



## 计及多时间尺度不确定性的电-氢一体化储能站随机-鲁棒混合规划

倪 鸾, 王育飞, 薛 花, 于艾清  
(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

**摘 要:** 考虑源-荷双侧长期不确定性对电-氢一体化储能站规划结果鲁棒性的影响, 提出一种计及多时间尺度不确定性的储能站容量规划方法。首先, 构建电-氢混合系统结构, 并设计储能站主要运行模式; 其次, 考虑风、光、电、氢的时序相关性, 提取考虑短期不确定性的源-荷双侧的时序典型场景, 以年综合成本最小为目标, 建立基于多场景随机优化的储能站容量规划模型; 然后, 进一步考虑长期不确定性, 基于信息间隙决策理论对规划模型进行改进, 提出考虑长-短期不确定性的储能站随机-鲁棒混合规划方法; 最后, 基于某风光电场历史数据进行仿真验证, 并对缺能惩罚成本系数和氢气价格等关键因素进行灵敏度分析。仿真结果表明, 所提方法可合理规划电-氢一体化储能站容量, 提高电-氢混合系统的风险规避能力。

**关键词:** 电-氢一体化储能站; 容量规划; 多时间尺度; 不确定性; 随机-鲁棒混合规划

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0726

中图分类号: TM 911

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2023) 03-846-11

## Hybrid stochastic-robust planning of an electricity-hydrogen integrated energy storage station considering multi-timescale uncertainty

NI Luan, WANG Yufei, XUE Hua, YU Aiqing

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** Considering the impact of long-term uncertainty of supply and load on the robustness of the planning results of an electricity-hydrogen integrated energy storage station, a capacity planning method considering the uncertainty of multiple time scales is proposed. First, the structure of the hybrid electricity-hydrogen system is constructed, and the main operating modes of the energy storage station are designed. Second, taking into account the temporal correlation of wind, photovoltaic, electricity and hydrogen, the typical temporal scenarios of both source and load sides considering short-term uncertainty are extracted. Also, the capacity planning model of the energy storage station based on multi-scenario stochastic optimization is established to minimize the comprehensive annual cost. Then, further considering the long-term uncertainty, the planning model is improved based on the information gap decision theory. A stochastic robust hybrid planning method for energy storage stations is proposed considering long- and short-term uncertainties. Finally, the simulation is performed based on historical data of wind and photovoltaic power stations. Sensitivity analyses of critical factors, such as the energy shortage penalty cost coefficient and hydrogen price, are performed. The simulation results demonstrate that the proposed method can plan reasonably the capacity of

the electric-hydrogen integrated energy storage station and improve the risk aversion ability of the hybrid electric-hydrogen system.

**Keywords:** electric-hydrogen integrated energy storage station; capacity planning; multi-timescale; uncertainty; stochastic-robust mixed planning

实现“3060”双碳目标的主要途径是构建以可再生能源为主体的新型电力系统<sup>[1-2]</sup>。随着电力系统中新能源占比不断升高,其消纳问题日益突出,建设规模化储能站以提高新能源利用率这一应用模式备受关注<sup>[3]</sup>。作为一种优质的二次能源,氢能为电力系统提供了一种新的储能形式,氢储能技术也成为构建新型电力系统最具应用潜力的技术之一<sup>[4-5]</sup>。应用氢储能技术的电-氢一体化储能站,具有存储规模大、存储周期长以及充放电响应速度快等优势<sup>[6]</sup>。因此,研究规模化电-氢一体化储能站的规划问题具有重要意义。

目前已有一些关于电-氢混合系统中氢储能配置问题的相关研究<sup>[7-9]</sup>。文献[10]考虑了多能流平衡,基于主从博弈方法对含可再生能源的工业园区进行氢储能配置研究;文献[11]结合电网与路网的特点,通过配置季节性氢储能系统,以消除可再生能源和氢负荷需求间的时空不平衡问题;文献[12]考虑氢负荷对电力系统消纳新能源的影响,对引入氢能负荷的新型电力系统进行电源规划研究。以上对电-氢混合系统规划问题的研究,仅在新型电力系统中引入氢储能系统,并未考虑新能源高渗透率系统中不确定性因素。

目前针对系统中的不确定性问题研究主要从源、荷单侧或源-荷双侧同时考虑几个角度展开<sup>[13-15]</sup>。文献[16]针对可再生能源高渗透率电力系统,提出了一种考虑源、荷随机性的电-氢综合能源系统两阶段规划模型;文献[17]考虑风光出力 and 电动汽车充电负荷的源、荷双侧不确定性,对风-光-氢综合能源系统进行容量规划;文献[18]设计了应用可逆固体氧化物电池的電-氢一体化能源站框架,并采用考虑源、荷不确定性的随机规划方法对能源站内各装置进行容量配置。以上对电-氢混合系统面临的不确定性问题研究,仅考虑了系统面临的短期不确定性,并未充分考虑气候、经济等因素对源、荷双侧随机变量的长期影响,即源、荷双侧的长期不确定性。

随着电-氢一体化储能站使用年限的增长,基

于历史数据得到的概率密度函数难以准确描述随机变量的实际概率分布,因此仅考虑短期不确定性的常规随机规划(stochastic programming, SP)无法规避长期不确定性的影响。基于非概率又非模糊的信息间隙决策理论(information gap decision theory, IGDT)的鲁棒优化方法可用来处理源、荷双侧的长期不确定性<sup>[19]</sup>。对比传统鲁棒优化方法和随机规划,IGDT无须准确描述不确定变量波动范围和其概率分布,在不确定性变量信息较少时即可最大化其波动区间,进而规避长期不确定性带来的风险。

常规IGDT理论考虑随机变量的短期不确定性,导致其规划结果经济性不足。因此,结合SP与IGDT理论规划方法的优点,提出一种计及源、荷双侧多时间尺度不确定性的储能站随机-鲁棒混合规划方法。在新能源高渗透率电力系统中,对电-氢一体化储能站主要装置容量规划开展研究。首先,考虑源、荷的短期不确定性,随机生成全年源、荷序列,并运用最优分割法和考虑场景间相似度指标的动态时间规整(dynamic time warping, DTW)算法进行场景提取,得到更符合实际情况的时序典型场景;然后,依据电-氢一体化储能站运行模式,构建储能站的容量规划模型,并进一步考虑长期不确定性,采用SP-IGDT混合规划方法,建立计及多尺度不确定性的电-氢一体化储能站随机-鲁棒混合规划模型;最后,基于某风光电场进行算例分析,验证所提规划方法的有效性。

