

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.07.007

基于不确定性分析与电价波动的电—氢—热综合能源系统分析

闫振靖¹, 李皓然¹, 杨欣可², 李浩南², 程艳杰¹, 沈飞², 周峻²

(1. 西安平高智慧能源有限公司, 西安 710000; 2. 西安交通大学, 西安 710049)

摘要:“双碳”目标背景下,建设以电—氢—热多能流耦合的综合能源系统不仅可以解决新能源并网难的问题,也可以促进能源领域降碳减排。对于电—氢—热综合能源系统,以燃料电池与电解池为能源枢纽,实现电—氢—热的相互转换,进一步提高能源的梯级利用效率,增强电网调度灵活性。文中首先建立了一个基于不确定性分析与电价波动的电—氢—热综合能源系统,分析了不同能量消耗方式和电价波动对综合能源系统投资成本的影响;其次,研究了可再生能源的不确定性对系统“弃风、弃光”决策的影响机制。结果表明:综合能源系统可通过电—氢—热3种形式的能量高效转换,实现削峰填谷和长时间储能。由于可再生能源不确定性而产生的“弃风弃光”现象,可通过降低风光发电成本进行消除,进而提高综合能源系统的稳定性和灵活性。

关键词: 燃料电池; 电解池; 储能系统; 综合能源系统

Analysis of Electric-Hydrogen-thermal Integrated Energy System Based on Uncertainty Analysis and Electricity Tariff Fluctuation

YAN Zhenjing¹, LI Haoran¹, YANG Xinke², LI Haonan², CHENG Yanjie¹,
SHEN Fei², ZHOU Jun²

(1. Xi'an Pinggao Smart Energy Company, Xi'an 710000, China; 2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Under the background of the 'dual Carbon' goal, the construction of an integrated energy system with electric-Hydrogen-thermal multi-energy flow can not only solve the difficulty of renewable energy grid connection but also promote Carbon reduction and emission in the energy field. For the energy system containing electricity, heat, and gas, the fuel cell and electrolytic cell are taken as the energy hubs to realize the mutual conversion of different kinds of energy, improve the gradient utilization efficiency of energy further, and strengthen the flexibility of grid dispatching. In this paper, an integrated energy system containing electricity, heat, and gas based on uncertainty analysis and electricity price is set up, and the influence of different energy consumption modes and electricity price fluctuation on the cost of the integrated energy system is analyzed. Then, the influence mechanism of the uncertainty of renewable energy on the decision-making process of curtailment of wind and solar energy is studied. The results show that the integrated energy system can realize peak-valley shifting and long-time energy storage by high efficiency. The phenomenon of curtailment of wind and solar energy due to the uncertainty of renewable energy uncertainty can be eliminated by reducing the cost of wind and solar power generation, thereby improving the stability of the integrated energy system.

Key words: fuel cell; electrolytic cell; energy storage system; integrated energy system

收稿日期:2024-03-01; 修回日期:2024-05-13

基金项目:国家电网有限公司科技项目(CEE-2022-B-01-03-003-SD);陕西省重点研发计划(2023-YBGY-057)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid of China(CEE-2022-B-01-03-003-SD), the Key R&D Program of Shaanxi Province(2023-YBGY-057).

0 引言

新能源电力的大规模接入是电力能源领域实现碳中和的重要手段^[1-3]。但是由于新能源波动性的特点,会使得电网的供电稳定性和安全性下降^[4];另外,中国新能源发电和用能分布在地理空间上不匹配,导致存在弃风弃光现象^[5-6]。利用多能互补协同来提高新能源的消纳能力对电力能源领域的可持续发展具有十分重要的意义^[7-8]。由于固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)与固体氧化物电解池(solid oxide electrolysis cell, SOEC)能实现热、电、氢能等的高效转化,被认为是连接热、电、氢的核心设备^[9]。一方面,当新能源发电量大于负荷所需电能时,SOEC能够将多余电能转化为氢气或者再经过甲烷化生成甲烷储存起来,实现可再生能源能量的大规模、长时间存储;另一方面,当用电高峰时,SOFC可以将储存的化学能转化成电能^[10]。采用“SOFC+SOEC+新能源+储能”的模式,不仅增强了不同能源之间的耦合性,实现多能互补,还能提高能源系统的运行灵活性和经济性^[11-13]。

此外,SOFC往往工作在较高的温度(800~1 000 °C)^[14],因此可以利用余热进行热电联产,从而实现电—氢—热三联产,增加系统的经济收益^[15]。在电—氢—热综合能源系统中,SOFC与SOEC既可以独立运行,也可以根据需要并网。储能(energy storage, ES)技术在实现电力系统脱碳和调峰调频过程中发挥着越来越大的作用^[16]。耦合SOEC电解制氢和ES不仅可以提升储能容量、消纳新能源电力,而且还可以利用SOFC/SOEC双向运行的特点,促进源网荷储的互动协同作用,增强应急保供能力^[17]。文[18]考虑多能流交互拓扑,提出了电—氢调控策略,发展了电—氢能源系统碳流倒推方法。文[19]研究了电氢混合储能的充放电约束,制定了相应的能量管理策略,从而获得了较高的经济性。国内外学者已取得了诸多研究成果,但缺乏计及电价波动的电—氢—热综合能源系统分析,尤其是缺少新能源导入不确定性对系统优化策略的影响研究。为此,文中重点考虑可再生能源不确定性与电价响应条件下的电—氢—热综合能源系统的灵活性提升研究。建立以SOFC与SOEC耦合储能的电—氢—热多能源互联系统模型,分析不同能量消耗方式和电价波动对综合能源系统投资成本的影响,考虑可再生能源不确定性与电价响应因素,提出电—氢—热综合能源系统的优化和配置方法,通过电—氢—

