 RD 分别为单位时间段电解槽功率增减的最大值。

2.2.2 储氢罐约束

储氢罐在工作过程中, 应严格遵守质量守恒的原则。同时, 储氢罐中氢气量也应时刻处于合理的范围内, 即:

$$M_0^{\text{HST}} = M_{24}^{\text{HST}} \quad (29)$$

$$M_{\min}^{\text{HST}} \leq M_t^{\text{HST}} \leq M_{\max}^{\text{HST}} \quad (30)$$

式(29)、(30)中: M_0^{HST} 、 M_{24}^{HST} 分别为初始和结束时刻储氢罐中氢气的质量; $M_{\min}^{\text{HST}}$ 、 $M_{\max}^{\text{HST}}$ 分别为储氢

罐储氢量的最小值和最大值。

2.2.3 功率平衡约束

由系统结构可知,任意时刻的风电出力加电网购电应满足制—储氢系统各设备和负荷侧的用电需求,即

$$P_t^w + P_t^{\text{grid}} \geq P_t^{\text{AE}} + P_t^{\text{load}} + P_t^{\text{comp}} \quad (31)$$

式(31)中: P_t^w 为 t 时刻风机输出功率; P_t^{grid} 为 t 时刻从电网中购电量; P_t^{load} 为 t 时刻用户侧的电负荷需求。

3 算例分析

3.1 算例介绍

以图1所示风电制—储氢系统为算例模型。系统中供电单元为风力发电机组和交流电网,系统使用碱性电解槽电解 KOH 溶液制取氢气。在保证供电可靠性的前提下,充分利用可再生风能,通过合理的优化调度,提高整个风电制氢系统的收益,最后给出各个设备的出力计划,详细参数见表1。

表1 优化调度参数

Table 1 Optimal dispatch parameters

参数	数值	参数	取值
$c_i^{\text{AE}} / [\text{元} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}]$	500	$R_i / (\text{K} \cdot \text{W}^{-1})$	0.12
$c_i^{\text{AS}} / [\text{元} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}]$	300	$\Delta t / \text{h}$	1
λ	0.02	η_{AE}	0.6
$c_{\text{HS}} / \text{元}$	78.2	$H_{\text{LHV}} / [(\text{KW} \cdot \text{h}) \cdot \text{m}^{-3}]$	3.509
$c_{\text{CS}} / \text{元}$	705.6	$T_{\text{AEmax}} / ^\circ\text{C}$	90
$c_{\text{deg}} / (\text{元} \cdot \text{MW}^{-1})$	0.45	$T_{\text{AEmin}} / ^\circ\text{C}$	60
α_p	0.62	$T_s / ^\circ\text{C}$	45
β_p	0.049 1	RD / MW	-20
γ_p	0.002 642	RU / MW	20
α_0	0.28	$M_{\text{HSTmax}} / \text{kg}$	90
β_0	0.022 2	$M_{\text{HSTmin}} / \text{kg}$	16
γ_0	-0.002 588	η_c	0.75
$T_s / ^\circ\text{C}$	25	γ	1.4

为验证所提出的方法的有效性,从新疆乌鲁木齐一个月中选取3个典型日:①正常日,一天之中风电出力既有能全部满足各设备用电需求及用户电负荷的小时段,也有供应不足、需要从电网中购电的小时段;②盈余日,一天之中各小时风电出力几乎能很好满足各设备用电需求和用户侧电负荷;③亏欠日,各小时用户侧电负荷几乎能全部抵消风电出力,制氢系统想要正常工作需从电网中购电。3个典型日下风电出力曲线见图4。