## 1 电-氢一体化储能站结构

电-氢一体化储能站是立足于发电侧,可与新能源发电站共同组成电-氢混合能源系统,图1为电-氢混合系统基本结构。

根据储氢系统可在电、氢能量之间灵活转换的特点,电-氢一体化储能站的运行模式如下。

(1) 围绕系统中电能流:储能站可以通过电转氢(power to hydrogen, P2H)装置,充分发挥氢储能的优势,适应风、光出力和电、氢负荷需求的长期不确定性,保障系统能源供需平衡与稳定运行。

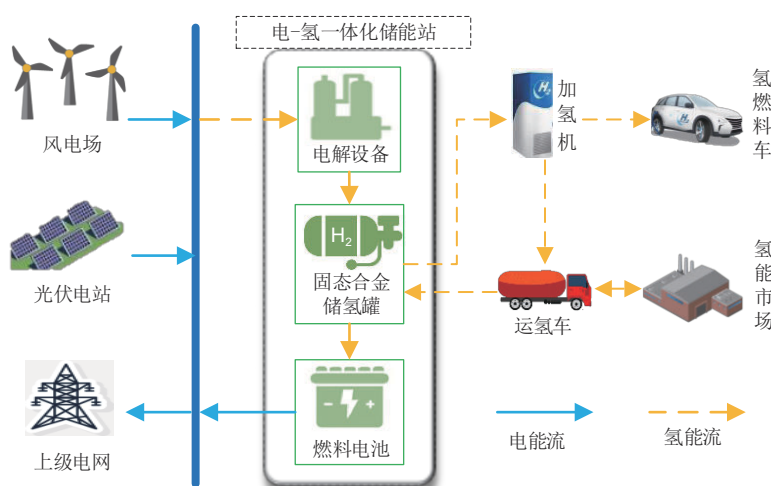


图1 电-氢混合系统基本结构

Fig. 1 Structure of electricity-hydrogen hybrid system

(2) 围绕系统中氢能流：储能站可向氢燃料汽车供应氢气或在氢能市场进行氢气销售，丰富氢能利用模式，提高储能站经济效益与氢能的利用率；储能站也可在氢气储量不足时，直接从氢能市场购氢，避免因能量供应不足导致惩罚成本增加。

储氢装置、电解槽和燃料电池为电-氢一体化储能站核心装置，其主要装置种类如下。

#### (1) 固态储氢罐

对于用于高比例可再生能源新型电力系统中大规模的储氢，需采用安全性高、容量大、存储周期长、灵活性强且成本较低的储氢方式。由表1可知，固态储氢技术不需要额外配置氢气压缩装置，对存储环境与能耗要求更低，且有着更高的安全性与储氢密度<sup>[20-21]</sup>，因此在电-氢一体化储能站中，选择应用固态储氢罐技术。

#### (2) 能量转换装置

相较于碱性电解装置，质子交换膜电解槽响应时间短、电流密度大、体积更加紧凑，更适合用于集成0~100 MW超大规模系统<sup>[20]</sup>，因此选用质子交换膜电解槽作为电解制氢装置。

表1 不同储氢方式主要特性

Table 1 Features of different hydrogen storage modes

类型	高压气态储氢	低温液态储氢	固态储氢
工作温度/℃	-40~85	<-253	-40~60
寿命/a	15~20	<10	15~30
储氢密度(质量分数)/%	1~3	>10	1~18
成本/(元/kg)	4000~7000	11000~15000	8000~11000

新能源出力以及电、氢负荷需求存在较强的随机性问题，在出力充足时段，储能站可通过电解装置将电能转换为氢能；在电负荷供应不足时段，可通过燃料电池将氢能转化为电能；在氢负荷需求高峰时段，储能站也可通过“电解设备实时制氢+储氢罐放氢”的方式满足氢负荷需求。通过以上运行策略，可实现日内尺度的电能、氢能的削峰填谷以及可再生能源的跨季节转移，提高可再生能源的消纳水平。

## 2 计及多时间尺度不确定性的储能站随机-鲁棒混合规划方法

### 2.1 源-荷典型场景提取

采用基于多场景的随机规划来描述电-氢混合系统的短期不确定性，为获取更加符合实际情况的典型日场景，需要考虑风、光、电-氢负荷的时序相关特性，而DTW能够更好地刻画时间序列的整体动态特性，辨别曲线间的相似度。因此，运用最优分割法和计及源-荷间相关性的DTW算法提取源-荷时序典型场景<sup>[22]</sup>，以弥补传统聚类方法对整体时序特性描述的不足。

考虑到风、光等新能源出力的随机性较强，而负荷需求存在明显的周期性，因此将负荷功率作为最优分割基准。主要步骤如下。

(1) 根据历史数据得到的概率分布，生成全年源、荷运行序列，采用最优分割法对负荷数据进行时序分段，并按负荷序列的时间分段点进一步分

割, 得到不同季节中风、光、电、氢的典型时序场景集。

(2) 生成源-荷序列的时序相关性曲线, 计算源荷序列的欧氏距离  $\theta$ , 场景内源-荷相关性矩阵  $\mathbf{Y}$  以及DTW距离矩阵  $\mathbf{D}$ , 如式(1)~(3)所示:

$$\theta = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\alpha_i - \beta_i)^2} \quad (1)$$

$$\mathbf{Y} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [(\alpha_i - \beta_i) - (\alpha_j - \beta_j)]^2} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \mathbf{D} = [d_{i,j}] \\ d_{i,j} = \sqrt{(\alpha_i - \beta_j)^2} + \min\{d_{i-1,j}, d_{i,j-1}, d_{i-1,j-1}\} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为源、荷序列;  $d_{i,j}$  为序列之间的DTW距离。

引入场景间相似度评价指标  $\varphi$ , 以描述源荷序

列的时序相关性与整体动态特性, 如式(4)所示:

$$\varphi = \rho_1 \theta + \rho_2 \mathbf{Y} + \rho_3 \mathbf{D} \quad (4)$$

式中,  $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 、 $\rho_3$  分别为欧氏距离、相关性矩阵以及DTW距离的权重系数。