热间的高效转化,实现多种能流的强耦合。

1 系统建模

文中综合能源系统示意图见图1,该系统主要由风光能源、SOFC/SOEC、储氢罐以及电热泵等装置所组成,说明了电能、氢能、热能3种能流的传递和转化路径。

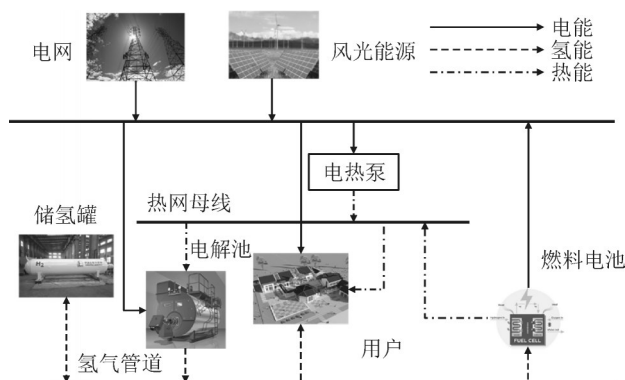


图1 “电—氢”综合能源系统示意图

Fig. 1 “Electric-Hydrogen” integrated energy system

1.1 目标函数

文中以最低的系统整体成本为优化函数^[18],定义为

$$\min(f_{\cos t}) = \min(\sum_{i=1} Z_{\text{CRF}} \cdot C_{\text{CAPEX}_i} + \sum_{t=0}^{24} \sum_{i=1} [C_{\text{imp}}(t) + C_{\text{OPEX}_i}(t)] + \sum_{t=0}^{24} \sum_{i=1} [P_{\text{exp}}(t) \cdot P_{\text{P-exp}} + H_{\text{exp}}(t) \cdot P_{\text{H-exp}} + V_{\text{exp}}(t) \cdot P_{\text{V-exp}}]) \quad (1)$$

式(1)中: $C_{\text{CAPEX}_i}(t)$ 是每个模块使用的一次成本; $C_{\text{imp}}(t)$ 是每个小时从电网购买的民用电成本,在考虑成本时,计算总时长为一天,即24个小时; $C_{\text{OPEX}_i}(t)$ 是每个模块的运行成本,同样以小时为单位计算一年的使用量; $P_{\text{exp}}(t)$ 、 $H_{\text{exp}}(t)$ 、 $V_{\text{exp}}(t)$ 分别是系统需要从外部购买的电能、热能以及气体; $P_{\text{P-exp}}$ 、 $P_{\text{H-exp}}$ 、 $P_{\text{V-exp}}$ 分别代表外部购电单价、购热单价以及购气单价; Z_{CRF} 是折旧投资因子,因为考虑到一次成本能够使用的年限,需要对每一年分摊的一次成本进行折旧^[19],定义为

$$Z_{\text{CRF}} = \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2)$$

1.2 网络平衡方程

1.2.1 电网模型

$$P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{wind}}(t) + P_{\text{SOFC}}(t) + P_{\text{grid}}(t) = P_{\text{SOFC}}(t) + P_{\text{load}}(t) + P_{\text{HP}}(t) \quad (3)$$

式(3)中: $P_{PV}(t)$ 、 $P_{wind}(t)$ 、 $P_{SOFC}(t)$ 、 $P_{grid}(t)$ 分别是太阳能发电功率、风能发电功率、SOFC发电功率以及电网输入系统的功率; $P_{SOEC}(t)$ 、 $P_{load}(t)$ 、 $P_{HP}(t)$ 分别是SOEC功率、电负荷和电热泵功率。

1.2.2 热网模型

$$H_{SOFC}(t) + H_{HP}(t) = H_{SOEC}(t) + P_{load}(t) + P_{out}(t) \quad (4)$$

式(4)中: $H_{SOFC}(t)$ 、 $H_{HP}(t)$ 分别是SOFC发热功率以及电热泵产热功率; $H_{SOEC}(t)$ 、 $H_{load}(t)$ 、 $H_{out}(t)$ 分别是SOEC吸热功率、热负荷和机组散热功率。

1.2.3 气网模型

$$H_{SOFC}(t) + V_{SS}(t-1) = V_{SOFC}(t) + V_{SS}(t) + V_{load}(t) + V_{sell} \quad (5)$$

式(5)中: $V_{SOFC}(t)$ 、 $V_{SS}(t-1)$ 分别是SOEC产气量以及上一时刻氢储罐输出; $V_{SOFC}(t)$ 、 $V_{SS}(t)$ 、 $V_{load}(t)$ 、 $V_{sell}(t)$ 分别是SOFC耗气量、氢储罐输入、气负荷和售气。

