

# 考虑柔性氢需求的区域综合能源系统优化调度方法

韩华春, 李强, 袁晓冬

(国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:**氢相较于电更易存储的属性,使其可在高比例可再生能源消纳中发挥重要作用。在此背景下,着重研究不同时间尺度氢需求(柔性氢需求)对区域综合能源系统运行优化的影响。在区域综合能源系统建模中,重点考虑可再生能源出力不确定性、需求侧响应和柔性氢需求。通过分析小时级年电力负荷需求和光伏出力数据,以最小化系统年运行费用为目标,研究不同光伏消纳水平下柔性氢需求对区域综合能源系统优化运行的影响。仿真结果表明,随着氢需求时间尺度逐渐增大(终端存储能力逐渐增强),系统经济性逐渐提高,并在设备运行、与上级电网交易和需求侧响应等方面有显著效果。

**关键词:**电制氢;光伏;综合能源系统;优化调度;新能源消纳

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.03.002 中图分类号:TM464 文章编号:1673-9140(2022)03-0012-07

## Optimal dispatch of regional integrated energy systems considering flexible hydrogen demand

HAN Huachun, LI Qiang, YUAN Xiaodong

(Electric Power Science Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

**Abstract:** Compared with electricity, hydrogen is easier to store and can play an important role in the high renewable energy integration. Under the background, this paper focuses on the influence of hydrogen demand (flexible hydrogen demand) at different time scales on the optimization of regional integrated energy systems. Firstly, the uncertainty of renewable energy output, demand-side response and flexible hydrogen demand are considered in the modeling of regional integrated energy systems. Then, the impact of hydrogen demand on the optimal dispatch of regional integrated energy systems is studied for different time scales with different photovoltaic penetration levels based on the hourly annual electricity load demand and photovoltaic output data. Finally, a simulation is included for verification with the goal of minimizing the annual operating cost of the system. It is shown that the system economy gradually improves as the time scale of hydrogen demand increases (the storage capacity of the terminal gradually increases) especially for area of the equipment operation, transaction with the upper-level grid, and demand-side response.

**Key words:** power to hydrogen; photovoltaic; integrated energy systems; optimal dispatch; renewable integration

收稿日期:2020-12-16;修回日期:2021-05-19

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(J2020001)

通信作者:韩华春(1988-),女,博士,高级工程师,主要从事分布式电源及配电网技术研究;E-mail:598543427@qq.com

大力推动以绿色低碳可再生能源为主体的新型能源系统是世界各国的努力方向和必然选择<sup>[1-3]</sup>。然而相比传统火力发电,以风电光伏为主的可再生能源发电具有极大的波动性和间歇性,导致中国在发展可再生能源进程中面临较大的可再生能源发电消纳问题<sup>[4]</sup>。据国家能源局公开资料,中国在 2016—2018 年中“三弃”电量达 1 000 亿 kW·h 以上,每年相当于弃掉一个三峡电站全年发电量<sup>[5]</sup>。“三弃”问题在 2018 年以后开始逐年缓解,但是“3060”碳目标的提出使得以风电、光伏为代表的可再生能源在未来呈现爆发式增长的态势<sup>[6]</sup>。因此,需采用储能技术、需求侧管理和扩建输电基础设施等措施来提升可再生能源的利用水平。

电转气(氢)技术作为一种新型的能源转换方式,有利于可再生能源消纳,近些年得到广泛地研究与关注<sup>[7-8]</sup>。文献[9]研究了考虑电转气设备和风电场协同扩建的电气综合能源系统规划设计,可有效地减少输电线路阻塞和输电线路的过度投建;文献[10]评估了电转气技术对提升电—气互联系统的可靠性及提升风电消纳能力的作用;文献[11]进一步建立针对电转气综合能源系统的评价指标。以上结果表明,将富余电能转化为甲烷,注入现有天然气网络传输或终端消纳,是现阶段较为经济且便利的方式。然而,电转气技术需经历电转氢和氢合成甲烷 2 个过程,整体转化效率较低,仅在特定条件下具备盈利空间。

