

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240512

可再生能源 ALK-PEM 联合制氢系统多时间尺度优化运行策略

杨胜, 樊艳芳, 侯俊杰, 白雪岩, 谢紫云

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 随着用氢需求的逐渐增加, 可再生能源制氢系统优化运行的研究已成为一个热门话题。然而, 由于风光可再生能源出力的不确定性使得可再生能源制氢系统的优化运行变得复杂。针对风光出力不确定性对系统优化运行的影响, 以系统日运行成本最低为目标, 提出了可再生能源碱性-质子交换膜联合制氢系统多时间尺度优化策略。该策略依据系统中不同设备动态响应能力差异及其在系统中的具体功能, 实行多时间尺度的运行调控策略。在日前阶段, 构建了可再生能源碱性-质子交换膜联合制氢系统日前分布鲁棒优化模型。在日内阶段, 采用滚动优化策略。在实时阶段, 先通过超级电容平抑风光功率的剧烈波动, 进而以最小化各设备出力调整变化量为目标, 提出实时优化运行策略。算例结果表明, 通过日前-日内-实时多时间尺度优化运行策略, 可以提升系统的运行经济性。
关键词: 碱性-质子交换膜联合制氢; 多时间尺度; 分布鲁棒; 滚动优化

Multi-time scale optimization strategy of a renewable energy ALK-PEM combined hydrogen production system

YANG Sheng, FAN Yanfang, HOU Junjie, BAI Xueyan, XIE Ziyun

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: With the gradual increase in the demand for hydrogen, research on the optimal operation of a renewable energy hydrogen production system has become a hot topic. However, the uncertainty of wind and solar renewable energy output makes the optimal operation of these systems complex. To address the impact of wind and solar output uncertainty on system optimization, a multi-time scale optimization strategy for a renewable energy alkaline-proton exchange membrane combined hydrogen production system is proposed, aiming to minimize the system's daily operating cost. The strategy implements a multi-time scale operational control based on the differences in dynamic response capabilities of different equipment in the system and their specific functions. In the day-ahead stage, a day-ahead distributed robust optimization model of the renewable energy alkaline-proton exchange membrane combined hydrogen production system is constructed. In the intra-day stage, a rolling optimization strategy is adopted. In the real-time stage, supercapacitors are used to smooth out the severe fluctuations in wind and solar power, and then the real-time optimal operation strategy is proposed to minimize the output adjustment variation of each device. The case study results show that the operational economy of the system can be improved by the multi-time scale optimization operation strategy from day-ahead to intra-day and to real-time.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region (No. 2022D01C365).

Key words: alkaline-proton exchange membrane combined hydrogen production; multiple-time-scale; distributed robust; rolling optimization

0 引言

近年来, 为实现双碳目标, 各行业大规模积极

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目资助 (2022D01C365); 天山英才培养计划项目资助 (2022TSYCLJ 0019)

开发利用可再生能源^[1-2]。其中, 风电、光伏在电力系统中的比重逐年增加^[3-4]。但风电、光伏存在的随机性和波动性, 制约了其在电力系统中的发展。氢能是一种清洁、高效、无污染的能源, 可以与其他能源进行相互转换^[5-6]。利用风光这类波动性可再生能源制氢是提高风光消纳、减少弃风弃光电量的有效方法。

目前很多学者对可再生能源制氢系统优化运行进行了相关研究。文献[7]提出了一种光储联合制氢系统,并通过算例验证了该系统的运行经济性。文献[8]提出了一种兼顾制氢效率和灵活性的光伏制氢控制策略。文献[9]在文献[7]的基础上将 Stackelberg 博弈机制引入制氢系统,经算例验证该机制的引入提高了系统经济性,同时兼顾了用户的利益。文献[10]提出了基于电解槽启停特性的日前优化模型,以减少电解槽启停次数并降低运行成本。但上述文献未深入考虑风光波动特性对系统的影响。针对此问题,文献[11]提出了基于模型预测控制的制氢系统协调控制策略,结果表明该策略可以应对氢负荷的波动,提高系统的鲁棒性。文献[12]提出通过超级电容和电解槽模块化自适应策略平抑风电功率波动,仿真表明,所提策略可显著降低电解槽的启停次数,增加氢气产量。

以上都是假设风光出力为确定性模型,然而风光出力具有不确定性,依据确定性模型对制氢系统进行调度研究,其结果会与实际情况相差很大。为应对风光出力的不确定性,有学者将鲁棒优化方法应用于微电网系统的优化调度研究。文献[13]建立了 min-max-min 结构的两阶段鲁棒优化模型,得到最恶劣场景下运行成本最低的调度方案。然而,鲁棒优化由于考虑的是最恶劣的场景,所得出的结果难免过于保守,会严重影响系统的整体运行经济性。为降低鲁棒优化的保守性,分布鲁棒优化被用于电力系统中。文献[14]利用分布鲁棒优化对风电功率不确定性进行建模。文献[15]建立了考虑网络拓扑结构的分布鲁棒优化模型。目前,分布鲁棒优化在微电网和综合能源领域的应用较多,少有研究将分布鲁棒优化应用于可再生能源制氢系统中。

上述对于制氢系统的研究多停留在日前优化层面,风光波动性在不同时间尺度上具有较大差异性。因此需要深入研究制氢系统的多时间尺度优化运行。文献[16]将多时间尺度优化应用于冷热电联供系统,提出了“日前-日内-实时”三阶段优化模型,实现逐级优化出力。优化结果表明,该模型不仅能提高系统的运行经济性,而且可以降低设备的功率波动和运行损耗。文献[17]提出一种计及多重需求响应的综合能源系统(integrated energy system, IES)多时间尺度低碳调度策略,经验证表明,该策略能有效缓解源、荷误差带来的功率波动并降低系统碳排放量,实现 IES 低碳、经济和稳定运行。以上都是研究综合能源系统的多时间尺度优化运行,对制氢系统的多时间尺度优化运行的研究较少。文献[18]将 MPC 滚动优化引入离网型电氢耦合系统,表明

所提运行控制策略具有一定的鲁棒性。

目前对于可再生能源制氢系统的研究多局限于单一类型的制氢方式,其中 ALK 电解槽具备技术成熟和成本低的优势,而 PEM 电解槽造价较高,但其承受风光波动适应性更强,鲜有文献考虑利用二者各自的优势,将两种类型的电解槽进行组合以提高制氢效率、降低制氢成本。在利用两类电解槽组合电解制氢方面,文献[19]通过分析 ALK 电解槽与 PEM 电解槽的经济性,建立混合制氢系统的全生命周期制氢经济性指标。文献[20]则将 ALK 电解槽与 PEM 电解槽按 1:1 的比例进行组合应用在风光互补制氢系统中,并进行相应的优化,结果显示,混合电解制氢系统在经济性和制氢效率方面具有显著优势。然而,目前对 ALK 电解槽与 PEM 电解槽组合制氢系统的研究不够深入,且多局限于确定模型和日前时间尺度。

基于上述研究存在的问题,本文考虑可再生能源碱性-质子交换膜(alkaline-proton exchange membrane, ALK-PEM)联合制氢系统的前、日内、实时运行过程,计及两类电解槽、蓄电池、超级电容器等设备的运行工作特性,考虑了两类电解槽不同的动态响应特性,对制氢系统建模分析,提出了一种日前-日内-实时多时间尺度优化运行策略。本文将多时间尺度和分布鲁棒优化引入 ALK-PEM 联合制氢系统,并针对制氢系统的特点,制定了适用于本系统的多时间尺度运行控制策略。

1 系统框架及设备模型

1.1 ALK-PEM 联合制氢系统框架

目前电解制氢方式中,ALK 电解槽在国内应用广泛,但 ALK 电解槽对电能质量要求较高,与风光等间歇性电源匹配性较差;而 PEM 电解槽造价较高,对风光波动具有较宽的适应范围,其在冷启动时间、响应速率、负荷范围等方面均优于 ALK 电解槽,对可再生能源制氢系统适应度更佳。从技术和经济综合性角度,将 ALK 电解槽与 PEM 电解槽组合制氢具有一定优势。

ALK-PEM 联合制氢系统拓扑结构包含可再生能源发电单元、电解制氢单元、电储能单元、氢储能单元等,其拓扑结构如图 1 所示。风电和光伏机组为制氢系统提供电能,若系统有功率缺额,则可通过向上级电网购电弥补电能短缺。本文不考虑使用燃料电池将多余的氢能转化为电能,以减少能源的浪费。通过使用超级电容的快速充放电响应特性来平抑实时风电功率波动对系统造成的影响。蓄电池在本系统中起着削峰填谷的作用。