新疆某加气站一天内每小时氢负荷见图5,包括了两个高峰加气时间,与白天两个班次的工作有

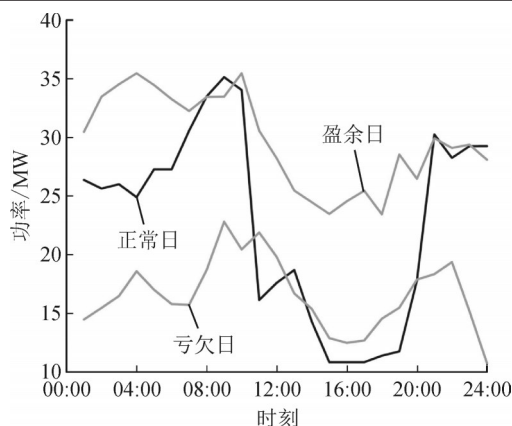


图4 3个典型日下风电出力情况

Fig. 4 Three typical daily wind power output situations

关。第一个高峰发生在上班前的早上7-9时,第二个高峰发生在下班后的晚上5-7时。依据城市用气的日负荷分布特性,为研究系统优化运行,制定日前出力计划提供更加真实的场景,具有现实价值。

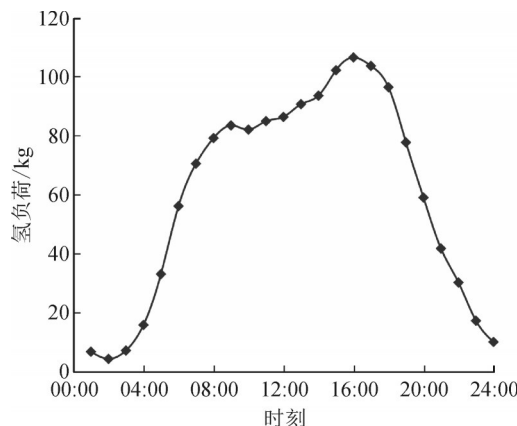


图5 一天中氢负荷需求曲线

Fig. 5 Hydrogen load demand curve for one day

3.2 优化调度结果分析

上述已知参数和数据确定后,将模型代入Gurobi求解器中进行求解。Gurobi可以求解大规模线性问题,二次型问题和混合整数线性二次型问题,支持多目标优化。与Cplex求解器对比,Gurobi在性能方面更优越,运算速度更快。与遗传算法和粒子群算法相比,Gurobi求解器在求解优化问题时收敛速度较快,调整参数容易,适用面更广,但全局搜索能力稍弱。利用Gurobi求解出3种典型日下各设备出力情况见图6。

图6(a)为正常日场景下各设备最优电出力情况,在23:00-次日10:00,由于处于夜间和上午的时段,风电出力较大,用户侧的用电需求较小,而此时氢负荷需求也未达到一天之中的峰值,所以电解槽一直处于生产状态,既满足当前时段的氢负荷需求,又同时储存余氢到储氢罐中,在本时段不存在电解槽状态转换带来的额外成本,系统收益很高。