考虑近些年国家对加氢站及氢燃料电池的补贴与扶持,氢作为一种终端能源在交通、化工、发电和供热等领域具备巨大的应用潜力<sup>[12-14]</sup>。相比电转气技术,电制氢技术不需进行二氧化碳加氢合成甲烷反应,能源转化效率更高。文献[15]从全网集中式调度角度出发,建立了精细化的电制氢模型,研究包含火电机组、风电场和制氢设备的优化调度方法;文献[16]提出一种面向高比例可再生能源消纳的电和氢为能源载体的电氢能源系统,力图探索适合未来人类社会的能源系统形态;文献[17]从多利益主体角度出发,基于纳什谈判理论建立了风—光—氢多主体合作运行模型,并采用交替方向乘法进行求解;文献[18]评述了风电耦合制氢的技术进展,该技术优势在于利用氢能长周期大规模储能与多元化终端应用来平抑风电的强随机波动性和间歇性,

并且从系统优化设计、运行策略制定以及全寿命周期技术经济性评价三方面对风电耦合制氢前景给出发展方向建议。以上研究表明,计及终端氢需求后,电制氢相比电转气更加经济高效。然而,已有研究主要在给定的氢需求前提下探讨电制氢对能源系统优化运行及可再生能源消纳的作用,尚未有研究关注多时间尺度柔性氢需求,即保证小时级、天级、周级等不同时间尺度下的稳定氢供应对能源系统优化运行的影响。

氢作为终端能源应用于交通、工业、发电、建筑供热等不同领域时,在能源供需的时间尺度上要求不一:比如氢经燃料电池发电时需满足实时稳定的氢供应,而用于部分工业企业时只需满足天级以上的氢需求量即可<sup>[19]</sup>。因此,如何利用不同终端需求自身的氢存储能力,优化区域综合能源系统与上级电网的交互功率,具有重要的现实意义。

本文以具有需求响应能力的柔性氢需求为出发点,研究柔性氢需求对综合能源系统优化运行的影响,为未来氢能供应链建设及与电力系统之间的耦合关系提供一定的参考。

## 1 区域综合能源系统建模

考虑如图 1 所示的简化区域综合能源系统,该系统自身配置分布式光伏发电设备,并与上级电网互联进行电能交易,来满足区域内的电负荷需求。此外,该系统还配置了电制氢设备,可将电能转化为氢能来满足区域内的氢需求。本文分别对分布式光伏、电制氢、需求侧响应和柔性氢需求建模,并给出该优化调度模型的表现形式。

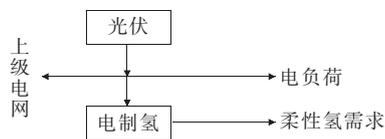


图 1 区域综合能源系统结构

Figure 1 Structure of regional integrated energy systems

### 1.1 分布式光伏建模

分布式光伏出力具有随机性。为保证区域综合能源系统的安全稳定运行,假定分布式光伏的出力需在一定的置信水平  $\eta$  以内,即

$$\Pr(p_i^{PV} \leq p_{i,fore}^{PV}) \geq \eta \quad (1)$$

式中  $P_t^{PV}$  为该系统内光伏在  $t$  时段的输出电功率;  $p_{t,fore}^{PV}$  为光伏预测出力值。本文假定光伏的实际出力  $p_t^{PV}$  遵循高斯分布  $N(p_{t,fore}^{PV}, \sigma_{t,fore}^2)$ ,  $\sigma_{t,fore}^2$  为方差值。式(1)可改写为

$$\Pr(p_{t,fore}^{PV} \geq p_t^{PV}) = \varphi(p_t^{PV}) \leq 1 - \eta \quad (2)$$