1.3 系统组分建模

1.3.1 新能源电站模型

对于光伏电站来说,根据光伏曲线得到的能量功率为

$$E_{PV}(t) = P_{PV} \cdot \alpha_{PV}(t) \quad (6)$$

式(6)中, $\alpha_{PV}(t)$ 为实际光伏发电曲线对应向量。

对于风力发电站来讲,同理根据风力发电功率曲线得到的能量功率为

$$E_{wind}(t) = P_{wind} \cdot \alpha_{wind}(t) \quad (7)$$

式(7)中, $\alpha_{wind}(t)$ 为实际风力发电功率曲线对应向量。

为了分析光伏电站发电的不确定性,在本工作中引入了一种鲁棒优化(RO)方案^[20],此时式(6)、(7)会被式(8)–(11)所替代:

$$E_{PV}(t) = P_{PV} \cdot \alpha_{PV}(t) - \beta_{PV}(t) \Gamma_{PV} - \xi_{PV}(t) \quad (8)$$

$$\beta_{PV}(t) + \xi_{PV}(t) \geq D_{PV}(t) \cdot \lambda_{PV}(t) \quad (9)$$

$$\beta_{PV}(t), \xi_{PV}(t), \lambda_{PV}(t) \geq 0 \quad (10)$$

$$\lambda_{PV}(t) \geq P_{PV} \quad (11)$$

式(8)–(11)中: $\beta_{PV}(t)$ 、 $\xi_{PV}(t)$ 、 $\lambda_{PV}(t)$ 均为鲁棒数学模型中的辅助变量; Γ_{PV} 是太阳能发电鲁棒性控制参数(定义域为[0, 1]),当 Γ_{PV} 取0时整个不确定性系统退化为确定性系统,而当 Γ_{PV} 取1时整个系统的不确定性达到最大; $D_{PV}(t)$ 是每个时刻PV功率曲线与平均值的偏差,即 $E_{PV}(t) - E[E_{PV}(t)]$ 。

1.3.2 燃料电池模型

对于固体氧化物燃料电池来说,反应不仅能让

气体化学能转换成电能,放热反应也会产生一定的热能:

$$H_{SOFC}(t) = V_{SOFC}(t) \cdot \Delta H \cdot \eta_{SOFC}^{th} \quad (12)$$

$$P_{SOFC}(t) = V_{SOFC}(t) \cdot \Delta H \cdot \eta_{SOFC}^{el} \quad (13)$$

式(12)、(13)中: ΔH 是氢气的热值; η_{SOFC}^{el} 是燃料电池气转电的效率; η_{SOFC}^{th} 是燃料电池反应过程中释放出热量的效率。

1.3.3 电解池模型

对于电解池来说,反应不仅能让电能转换成气体化学能,吸热反应也会消耗一定的热能:

$$P_{ec}(t) = \frac{V_{SOFC}(t) \cdot \Delta H}{\eta_{ec}^{el}} \quad (14)$$

$$H_{ec}(t) = P_{ec}(t) \cdot \eta_{ec}^{th} \quad (15)$$

1.3.4 电热泵模型

热泵是热能领域最重要的高效电能替代技术。同样消耗一度电,热泵产生的热量是电加热的3~10倍,因此,热泵在20~150℃温度范围内是电能替代的最佳技术。而在微电网中,当RSOC余热供应不足时,电热泵产热可以弥补热能供给不足的部分。基于能量守恒建立热泵的数学模型为

$$H_t^{HP} = P_t^{HP} \eta_{HP} \quad (16)$$

式(16)中: P_t^{HP} 和 H_t^{HP} 分别为电热泵消耗的电功率和产生的热功率; η_{HP} 为电热泵的制热效率。

1.3.5 储氢系统模型

氢气储罐中通过的气体流量不能超过建设的储罐容量:

$$V_{SS}(t) \leq C_{VSS} \quad (17)$$

$$-T_{VSS} \leq V_{SS}(t) - V_{SS}(t-1) \leq T_{VSS} \quad (18)$$

式(17)、(18)中: C_{VSS} 为氢气储罐的规划体积; T_{VSS} 为单次运送的卡车容量。

2 案例输入参数

2.1 新能源电站、储罐等系统部件的参数输入

风光发电的容量因子曲线见图2,其中风电和光伏发电的功率曲线来自于Renewable Ninja网站的数据。考虑到风力和光伏电站的投资分为一次成本与二次成本(一次成本即发电站建设成本;二次成本即发电站的运行成本)。本案例使用参数为:一次投资,风力按2513欧元/kW计算^[21],太阳能发电按817欧元/kWh计算^[22],在本案例中,针对运营成本,光伏的年运行成本被折算成一年的一次投资成本(CAPEX)的3%,风力发电年运行成本仅为一次投资成本的1%。

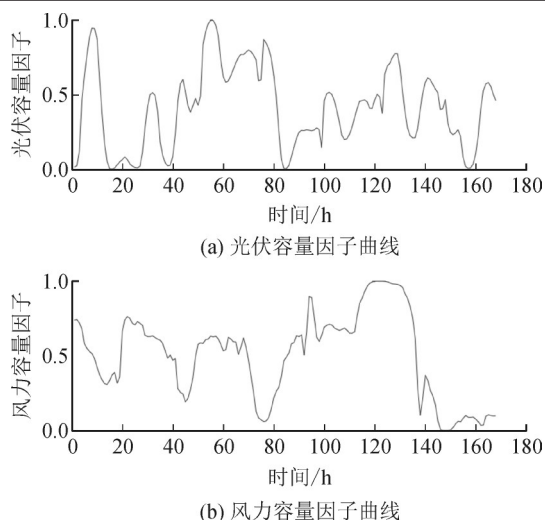


图2 风、光伏电站容量因子曲线

Fig. 2 Capacity factor curves for wind and photovoltaic stations

在标准大气压下运行的氢储罐的一次投资成本^[23]为400欧元/kg,热储罐的一次成本^[23]为60欧元/kWh。此外,针对燃料电池、电解池和电热泵,其一次投资成本、运行成本、装置的运行效率以及装置的功耗等相关参数见表1, C_{OPEX} 指的是一年内设备的运行成本,占一次成本的百分比。