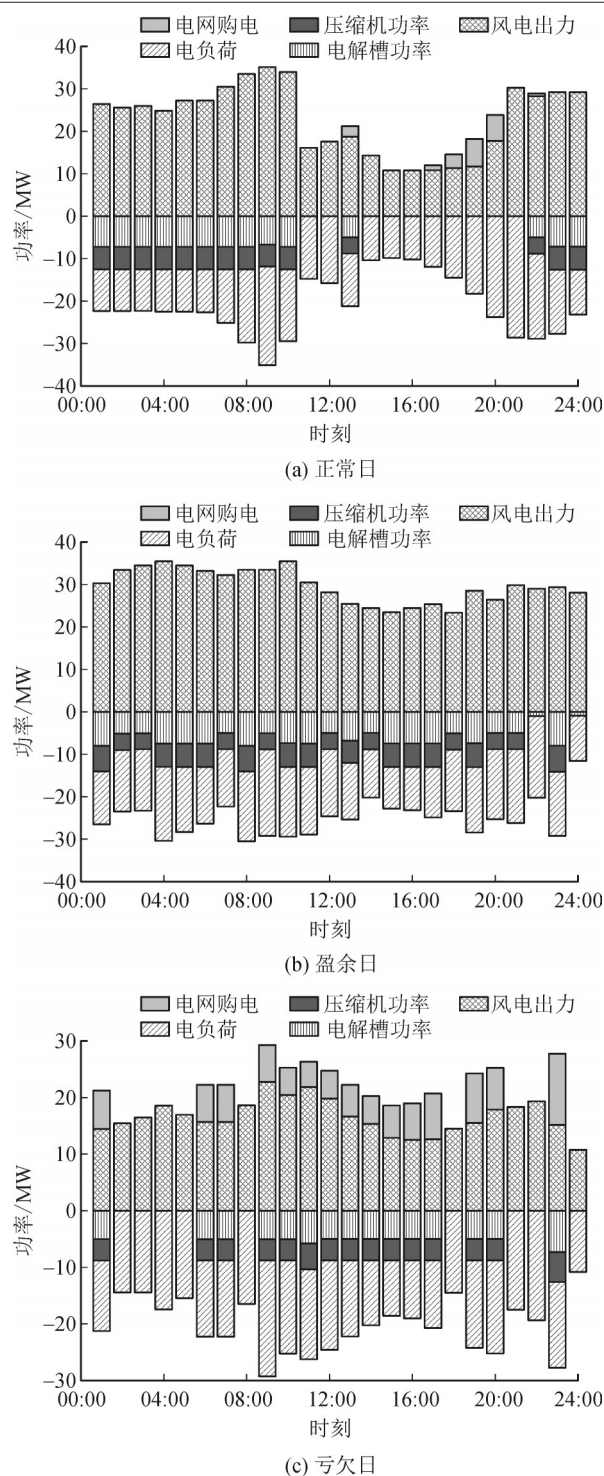


图6 不同场景下各设备出力

Fig. 6 Output of each device in different scenarios

在10:00-23:00时段,氢负荷需求急剧上升,到达一天中的最高值,电解槽在大部份时段处于停机状态,此时风电出力处于一天中的谷段,用户侧电负荷逐渐上升,只靠风电出力不足以满足电负荷需求,因此在13:00-14:00和17:00-1:00两个时段都需要从电网中额外购电来填补空缺。电解槽状态方面,由于风电紧缺,夜间和上午时段储氢罐中已存储大量氢气,因此电解槽几乎一直处于停机状

态,仅在13:00-14:00时段恢复生产进行补氢,避免了额外购电成本。同理,图6(b)、(c)展示了盈余日和亏欠日下各设备最优电力情况。为了进一步说明此优化调度模型的灵活性、单独展示电解槽的运行状态,在此构造电解槽状态与分时电价对照关系见图7,底部黑色、灰色和白色线段分别对应电解槽生产、待机和停机状态。