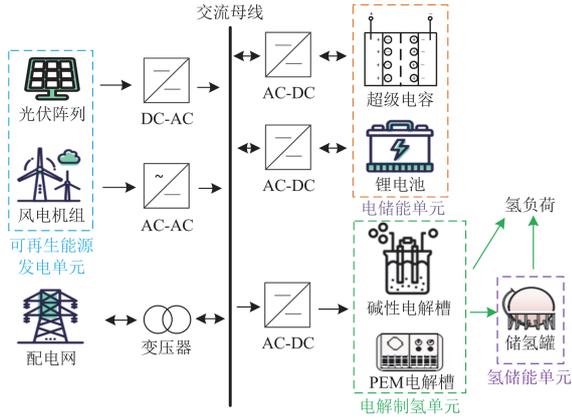


图 1 ALK-PEM 联合制氢系统拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of ALK-PEM combined hydrogen production system

由电解制氢单元为主体构建的 ALK-PEM 联合制氢系统可以实现对风光资源的充分利用，减少弃风弃光电量，满足用氢需求。本文在传统微电网的基础上进行了改进，将未考虑氢负荷需求、且所生产的氢气采取“即产即用”的方式，修改为将用氢需求纳入考量范围，并同时考虑风光波动性对制氢系统的影响，通过超级电容器来平抑实时阶段风光瞬时功率波动。本文依据两类电解槽在动态响应特性和经济性等方面的差异，同时为充分利用风光资源，对电解制氢单元的运行过程及各设备特性建立模型。

1.2 各设备数学模型

1.2.1 电解槽单元模型

电解槽在运行过程中需要满足爬坡功率约束和出力上下限约束，分别如式(1)和式(2)所示。

$$\begin{cases} |P_{k,t}^{\text{ALK}} - P_{k,t-1}^{\text{ALK}}| \leq \Delta P_{\text{max}}^{\text{ALK}} \\ |P_{k,t}^{\text{PEM}} - P_{k,t-1}^{\text{PEM}}| \leq \Delta P_{\text{max}}^{\text{PEM}} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} Y_{k,t}^{\text{ALK}} \cdot P_{\text{min}}^{\text{ALK}} \leq P_{k,t}^{\text{ALK}} \leq Y_{k,t}^{\text{ALK}} \cdot P_{\text{max}}^{\text{ALK}} \\ Y_{k,t}^{\text{PEM}} \cdot P_{\text{min}}^{\text{PEM}} \leq P_{k,t}^{\text{PEM}} \leq Y_{k,t}^{\text{PEM}} \cdot P_{\text{max}}^{\text{PEM}} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $P_{k,t}^{\text{ALK}}$ 、 $P_{k,t}^{\text{PEM}}$ 分别为 k 场景下 t 时段的 ALK 电解槽、PEM 电解槽的制氢功率； $\Delta P_{\text{max}}^{\text{ALK}}$ 、 $\Delta P_{\text{max}}^{\text{PEM}}$ 分别为 ALK 电解槽与 PEM 电解槽的爬坡功率上限； $Y_{k,t}^{\text{ALK}}$ 、 $Y_{k,t}^{\text{PEM}}$ 分别为 k 场景下 t 时段的 ALK 电解槽、PEM 电解槽运行状态标志位，值为 1 表示电解槽运行； $P_{\text{max}}^{\text{ALK}}$ 、 $P_{\text{min}}^{\text{ALK}}$ 和 $P_{\text{max}}^{\text{PEM}}$ 、 $P_{\text{min}}^{\text{PEM}}$ 分别为 ALK 电解槽与 PEM 电解槽的功率上下限。

1.2.2 锂电池单元模型

锂电池在运行过程中需要满足充放电功率约束、充放电状态约束、一天内充放电电量守恒约

束^[21]，分别如式(3)一式(5)所示。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{k,t}^{\text{bat,dis}} \leq Y_{k,t}^{\text{bat,dis}} \cdot P_{\text{max}}^{\text{bat,dis}} \\ 0 \leq P_{k,t}^{\text{bat,ch}} \leq Y_{k,t}^{\text{bat,ch}} \cdot P_{\text{max}}^{\text{bat,ch}} \\ Y_{k,t}^{\text{bat,ch}} + Y_{k,t}^{\text{bat,dis}} \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} H_{\text{min}}^{\text{bat}} \leq H_{k,t}^{\text{bat}} \leq H_{\text{max}}^{\text{bat}} \\ H_{k,t}^{\text{bat}} = H_{k,t-1}^{\text{bat}} + \left(\frac{\eta_{\text{bat,ch}} \cdot P_{k,t}^{\text{bat,ch}}}{E_{\text{bat}}} - \frac{P_{k,t}^{\text{bat,dis}}}{\eta_{\text{bat,dis}} \cdot E_{\text{bat}}} \right) \Delta t \end{cases} \quad (4)$$

$$\eta_{\text{bat,ch}} \sum_{t=1}^T (P_{k,t}^{\text{bat,ch}} \cdot \Delta t) - \frac{1}{\eta_{\text{bat,dis}}} \sum_{t=1}^T (P_{k,t}^{\text{bat,dis}} \cdot \Delta t) = 0 \quad (5)$$

式中： $P_{k,t}^{\text{bat,ch}}$ 、 $P_{k,t}^{\text{bat,dis}}$ 分别为 k 场景下 t 时段锂电池的充放电功率； $Y_{k,t}^{\text{bat,ch}}$ 、 $Y_{k,t}^{\text{bat,dis}}$ 分别为 k 场景下 t 时段锂电池的充放电状态标志位， $Y_{k,t}^{\text{bat,ch}}$ 为 1 表示充电， $Y_{k,t}^{\text{bat,dis}}$ 为 1 表示放电； $P_{\text{max}}^{\text{bat,ch}}$ 、 $P_{\text{max}}^{\text{bat,dis}}$ 分别为锂电池的充放电功率上限； E_{bat} 为锂电池容量； $H_{k,t}^{\text{bat}}$ 为 k 场景下 t 时段锂电池的荷电状态； $H_{\text{max}}^{\text{bat}}$ 、 $H_{\text{min}}^{\text{bat}}$ 分别为锂电池的荷电状态上下限； $\eta_{\text{bat,ch}}$ 、 $\eta_{\text{bat,dis}}$ 分别为锂电池的充放电效率； Δt 为时间间隔； T 为一天的总时段数。

1.2.3 储氢单元模型

储氢罐在充放氢过程中也需要满足等效荷电状态约束、压强约束、一天内的充氢量等于放氢量约束^[22]，分别如式(6)和式(7)所示。

$$\begin{cases} H_{k,t}^{\text{OH}} = H_{k,t-1}^{\text{OH}} + \frac{\eta_{\text{HS}} \cdot n_{k,t}^{\text{in}} - n_{k,t}^{\text{out}} / \eta_{\text{HS}}}{E_{\text{HS}}} \cdot \Delta t \\ H_{\text{min}}^{\text{OH}} \leq H_{k,t}^{\text{OH}} \leq H_{\text{max}}^{\text{OH}} \end{cases} \quad (6)$$

$$\eta_{\text{HS}} \sum_{t=1}^T (n_{k,t}^{\text{in}} \cdot \Delta t) - \frac{1}{\eta_{\text{HS}}} \sum_{t=1}^T (n_{k,t}^{\text{out}} \cdot \Delta t) = 0 \quad (7)$$

式中： $H_{k,t}^{\text{OH}}$ 为 k 场景下 t 时段储氢罐的等效荷电状态； $H_{\text{max}}^{\text{OH}}$ 、 $H_{\text{min}}^{\text{OH}}$ 分别为等效荷电状态的上下限； E_{HS} 为储氢罐的储氢量； η_{HS} 为储氢罐充放氢效率； $n_{k,t}^{\text{in}}$ 、 $n_{k,t}^{\text{out}}$ 分别为 k 场景下 t 时段储氢罐的充放氢速率。

1.2.4 超级电容单元模型

与锂电池类似，超级电容(super capacitor, SC)在运行过程中也需要满足充放电功率约束、充放电状态约束、一个周期内充放电电量守恒约束、荷电状态约束^[23]，分别如式(8)一式(10)所示。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{k,t}^{\text{SC,dis}} \leq Y_{k,t}^{\text{SC,dis}} \cdot P_{\text{max}}^{\text{SC,dis}} \\ 0 \leq P_{k,t}^{\text{SC,ch}} \leq Y_{k,t}^{\text{SC,ch}} \cdot P_{\text{max}}^{\text{SC,ch}} \\ Y_{k,t}^{\text{SC,ch}} + Y_{k,t}^{\text{SC,dis}} \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} H_{\min}^{\text{SC}} \leq H_{k,t}^{\text{SC}} \leq H_{\max}^{\text{SC}} \\ H_{k,t}^{\text{SC}} = (1 - \eta_{\text{SC}}^{\text{loss}}) H_{k,t-1}^{\text{SC}} + \\ \left(\frac{\eta_{\text{SC, ch}} \cdot P_{k,t}^{\text{SC, ch}}}{E_{\text{SC}}} - \frac{P_{k,t}^{\text{SC, dis}}}{\eta_{\text{SC, dis}} \cdot E_{\text{SC}}} \right) \Delta t \end{cases} \quad (9)$$

$$\eta_{\text{SC, ch}} \sum_{t=1}^T (P_{k,t}^{\text{SC, ch}} \cdot \Delta t) - \frac{1}{\eta_{\text{SC, dis}}} \sum_{t=1}^T (P_{k,t}^{\text{SC, dis}} \cdot \Delta t) = 0 \quad (10)$$