式中  $\varphi(\cdot)$  为光伏累积分布函数,并可以改写为以下标准形式:

$$\varphi(p_t^{PV}) = \varphi_a\left(\frac{p_t^{PV} - p_{t,fore}^{PV}}{\sigma_{t,fore}}\right) \leq 1 - \eta \quad (3)$$

式中  $\varphi_a(\cdot)$  为标准正态分布  $N(0,1)$  的累积分布函数,其与  $\varphi(\cdot)$  的物理意义相同,只是表现形式有所区别。

因此,在一定的置信水平  $\eta$ ,光伏实际出力需满足以下约束:

$$0 \leq p_t^{PV} \leq p_{t,fore}^{PV} + \sigma_{t,fore} \cdot \varphi_a^{-1}(1 - \eta) \quad (4)$$

式中  $\varphi_a^{-1}(\cdot)$  为标准正态分布  $N(0,1)$  的逆累积分布函数;标准差  $\sigma_{t,fore}$  设定为预测出力值  $p_{t,fore}^{PV}$  的 5%。该约束有利于系统安全稳定运行。

## 1.2 电力需求侧响应

需求侧响应可实现电力负荷的削峰填谷,可提升电力系统供电可靠性和经济性。电负荷分为基准负荷与可转移负荷,其中假定基准负荷是固定且不可调整的,而可转移负荷可基于实际需求在一个调度周期内进行转入与转出,具体为

$$P_t^{e,fore} = P_t^{e,fix} + P_t^{e,in} - P_t^{e,out} \quad (5)$$

$$0 \leq P_t^{e,in} \leq \alpha P_t^{e,fore} \quad (6)$$

$$0 \leq P_t^{e,out} \leq \alpha P_t^{e,fore} \quad (7)$$

$$\sum_{t=k}^{t=k+24} P_t^{e,in} = \sum_{t=k}^{t=k+24} P_t^{e,out} \quad (8)$$

式(5)为每个时刻的电负荷,由基准固定负荷  $P_t^{e,fix}$ 、转入负荷  $P_t^{e,in}$  和转出负荷  $P_t^{e,out}$  组成,式(6)、(7)分别为约束每个时刻的最大转入/转出负荷,其中  $\alpha$  为最大可转移负荷系数,式(8)保证每天的总转入负荷等于总转出负荷。

## 1.3 电制氢设备建模

电制氢技术是通过电解驱动水生成氢气与氧气,其本身输入输出特性比较复杂,呈现非线性特征<sup>[20]</sup>。考虑电制氢设备具有动态响应速度快,一般情况下,其转化效率受负载水平影响很小,因此表征电制氢设备的输入输出关系和电制氢设备的输入电功率采用如下约束:

$$\eta^{P2H} P_t^{P2H} = P_t^h \quad (9)$$

$$\lambda \epsilon_i^{P2H} C^{P2H} \leq P_t^{P2H} \leq \epsilon_i^{P2H} C^{P2H} \quad (10)$$

式(9)、(10)中  $P_t^{P2H}$  为该系统内电制氢设备在  $t$  时段的输入电功率;  $C^{P2H}$  为电制氢设备的容量;  $\epsilon_i^{P2H}$  为整数变量,用于表示电制氢设备的运行状态;  $\eta^{P2H}$  为电制氢设备的转化效率;  $\lambda$  为电制氢设备的最小负载水平。

## 1.4 柔性氢需求

不同于终端电用户可实时从电网获取电能,终端氢用户往往需要一定容量的氢存储能力,比如氢燃料电池车、合成氨厂和炼钢厂等。不同质量氢所包含的能量及用途如图 2 所示。由图 2 可知,5 kg 氢可满足 1 辆氢燃料电池车 (Toyota Mirai) 行驶 500 km,22 kg 氢相当于一台 50 kW 电解槽一天的产量,25 kg 氢可满足一辆氢燃料电池大巴 (Toyota Sora) 行驶 200 km,200~500 kg 氢为一座加氢站的加注能力,而 3.3 t 氢存储的能量等于目前世界上最大的电池储能项目的存储容量 (Hornsedale Power Reserve, 129 MW · h)。以上结果表明,不同的氢需求均需配置相应容量的氢存储设备。