表1 各种装置的投资成本、运行效率、装置功耗

Table 1 Investment costs, operational efficiency, power consumption of various devices

参数	燃料电池	电解池	电热泵
$\eta/\%$	el:52.2 th:40	el:75 th:30	200
C_{CAPEX} [元·(m ³ /h ⁻¹) ⁻¹]	2 000	2 000	100
C_{OPEX}	2	2	0

2.2 系统负荷和电价曲线

文中采用的典型日负荷曲线^[24]见图3。为了验证模型和优化方案的有效性,选取电价参数见图4,此场景中的电价峰谷差值较小,并且电价维持在一个相对稳定的范围内。天然气的价格为30.0欧元/MWh;热能的价格为17.78欧元/MWh。

3 案例分析

在系统不确定性提高的过程中,系统中风、光发电的功率有所降低,与此相对的是系统对于电—氢—热三网的依赖性增高。在可再生能源发电量减少的同时,系统对于SOEC与SOFC的使用也减小了,因此可见电解池与燃料电池在系统中对于可再生能源的消纳起到的积极作用。当不确定性较低($\Gamma=0.2$)时,系统可以优化3种能源的配置,通过调动

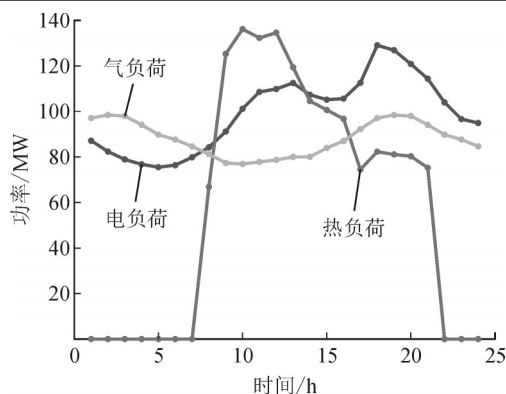


图3 电—氢—热负荷典型日曲线

Fig. 3 Typical daily curve of electricity-Hydrogen-thermal load

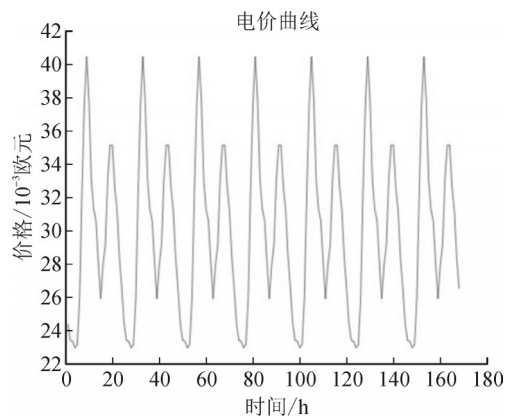
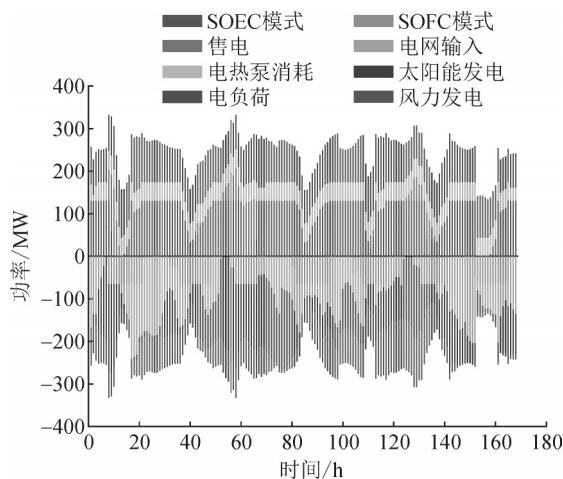