(3) 基于动态规划思想, 采用考虑场景间相似度指标的DTW算法, 得到时序相关的风-光-电-氢的联合时序典型场景, 作为后续规划阶段的基础。

## 2.2 基于短期不确定性场景的储能站随机规划模型

如图2所示, 采用随机规划方法, 构建基于短期不确定性场景的电-氢一体化储能站容量随机规划模型。其中, 规划决策模块确定储能站各设备的额定容量; 运行模拟模块采用随机规划方法, 以年运行成本最小为目标, 对储能站进行年度运行模拟。

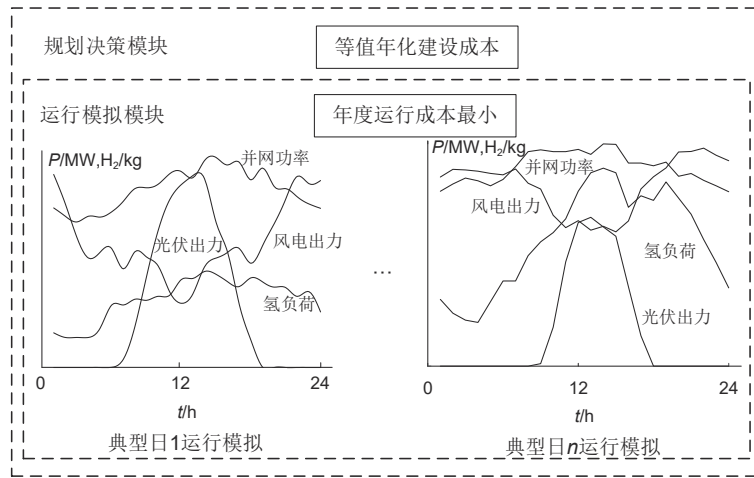


图2 储能站随机规划模型

Fig. 2 Stochastic programming model of energy storage station

### 2.2.1 目标函数

电-氢一体化储能站容量规划模型的目标函数为电-氢混合系统的年综合成本  $C$  最小, 包括等值年化建设成本  $C_{inv}$ 、运维成本  $C_{om}$ 、弃风弃光成本  $C_p$  和缺能惩罚成本  $C_{out}$ , 如式(5)所示:

$$f = \min C = \min(C_{inv} + C_{om} + C_p + C_{out}) \quad (5)$$

(1) 储能站等值年化建设成本。将储能站总建设成本折合成等值年化建设成本, 如式(6)所示:

$$C_{inv} = \sum_{i=1}^N E_{i,d} c_{i,d} \frac{m(1+m)^y}{(1+m)^y - 1} \quad (6)$$

式中,  $N$  为设备的种类数量, 包括储氢罐、电解槽和燃料电池;  $E_{i,d}$  为第  $i$  种设备的容量;  $c_{i,d}$  为第  $i$  种设备的单位成本;  $m$  为折现率, 取 0.1;  $y$  表示

各设备的预期寿命, 规划年限为 20 年。电解槽、燃料电池等设备的使用寿命相对较短, 规划周期内的设备更替成本已折算至式(6)中。

(2) 储能站运维成本。当风光电场出力无法满足其负荷需求时, 电-氢一体化储能站通过燃料电池消耗氢气同时向电网供电。此时, 如储能站氢气储量不足, 则需从氢能市场外购氢气供应燃料电池发电, 以满足风光电场的供电需求。因此其年度运维成本主要为购售氢成本和维护成本, 如式(7)所示:

$$C_{om} = 365 \sum_{s=1}^S P_s \sum_{t=1}^{24} c_h [H_{buy}(t) - H_{load}(t)] \Delta t + \sum_{i=1}^N \lambda_{i,d} E_{i,d} c_{i,d} \quad (7)$$

式中,  $S$  为典型场景数;  $P_s$  为第  $s$  种场景的概率



率;  $c_h$  为氢气市场的售氢价格;  $H_{\text{buy}}(t)$ 、 $H_{\text{load}}(t)$  分别为  $t$  时刻储能站向氢能市场的购氢量和氢负荷需求;  $\lambda_{i,d}$  为第  $i$  种设备的维护成本系数。

(3) 弃风弃光成本。若风光电场发出的电能无法完全消纳, 则会产生一定的弃风、弃光成本, 如式(8)所示:

$$C_p = 365 \sum_{s=1}^S P_s \sum_{t=1}^{24} [c_w P_{\text{waste}, w}(t) + c_{pv} P_{\text{waste}, pv}(t)] \Delta t \quad (8)$$

式中,  $P_{\text{waste}, w}(t)$ 、 $P_{\text{waste}, pv}(t)$  分别为  $t$  时刻的弃风、弃光功率;  $c_w$ 、 $c_{pv}$  分别为弃风、弃光单位成本。

(4) 缺能惩罚成本。当储氢罐配置通量较小时, 可能出现氢负荷与燃料电池氢气需求过大导致氢气供应不足。若此时仅依靠从氢能市场外购氢气以满足氢气需求, 会导致储能站运行成本大幅增加, 因此引入缺能惩罚成本来平衡电-氢系统运行成本和供能缺失。缺能惩罚成本主要包括失电惩罚成本和削氢惩罚成本, 如式(9)所示:

$$C_{\text{cut}} = 365 \sum_{s=1}^S P_s \sum_{t=1}^{24} [c_{p,e} P_{\text{short}}(t) + c_{p,h} H_{\text{cut}}(t)] \Delta t \quad (9)$$

式中,  $P_{\text{short}}(t)$ 、 $H_{\text{cut}}(t)$  分别为  $t$  时刻的供电缺失功率、氢气削减量;  $c_{p,e}$ 、 $c_{p,h}$  分别为单位失电惩罚成本、削氢惩罚成本。

## 2.2.2 约束条件

(1) 电能平衡约束。为保持系统的稳定运行, 电-氢混合系统中各设备功率需满足以下约束, 如式(10)所示:

$$P_{\text{wt}}(t) + P_{\text{pv}}(t) + P_{\text{fc}}(t) + P_{\text{short}}(t) = P_{\text{load}}(t) + P_{\text{ed}}(t) + P_{\text{waste}, w}(t) + P_{\text{waste}, pv}(t) \quad (10)$$

式中,  $P_{\text{wt}}(t)$ 、 $P_{\text{pv}}(t)$ 、 $P_{\text{load}}(t)$ 、 $P_{\text{ed}}(t)$ 、 $P_{\text{fc}}(t)$  分别为风光电场  $t$  时刻的风电出力、光伏出力、并网负荷需求、电解设备的耗电功率以及燃料电池的发电功率。