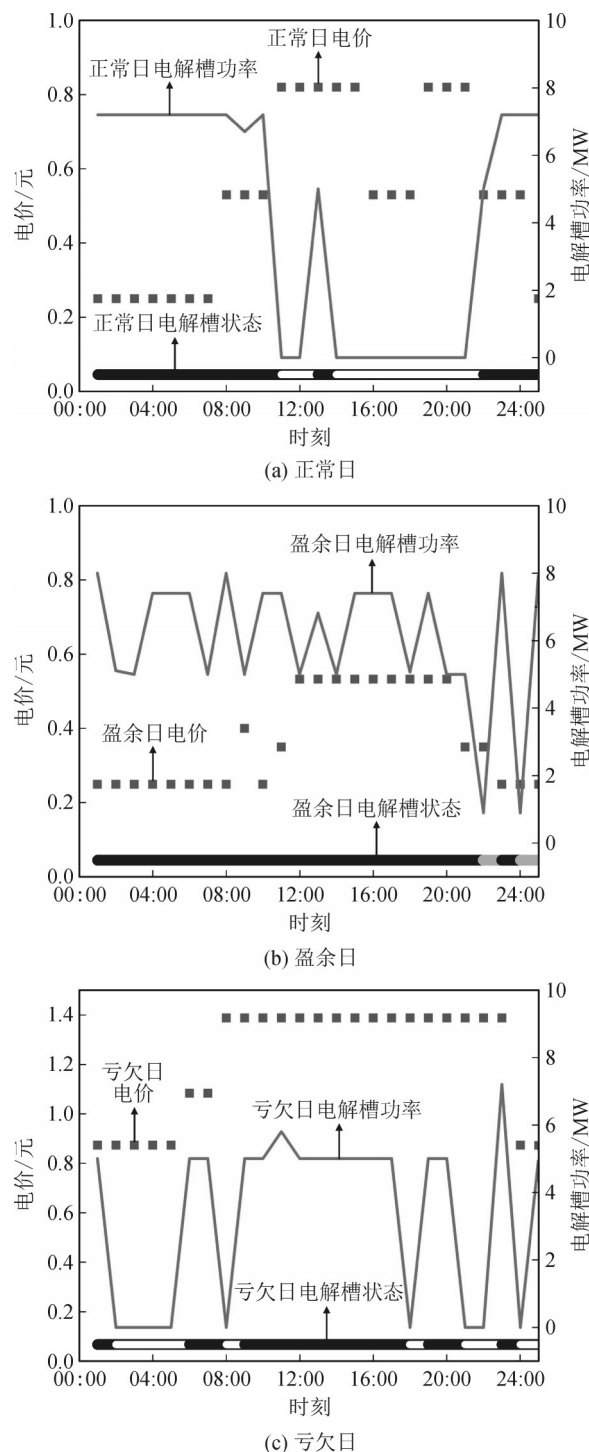


图7 电解槽状态与电价对照图

Fig. 7 Comparison between electrolyzer status and electricity price

图7(a)展示了正常日下电解槽状态与实时电价的对对应关系,可以看出,电价在10:00-15:00和18:00-21:00两段达到峰值,而在其他时段则相对较低。与此对应,电解槽在21:00-次日10:00一直处于生产状态,除了12:00-13:00进行短暂补氢外,其余价格峰值时段电解槽一直处于停机状态。从日氢负荷曲线中可以看出,电价峰值时段与氢负荷需求峰值时段几乎重合,所以此模型的灵活性很好地体现出来,在电价低的时段电解槽保持生产状态,生产氢气存储到储氢罐中以备使用。

图7(b)展示了盈余日下电解槽状态与实时电价的对对应关系,如图所示,风电出力在一天中所有时段都能满足设备及用户的用电需求,因此全天的电价都处于一个较低的区间。与正常日不同,盈余日下电解槽几乎全部处于生产状态,原因是热启动和冷启动的成本在此场景要高于每小时电解槽运行的成本,减少电解槽开关次数可以减少退化成本。但另一方面,生产状态下电解槽功率的频繁波动又会增加退化成本。比较之下,通过减少开关次数降低的成本要多于电解槽功率波动增加的成本,从而体现了优化调度模型的作用。

图7(c)展示了亏欠日下电解槽状态与实时电价的对对应关系,如图所示,风电出力在一天中所有时段都只能刚好满足用户端的电负荷,想要制氢来满足氢负荷需求就必须要从电网中额外购电,因此全天的电价都处于一个较高的区间。此时电解槽工作状态主要由氢负荷曲线决定,在氢负荷需求高的时段电解槽集中工作,氢负荷需求低的时段电解槽大多数时段处于停机状态,避免高电价带来的额外成本,通过储氢罐中剩余的氢气来供应氢负荷。

为证明该优化方案的稳定性,以盈余日为例,对未搭建碱性电解槽电—热线性模型的风电制—储氢系统进行仿真分析,结果见图8。可以看出,电解槽在个别时段出现了功率峰值,生产状态下功率起伏较大。具体每时刻的电解槽功率见表2,通过计算可知,电解槽的功率标准差为2.50,而采用优化方案后盈余日下电解槽的功率标准差为1.99。其余两种典型日优化前后的电解槽功率标准差见表3,可以看出,采用此优化方案后,电解槽功率波动幅度都有所降低,说明该优化方案具有良好的稳定性。