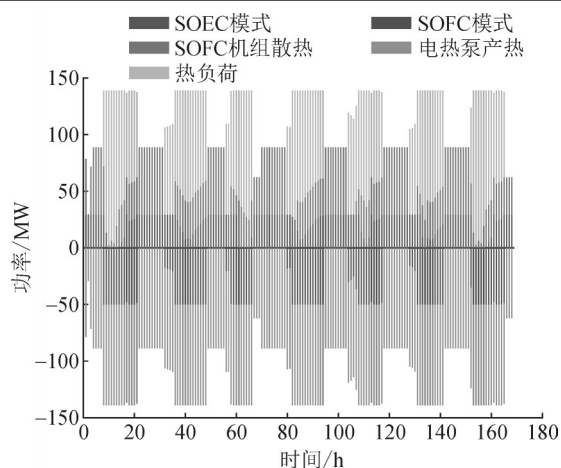
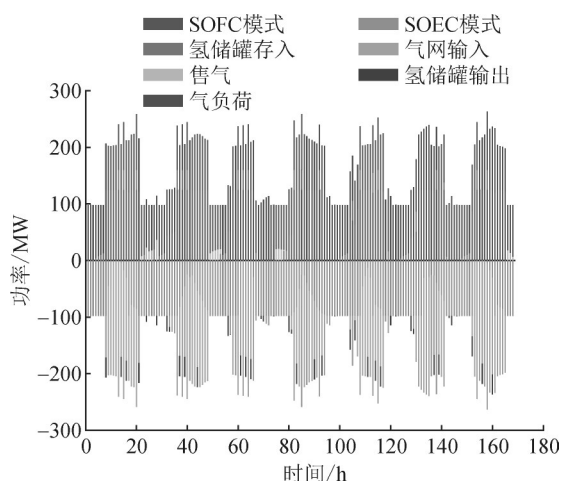
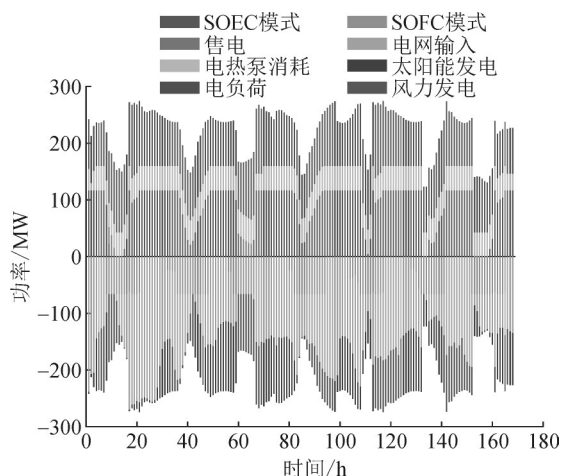
图4 一周内电价随时间的变化曲线

Fig. 4 Curve of electricity price over time in a week

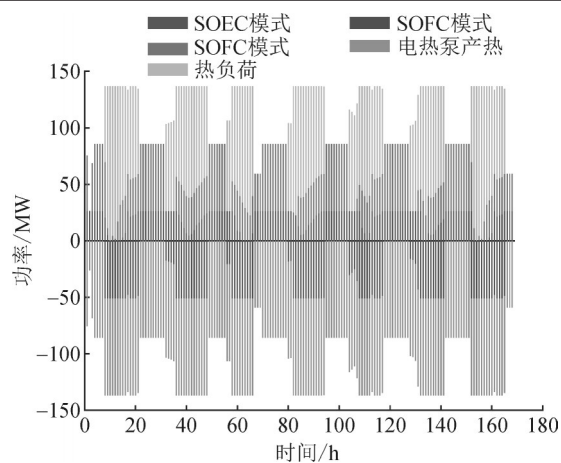
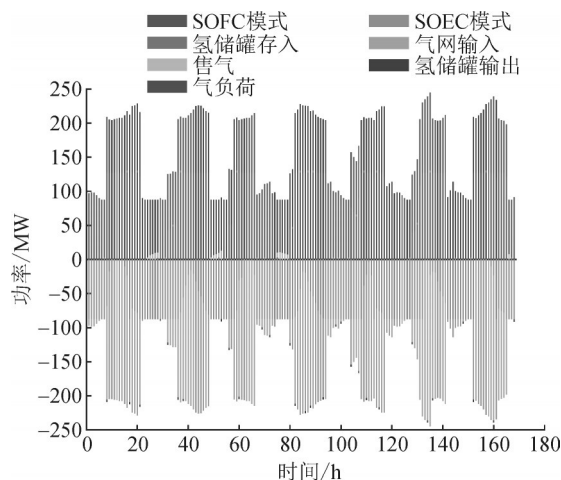
风光能源,起到削减用电高峰的作用,同时系统对于氢储罐的规划容量比较充裕,可以达到长时间储能的目的。在不确定性 $\Gamma=0.2$ 下系统设备的调度情况见图5-7。

图5 $\Gamma=0.2$ 系统电网平衡曲线Fig. 5 $\Gamma=0.2$ power grid balance curve

在 $\Gamma=0.8$ 时系统各设备产氢/耗氢的调度情况见图8-10。

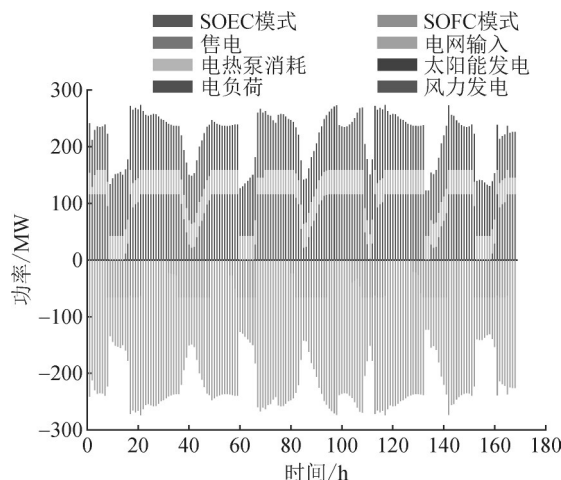
图6 $\Gamma=0.2$ 系统热网平衡曲线Fig. 6 $\Gamma=0.2$ heat grid balance curve图7 $\Gamma=0.2$ 系统气网平衡曲线Fig. 7 $\Gamma=0.2$ gas grid balance curve图8 $\Gamma=0.8$ 系统电网平衡曲线Fig. 8 $\Gamma=0.8$ power grid balance curve