柔性氢需求特指具备一定的氢存储能力,对供氢的时间要求不同的多类型氢用户,比如某些企业需保证每天的供氢量相同,而另一些企业自身有一定的存储能力,只需保证每周的供氢量一致。在保证安全稳定的氢供应前提下,根据每  $i$  小时间隔的总供氢量保持一致的要求,柔性氢需求约束为

$$\sum_{t=ik+1}^{t=ik+i} P_t^h = \Delta P^h, k = \left\{0, 1, 2, \dots, \frac{8760}{i} - 1\right\} \quad (11)$$

式中  $\Delta P^h$  为每  $i$  小时间隔的总供氢量。



图 2 不同质量氢所包含的能量及用途

Figure 2 Energy and uses of hydrogen with different masses

## 1.5 优化模型

该优化模型的目标为最小化系统年费用,具体包含购电费用  $c_t^{\text{grid}+} P_t^{\text{grid}+}$ 、补偿费用  $c^{\text{shift}} P_t^{\text{e},\text{in}}$  和售电费用  $-c_t^{\text{grid}-} P_t^{\text{grid}-}$ ,即

$$\min\{c_t^{\text{grid}+} P_t^{\text{grid}+} - c_t^{\text{grid}-} P_t^{\text{grid}-} + c^{\text{shift}} P_t^{\text{e},\text{in}}\} \quad (12)$$

式中  $c_t^{\text{grid}+}$ 、 $c_t^{\text{grid}-}$  分别为该区域综合能源系统在  $t$  时段买的、卖电价; $P_t^{\text{grid}+}$ 、 $P_t^{\text{grid}-}$  分别为该区域综合能源系统在  $t$  时段与电网的买、卖电功率; $c^{\text{shift}}$  为单位转移负荷补偿费用。

约束包含功率平衡约束:

$$P_t^{\text{grid}+} - P_t^{\text{grid}-} + P_t^{\text{PV}} - P_t^{\text{P2H}} = P_t^{\text{e},\text{fore}} \quad (13)$$

电网交互约束:

$$0 \leq P_t^{\text{grid}+} \leq \epsilon_t^+ P_{\text{max}}^{\text{grid}} \quad (14)$$

$$0 \leq P_t^{\text{grid}-} \leq \epsilon_t^- P_{\text{max}}^{\text{grid}} \quad (15)$$

$$0 \leq \epsilon_t^+ + \epsilon_t^- \leq 1 \quad (16)$$

式(13)~(16)  $P_t^{\text{e},\text{fore}}$  为该系统在  $t$  时段的预测电负荷; $\epsilon_t^+$ 、 $\epsilon_t^-$  分别为该系统与上级电网的买、卖状态; $P_{\text{max}}^{\text{grid}}$  为该区域综合能源系统上级与电网联络线的最大交互电功率。式(13)为系统电功率平衡方程,式(14)~(16)为该区域综合能源系统从上级电网购售电约束,并保证在某一时刻只能有一种交互状态。

优化模型还包含光伏出力约束式(4)、需求侧响应约束式(5)~(8)、电制氢设备输入功率约束式(9)、(10)和柔性氢需求约束式(11)。模型输入为电负荷、价格和系统参数,模型输出为与电网交互电功率、转移电功率和设备运行功率。该优化模型属于典型的混合整数线性规划模型,可采用商业求解器 Cplex 等直接求解。