(2) 能量转换装置功率约束。电解槽和燃料电池的转换过程如式(11)所示:

$$\begin{cases} H_{\text{ed}}(t) = \eta_{\text{ed}} P_{\text{ed}}(t) B_{\text{ed}}(t) \\ H_{\text{fc}}(t) = B_{\text{fc}}(t) P_{\text{fc}}(t) / \eta_{\text{fc}} \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $H_{\text{ed}}(t)$  为  $t$  时刻电解设备的产氢速率;  $H_{\text{fc}}(t)$  为  $t$  时刻燃料电池的耗氢速率;  $\eta_{\text{ed}}$ 、 $\eta_{\text{fc}}$  分别为电解槽、燃料电池的能量转化效率;  $B_{\text{ed}}(t)$ 、 $B_{\text{fc}}(t)$  为 0-1 变量, 分别表示  $t$  时刻电解设备和燃料电池的工作状态, 其中 0 表示设备处于停机状态, 1 表示设备处于工作状态。

储能站的储氢和用氢的功率不能大于其额定功

率且电解槽和燃料电池不能同时处于运行状态。因此电解槽和燃料电池有以下约束, 如式(12)所示:

$$\begin{cases} P_{\text{ed}, \min} \leq P_{\text{ed}}(t) \leq P_{\text{ed}, \max} \\ P_{\text{fc}, \min} \leq P_{\text{fc}}(t) \leq P_{\text{fc}, \max} \\ B_{\text{ed}}(t) + B_{\text{fc}}(t) \leq 1 \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $P_{\text{ed}, \max}$ 、 $P_{\text{fc}, \max}$  分别为电解槽、燃料电池的额定功率;  $P_{\text{ed}, \min}$ 、 $P_{\text{fc}, \min}$  分别为电解槽、燃料电池的最小运行功率。

(3) 弃风弃光量约束。依据新能源可持续发展政策, 弃风弃光量需满足一定的上限约束, 如式(13)所示:

$$\frac{P_{\text{waste}, pv}(t) + P_{\text{waste}, w}(t)}{P_{\text{pv}}(t) + P_{\text{w}}(t)} \leq \beta_w \quad (13)$$

式中,  $\beta_w$  为弃风弃光量上限。

(4) 储氢罐容量约束。首先, 为保证在系统初始运行时刻, 储能站可进行储氢或放氢操作, 储氢罐中已有初始储量; 其次, 氢气储量不能超过储氢罐的规划容量。因此, 储氢罐容量约束如式(14)所示:

$$0 \leq \frac{S_{\text{HS}}(t)}{S_{\text{HS}, \max}} \leq 1 \quad (14)$$

式中,  $S_{\text{HS}}(t)$ 、 $S_{\text{HS}, \max}$  分别为固态储氢罐的  $t$  时刻储氢质量和额定储氢质量。

(5) 氢能平衡约束。在电-氢一体化储能站中, 电解槽、燃料电池所生产或消耗的氢气与氢负荷以及氢气削减量之间需满足氢能平衡约束, 如式(15)所示:

$$H_{\text{ed}}(t) + H_{\text{cut}}(t) - H_{\text{load}}(t) - H_{\text{fc}}(t) = S_{\text{HS}}(t+1) - S_{\text{HS}}(t) \quad (15)$$

式中,  $H_{\text{load}}(t)$  为  $t$  时刻储能站的氢负荷需求。

(6) 固态储氢罐寿命约束。固态储氢材料受其使用寿命限制, 在吸放氢循环过程中, 储氢材料可能会发生氧化反应, 使储氢罐的可逆储氢容量降低导致使用寿命缩减<sup>[23]</sup>。因此, 固态储氢罐寿命主要与其吸氢总量有关, 如式(16)所示:

$$y_M = y_{M0} - \mu \sum_{t=1}^T Q_{\text{in}} \Delta t, y_M \geq y \quad (16)$$

式中,  $y_M$  为固态合金储氢罐的实际使用寿命;  $y_{M0}$  为固态合金储氢罐的理想寿命;  $\mu$  为常数;  $Q_{\text{in}}$  为储氢合金的吸氢量。

## 2.3 考虑长-短期不确定性的随机-鲁棒混合规划模型

基于上述储能站随机规划模型, 进一步引入 IGDT 的风险规避策略, 保证规划结果不劣于预期

投资的条件下, 最大程度规避源、荷长期不确定性的影响。

在IGDT鲁棒规划模型中, 源、荷双侧不确定性变量集合 $\gamma$ 如式(17)所示:

$$U(\alpha, \tilde{\gamma}) = \{\gamma | (1 - \alpha)\tilde{\gamma} \leq \gamma \leq (1 + \alpha)\tilde{\gamma}, \alpha \geq 0\} \quad (17)$$

式中,  $\gamma$ 为不确定性变量, 包括风、光出力以及电、氢负荷需求实际值;  $\tilde{\gamma}$ 为不确定性变量的预测值, 即基于短期不确定性的时序典型场景;  $\alpha$ 为不确定性变量的偏差半径, 表示不确定性变量的实际值与其预测值偏差程度。

结合2.2节建立的电-氢一体化储能站容量规划模型, 可得到基于IGDT风险规避策略下的储能站鲁棒规划模型如式(18)所示:

$$\begin{cases} \max \alpha \\ \text{s.t. } \max C(X, \gamma) \leq (1 + \sigma)C_0 \\ C_0 = \min C(X, \tilde{\gamma}) = \min(C_{\text{inv}} + C_{\text{om}} + C_p + C_{\text{cut}}) \\ h(X, \gamma) = 0 \\ g(X, \gamma) \leq 0 \\ \gamma \in U(\alpha, \tilde{\gamma}) \end{cases} \quad (18)$$

式中,  $C(X, \tilde{\gamma})$ 为基于SP的储能站容量规划模型, 即年综合成本 $C$ 最小;  $X$ 为决策变量, 主要包括电解槽、储氢罐以及燃料电池三者的容量;  $C_0$ 为在随机规划模型下最优解, 作为鲁棒规划阶段的基准值;  $\sigma$ 为风险规避系数, 表示规划者能接受的成本变化范围;  $h(X, \gamma)=0$ 为等式约束, 包括电能平衡约束、氢能平衡约束等;  $g(X, \gamma) \leq 0$ 为不等式约束, 包括设备运行工况约束、弃风弃光约束等。