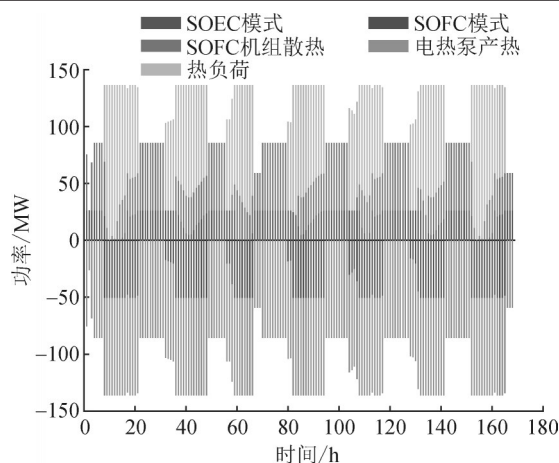
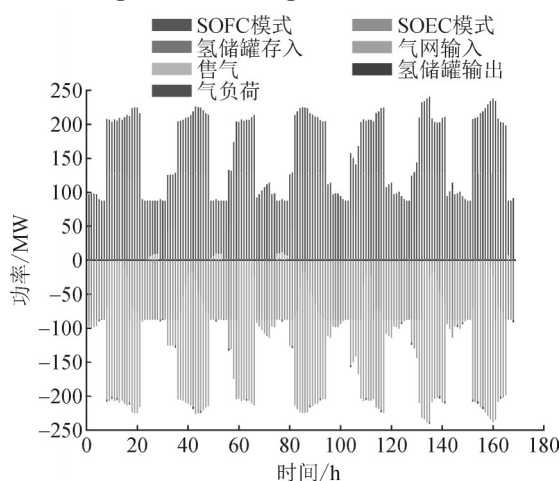
当不确定性因子 $\Gamma=0.8$ 时,系统出现了弃风现象,并且随着光能容量因子的减小,太阳能的发电份额也迅速降低。带来的是系统中电网、气网输入系统的显著增加,当系统不再依靠可再生能源制氢储能,氢储罐的规划容量也大大降低。可以看到,

图9 $\Gamma=0.8$ 系统热网平衡曲线Fig. 9 $\Gamma=0.8$ heat grid balance curve图10 $\Gamma=0.8$ 系统气网平衡曲线Fig. 10 $\Gamma=0.8$ gas grid balance curve

当用电需求较低时,系统仅调度SOFC和电网输入,即可保证满足负荷要求;当用电高峰到达时,系统通过增加太阳能发电比例,达到消除高峰的目的。

不同的场景下系统各设备产氢耗氢的调度情况见图11-13。

图11 $\Gamma=1$ 系统电网平衡曲线Fig. 11 $\Gamma=1$ power grid balance curve

图12 $\Gamma=1$ 系统热网平衡曲线Fig. 12 $\Gamma=1$ heat grid balance curve图13 $\Gamma=1$ 系统气网平衡曲线Fig. 13 $\Gamma=1$ gas grid balance curve

当不确定性因子 $\Gamma=1$ 时,在弃风之后,系统又出现了弃光现象,此时系统完全并网运行,氢储罐规划容量趋近于零。由此可见,当不确定性指标高到一定程度时,系统无法起到长期储能的作用。但是系统中SOEC与SOFC的使用并没有停止,在没有新能源发电的输入后,电解池与燃料电池在系统中起到平衡3种负荷及电价的作用。此外,通过不同形式的能量转换,考虑电价的波动,削减用电/用热/用气高峰,实现多种能流的强耦合,以此使资源得到更加合理的配置。

引入不确定性之后系统成本的逐步变化见图14。如图14所示,随着不确定因子 Γ 的逐步增大,系统的总成本逐步增加。可以看到,当 Γ 为0~0.6时,系统总投资成本增速较为稳定; $\Gamma=0.8$ 时,尽管风能的容量因子大于光能,但是由于风电的成本要高于光电,且风能的波动性较光能大得多,弃风现象首先产生;当 Γ 为0.8~0.9时,系统成本的增速相较于之前放缓,其原因是此时风能大多被舍弃,

成本的增加主要由光能和其他设备引起;而当不确定性因子高到一定程度时($\Gamma=0.95$ 左右),系统同时发生弃风弃光现象,系统成本不再随着不确定性的提高而增加,曲线呈水平状态。

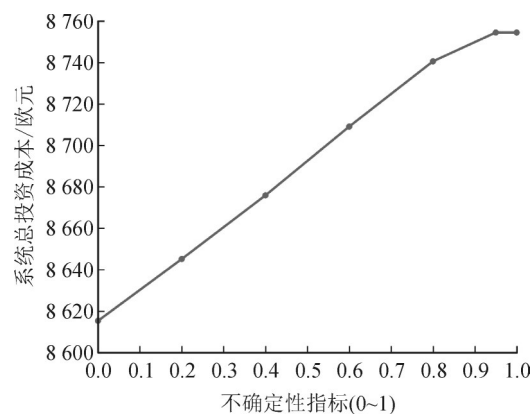


图14 系统总投资成本随不确定性指标的变化

Fig. 14 Variation of total system investment cost with uncertainty indicators

不确定性对于风、光容量因子的具体影响见图15。随着不确定性的逐步增大,风光容量因子随之降低,这主要是因为当风光能源的不确定性增加时,系统会降低风光发电的比例,进而保证能源供给的稳定性。当不确定性指标 Γ 达到最值1时,系统的不确定性最强,光能的容量因子为25.0%,仅为确定性情况的76.45%;风能容量因子为38.3%,仅为确定性情况的84.55%。系统总投资成本、风光容量因子随不确定性指标的变化见表2。