式中: $P_{k,t}^{\text{SC, ch}}$ 、 $P_{k,t}^{\text{SC, dis}}$ 分别为 SC 的充放电功率; $P_{\max}^{\text{SC, ch}}$ 、 $P_{\max}^{\text{SC, dis}}$ 分别为 SC 充放电功率的上限; $Y_{k,t}^{\text{SC, ch}}$ 、 $Y_{k,t}^{\text{SC, dis}}$ 分别为 k 场景下 t 时段 SC 的充放电状态标志位, $Y_{k,t}^{\text{SC, ch}}$ 为 1 表示充电, $Y_{k,t}^{\text{SC, dis}}$ 为 1 表示放电; $H_{k,t}^{\text{SC}}$ 为 k 场景下 t 时段 SC 的荷电状态; H_{\max}^{SC} 、 H_{\min}^{SC} 分别为 SC 的荷电状态上下限; $\eta_{\text{SC}}^{\text{loss}}$ 为 SC 的自放电系数; $\eta_{\text{SC, ch}}$ 、 $\eta_{\text{SC, dis}}$ 分别为 SC 的充放电效率; E_{SC} 为 SC 的容量。

1.2.5 向电网购售电模型

当系统与上级电网进行功率交互时, 需要满足购电功率约束、售电功率约束、同一时段不能同时购电与售电状态约束^[24], 如式(11)所示。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{k,t}^{\text{buy}} \leq Y_{k,t}^{\text{buy}} \cdot P_{\max}^{\text{buy}} \\ 0 \leq P_{k,t}^{\text{sell}} \leq Y_{k,t}^{\text{sell}} \cdot P_{\max}^{\text{sell}} \\ Y_{k,t}^{\text{buy}} + Y_{k,t}^{\text{sell}} \leq 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P_{k,t}^{\text{buy}}$ 、 $P_{k,t}^{\text{sell}}$ 分别为 k 场景下 t 时段系统向电网购售电功率; P_{\max}^{buy} 、 P_{\max}^{sell} 分别为系统向上级电网购售电功率的上限; $Y_{k,t}^{\text{buy}}$ 、 $Y_{k,t}^{\text{sell}}$ 分别为 k 场景下 t 时段系统向电网购、售电状态标志位, $Y_{k,t}^{\text{buy}}$ 为 1 表示购电, $Y_{k,t}^{\text{sell}}$ 为 1 表示售电。

2 系统多时间尺度优化运行策略

ALK-PEM 联合制氢系统所用电源主要以风光电源为主, 由于风光出力具有较强的不确定性和波动性, 系统运行需要根据风光出力变化做出相应的调整^[25]。本文应用日前分布鲁棒优化模型与多时间尺度滚动优化模型相结合, 以应对风光出力随机性对系统运行稳定性的影响。本文的多时间尺度分为日前 1 h、日内 15 min、实时 5 min 这 3 个时间尺度, 优化策略如图 2 所示。

首先, 在日前阶段, 根据预测的风光数据和氢负荷数据进行分布鲁棒优化, 确定每台设备在接下来的 24 h 内的运行计划以及系统与电网之间的交互计划。随后, 将日前设备出力计划、电网的购售电

状态以及 ALK 电解槽的运行状态导入日内阶段。

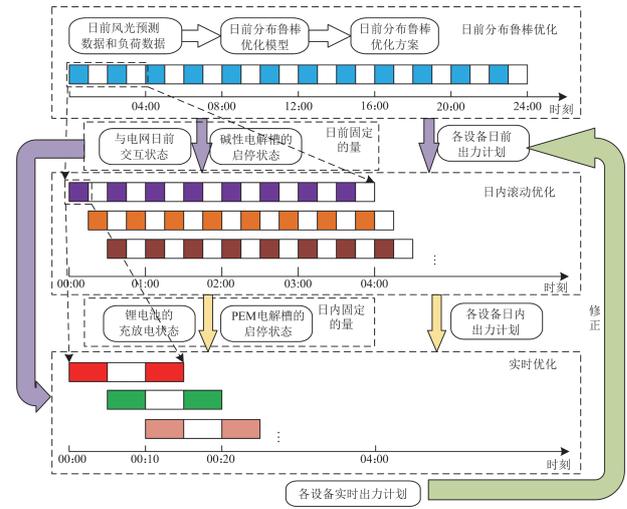


图 2 系统多时间尺度优化策略

Fig. 2 System multi-time scale optimization strategy

其次, 在日内滚动优化阶段, 系统依据日前数据和日内短期预测数据, 以 4 h 为滚动时域, 在每 15 min 的时间尺度内连续进行滚动优化, 以确定系统的日内运行计划。该计划包括 PEM 电解槽的启停状态、锂电池的充放电状态以及各设备的出力计划, 并将其导入实时阶段进行执行。

最后, 在实时阶段, 根据本文所提的 SC 平抑目标函数、约束条件和 SC 运行控制策略对实时波动的光风功率进行平抑。根据平抑后的风光功率、日内导入的数据以及日前和日内已确定的设备运行状态, 对实时阶段的设备出力进行实时修正。

2.1 日前分布鲁棒优化模型

日前优化以购售电成本、各设备运行成本和电解槽启停成本等最小为目标函数, 考虑风光出力的不确定性, 建立可再生能源 ALK-PEM 联合制氢系统日前分布鲁棒优化模型。分布鲁棒优化模型构建了综合范数(∞ -范数和 1-范数)不确定概率集合, 以描述系统的不确定性。

日前阶段所涉及分布鲁棒优化问题可以被描述为一个两阶段分布鲁棒优化问题。第一阶段为求解 min 问题阶段, 该阶段的主要目的是在已知风光场景概率分布下, 求解使系统运行成本最低的优化方案。第二阶段为求解 max-min 问题阶段, 旨在搜索导致系统运行成本最大的情况, 即获取最恶劣风光场景的概率分布, 表达式为

$$\min_{p_k \in \Omega} \max \min \left(\sum_{k=1}^N p_k \cdot C_k(x, y) \right) \quad (12)$$

$$C_k(x, y) = \sum_{t=1}^T (C_{k,t}^{\text{buy}} - C_{k,t}^{\text{sell}} + C_{k,t}^{\text{om}} + C_{k,t}^{\text{ST}}) \quad (13)$$

$$C_{k,t}^{\text{buy}} = e_t^{\text{price}} \cdot P_{k,t}^{\text{buy}} \quad (14)$$

$$C_{k,t}^{\text{sell}} = \lambda^{\text{sell}} \cdot P_{k,t}^{\text{sell}} \quad (15)$$

式中： Ω 为综合范数不确定性概率集合； N 为典型场景数； p_k 为第 k 个场景出现的概率，其具体计算步骤见附录A； x 为第一阶段变量，包括两类电解槽的功率、锂电池充放电、储氢罐充放氢、系统向电网购电功率和电解槽启停成本等； y 为第二阶段变量，即引入的相关辅助变量； $C_k(x, y)$ 为第 k 个场景中系统的运行成本； $C_{k,t}^{\text{buy}}$ 、 $C_{k,t}^{\text{sell}}$ 、 $C_{k,t}^{\text{om}}$ 、 $C_{k,t}^{\text{ST}}$ 分别为 k 场景下 t 时段系统购电成本、售电收益、各设备的运行成本和两类电解槽的启停成本； e_t^{price} 为分时电价； λ^{sell} 为单位售电电价。对不确定集 Ω 以及 $C_{k,t}^{\text{ST}}$ 、 $C_{k,t}^{\text{om}}$ 的解释如下所述。

1) 不确定集的构建

$$\Omega = \begin{cases} p_k \geq 0, k=1, 2, \dots, N \\ \sum_{k=1}^N p_k = 1 \\ \|p_k - p_{k,0}\|_1 \leq \varepsilon_1 \\ \|p_k - p_{k,0}\|_\infty \leq \varepsilon_\infty \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \Pr \left\{ \sum_{k=1}^N |p_k - p_{k,0}| \leq \varepsilon_1 \right\} \geq 1 - 2Ne^{-2M\varepsilon_1/N} \\ \Pr \left\{ \max_{1 \leq k \leq M} |p_k - p_{k,0}| \leq \varepsilon_\infty \right\} \geq 1 - 2Ne^{-2M\varepsilon_\infty} \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \frac{N}{2M} \ln \frac{2N}{1 - \vartheta_1} \\ \varepsilon_\infty = \frac{1}{2M} \ln \frac{2N}{1 - \vartheta_\infty} \end{cases} \quad (18)$$