由于IGDT理论在处理多个不确定性变量时, 会导致规划模型的目标数增加, 使模型复杂度增加。因此, 本工作采用半径线性加权归一法将风电、光伏出力和电、氢负荷需求等不确定性变量, 转化为其共同作用下的等效偏差半径, 如式(19)所示:

$$\begin{cases} r_{\text{ran}} = k_w \alpha_w + k_p \alpha_p + k_l \alpha_l + k_h \alpha_h \\ k_w + k_p + k_l + k_h = 1 \end{cases} \quad (19)$$

式中,  $r_{\text{ran}}$ 为等效偏差半径, 其值越大表示规划方案所能承受的不确定性变量波动范围越大;  $k_w$ 、 $k_p$ 、 $k_l$ 、 $k_h$ 分别为风电出力、光伏出力、电负荷和氢负荷的偏差半径的权重, 根据实际配置需求利用判断矩阵法确定, 以反映投资者对风、光、荷不确定性的重视程度。

综上所述, 考虑源-荷双侧存在的长短期不确

定性, 基于SP-IGDT的电-氢一体化储能站随机-鲁棒混合规划模型如式(20)所示:

$$\begin{cases} \max r_{\text{ran}} \\ \text{s.t. } \max C(X, \gamma) \leq (1 + \sigma)C_0 \\ C_0 = \min C(X, \tilde{\gamma}) \\ h(X, \gamma) = 0 \\ g(X, \gamma) \leq 0 \\ \gamma \in U(\alpha, \tilde{\gamma}) \end{cases} \quad (20)$$

## 2.4 模型求解流程

如图3所示, 电-氢一体化储能站随机-鲁棒混合规划流程包括以下阶段。

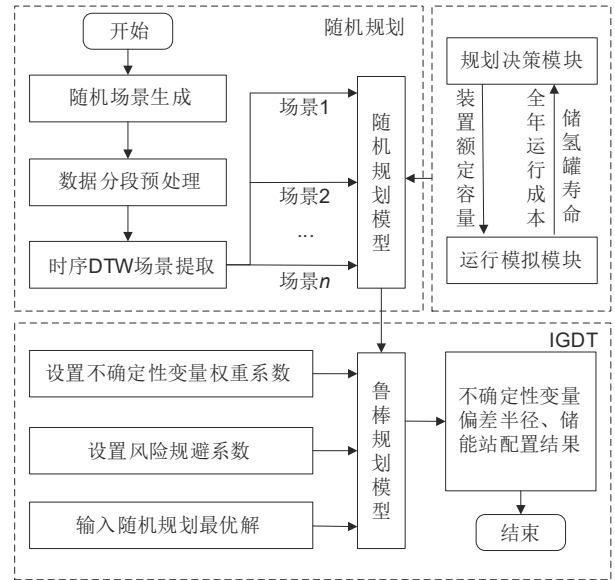


图3 储能站随机-鲁棒混合规划框架

Fig. 3 Stochastic-robust hybrid planning framework of energy storage stations

(1) SP随机规划阶段。包括以下步骤:

步骤1: 式(1)~(4)构成了源-荷场景提取模型。根据历史“风光电氢”概率模型, 随机生成全年数据序列, 并采用最优分割法和考虑场景间相似度指标的DTW算法进行分段提取, 得到不确定性变量的时序典型场景。

步骤2: 以式(5)~(9)所示的年综合成本最小为优化目标、式(10)~(16)为约束条件, 构成基于时序相关的典型场景的储能站随机规划模型。基于步骤1的时序典型场景进行全年运行模拟, 求解得到储能站各装置的初始规划方案, 作为鲁棒规划阶段的基准值。

(2) IGDT鲁棒规划阶段。基于随机规划阶段

的初始规划方案与决策者设置的风险规避系数，对式(17)~(20)所示的随机-鲁棒规划模型进行求解，得到可规避长期不确定性影响的最优规划方案。

3 算例分析

3.1 算例设置

本工作以某风光电场为规划对象，该电场配置100 MW 风电机组和120 MW 光伏发电装置。参考当地历史天气及运行数据生成全年源、荷序列，借助考虑相关性距离的DTW算法进行分段聚类，得到春秋季节、夏季和冬季的典型日数据序列，各典型日天数分别为162 d、91 d和112 d，如图4所示。

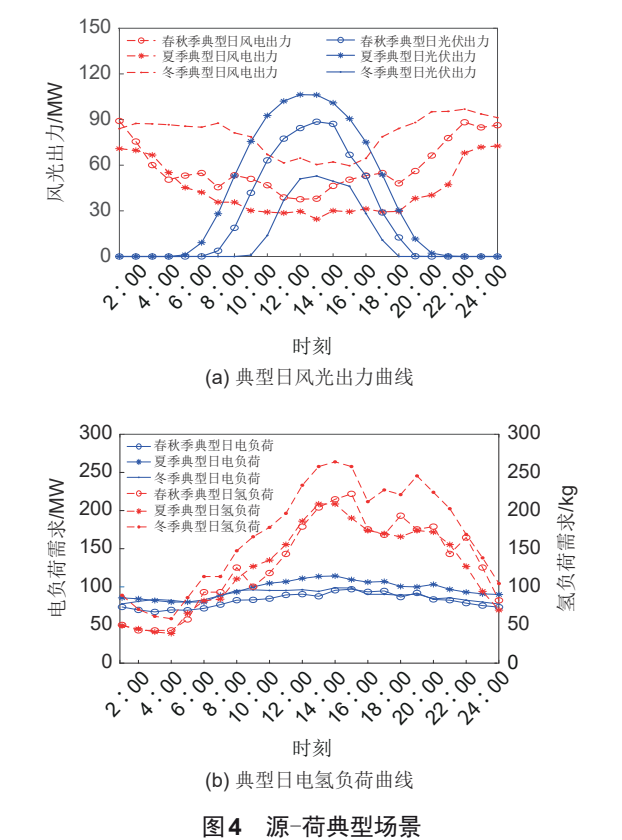


图4 源-荷典型场景  
Fig. 4 Typical scenarios of supply and load

根据以上典型时序场景，对所提氢储能子系统中的电解槽、燃料电池和储氢罐的容量规划方法进行验证。电-氢一体化储能站容量规划的基本参数见表2<sup>[10, 12]</sup>。