## 2 优化结果分析

### 2.1 算例简介

以如图 1 所示的区域综合能源系统进行算例仿真,来验证本文所提模型的有效性。为使仿真结果更具实用性,通过采集中国东部沿海某地区的小时级年电力负荷曲线作为电负荷数据,利用美国国家可再生能源实验室开发的 PVWatts Calculator 计算年小时级单位光伏发电数据。电负荷和光伏出力具体如图 3 所示。此外,电解槽的电氢转换效率为

0.613,即每生产 1 kg 氢需消耗 54.3  $\text{kM} \cdot \text{h}$  电,设备容量为 2 MW,最小负载水平为 0.1<sup>[21]</sup>;需求侧响应中的最大可转移负荷系数设置为 0.2。与上级电网的购售电价如表 1 所示。

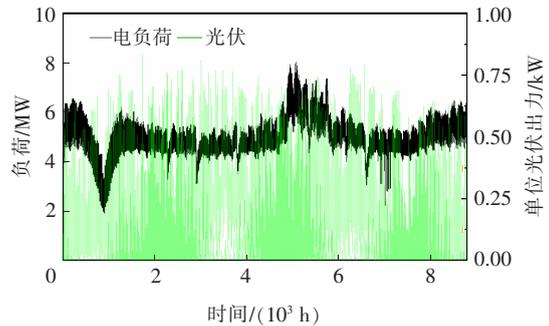


图 3 电负荷和单位光伏出力

Figure 3 Electric load and unit PV output

表 1 价格参数

Table 1 Price Parameter

参数	价格/(元/( $\text{kW} \cdot \text{h}$ ))	时段
$c^{\text{grid}-}$	0.39	00:00—24:00
	0.41	00:00—08:00
$c^{\text{grid}+}$	1.15	09:00—12:00,18:00—21:00
	0.73	13:00—17:00,22:00—24:00

### 2.2 结果分析与讨论

#### 2.2.1 不同光伏消纳比例下的经济性对比

首先将柔性氢需求的供氢时间尺度分别设置为 1、6、12、24、168 h,对应的氢需求分别为 12.5 kg/h、75.0 kg/6 h、150.0 kg/12 h、300.0 kg/24 h 和 2100.0 kg/168 h,研究从小时级到周级尺度下氢需求对综合能源系统的影响。为了探究柔性氢需求在不同光伏消纳比例中的作用,图 4 分别给出光伏配置容量分别为 10、15、20 MW 下不同柔性氢需求的系统经济性对比情况。由图 4 可知,在不同光伏配置容量下,系统年运行成本均随着供氢时间尺度的增加而降低。随着时间尺度从 1 h 到 6 h,系统的购电成本在不同光伏配置容量下均大幅降低,进而使系统总费用降低;随着时间尺度从 6 h 到 168 h,系统的成本降低逐渐放缓,后期变化很小。以上说明在该系统中,一个 6 h 的氢储氢设备可有效地提升系统运行灵活性和经济性。从整体上可知,随着柔性氢需求供氢时间尺度的增加,系统购电费用、售电费用和补贴费用均逐渐降低,这有利于缓解对上级电网和需求侧响应的依赖作用。