式中： $p_{k,0}$ 为第 k 种场景的初始概率； ε_1 、 ε_∞ 分别表示相应概率分布所满足的偏差值； M 为样本数； ϑ_1 、 ϑ_∞ 分别表示基于1-范数和 ∞ -范数所满足的置信度。为便于求解，本节参考文献[13]引入辅助变量对式(17)中的非线性约束进行线性化。

2) 电解槽启停成本

$$C_{k,t}^{\text{ST}} = C_{k,t}^{\text{ST,ALK}} + C_{k,t}^{\text{ST,PEM}} \quad (19)$$

$$C_k^{\text{ST,ALK}} = \sum_{t=1}^T (Y_{k,t}^{\text{Aon}} \cdot C^{\text{Aon}} + Y_{k,t}^{\text{Aoff}} \cdot C^{\text{Aoff}}) \quad (20)$$

$$C_k^{\text{ST,PEM}} = \sum_{t=1}^T (Y_{k,t}^{\text{Pon}} \cdot C^{\text{Pon}} + Y_{k,t}^{\text{Poff}} \cdot C^{\text{Poff}}) \quad (21)$$

式中： $C_k^{\text{ST,ALK}}$ 、 $C_k^{\text{ST,PEM}}$ 分别为 k 场景下ALK与PEM

电解槽的启停成本； $Y_{k,t}^{\text{Aon}}$ 、 $Y_{k,t}^{\text{Aoff}}$ 分别为 k 场景下 t 时段ALK电解槽的启动、停止状态标志位； C^{Aon} 、 C^{Aoff} 分别为ALK电解槽的单次启动、停止成本； $Y_{k,t}^{\text{Pon}}$ 、 $Y_{k,t}^{\text{Poff}}$ 分别为 k 场景下 t 时段PEM电解槽的启动、停止状态标志位； C^{Pon} 、 C^{Poff} 分别为PEM电解槽的单次启动、停止成本。

3) 设备运行成本

日前设备运行成本包括各用电设备运行成本和储氢罐的运行成本，如式(24)所示。

$$C_{k,t}^{\text{om}} = \left[\sum_{j=1}^W (\alpha^j \cdot P_{k,t}^j) + \beta^{\text{HS}} \cdot |n_{k,t}^{\text{in}} - n_{k,t}^{\text{out}}| \right] \cdot \Delta t \quad (22)$$

式中： W 为用电设备数； α^j 为第 j 类设备的单位电量运行成本， j 包括PEM电解槽、ALK电解槽和锂电池； $P_{k,t}^j$ 为第 j 类设备在 k 场景下 t 时段的出力； β^{HS} 为储氢罐单位充放氢量运行成本。

2.2 日内滚动优化模型

为减小由于日前预测误差对系统的影响^[26]，本节在日内阶段缩短预测时域至4h，并将时间尺度缩小至15min，以获得更精确的风光发电预测数据。依据预测数据，制定日内运行计划。

在日内优化阶段，为避免ALK电解槽频繁启停，将日前阶段确定的ALK电解槽启停状态保持不变。此外，为防止由于日内风光功率变动而导致日前确定的购售电状态频繁变更，也将日前阶段确定的购售电状态保持不变。进一步确定系统设备实时阶段下的状态，包括PEM电解槽的启停状态和锂电池的充放电状态。

日内滚动优化的目标函数包含两个部分，一部分为预测时域的系统运行成本，另一部分是预测时域的日内功率变动惩罚成本。目标函数如式(23)所示。

$$\min C_{\text{rr}} = \sum_{t=m+1}^{m+B} (C_t^{\text{jh,r}} + C_t^{\text{om,r}} + C_t^{\text{ST,PEM,r}} + C_t^{\text{cf,r}}) \quad (23)$$

式中： C_{rr} 为日内控制时段成本； m 为时段序号； B 为预测时域； $C_t^{\text{jh,r}}$ 、 $C_t^{\text{om,r}}$ 、 $C_t^{\text{ST,PEM,r}}$ 、 $C_t^{\text{cf,r}}$ 分别为日内 t 时段内与电网的交互成本、设备的运行成本、PEM电解槽的启停成本、功率变动惩罚成本。

1) 日内与电网之间的交互成本

$$C_t^{\text{jh,r}} = \left[e_t^{\text{price}} (P_t^{\text{buy}} + \Delta P_t^{\text{buy,r}}) - \lambda^{\text{sell}} (P_t^{\text{sell}} + \Delta P_t^{\text{sell,r}}) \right] \cdot \Delta t \quad (24)$$

式中： P_t^{buy} 、 P_t^{sell} 分别为日前 t 时段系统向电网的购售电功率； $\Delta P_t^{\text{buy,r}}$ 、 $\Delta P_t^{\text{sell,r}}$ 分别为日内 t 时段内系统向电网购电和售电的功率变动。

2) 日内设备运行成本

$$C_t^{\text{om},r} = \left\{ \sum_{j=1}^W [\alpha^j \cdot (P_t^j + \Delta P_t^{j,r})] + \beta^{\text{HS}} \cdot (|n_t^{\text{in}} + \Delta n_t^{\text{in},r} - n_t^{\text{out}} - \Delta n_t^{\text{out},r}|) \right\} \cdot \Delta t \quad (25)$$

式中: P_t^j 为日前 t 时段内设备 j 的出力; $\Delta P_t^{j,r}$ 为日内 t 时段内设备 j 的出力变化量; n_t^{in} 、 n_t^{out} 分别为日前 t 时段内储氢罐的充放氢速率; $\Delta n_t^{\text{in},r}$ 、 $\Delta n_t^{\text{out},r}$ 分别为日内 t 时段内储氢罐的充放氢速率变化量。

3) 日内 PEM 电解槽启停成本

$$C_t^{\text{ST,PEM},r} = Y_t^{\text{Pon},r} \cdot C^{\text{Pon}} + Y_t^{\text{Poff},r} \cdot C^{\text{Poff}} \quad (26)$$

式中, $Y_t^{\text{Pon},r}$ 、 $Y_t^{\text{Poff},r}$ 分别为日内 t 时段的 PEM 电解槽启停状态标志位。

4) 日内出力变动惩罚成本

$$C_t^{\text{cf},r} = \left\{ \left[(\Delta P_t^{\text{buy},r})^2 + (\Delta P_t^{\text{sell},r})^2 \right] \gamma^{\text{grid},r} + \sum_{j=1}^W [(\Delta P_t^{j,r})^2 \cdot \gamma^{j,r}] \right\} \cdot \Delta t \quad (27)$$

式中: $\gamma^{\text{grid},r}$ 为系统与电网交互功率日内调整惩罚系数; $\gamma^{j,r}$ 为第 j 类设备的日内出力调整惩罚系数。

2.3 实时调整模型

实时优化具体分为两层: 为平抑瞬时功率波动对 SC 的调节; 对系统运行的优化控制研究。实时阶段双层优化策略如图 3 所示。

1) 第一层目标函数

$$\min \Delta C_{\text{SC}} = \lambda^{\text{SC},s} \sum_{t=1}^T (P_t^{\text{SC},\text{dis},s} + P_t^{\text{SC},\text{ch},s}) + \lambda^{\text{off},s} \sum_{t=1}^T (P_t^{\text{WP},s} - P_t^{\text{WP},\text{SC},s}) \quad (28)$$

式中: ΔC_{SC} 为 SC 的实时成本; $\lambda^{\text{SC},s}$ 、 $\lambda^{\text{off},s}$ 分别为实时阶段 SC 单位运行成本和弃风弃光电量单位惩罚成本; $P_t^{\text{SC},\text{ch},s}$ 、 $P_t^{\text{SC},\text{dis},s}$ 分别为 SC 的实时充放电功率; $P_t^{\text{WP},s}$ 、 $P_t^{\text{WP},\text{SC},s}$ 分别为 t 时段实时风光功率和经 SC 平抑后的实时风光功率。