3.2 储能站规划结果

3.2.1 储能站设备规划容量

基于经验值，风险规避系数取值0.1，各不确定性变量占比均取值0.25，采用MATLAB R2018b中

表2 储能站各设备经济技术参数  
Table 2 Economic and technical parameters of equipment in energy storage station

参数	数值
固态合金储氢罐单位成本/(元/kg)	8000
电解槽单位成本/(万元/MW)	200
燃料电池单位成本/(万元/MW)	400
电解槽效率/%	60
燃料电池效率/%	65
运行维护成本系数	0.04
弃风弃光成本/(元/MWh)	360
失电惩罚成本/(元/MWh)	2000
削氢惩罚成本/(元/kg)	150

的YALMIP/CPLEX12.8商用求解器对基于SP-IGDT储能站随机-鲁棒规划模型进行求解，得到最优规划方案见表3，表中基于多场景法的随机规划模型为仅考虑短期不确定的规划模型，即为IGDT鲁棒规划中确定性模型。

表3 储能站规划结果  
Table 3 Planning results of energy storage station

规划模型	电解槽 /MW	燃料电池 /MW	固态储氢罐 /kg	年综合成本 /万元
随机规划	34.2	32.3	3943	3737.24
随机-鲁棒规划	36.5	36.7	4100	4110.96

由表3可知，考虑长-短期不确定性随机-鲁棒混合规划模型的求解得到各设备规划容量与仅考虑短期不确定性的随机规划模型相比均有所增加。在随机规划模型下，决策者按照预测的源-荷典型场景对电-氢混合系统进行规划，相当于等效偏差半径为0。而在随机-鲁棒混合模型下，源、荷双侧的等效偏差半径为18.31%，可以理解为得到的规划方案在规划周期内能承受的源、荷双侧的最大波动范围为18.31%，即系统承受源、荷双侧长期不确定性的鲁棒水平是18.31%。此时决策者需承担规避系数为0.1的预算投资，即系统投资预算增加10%。因此，所提规划方法可更好应对储能站投入使用后面临的长期不确定性。

3.2.2 风险规避系数灵敏度分析

风险规避系数 $\sigma$ 代表储能站规划者对其规划成本增加的接受程度，同时反映了配置方案对长期不确定性的应对能力。风险规避系数越大，规划者能接受的预算越高，规划方案对不确定性变量的适应程度越高，鲁棒性越强。



求解不同风险规避系数下的 SP-IGDT 随机-鲁棒模型，并分析其对年综合成本与等效偏差半径的影响。由图 5 可知，随着风险规避系数增大，规划方案能承受的风、光、电、氢等效偏差半径从 0 增加到 36.49%，年综合成本也从 3737.24 万元增加到 4485.17 万元。等效偏差半径越大，表示电-氢混合系统的鲁棒性越强，能更好应对储能站投入运营后面临的源-荷长期不确定性。储能站规划方可根据自身承受投资成本上限、对负荷需求的保障程度以及系统稳定性需求来选择风险规避系数、风光电氢等不确定性变量的权重系数。

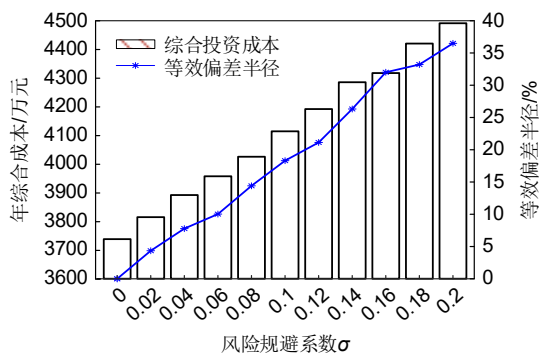


图 5 风险规避系数灵敏度分析

Fig. 5 Sensitivity analysis of risk aversion coefficient

### 3.2.3 储能站运行工况分析

选取春秋季典型场景为例进行日运行工况分析，电能平衡和氢能平衡如图 6 所示。由图 6(a) 可知，储能站的电解槽在 0:00—2:00、9:00—16:00 和 21:00—24:00 这三个时段运行，以消纳风光电场的富余电能，此时电解槽制备的氢气可直接满足氢气负荷，富余氢气则存入储氢罐中。而在 3:00—8:00 和 17:00—21:00 时段，风光场站的联合出力已无法满足并网负荷需求，储氢罐释放氢气，以满足燃料电池发电并网和负荷的氢气需求。由图 6(b) 储氢量曲线可以看出，在春秋季典型日结束时刻，储氢罐储量相比初始运行时刻有较大程度增长，这是由于春秋季的风电、光伏资源均较为充足，储能站制氢量大于燃料电池发电和氢负荷供应的总氢气需求。其余典型日运行工况与春秋季典型日类似，在此不再赘述。

此外，在春秋季典型日、夏季和冬季典型日，储能站均已基本消纳风光出力，仅在风光出力高峰时段，存在少量弃风弃光现象；同时在运行阶段均

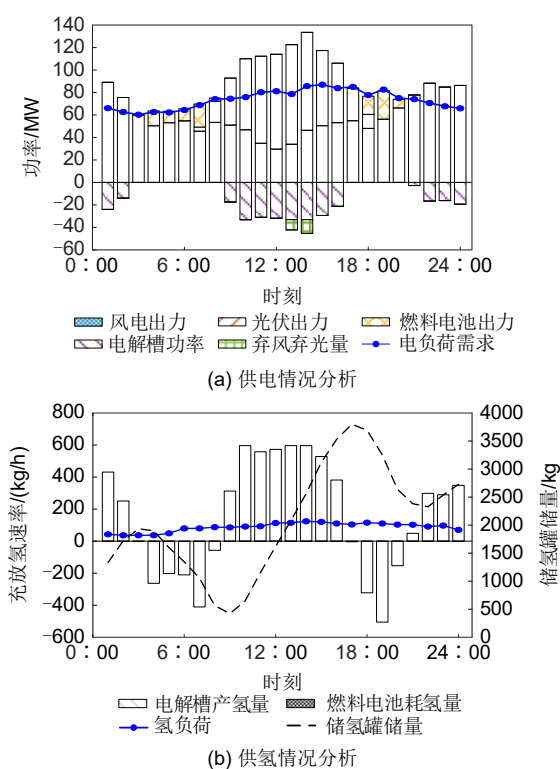


图 6 春秋季运行工况

Fig. 6 Operational conditions in spring and autumn

已满足负荷需求，并未出现电、氢负荷削减的情况。由此表明，配置电-氢一体化储能站的风光电场，具有更灵活的能量互动能力，可提高新能源利用率。

### 3.3 规划方法对比

为验证所提规划方法的优越性，选取文献[24]两阶段随机优化方法与常规 IGDT 方法进行对比分析。对比结果见表 4。

表 4 规划方法对比

Table 4 Comparison of planning methods

(单位：万元)