为证明该优化方案的有效性,将优化后的日利润与没有优化运行(称为基本负荷运行模式)的日利润在3种典型日下进行了比较,见图9。其中,基本负荷运行模式是指电解槽在全天一直保持一个功率稳定运行。从图9可以看出,在3种不同的典

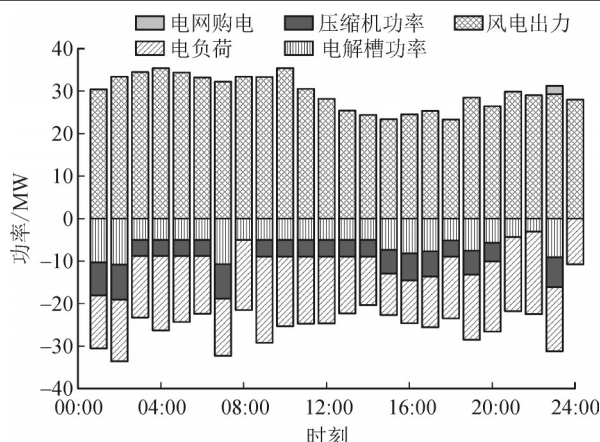


图8 盈余日优化前各设备出力

Fig. 8 Output of each device before optimization on the earning day

表2 盈余日优化前后电解槽功率

Table 2 Power of electrolyzer before and after optimization on the earning day

时刻	优化前/ MW	优化后/ MW	时刻	优化前/ MW	优化后/ MW
1:00	10.24	8.00	13:00	5.00	6.82
2:00	10.80	5.11	14:00	5.00	5.00
3:00	5.00	5.00	15:00	7.31	7.40
4:00	5.00	7.40	16:00	8.14	7.40
5:00	5.00	7.40	17:00	7.68	7.40
6:00	5.00	7.40	18:00	5.07	5.07
7:00	10.68	5.00	19:00	7.43	7.40
8:00	5.00	8.00	20:00	5.68	5.00
9:00	5.00	5.00	21:00	4.19	5.00
10:00	5.00	7.40	22:00	3.03	0.90
11:00	5.00	7.40	23:00	9.14	8.00
12:00	5.00	5.00	24:00	0.00	0.90

表3 电解槽功率标准差

Table 3 Standard deviation of electrolyzer

典型日	优化前	优化后
正常日	3.47	3.27
盈余日	2.50	1.99
亏欠日	2.86	2.61

型日下,优化运行后的系统都比基本负荷运行模式下的系统表现出更好的经济性。各情景的比较进一步表明,从电网中购电越少,优化操作越有价值。例如,典型日二为盈余日,风电出力几乎在各时段都能满足系统用电需求,此场景下利润改善最大。