为使实时风光功率能更有效地跟踪日内功率、实时阶段的风光曲线更加平滑, 本文采用前一时段的值、当前时段的值以及后一时段的预测值的平均值作为风光功率平抑的基准。具体的平抑策略和基准功率分别如式(29)和式(30)所示。

$$\begin{cases} P_t^{\text{SC},\text{ch},s} = \min(P_t^{\text{WP},s} - P_t^{\text{WZ},\text{SC},s}, P_{\text{max}}^{\text{SC},\text{ch}}), \\ P_t^{\text{WP},s} - P_t^{\text{WZ},\text{SC},s} \geq 0 \\ P_t^{\text{SC},\text{dis},s} = \min(P_t^{\text{WZ},\text{SC},s} - P_t^{\text{WP},s}, P_{\text{max}}^{\text{SC},\text{dis}}), \\ P_t^{\text{WP},s} - P_t^{\text{WZ},\text{SC},s} < 0 \end{cases} \quad (29)$$

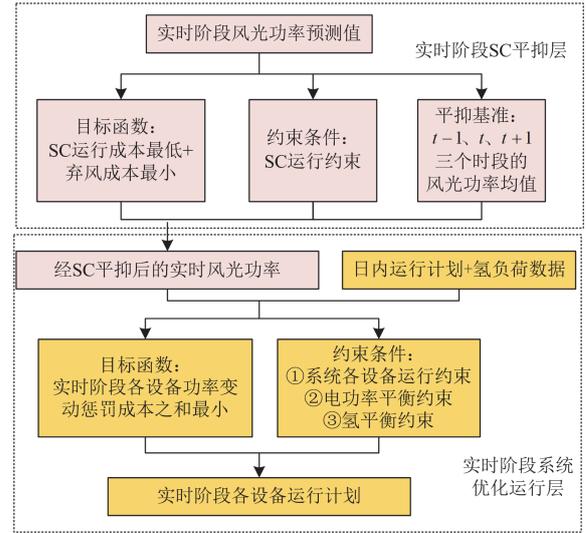


图3 实时阶段双层优化策略

Fig. 3 Real-time phase bi-level optimization strategy

$$P_t^{\text{WZ},\text{SC},s} = \frac{P_{t-1}^{\text{WP},s} + P_t^{\text{WP},s} + P_{t+1}^{\text{WP},s}}{3} \quad (30)$$

式中, $P_t^{\text{WZ},\text{SC},s}$ 为 SC 平抑的基准功率。

2) 第二层目标函数

$$\min \Delta C_{\text{ss}} = \mu \sum_{t=1}^T \left(\frac{|\Delta P_t^{\text{buy},s}|}{P_{\text{max}}^{\text{buy}}} + \frac{|\Delta P_t^{\text{sell},s}|}{P_{\text{max}}^{\text{sell}}} + \frac{|\Delta P_t^{\text{PEM},s}|}{P_{\text{max}}^{\text{PEM}}} + \frac{|\Delta P_t^{\text{ALK},s}|}{P_{\text{max}}^{\text{ALK}}} + \frac{|\Delta P_t^{\text{bat},\text{dis},s}|}{P_{\text{max}}^{\text{bat},\text{dis}}} + \frac{|\Delta P_t^{\text{bat},\text{ch},s}|}{P_{\text{max}}^{\text{bat},\text{ch}}} \right) \quad (31)$$

式中: ΔC_{ss} 、 μ 分别为设备的功率调整惩罚成本和成本系数; $\Delta P_t^{\text{buy},s}$ 、 $\Delta P_t^{\text{sell},s}$ 、 $\Delta P_t^{\text{PEM},s}$ 、 $\Delta P_t^{\text{ALK},s}$ 、 $\Delta P_t^{\text{bat},\text{ch},s}$ 、 $\Delta P_t^{\text{bat},\text{dis},s}$ 分别为 t 时段内实时的购电功率、售电功率、PEM 电解槽制氢功率、ALK 电解槽制氢功率、锂电池充放电功率; $P_{\text{max}}^{\text{buy}}$ 、 $P_{\text{max}}^{\text{sell}}$ 、 $P_{\text{max}}^{\text{PEM}}$ 、 $P_{\text{max}}^{\text{ALK}}$ 、 $P_{\text{max}}^{\text{bat},\text{ch}}$ 、 $P_{\text{max}}^{\text{bat},\text{dis}}$ 分别为购电功率、售电功率、PEM 电解槽制氢功率、ALK 电解槽制氢功率、锂电池充放电功率的上限。

2.4 约束条件

系统除了需要考虑 1.2 节的各设备运行特性约束外, 也需要满足电能平衡约束和氢能平衡约束, 相关模型参考文献[10,27]。

3 算例分析

本文以东北某地区的风电场和光伏电站的数据为例, 等效氢负荷参考文献[28]。假设加氢站的日均需求量为 1500 kg/天。以 7 MW 的风电机组、4 MW 的光伏机组、184.9 kWh 的 SC、2.94 MW 的

ALK 电解槽、1.40 MW 的 PEM 电解槽、593 kWh 的锂电池组、208 m³ 的储氢罐为例，对系统的优化结果进行分析。锂电池的 SOC 上下限分别设为 0.9 和 0.1，初始 SOC 为 0.5。1-范数约束与∞-范数约束置信度均设定为 0.9。各设备参数^[7,10,29-30]如表 1 和表 2 所示；分时电价数据^[31]如表 3 所示。参考风光并网标准，本文风光波动量限值设置为风光机组装机容量的 3%。本文程序所使用的仿真环境为 MatlabR2021b，CPU 12th Gen Intel(R) Core(TM) i7-12700H，RAM 16 GB，利用 Gurobi 求解器对模型进行求解。

表 1 设备运行成本相关参数

设备	参数	取值
锂电池	α^{bat}	0.05
储氢罐	β^{HS}	0.1314
PEM 电解槽	α^{PEM}	0.8974
ALK 电解槽	α^{ALK}	0.3846

表 2 其他参数

参数	数值
锂电池 SOC 上下限	0.9,0.1
SC 自放电率/%	0.5
储氢罐压强上下限/Mpa	5, 0.5
向电网售电电价/(元/kWh)	0.3

表 3 分时电价

时段划分	具体时段	电价/(元/kWh)
谷时段	01:00—08:00	0.382
峰时段	13:00—16:00、20:00—22:00	0.922
平时段	剩余时段	0.54

3.1 日前分布鲁棒优化结果分析

本文设定以下 3 种方案进行对比分析：

- 方案 1：采用随机优化模型；
- 方案 2：采用鲁棒优化模型；
- 方案 3：采用分布鲁棒优化模型(本文方法)。

据表 4 的数据显示，方案 2 采用的鲁棒优化方法考虑所有场景中的最恶劣情况，因此其考虑的场景风光出力最低，需要大量购电来满足氢负荷需求，导致设备的日运行成本是 3 个方案中最高的。同时，由于风光出力最低，没有富余的风光出力可向电网出售。相比之下，方案 1 采用的随机优化方法对应的是风光出力最高的场景，因此除了满足系统氢负荷需求外，还有大量富余的风光出力可向电网出售，且购电量最低。而方案 3 采用的分布鲁棒优化方法综合考虑了各种可能的概率分布，并从中找出了最恶

劣的场景。所以，其日运行成本略高于方案 1 的随机优化方法，但比方案 2 的鲁棒优化模型减少了 29% 的费用支出。因此，分布鲁棒优化方法能够很好地兼顾鲁棒优化的保守性和随机优化的经济性。

表 4 不同方案下系统运行情况

	方案 1	方案 2	方案 3
设备日运行成本/万元	3.058	6.199	4.407
系统购电量/MWh	2.676	54.423	21.076
系统售电量/MWh	13.109	0	0.789

观察图 4 可知，分布鲁棒优化选取的最恶劣场景下，风光出力不足，系统需从电网购买电能来满足氢负荷需求。由图 5 可以看出，氢负荷需求高峰主要集中在 05:00—21:00 时段。而在 00:00—05:00 和 21:00—24:00 这两个时段，氢负荷需求相对较低，风光出力能够满足氢需求且有剩余，系统选择向电网售电获取一定的收益，弥补系统运行支出。

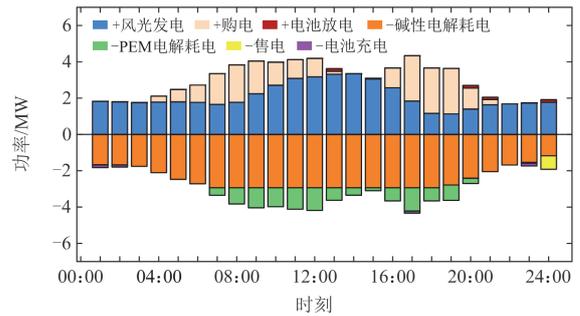


图 4 日前电功率平衡

Fig. 4 Day-ahead electric power balance

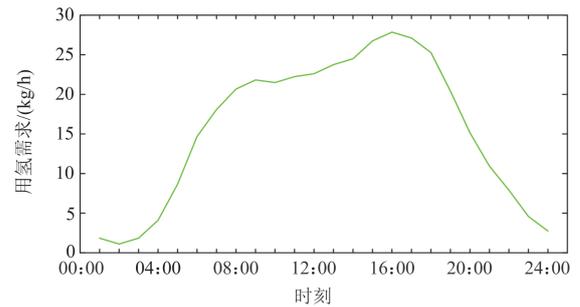


图 5 氢负荷需求

Fig. 5 Hydrogen load demand

由图 6 和表 3 可以看出，在 03:00—13:00 时段、14:00—21:00 时段，系统需要从电网购电。在这段时间内，购电量在电价平时段和谷时段相对较大，而在电价峰时段相对较少。通过对比图 7 和图 8，发现系统在这两个时段内通过锂电池放电制氢和储