成本	两阶段随机优化	常规 IGDT	SP-IGDT
年综合成本	3936.41	4346.77	4110.96
建设成本	24212.0	26709.6	25260.0
弃风弃光成本	114.23	51.21	55.35
失电惩罚成本	17.51	11.64	12.49
削氢惩罚成本	15.26	10.01	10.77

(1) 与两阶段随机优化方法对比分析。采用 SP-IGDT 方法求解的年综合成本要高于两阶段随机优化的结果，主要体现在储能站建设成本上；而在模拟运行阶段，采用 SP-IGDT 方法规划的储能站



能量利用率更高,其弃风弃光率和缺能率分别为后者的48.5%和70.9%,结果表明SP-IGDT法得到的规划结果具有更强的鲁棒性,更能适应电-氢系统面临的随机性。为有效应对新能源出力难以预测以及负荷需求长期增长等问题,电-氢一体化储能站需适当追加投资以增强其鲁棒性,进而规避源、荷双侧的长期不确定性,减少风光电场弃风弃光量、供电缺失能量以及氢负荷需求削减量。

(2)与常规IGDT方法对比分析。采用SP-IGDT方法得到的年综合成本明显小于常规IGDT,而在模拟运行阶段的成本略高于后者,二者的弃风弃光率与缺能率相对误差均在7%以内,表明两种方法规划的储能站应对不确定性的能力相近。这是由于SP-IGDT考虑了短期不确定性,将计及源-荷变量时序相关性的随机优化结果,作为其鲁棒规划的基础参数,使规划方案更具准确性与经济性。因此,采用基于SP-IGDT的储能站随机-鲁棒混合规划方法,其规划结果在保留常规IGDT鲁棒性的基础上,更具经济性。

总体上看,在计及多尺度不确定性的场景中,基于SP-IGDT的随机-鲁棒混合规划方法可兼顾储能站规划方案的经济性与鲁棒性。

### 3.4 经济灵敏度分析

#### 3.4.1 缺能惩罚成本系数灵敏度分析

引入缺能惩罚成本系数 $\theta$ ,表示单位惩罚成本为电价和氢气价格的 $\theta$ 倍,其灵敏度分析见图7,由图7可知,在缺能惩罚成本系数较低时,系统对储能站配置的设备容量较低,无法满足系统对于储能站的负荷需求,且能源利用率较低。当缺能惩罚单位成本超过电、氢价格的4倍时,储能站配置的设备容量不再增加,这是由于储能站的容量已满足

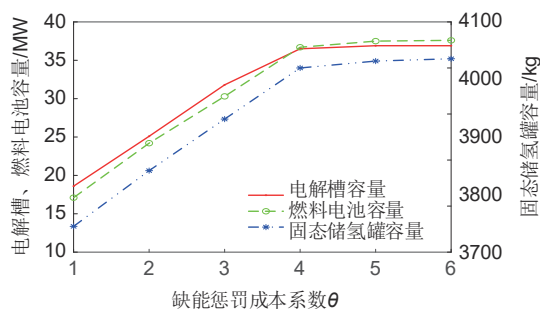


图7 缺能惩罚成本系数灵敏度分析

Fig. 7 Sensitivity analysis of energy deficiency penalty coefficient

风光电场的消纳与负荷需求,追加配置反而会造成设备闲置率过高。

#### 3.4.2 氢气售价灵敏度分析

氢气售价主要通过售氢收益和购氢成本来影响储能站的规划容量,图8为氢气售价灵敏度分析。由图8可知,当氢气售价较低时,电解槽和储氢罐的规划容量与氢气售价呈正相关。当氢气售价达到30元/kg时,电解槽和储氢罐容量增长趋势变缓;当氢气售价提高到40元/kg以上时,随着售价继续升高,电解槽和储氢罐的规划容量则开始下降,这是由于氢气售价过高导致氢负荷需求下降,使得储能站盈利能力受到抑制,难以收回储能站的建设成本、运维成本。燃料电池的规划容量基本保持不变,这是由于氢气售价主要从氢负荷盈利与外购氢气成本等角度对储能站规划产生影响,而燃料电池主要用于新能源低谷时供电,因此燃料电池规划容量对氢气售价的灵敏度较低。

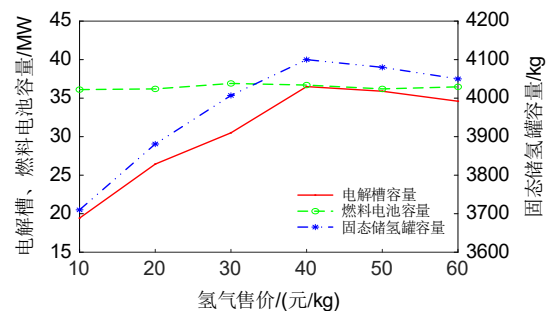


图8 氢气售价灵敏度分析

Fig. 8 Sensitivity analysis of hydrogen price

## 4 结 论

针对电-氢一体化储能站规划问题开展研究,考虑源-荷的多时间尺度不确定性,提出基于SP-IGDT的随机-鲁棒混合规划方法,通过仿真分析对比,主要结论如下。

(1)考虑了长-短期不确定性的储能站规划方案,可有效应对源-荷双侧的随机性与波动性,降低了弃风弃光量和失能水平,提高了电-氢混合系统的能量利用率。

(2)采用计及多时间尺度不确定性的随机-鲁棒混合规划方法,考虑了短期不确定性以保证储能站规划方案的准确性与经济性,同时有效规避因随机变量长期不确定性无法准确描述导致的风险,保证规划方案的鲁棒性。通过与两阶段随机优化、常