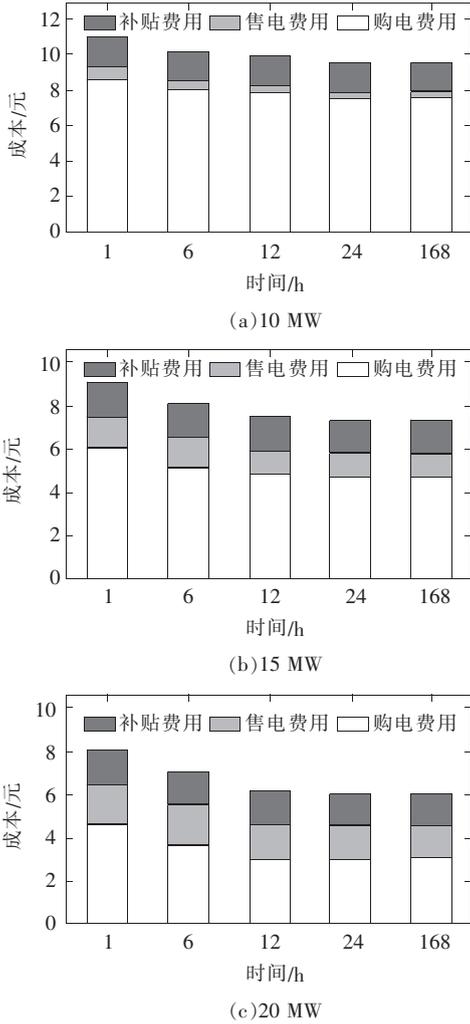


图4 不同光伏消纳比例下的经济性对比  
Figure 4 Economic comparison under different PV integrations

### 2.2.2 运行场景分析

为了研究不同供氢时间尺度氢需求对区域综合能源系统优化运行的影响,图5~7进一步给出15 MW光伏配置容量下电制氢输入电功率、与电网交互电功率和转移电功率在不同供氢时间尺度下随时间的变化。由图5可知,在1 h氢需求约束中,电解槽需保持恒功率运行来满足实时的用氢需求。当时间尺度增加到6 h时,电解槽运行灵活性迅速提升,在一天的调度周期内主要工作于03:00—04:00、11:00—12:00、14:00—15:00、23:00—24:00电价低谷和光伏出力高峰时段,因此系统经济性有所提升,但电解槽启停过于频繁(一天内启停3次,其中电解槽由零电功率输入到有电功率输入再到无电功率输入为一次启停)。而随着时间尺度的进一步增加,电解槽进一步集中于在中午时段以额定功

率进行工作,且在一个典型日内只启停一次。由图6可知,不同时间尺度下系统主要在08:00—18:00时段向上级电网售电,而在其他时刻从上级电网买电。除了时间尺度6 h下部分时段从上级电网的购电功率波动较大外,整体上随着时间尺度的增加,系统与上级电网的交互功率更加平缓。由图7可知,不同时间尺度下系统主要将其他时段的电负荷需求转移到08:00—17:00时段光伏出力高峰时段,且通过需求侧响应曲线可以发现,时间尺度为1 h时波动最大,随后随着时间尺度增加波动越来越小。由以上结果可以发现,随着氢需求时间尺度逐渐增大(终端存储能力逐渐增强),系统在设备运行、与上级电网交易和需求侧响应等方面效果显著。

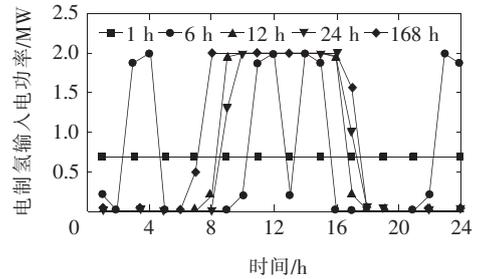


图5 不同供氢时间尺度下的电制氢运行分析  
Figure 5 Operating results of electrolyzers under different hydrogen supply time scales

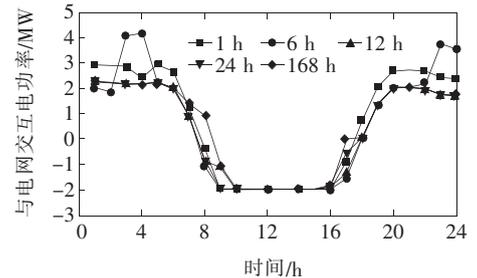


图6 不同供氢时间尺度下与电网交互电功率  
Figure 6 Operating results of trading power with upper-grid under different hydrogen supply time scales