氢罐释放氢气两种途径减少了向电网购电的需求。

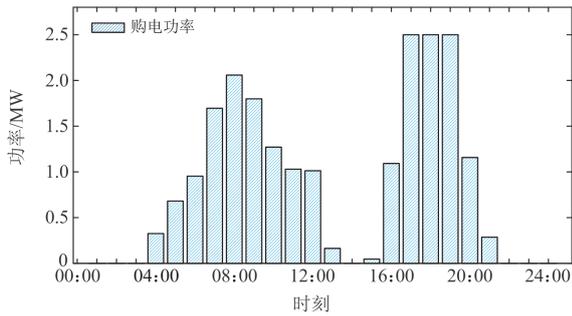


图 6 系统向电网购电计划

Fig. 6 Plan of system purchasing electricity from the grid

由图 7 可知, 在风光出力较高且氢负荷需求较低的 00:00—02:00、16:00—17:00 和 22:00—23:00 时段, 锂电池进行充电; 而在氢负荷需求高峰期的 12:00—13:00、19:00—21:00 时段, 由于风光发电无法满足氢负荷需求且此时电价处于峰时段和平时段, 锂电池通过放电来制取氢气。

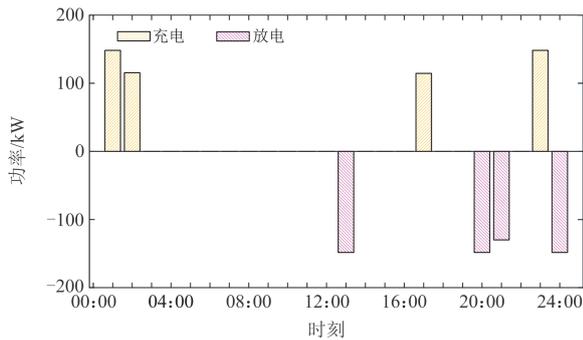


图 7 锂电池充放电计划

Fig. 7 Plan of lithium battery charging and discharging

图 8 为储氢罐的充放氢计划。当净进气速率为正值时, 表示储氢罐正在储存氢气, 而负值则表示释放氢气。在一天内, 必须确保总充氢量等于总放氢量, 以确保不会影响下一个周期的使用。

储氢罐的充氢计划主要集中在 00:00—05:00 和 20:00—24:00 这两个时段。在这些时段, 风光出力较高, 但氢负荷需求较低。系统将风电机组和光伏电站产生的多余电量一部分通过电解槽制氢储存在储氢罐中, 另一部分则储存在锂电池中削峰填谷。目的是在氢负荷需求增加时提供储备, 以满足负荷。放氢计划则集中在 12:00—20:00 时段。在此时段, 氢负荷需求较高, 且风光产出的氢气无法满足需求。因此, 储氢罐会释放所储存的氢气以保障氢能供应, 维持系统氢能的供需平衡。在其他时段, 储氢罐既不充氢也不放氢, 即系统中电解制氢

单元产出的氢气与氢负荷需求相匹配。

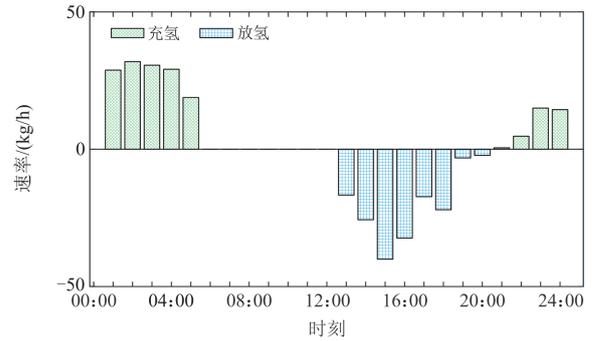


图 8 储氢罐充放氢计划

Fig. 8 Plan of hydrogen charging and discharging in hydrogen storage tank

3.2 日内优化结果分析

图 9 为系统日内电功率平衡图。

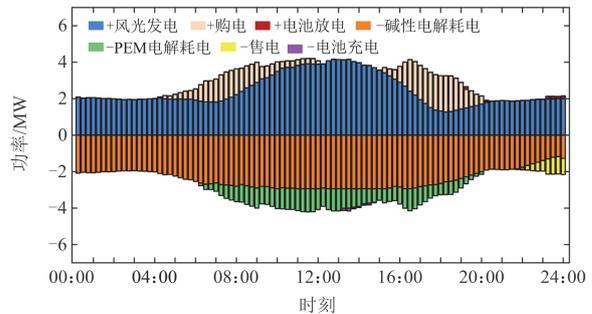


图 9 系统日内电功率平衡

Fig. 9 System intra-day power balance

对比图 4 和图 9 的结果可知, 日内计划整体上相对于日前的运行计划基本稳定。然而, 由于日内风光数据是基于短期预测结果得出的, 这与日前长期预测存在差异。同时, 日内滚动优化是在日前优化基础上进一步修正的, 这也导致了日内购售电功率、电解制氢功率以及锂电池充放电功率相对于日前的计划产生了一定变化。特别是日内短期尺度的风光发电数据波动较大, 影响了锂电池的充放电计划、储氢罐的充放氢计划以及 PEM 电解槽的启停计划, 使得它们都出现了较大的功率变动。

根据图 10(a)的结果显示, ALK 电解槽在日内和日前的功率变化相对不显著, 表明其在日内能较有效地跟踪日前的计划。然而, 从图 10(b)可以观察到, 与 ALK 电解槽相比, PEM 电解槽在日内相对日前的功率变化较大。这一差异主要源于日内短期风光功率预测的波动性, 而 PEM 电解槽能够更快地响应这类电源波动, 因而导致了其在日内相对日前功率出现较大波动。观察图 10(c)锂电池的日前

与日内出力对比图,正向功率为锂电池的放电功率,负向功率为锂电池的充电功率。由图 10(c)可知,锂电池在日内的充放电计划与日前计划显著不同。这是因为锂电池利用其充放电特性来平抑日内风光出力的波动,由此进一步降低了制氢功率和与电网交互功率的波动。这一结论是基于图10(a)、图 10(b)和图 10(d)的结果而得出的。在图 10(d)中,正向功率表示系统向电网购电功率,负向功率则表示系统向电网售电功率。从图 10(d)可以看出,日内系统与电网之间的交互功率相较于日前有所降低,且交互曲线呈现更加平滑的趋势,这表明经过日内滚动优化过程,可以在一定程度上降低系统与电网之间的交互功率,从而降低购电成本。

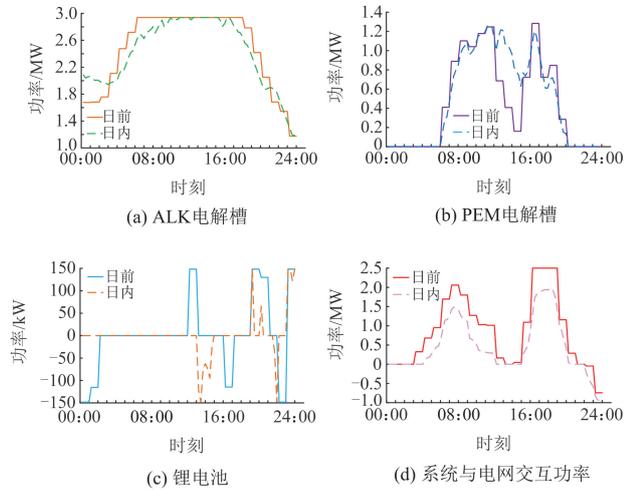


图 10 系统各单元日前与日内出力对比
Fig. 10 Comparison of day-ahead and intra-day output of each unit of the system

3.3 实时优化结果分析

实时优化旨在最小化实时和日内各单元的功率变动。鉴于风光功率在短时间尺度上的波动特性,及其对实时阶段各机组运行计划的实时影响,需要进行实时优化以相应调整系统的运行计划,本文采用双层优化策略。