规IGDT等规划方法对比, 所提规划方法能更好地兼顾规划方案的经济性与鲁棒性。

(3) 对失能惩罚成本和氢气售价的灵敏度分析结果表明, 电-氢一体化储能站的规划, 应充分考虑失能惩罚成本和投资成本的平衡关系以及关注氢能市场的价格趋势, 选择合理的失能惩罚成本系数和氢气售价, 以获取最合理的规划方案。

### 参考文献

- [1] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.  
ZHANG Z G, KANG C Q. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [2] 时智勇, 王彩霞, 胡静. 独立新型储能电站价格形成机制及成本疏導优化方法[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(12): 4067-4076.  
SHI Z Y, WANG C X, HU J. A price formation mechanism and cost diversion optimization method for designing an independently new energy-storing power station[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(12): 4067-4076.
- [3] 姜海洋, 杜尔顺, 朱桂萍, 等. 面向高比例可再生能源电力系统的季节性储能综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 194-207.  
JIANG H Y, DU E S, ZHU G P, et al. Review and prospect of seasonal energy storage for power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 194-207.
- [4] 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 G S, GU W, ZHANG H Y, et al. Electricity and hydrogen energy system towards accomodation of high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 1-10.
- [5] 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 W, WAN Y M, XIONG Y L, 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.
- [6] GORRE J, RUOSS F, KARJUNEN H, et al. Cost benefits of optimizing hydrogen storage and methanation capacities for Power-to-Gas plants in dynamic operation[J]. Applied Energy, 2020, 257: doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113967.
- [7] 张红, 袁铁江, 谭捷, 等. 面向统一能源系统的氢能规划框架[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 83-94.  
ZHANG H, YUAN T J, TAN J, et al. Hydrogen energy system planning framework for unified energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 83-94.
- [8] EGELAND-ERIKSEN T, HAJIZADEH A, SARTORI S. Hydrogen-based systems for integration of renewable energy in power systems: Achievements and perspectives[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(63): 31963-31983.
- [9] UFA R A, MALKOVA Y Y, GUSEV A L, et al. Algorithm for optimal pairing of res and hydrogen energy storage systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(68): 33659-33669.
- [10] 熊宇峰, 司杨, 郑天文, 等. 基于主从博弈的工业园区综合能源系统氢储能优化配置[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 507-516.  
XIONG Y F, SI Y, ZHENG T W, et al. Optimal configuration of hydrogen storage in industrial park integrated energy system based on stackelberg game[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 507-516.
- [11] LI J R, LIN J, ZHANG H C, et al. Optimal investment of electrolyzers and seasonal storages in hydrogen supply chains incorporated with renewable electric networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1773-1784.
- [12] 袁铁江, 孙传帅, 谭捷, 等. 考虑氢负荷的新型电力系统电源规划[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(17): 6316-6326.  
YUAN T J, SUN C S, TAN J, et al. Generation planning of new power system considering hydrogen load[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(17): 6316-6326.
- [13] 金红洋, 滕云, 冷欧阳, 等. 基于源荷不确定性状态感知的无废城市多能源协调储能模型[J]. 电工技术学报, 2020, 35(13): 2830-2842.  
JIN H Y, TENG Y, LENG O Y, et al. Multi-energy coordinated energy storage model in zero-waste cities based on situation awareness of source and load uncertainty[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(13): 2830-2842.
- [14] 孔令国, 王士博, 蔡国伟, 等. 零能耗建筑电-氢-热双层能量优化调控方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(17): 6196-6208.  
KONG L G, WANG S B, CAI G W, et al. Zero energy building electricity-hydrogen-heat double-layer energy optimization control method[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(17): 6196-6208.
- [15] LI J W, ZOU W T, YANG Q Q, et al. Towards net-zero smart system: An power synergy management approach of hydrogen and battery hybrid system with hydrogen safety consideration[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 263: doi: 10.1016/j.enconman.2022.115717.
- [16] PAN G S, GU W, LU Y P, 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.
- [17] 周建力, 乌云娜, 董昊鑫, 等. 计及电动汽车随机充电的风-光-氢综合能源系统优化规划[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(24): 30-40.  
ZHOU J L, WU Y N, DONG H X, et al. Optimal planning of wind-photovoltaic-hydrogen integrated energy system considering random charging of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24): 30-40.
- [18] 高赐威, 王威, 陈涛. 基于可逆固体氧化物电池的电氢一体化能源站容量规划[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(17): 6155-6170.  
GAO C W, WANG W, CHEN T. Capacity planning of electric-hydrogen integrated energy station based on reversible solid oxide battery[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(17): 6155-6170.
- [19] 叶鹤林, 刘松, 胡剑, 等. 基于IGDT的含光热电站电力系统多源联合

- 调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(23): 35-43.
- YE H L, LIU S, HU J, et al. Multi-source joint dispatching strategy for a power system with concentrating solar power plants based on IGDT[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23): 35-43.
- [20] 李星国. 氢气制备和储运的状况与发展[J]. 科学通报, 2022, 67(S1): 425-436.
- LI X G. Status and development of hydrogen preparation, storage and transportation[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(S1): 425-436.
- [21] 李璐伶, 樊栓狮, 陈秋雄, 等. 储氢技术研究现状及展望[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(4): 586-594.
- LI L L, FAN S S, CHEN Q X, et al. Hydrogen storage technology: Current status and prospects[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(4): 586-594.
- [22] 李勇, 姚天宇, 乔学博, 等. 基于联合时序场景和源网荷协同的分布式光伏与储能优化配置[J]. 电工技术学报, 2022, 37(13): 3289-3303.
- LI Y, YAO T Y, QIAO X B, et al. Optimal configuration of distributed photovoltaic and energy storage system based on joint sequential scenario and source-network-load coordination[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3289-3303.
- [23] 朱敏, 欧阳柳章. 镁基储氢合金动力学调控及电化学性能[J]. 金属学报, 2021, 57(11): 1416-1428.
- ZHU M, OUYANG L Z. Kinetics tuning and electrochemical performance of Mg-based hydrogen storage alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57(11): 1416-1428.
- [24] 左逢源, 张玉琼, 赵强, 等. 计及源荷不确定性的综合能源生产单元运行调度与容量配置两阶段随机优化[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(22): 8205-8214.
- ZUO F Y, ZHANG Y Q, ZHAO Q, et al. Two-stage stochastic optimization for operation scheduling and capacity allocation of integrated energy production unit considering supply and demand uncertainty[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2022, 42(22): 8205-8214.