4 结论

利用风电电解制氢是消纳新能源和能源清洁化的重要途径之一,针对碱性电解槽的运行优化问

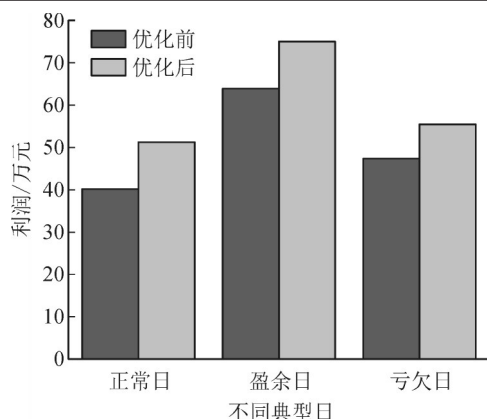


图9 优化前后日利润

Fig. 9 Daily profit before and after optimization

题,建立了一种基于碱性电解槽状态转换的风电制—储氢系统的优化调度模型。

1)文中建立了单个电解槽在3种典型日场景下的运行优化模型,利用Gurobi求解器进行24 h内电解槽3种状态分配求解,算例的运行时间为秒级别。结果表明,在电价较高的时段,电解槽若不工作应处于停机状态,以减少电网购电成本;在电价较低的时段,电解槽不工作应处于待机状态,避免冷启动带来的高额成本。相比于全天处于基本负荷运行模式下的电解槽,系统日收益平均提高20.79%,功率波动幅度平均降低11.63%。且MATLAB/Gurobi仿真分析工具、国内外碱性电解水制氢系统以及配套的辅机设备技术成熟度已经很高,工艺流程较为完善,上述内容说明本模型在实际工程中具有应用的可行性。

2)在实际生产中,一般由多个电解槽串并联组成电解槽阵列,现有的研究通常仅考虑电解槽运行功率和输入功率的线性关系,而文中分别建立了单个电解槽运行功率和产热与输入功率和槽温的线性模型,因此在后续研究中可考虑电解槽阵列在不同运行工况下温度、压力等指标的变化对电解效率的影响。

参考文献:

- [1] 于航,刘强,于广欣. 欧洲油气公司2050年净零碳排放战略目标浅析[J]. 国际石油经济,2020,28(10):31-36.
YU Hang, LIU Qiang, YU Guangxin. European oil and gas companies' strategic targets of net zero emissions by 2050 [J]. International Petroleum Economics, 2020, 28(10): 31-36.
- [2] 王陆新,王叙斐,王永臻. 美国2050年实现净零排放的气候战略及启示[J]. 中国能源,2022,44(2):67-72.
WANG Luxin, WANG Xufei, WANG Yongzhen. Implications of the U. S. climate strategy to achieve net-zero emissions by 2050[J]. Energy of China, 2022, 44(2): 67-72.
- [3] 刘玮,万燕鸣,熊亚林,等. “双碳”目标下我国低碳清洁氢能进展与展望[J]. 储能科学与技术,2022,11(2):635-642.
LIU Wei, WAN Yanming, XIONG Yalin, et al. Outlook of low Carbon and clean Hydrogen in China under the goal of “Carbon peak and neutrality” [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(2): 635-642.
- [4] 潘光胜,顾钟凡,罗恩博,等. 新型电力系统背景下的电制氢技术分析与展望[J]. 电力系统自动化,2023,47(10):1-13.
PAN Guangsheng, GU Zhongfan, LUO Enbo, et al. Analysis and prospect of electrolytic Hydrogen technology under background of new power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(10): 1-13.
- [5] 顾玖,王晨磊,解大. 电力市场环境下的电—氢一体化站优化运行[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(1):130-139.
GU Jiu, WANG Chenlei, XIE Da. Research on optimal operation of electricity-Hydrogen integrated station in electricity market environment[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1): 130-139.
- [6] SHIN H, JANG D, LEE S, et al. Techno-economic evaluation of green Hydrogen production with low-temperature water electrolysis technologies directly coupled with renewable power sources[J]. Energy Conversion and Management, 2023(286):117083.
- [7] 吴启亮,章雷其,赵波. 可再生能源制氢建模技术研究[J]. 浙江电力,2023,42(5):18-33.
WU Qiliang, ZHANG Leiqi, ZHAO Bo. A study of the modeling technology of Hydrogen production from renewable energy sources[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(5): 18-33.
- [8] 杨胜,樊艳芳,侯俊杰,等. 考虑平抑风光波动的ALK-PEM电解制氢系统容量优化模型[J]. 电力系统保护与控制,2024,52(1):85-96.
YANG Sheng, FAN Yanfang, HOU Junjie, et al. Capacity optimization model for an ALK-PEM electrolytic Hydrogen production system considering the stabilization of wind and PV fluctuations[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 85-96.
- [9] WULF C, ZAPP P, SCHREIBER A. Review of power-to-X demonstration projects in Europe[J]. Frontiers in Energy Research, 2020(8):191.
- [10] 年珩,陈磊磊,赵建勇,等. 基于电解槽状态识别的风光制氢系统能量管理优化[J]. 电测与仪表,2023,60(10):10-16.
NIAN Heng, CHEN Leilei, ZHAO Jianyong, et al. Energy management optimization of wind-solar Hydrogen production system based on electrolytic cell state recognition[J].

- Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(10): 10-16.
- [11] 刘雨佳,樊艳芳,郝俊伟,等. 基于碱性电解槽宽功率适应模型的风光氢热虚拟电厂容量配置与调度优化[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 48-59.
- LIU Yujia, FAN Yanfang, HAO Junwei, et al. Capacity configuration and optimal scheduling of a wind-photovoltaic-Hydrogen-thermal virtual power plant based on a wide range power adaptation strategy for an alkaline electrolyzer[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 48-59.
- [12] BRAUNS J, TUREK T. Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: A review[J]. Processes, 2020, 8(2): 248.
- [13] ULLEBERG Ø. Modeling of advanced alkaline electrolyzers: A system simulation approach[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2003, 28(1): 21-33.
- [14] PAN Guangsheng, GU Wei, LU Yuping, et al. Optimal planning for electricity-Hydrogen integrated energy system considering power to Hydrogen and heat and seasonal storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2662-2676.
- [15] 余娟,时权妍,杨知方,等. 考虑电解水与甲烷化运行特性的电转气系统日前调度方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18): 18-25.
- YU Juan, SHI Quanyan, YANG Zhifang, et al. Day-ahead scheduling method of power-to-gas system considering operation characteristics of water electrolysis and methanation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 18-25.
- [16] ZHENG Y, YOU S, BINDNER H W, et al. Optimal day-ahead dispatch of an alkaline electrolyser system concerning thermal-electric properties and state-transitional dynamics[J]. Applied Energy, 2022(307): 118091.
- [17] 刘继春,周春燕,高红均,等. 考虑氢能—天然气混合储能的电—气综合能源微网日前经济调度优化[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 170-178.
- LIU Jichun, ZHOU Chunyan, GAO Hongjun, et al. A day-ahead economic dispatch optimization model of integrated electricity-natural gas system considering Hydrogen-gas energy storage system in microgrid[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 170-178.
- [18] 高乾恒,黄帅飞,李二超,等. 市场环境下含氢储能的销售公司优化调度[J]. 电力建设, 2019, 40(4): 42-48.
- GAO Qianheng, HUANG Shuaifei, LI Erchao, et al. Optimal dispatching of electricity retailers considering Hydrogen storage in the electricity market[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(4): 42-48.
- [19] 刘志坚,余莎,梁宁. 考虑制氢储能参与的互联电力系统优化调度研究[J]. 电力科学与工程, 2020, 36(3): 45-51.
- LIU Zhijian, YU Sha, LIANG Ning. The optimal scheduling with Hydrogen energy storage participation for interconnected power system[J]. Electric Power Science and Engineering, 2020, 36(3): 45-51.
- [20] 尹晨旭,朱刘柱,项超,等. 考虑氢能交互转换的综合能源微网协调调度方法[J]. 中国电力, 2020, 53(10): 88-95.
- YIN Chenxu, ZHU Liuzhu, XIANG Chao, et al. Coordinated dispatch method for integrated microgrid energy system-considering interactive Hydrogen conversion[J]. Electric Power, 2020, 53(10): 88-95.
- [21] 侯慧,刘鹏,刘志刚,等. 电热氢多元储能系统优化调度方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(2): 536-543.
- HOU Hui, LIU Peng, LIU Zhigang, et al. Optimal dispatch method for multi-energy storage system of electricity heat Hydrogen[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 536-543.
- [22] MATUTE G, YUSTA J M, CORREAS L C. Techno-economic modelling of water electrolyzers in the range of several MW to provide grid services while generating Hydrogen for different applications: A case study in Spain applied to mobility with FCEVs[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(33): 17431-17442.
- [23] SHUAI Y, ZHAO P, LIU H, et al. Optimization of battery capacity for wind solar complementary Hydrogen production system under multi power conditions[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(11): 474.
- [24] HONG Zhenpeng, WEI Zixuan, HAN Xiaojuan. Optimization scheduling control strategy of wind-Hydrogen system considering Hydrogen production efficiency[J]. Journal of Energy Storage, 2022(47): 103609.
- [25] LI Jiarong, LIN Jin, SONG Yonghua, et al. Operation optimization of power to Hydrogen and heat(P2HH) in ADN coordinated with the district heating network[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(4): 1672-1683.
- [26] 袁铁江,万志,王进君,等. 考虑电解槽启停特性的制氢系统日前出力计划[J]. 中国电力, 2022, 55(1): 101-109.
- YUAN Tiejiang, WAN Zhi, WANG Jinjun, et al. The day-ahead output plan of Hydrogen production system considering the start-stop characteristics of electrolytic cell[J]. Electric Power, 2022, 55(1): 101-109.
- [27] 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.
- [28] MATUTE G, YUSTA J M, BEYZA J, et al. Multi-state techno-economic model for optimal dispatch of grid connected Hydrogen electrolysis systems operating under dynamic