首先,利用 SC 的快速充放电特性,对瞬时波动的风光发电功率进行平抑处理,这是第一层优化。由图 11 可以看出,经过 SC 平抑处理后,实时阶段的风光出力更为稳定平滑。并且,若在实时阶段不采用 SC 对风光功率进行实时平抑,会造成模型无法求解的问题,这是因为日前购售电状态以及日内锂电池运行状态都已固定,而风光发电在 5 min 时间尺度波动性较强,若不对这部分波动进行平抑,会造成可再生能源 ALK-PEM 联合制氢系统无法安

全稳定运行。

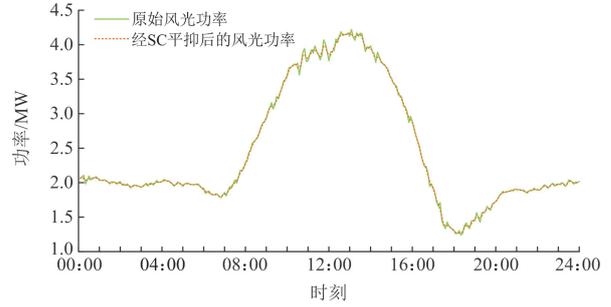


图 11 经 SC 平抑前后的实时风光功率
Fig. 11 Real-time wind/PV power before and after SC stabilization

其次,在日内滚动优化的基础上,为进一步调整制氢系统的运行,以确保实时能量供需平衡,形成第二层优化。经过平抑处理后,风光发电功率仍然存在相当大的波动性。为了避免平抑后的风光功率波动导致设备频繁启停以及设备出力剧烈变动等问题,在实时阶段,根据日内时间尺度制定的计划执行锂电池和 PEM 电解槽的启停计划。系统实时电功率平衡图如图 12 所示,与图 9 进行对比可知,实时阶段系统运行计划相比日内时间尺度的运行计划变动较小,即实时阶段能够很好地跟踪日内制定的计划。系统日内与实时出比如图 13 所示。

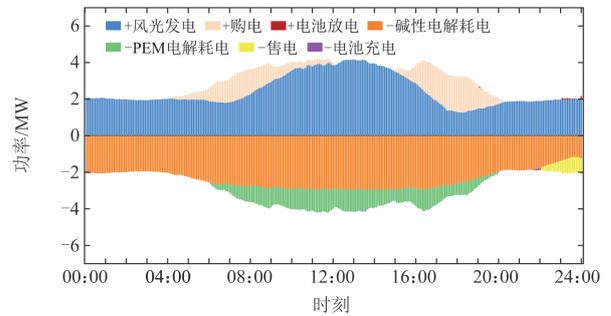


图 12 实时电功率平衡
Fig. 12 Real-time electric power balance

由图 13(a)、图 13(b)和图 13(d)可以看出,系统中 ALK 电解槽功率、PEM 电解槽功率以及与电网的交互功率在实时时间尺度上能够准确跟踪日内时间尺度所设定的运行计划,功率波动较小。由图 13(c)可以看出,锂电池的充放电功率相较于日内仍存在一定的波动,但总体上与图 10(c)日前与日内对比图相比,变动幅度不大。这表明 SC 的平抑效果显著,同时在经过 SC 平抑后,锂电池也对风光功率的波动进行了进一步的调节,以减少实时制氢功

率的波动, 并使系统与电网的交互计划更加稳定。

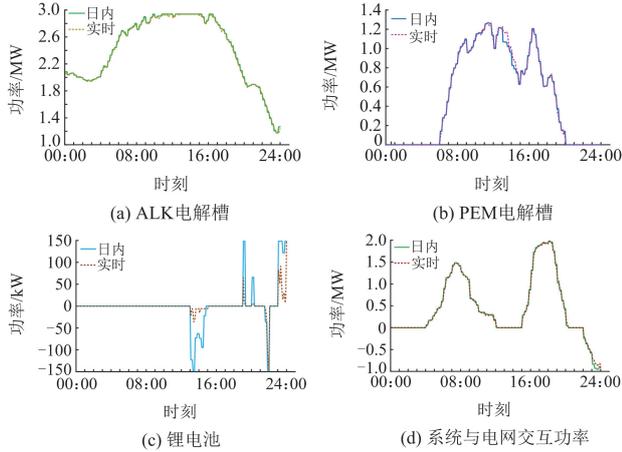


图 13 系统各单元日内与实时出力对比

Fig. 13 Comparison of intra-day and real-time output of each unit of the system

在完成对可再生能源 ALK-PEM 联合制氢系统进行多时间尺度优化后, 对系统在仅进行日前优化、日前+日内优化以及日前+日内+实时优化策略下得出的结果进行比较, 结果如表 5 所示。

方案 3: 系统仅进行日前优化, 即日前分布鲁棒优化得出的结果。

方案 4: 在方案 3 的基础上加入日内滚动优化以修正日前优化结果, 即日前+日内优化;

方案 5: 在方案 4 的基础上加入日内实时修正过程, 以修正日前优化结果, 即日前+日内+实时优化。

表 5 优化结果对比

Table 5 Comparison of optimization results

	方案 3	方案 4	方案 5
设备日运行成本/万元	4.407	3.923	3.915
系统购电量/MWh	21.076	12.275	12.104
系统售电量/MWh	0.789	1.322	1.207

由表 5 可以看出, 总体而言, 方案 3、方案 4 和方案 5 中系统的日运行成本没有出现显著变化。其中, 方案 5 的系统日运行成本最低, 而方案 3 的成本最高。然而, 在系统与电网交互功率方面, 仅进行日前优化相较于完成日内优化甚至实时优化后, 系统与电网的交互功率更大, 且系统向电网购电量更高, 售电量更低。相比之下, 完成实时优化后的系统与电网的交互功率最小。方案 5 与方案 4 的日运行成本差异不大, 这也说明了实时阶段可以很好地跟踪日内运行计划, 同时也表明 SC 在实时阶段对风光瞬时功率平抑的有效性。这进一步表明, 风光出力的不确定性导致了日前运行结果不可靠, 因此有必要对系统多时间尺度的优化运行进行研究。

4 结论

本文提出了可再生能源 ALK-PEM 联合制氢系统多时间尺度优化运行策略。在日前优化阶段, 构建了系统的分布鲁棒优化模型。在日内阶段, 构建了日内滚动优化模型。在实时优化阶段, 提出了利用 SC 平抑瞬时风光功率波动与系统实时运行优化控制相结合的双层优化策略。通过 Matlab 平台利用 Gurobi 求解器对算例求解, 得出了系统的多时间尺度优化结果。

1) 本文所提的可再生能源 ALK-PEM 联合制氢系统的分布鲁棒优化模型比鲁棒优化模型减少 29% 的费用支出, 与随机优化模型相比, 其考虑的场景与实际情况更贴合。因此本文所提可再生能源 ALK-PEM 联合制氢系统的分布鲁棒优化模型能够有效平衡鲁棒优化的保守性和随机优化的经济性。

2) 多时间尺度优化方法能够有效解决风光发电功率日前预测误差可能导致的制氢系统优化运行结果可信度低的问题, 实时阶段所提的双层优化策略能够解决风光功率瞬时波动特性造成的模型无法求解的问题, 并且在实时阶段 SC 可以为系统提供较为平滑的风光功率。在经过日内和实时阶段的优化后, 可以有效降低系统的日运行成本。

本文在多时间尺度优化的建模过程中, 未考虑氢能价格变动对优化运行的影响、负荷需求响应潜力等因素, 未来在多时间尺度优化方面需进一步考虑多方面因素, 使优化结果更具参考价值。在日前分布鲁棒优化中, 未考虑负荷需求、设备故障等不确定性的因素, 未来关于分布鲁棒建模过程需考虑更加全面的不确定性因素, 使模型更符合实际情况。对风光功率实时阶段平抑策略设计的较为简单粗糙, 未来对于实时平抑策略的设计也需要再做进一步研究, 以进一步降低系统日运行成本。

附录 A 场景削减方法

本文在对可再生能源 ALK-PEM 联合制氢系统进行优化配置研究时, 考虑的是全年 365 天的风光出力场景。若将全年的风光出力场景导入模型中进行求解, 会造成模型求解维数大, 计算困难的问题。因此, 考虑采用 K-means 聚类分别对全年的风光出力数据按一天 24 h 进行聚类, 以实现场景缩减, 具体如下。