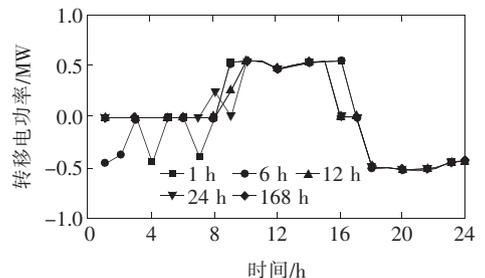


图7 不同供氢时间尺度下的转移电功率  
Figure 7 Operating results of transfer power under different hydrogen supply time scales

### 3 结语

为了研究不同时间尺度柔性氢需求对区域综合能源系统优化运行的影响,本文建立了包含柔性氢需求、需求侧响应和光伏出力的区域综合能源系统优化模型,结果表明:不同光伏配置下,随着氢需求时间尺度逐渐增大,系统经济性逐渐提高,并在设备运行、与上级电网交易和需求侧响应等方面具有优势。

柔性氢需求有利于区域综合能源系统中新能源和氢能发展,这可为以后普及以电和氢为终端需求的综合能源系统提供一定的指导作用。通过用能终端的氢存储增大氢需求的时间尺度,可自下而上地支撑电制氢的灵活性制氢,有效地提升区域综合能源系统在可再生能源消纳,降低对上级电网和需求侧响应的依赖作用,并有效提升系统整体经济性。

#### 参考文献:

- [1] 代琼丹,邓昕,吴雪妍,等. 能源互联网下综合能源服务商业模式综述[J]. 高压电器,2021,57(02):135-144.  
DAI Qiongdan, DENG Xin, WU Xuayan, et al. Overview on integrated energy service business model under energy internet[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(02): 135-144.
- [2] 张利军,王一铮,陈飞,等. 计及能源网络特性的综合能源系统最优协调规划[J]. 电力科学与技术学报,2020,35(1):3-13.  
ZHANG Lijun, WANG Yizheng, CHEN Fei, et al. Optimal coordinated planning of an integrated energy system considering characteristics of energy networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 3-13.
- [3] 和萍,祁盼,申润杰,等. 计及风电和燃料电池的综合能源系统阻尼特性分析[J]. 电力科学与技术学报,2020,35(1):14-23.  
HE Ping, QI Pan, SHEN Runjie, et al. Analysis of damping characteristics of an integrated energy system with hybrid wind-fuel cells integrated[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 14-23.
- [4] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报,2018,38(7):1893-1904+2205.  
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904+2205.
- [5] 国家能源局. 国家能源局发布 2018 年风电并网运行情况[EB/OL]. [http://www.nea.gov.cn/2019-01/28/c\\_137780779.htm](http://www.nea.gov.cn/2019-01/28/c_137780779.htm), 2019-01-28.
- [6] 东方网. 探索新能源发展新举措,助力国家稳步实现碳中和 [EB/OL]. <http://ex.chinadaily.com.cn/exchange/partners/82/rss/channel/cn/columns/sz8srm/stories/WS603887c9a3101e7ce97412b8.html>, 2021-02-26.
- [7] 龚晓琴,王进,王珑,等. 含电转气的电—气互联综合能源系统低碳经济运行[J]. 电力科学与技术学报,2020,35(2):76-83.  
GONG Xiaojin, WANG Jin, WANG Long, et al. Low-carbon economic operation for integrated electricity and natural-gas energy system with power-to-gas[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 76-83.
- [8] 张海静,杨雍琦,赵昕,等. 计及需求响应的区域综合能源系统双层优化调度策略[J]. 中国电力,2021,54(4):141-150.  
ZHANG Haijing, YANG Yongqi, ZHAO Xin, et al. Two-level optimal dispatching strategy for regional integrated energy system considering demand response[J]. Electric Power, 2021, 54(4): 141-150.
- [9] 马喜平,沈渭程,甄文喜,等. 基于低碳目标的电气综合能源系统优化调度策略研究[J]. 电网与清洁能源,2021,37(12):116-122.  
MA Xiping, SHEN Weicheng, ZHEN Wenxi, et al. A study on the optimal scheduling strategy of electric-gas-thermal integrated energy system based on low carbon target[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(12): 116-122.
- [10] 欧阳金鑫,李梦阳,唐挺,等. 含电转气的电—气互联系统风机失效的风险调度模型[J]. 电力自动化设备,2020,40(7):24-31.  
OUYANG Jinxin, LI Mengyang, TANG Ting, et al. Risk scheduling model of wind turbine failure in integrated electricity and natural gas system with power-to-gas[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 24-31.