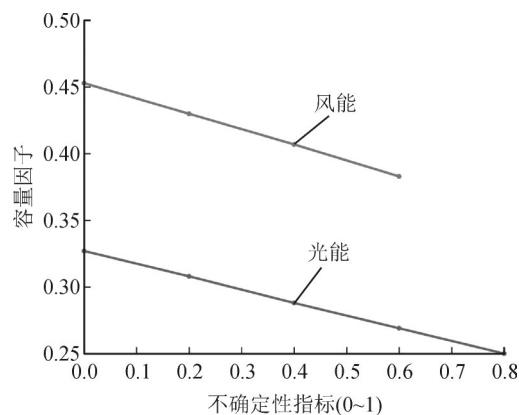


图15 风、光发电机组容量因子随不确定性指标的变化

Fig. 15 Variation of capacity factors with uncertainty indicators

如果将风光的成本(包括运行成本和一次成本)降低10%,见图16,此时弃风、弃光的现象消失,可以发现,随着科技水平的提高,风光等新能源的获取成本逐渐降低,其对抗不确定性的能力也越来越强,从而使整个系统的稳定性得到提高。

表2 系统总投资成本、风光容量因子随不确定性指标的变化

Table 2 Variation of total system investment cost and capacity factors with uncertainty indicator

参数	数值					
不确定性指标	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
光能容量因子	0.327	0.308	0.288	0.269	0.250	—
风能容量因子	0.453	0.430	0.407	0.383	—	—
光能装机容量	302.042	286.881	299.263	317.646	279.820	0.000
风能装机容量	133.665	134.652	102.304	79.223	0.000	0.000
投资成本	8 615.373	8 645.198	8 675.944	8 709.132	8 740.628	8 754.546

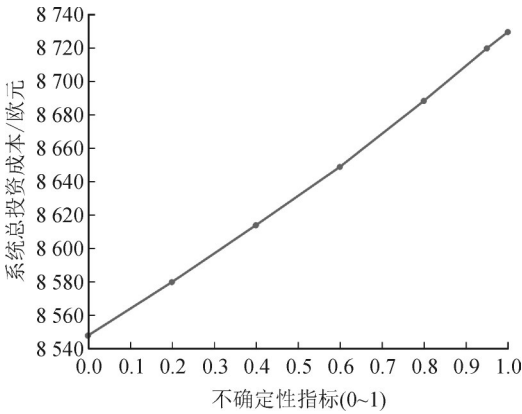


图16 风光成本降低后风、光发电机组容量因子随不确定性指标的变化

Fig. 16 Variation of capacity factors with uncertainty indicators after cost reduction

4 结论

针对氢能参与综合能源系统的灵活调控,考虑新能源导入不确定性与电价波动的电—氢—热综合能源系统,得出主要结论如下:

- 1)随着电价波动,系统对于电网电力的偏好降低。太阳能的发电份额也随着光能容量因子的减小迅速降低,电网、气网输入系统显著增加。
- 2)当系统不再依靠可再生能源制氢储能,氢储罐的规划容量也大大降低。当发生弃风弃光现象时,电解池与燃料电池在系统中起到平衡3种负荷及电价的作用,实现多种能流的强耦合,以此使资源得到更加合理的配置。
- 3)随着不确定性的提高,系统产生了弃风弃光现象,当不确定指标从0变化到1时,风能容量因子降低幅度为15.45%,光能容量因子降低幅度达到23.55%;当风、光等新能源的获取成本逐渐降低时,系统对抗可再生能源不确定性的能力越来越强。

参考文献:

[1] 武雅君. 目标下我国清洁能源发电现状及发展趋势[J].

电气技术与经济,2023(1):121-124.
WU Yajun. Present development condition and trends of China's clean energy power generation under targets of Carbon peak and Carbon neutrality[J]. Electrical Equipment and Economy, 2023(1): 121-124.
[2] 董 昱,梁志峰,王上行,等. 新型电力系统下推动储能与新能源协调有序发展的分析与思考[J]. 供用电, 2022, 39(10):84-92.
DONG Yu, LIANG Zhifeng, WANG Shangxing, et al. Analysis and thinking on promoting coordinated and orderly development of energy storage and new energy under new power system[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(10): 84-92.
[3] 杨 鑫,黄永章,付文启,等. 新能源同步机与调相机在高比例新能源电网中应用的比较[J]. 大电机技术,2022 (1):7-12.
YANG Xin, HUANG Yongzhang, FU Wenqi, et al. Comparison of MGP and synchronous condenser in high proportion renewable energy grid[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2022(1):7-12.
[4] 王黄磊,江 涛,吴玉玲,等. 计及新能源并网发电的配电网电能质量分析[J]. 电气自动化,2021,43(4):20-23.
WANG Huanglei, JIANG Tao, WU Yuling, et al. Analysis on distribution network power quality considering new energy grid - connected power Generation[J]. Electrical Automation, 2021, 43(4):20-23.
[5] 徐桂芝,梁丹曦,宋 洁,等. 风—光—氢—储综合能源系统日前经济调度[J]. 现代电力,2023,40(6):939-946.
XU Guizhi, LIANG Danxi, SONG Jie, et al. Day - ahead economic dispatch of wind - photovoltaic - HESS - BESS integrated energy system[J]. Modern Electric Power, 2023, 40(6):939-946.
[6] 吴晓刚,吴新华,季青锋,等. 计及新能源不确定性的新能源场站与储能电站分布式协同优化[J]. 浙江电力, 2022,41(6):54-61.
WU Xiaogang, WU Xinhua, JI Qingfeng, et al. Distributed