(下转第77页)

- and islanded-oriented design of a reversible solid oxide cell-based renewable microgrid[J]. *Energies*, 2019, 12(17): 12173224.
- [22] BERNAGOZZI M, PANESAR A S, MORGAN R. Molten salt selection methodology for medium temperature liquid air energy storage application[J]. *Applied Energy*, 2019 (248):500-511.
- [23] CALIFANO M, SORRENTINO M, ROSEN M A, et al. Optimal heat and power management of a reversible solid oxide cell based microgrid for effective technoeconomic Hydrogen consumption and storage[J]. *Applied Energy*, 2022 (319):119268-1-119268-19.
- [24] 孙 雯, 陈紫薇, 张玉琼, 等. 基于动态规划的SOFC冷热电三联供综合能源系统日前经济调度[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(21): 7775-7783.
- SUN Wen, CHEN Ziwei, ZHANG Yuqiong, et al. Economic day - ahead scheduling of SOFC - based integrated tri-generation energy system using dynamic programming[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(21): 7775-7783.
- 闫振靖(1983—), 男, 学士, 工程师, 研究方向为智慧用能技术研究(E-mail: yzjzu@163. com)。
- 李皓然(1991—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为绿氢制取及应用技术研究。
- 杨欣可(1986—), 男, 学士, 高级工程师, 研究方向为智慧用能技术研究。
- 李浩南(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为燃料电池运维技术。
- 程艳杰(1996—), 女, 学士, 助理工程师, 研究方向为绿氢制取及应用技术研究。
- 沈 飞(1986—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为储能技术。
- 周 峻(1985—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新能源系统优化。
- conditions[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(2): 1449-1460.
- [29] KHALIGH V, GHEZELBASH A, ZAREI M, et al. Efficient integration of alkaline water electrolyzer-A model predictive control approach for a sustainable low-Carbon district heating system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023(292): 117404.
- [30] ZHANG Hong, YUAN Tiejiang. Optimization and economic evaluation of a PEM electrolysis system considering its degradation in variable-power operations[J]. *Applied Energy*, 2022(324): 119760.
- 郭小龙(1983—), 男, 博士, 正高, 从事电网运行控制与分析(E-mail: ncepugxl@sina. com)。
- 亢朋朋(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电网运行控制与分析(E-mail: kangpengpeng@xj. sgcc. com. cn)。
- 田 晨(2000—), 男, 硕士研究生, 从事新型电力系统构建与运行控制研究(通信作者)(E-mail: tczx66@163. com)。

(上接第 68 页)