- 2020,40(7):24-31.
- [11] 杜琳,孙亮,陈厚合. 计及电转气规划的综合能源系统运行多指标评价[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):110-116.  
DU Lin,SUN Liang,CHEN Houhe. Multi-index evaluation of integrated energy system with P2G planning [J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(6):110-116.
- [12] 李鹏,韩建沛,殷云星,等. 电转氢作为灵活性资源的微网容量多目标优化配置[J]. 电力系统自动化,2019,43(17):28-35+139.  
LI Peng,HAN Jianpei,YIN Yunxing, et al. Multi-objective optimal capacity configuration of microgrid with power to hydrogen as flexible resource[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(17):28-35+139.
- [13] 聂聪颖,沈小军,吕洪,等. 并网型风电场氢超混合储能容量配置及控制策略研究[J]. 智慧电力,2020,48(9):1-8.  
NIE Congying,SHEN Xiaojun,LYU Hong, et al. Capacity configuration and control strategy of hydrogen super hybrid energy storage in grid connected wind farm[J]. Smart Power,2020,48(9):1-8.
- [14] 张涛,郭玥彤,李逸鸿,等. 计及电气热综合需求响应的区域综合能源系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(1):52-61.  
ZHANG Tao,GUO Yuetong,LI Yihong, et al. Optimization scheduling of regional integrated energy systems based on electric-thermal-gas integrated demand response[J]. Power System Protection and Control,2021,49(1):52-61.
- [15] 魏繁荣,随权,林湘宁,等. 考虑制氢设备效率特性的煤风氢能源网调度优化策略[J]. 中国电机工程学报,2018,38(5):1428-1439.  
WEI Fanrong,SUI Quan,LIN Xiangning, et al. Energy control scheduling optimization strategy for coal-wind-hydrogen energy grid under consideration of the efficiency features of hydrogen production equipment[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(5):1428-1439.
- [16] 潘光胜,顾伟,张会岩,等. 面向高比例可再生能源消纳的电氢能源系统[J]. 电力系统自动化,2020,44(23):1-10.  
PAN Guangsheng, GU Wei, ZHANG Huiyan, et al. Electricity and hydrogen energy system towards consumption of high-proportion renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(23):1-10.
- [17] 马腾飞,裴玮,肖浩,等. 基于纳什谈判理论的风—光—氢多主体能源系统合作运行方法[J]. 中国电机工程学报,2021,41(1):25-39+395.  
MA Tengfei, PEI Wei, XIAO Hao, et al. Cooperative operation method for wind-solar-hydrogen multi-agent energy system based on Nash bargaining theory [J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(1):25-39+395.
- [18] 曹蕃,郭婷婷,陈坤洋,等. 风电耦合制氢技术进展与发展前景[J]. 中国电机工程学报,2021,41(6):2187-2201.  
CAO Fan, GUO Tingting, CHEN Kunyang, et al. Progress and development prospect of coupled wind and hydrogen systems[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(6):2187-2201.
- [19] NUNES P, OLIVEIRA F, HAMACHER S, et al. Design of a hydrogen supply chain with uncertainty[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2015,40(46):16408-16418.
- [20] PAN G, GU W, LU Y, 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.
- [21] GUERRA O J, EICHMAN J, KURTZ J, et al. Cost competitiveness of electrolytic hydrogen [J]. Joule,2019,3(10):2425-2443.