- collaborative optimization of new energy station sand energy storage power stations taking account of the uncertainty of new energy[J]. Zhejiang Electric Power, 2022,41(6):54-61.
- [7] 袁铁江,谭捷,万志.考虑下游氢负荷波动的新能源制氢系统协调控制策略[J].电力系统及其自动化,2023,47(6):150-157.
- YUAN Tiejia, TAN Jie, WAN Zhi. Coordinated control strategy of Hydrogen producing system powered by renewable energy considering downstream Hydrogen load fluctuations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023,47(6):150-157.
- [8] 陈艺华,张炜,张成刚,等.新型电力系统中促进新能源消纳的电力现货市场交易机制研究[J].智慧电力,2022,50(2):97-104.
- CHEN Yihua, ZHANG Wei, ZHANG Chenggang, et al. Electricity spot market trading mechanism for promoting renewable energy integration in new power system[J]. Smart Power, 2022,50(2):97-104.
- [9] 杨威,王越,张曦,等.基于可逆固体氧化物燃料电池的综合能源站容量优化配置[J].电力自动化设备,2023,43(12):93-100.
- YANG Wei, WANG Yue, ZHANG Xi, et al. Optimal capacity configuration of integrated energy station based on reversible solid oxide fuel cell[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023,43(12):93-100.
- [10] 潘超,刘继哲,孙勇,等.考虑氢储一体化协同的综合能源系统低碳优化[J].电力自动化设备,2023,43(12):118-126.
- PAN Chao, LIU Jizhe, SUN Yong, et al. Low-Carbon optimization of integrated energy system considering Hydrogen-storage integrated coordination[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023,43(12):118-126.
- [11] 李建林,梁忠豪,梁丹曦,等.“双碳”目标下绿氢制备及应用技术发展现状综述[J].分布式能源,2021,6(4):25-33.
- LI Jianlin, LIANG Zhonghao, LIANG Danxi, et al. Overview of development status of green Hydrogen production and application technology under targets of Carbon peak and Carbon neutrality[J]. Distributed Energy, 2021,6(4):25-33.
- [12] GABRIELLI P, GAZZANI M, MARTELLI E, et al. Optimal design of multi-energy systems with seasonal storage[J]. Applied Energy, 2018(219):408-24.
- [13] 李建林,马会萌,惠东.储能技术融合分布式可再生能源的现状与发展趋势[J].电工技术学报,2016,31(14):1-10.
- LI Jianlin, MA Huimeng, HUI Dong. Present development condition and trends of energy storage technology in the integration of distributed renewable energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016,31(14):1-10.
- [14] 张鹏,张自航,周峻,等.可逆固体氧化物电池在低碳能源系统中的应用前景与挑战[J].电网与清洁能源,2020,36(6):54-63.
- ZHANG Peng, ZHANG Zihang, ZHOU Jun, et al. Application prospects and challenges of reversible solid oxide cells in the low - Carbon energy system[J]. Power System and Clean Energy, 2020,36(6):54-63.
- [15] 赵鸿飞,陈前昌,宗正,等.可逆固体氧化物电池发电—电解条件下的运行特性分析[J].电工电能新技术,2022,41(3):23-32.
- ZHAO Hongfei, CHEN Qianchang, ZONG Zheng, et al. Analysis of steady-state characteristics in reversible solid oxide cell[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022,41(3):23-32.
- [16] BUFFO G, FERRERO D, SANTARELLI M, et al. Energy and environmental analysis of a flexible power-to-X plant based on reversible solid oxide cells(rSOCs) for an urban district[J]. Journal of Energy Storage, 2020(29):101314-1-101314-16.
- [17] 肖云鹏,王锡凡,王秀丽,等.多能源市场耦合交易研究综述及展望[J].全球能源互联网,2020,3(5):487-496.
- XIAO Yunpeng, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Review and prospects of coupled transactions in multi-carrier energy systems[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020,3(5):487-496.
- [18] DOROTIC H, PUKSEC T, DUIC N. Economical, environmental and exergetic multi-objective optimization of district heating systems on hourly level for a whole year[J]. Applied Energy, 2019(251):113394-1-113394-16.
- [19] KHAN M J, YADAV A K, MATHEW L. Techno economic feasibility analysis of different combinations of PV-wind-diesel-battery hybrid system for telecommunication applications in different cities of Punjab, India[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017(76):577-607.
- [20] WANG Yun, KAZEMI M, NOJAVAN S, et al. Robust design of off-grid solar-powered charging station for Hydrogen and electric vehicles via robust optimization approach[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020,45(38):18995-19006.
- [21] SORRENTINO M, ADAMO A, NAPPI G. Self-sufficient

- 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)