1) 利用 K-means 聚类算法对全年的风光发电数据进行聚类, 得到了 N 个典型的风光出力场景。

2) 对各个典型风光出力场景的聚类曲线按累计波动量从大到小进行排序。并从各个典型风光出

力场景中分别选取波动量大小为中位数的风光出力曲线作为该典型场景的典型日风光出力曲线。定义风光功率波动量为当前时段的风光功率测量值 $P_{k,t}^{ya}$ 减去前一时段的风光功率测量值 $P_{k,t-1}^{ya}$ ，如式(A1)所示。

$$\Delta P_{k,t}^{WTPV} = P_{k,t}^{ya} - P_{k,t-1}^{ya} \quad (A1)$$

式中， $\Delta P_{k,t}^{WTPV}$ 为 k 场景下 t 时段的风光功率波动量。

3) 获取初始场景概率分布值 p_k ，如式(A2)所示。

$$p_k = \frac{L_k}{M} \quad (A2)$$

式中， L_k 为第 k 个典型场景中包含的天数。

附录 B 日前分布鲁棒优化模型求解方法

本文将式(12)的目标函数分为两个部分进行求解，本节所构建分布鲁棒优化模型是一个两阶段优化模型。通过对原模型进行分解处理，以简化计算。将原模型分为主问题和子问题进行迭代求解，先对主问题进行求解，再求解子问题，主问题对应第一阶段，子问题对应第二阶段。

主问题是在已知场景概率分布的前提下，求解满足可再生能源制氢系统运行成本 ϕ 最小的解，具体如式(B1)所示。

$$\begin{cases} \min \phi \\ \phi \geq \sum_{k=1}^N p_k^* C_k(x, y) \end{cases} \quad (B1)$$

式中， p_k^* 为对应最恶劣场景的风光概率分布。

通过解决主问题来获得对应变量的解 x^* 和模型的下界 B_L ，即主问题对应的运行成本。

子问题采用 max-min 双层结构模型，如式(B2)所示。

$$\max_{p_k \in \Omega} \min \left(\sum_{k=1}^N p_k C_k(x^*, y) \right) \quad (B2)$$

式(B2)描述的是，在场景变化的情况下，变量 y 能够灵活地进行调整以获取最优解，根据已得出的主问题求解 x^* 时，找出在置信区间中最恶劣场景的概率分布情况，从而确定模型上界 B_U ，即式(12)的值。考虑到内外两层问题的约束无关联，因此能够将式(B2)进行解耦为两式分步考虑。首先获取内层 min 问题的解 ϕ ，然后求取外层 max 问题的解，具体如式(B3)所示。

$$\begin{cases} \phi = \min C_k(x^*, y) \\ \max \sum_{k=1}^N p_k \phi \end{cases} \quad (B3)$$

式(B3)为一个混合整数规划问题。求取的结果为最恶劣场景的概率分布信息，将其作为已知参数

传至主问题进行求解。通过迭代计算获取最终解。

系统日前分布鲁棒优化求解流程如图 B1 所示，其中 ξ 为接近 0 的值。

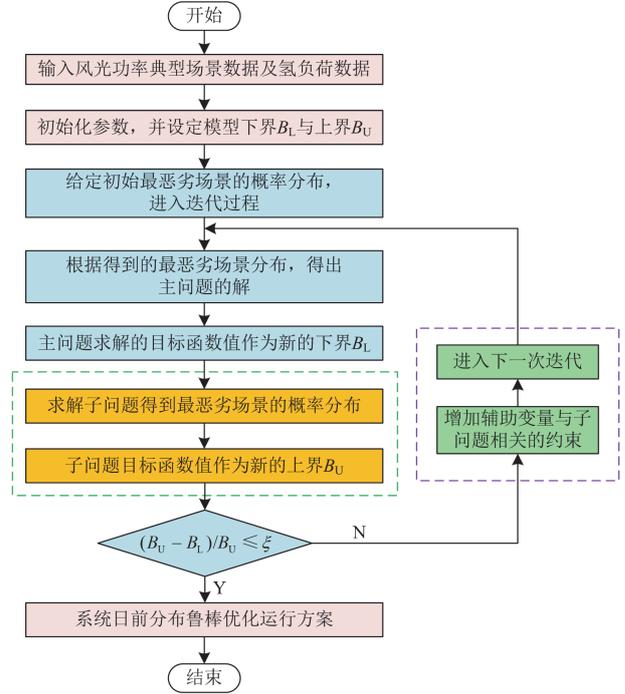


图 B1 系统日前分布鲁棒优化求解流程

Fig. B1 System day-ahead distribution robust optimization process

参考文献

- [1] 别朝红, 王则凯, 肖遥, 等. 双碳目标下新型电力系统发展展望[J]. 新型电力系统, 2023, 1(2): 116-131. BIE Zhaohong, WANG Zekai, XIAO Yao, et al. Outlook on the development of new power system under dual-carbon target[J]. New Type Power Systems, 2023, 1(2): 116-131.
- [2] 顾靖达, 白小会, 李伟, 等. 新型电力系统变电站绿色低碳技术分析[J]. 南方能源建设, 2024, 11(4): 111-117. GU Jingda, BAI Xiaohui, LI Wei, et al. Analysis on green and low carbon technologies for new power system substations[J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(4): 111-117.
- [3] 赵毅, 王维庆, 闫斯哲. 考虑阶梯型碳交易的风光储联合系统分布鲁棒优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 127-136. ZHAO Yi, WANG Weiqing, YAN Sizhe. Distributionally robust optimization scheduling of a joint wind-solar-storage system considering step-type carbon trading[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 127-136.
- [4] 蔡文亮, 赵正晖, 汪洋, 等. 面向新型能源结构的系统调频技术回顾与展望[J]. 电测与仪表, 2023, 60(10): 1-9.

- CAI Wenliang, ZHAO Zhenghui, WANG Yang, et al. Review and prospect of frequency modulation technology for new energy structure[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(10): 1-9.
- [5] 初壮, 赵蕾, 孙健浩, 等. 考虑热能动态平衡的含氢储能综合能源系统热电优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(3): 1-12.
- CHU Zhuang, ZHAO Lei, SUN Jianhao, et al. Thermoelectric optimization of an integrated energy system with hydrogen energy storage considering thermal energy dynamic balance[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(3): 1-12.
- [6] 李彬, 潘雨情, 文华杰, 等. 基于碳减排的氢电资源耦合发展现状及展望[J]. *供用电*, 2023, 40(10): 106-113.
- LI Bin, PAN Yuqing, WEN Huajie, et al. Current status and prospects of hydrogen electricity resource coupling development based on carbon emission reduction[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(10): 106-113.
- [7] ABOMAZID A M, EL-TAWHEEL N A, FARAG H E Z. Optimal energy management of hydrogen energy facility using integrated battery energy storage and solar photovoltaic systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2022, 13(3): 1457-1468.
- [8] 李广, 樊艳芳. 基于自适应功率阈值的电网辅助光伏制氢控制策略及容量优化配置[J]. *可再生能源*, 2022, 40(9): 1215-1222.
- LI Guang, FAN Yanfang. Grid-assisted photovoltaic hydrogen production control strategy and capacity optimization configuration based on adaptive power threshold[J]. *Renewable Energy Resources*, 2022, 40(9): 1215-1222.
- [9] 陈丽娜, 樊艳芳, 李广, 等. 基于斯塔克尔伯格博弈的光伏制氢系统能量优化管理策略[J/OL]. *现代电力*, 1-11[2024-04-25]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0331>.
- CHEN Lina, FAN Yanfang, LI Guang, et al. Energy optimization management strategy of photovoltaic hydrogen production system based on Stackelberg game[J/OL]. *Modern Electric Power*: 1-11[2024-04-25]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0331>.
- [10] 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.
- [11] 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]. *电力系统自动化*, 2023, 47(6): 150-157.
- YUAN Tiejiang, 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.
- [12] FANG R, LIANG Y. Control strategy of electrolyzer in a wind-hydrogen system considering the constraints of switching times[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(46): 25104-25111.
- [13] 刘一欣, 郭力, 王成山. 微电网两阶段鲁棒优化经济调度方法[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(14): 4013-4022, 4307.
- LIU Yixin, GUO Li, WANG Chengshan. Economic dispatch of microgrid based on two stage robust optimization[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(14): 4013-4022, 4307.
- [14] 司杨, 陈来军, 陈晓弢, 等. 基于分布鲁棒的风-氢混合系统氢储能容量优化配置[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(10): 3-10.
- SI Yang, CHEN Laijun, CHEN Xiaotao, et al. Optimal capacity allocation of hydrogen energy storage in wind-hydrogen hybrid system based on distributionally robust[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(10): 3-10.
- [15] 高海淑, 张玉敏, 吉兴全, 等. 基于场景聚类的主动配电网分布鲁棒综合优化[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(21): 32-41.
- GAO Haishu, ZHANG Yumin, JI Xingquan, et al. Scenario clustering based distributionally robust comprehensive optimization of active distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(21): 32-41.
- [16] 王智, 陶鸿俊, 蔡文奎, 等. 多时间尺度滚动优化在冷热电联供系统中的优化调度研究[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(2): 298-308.
- WANG Zhi, TAO Hongjun, CAI Wenkui, et al. Optimal scheduling research of multi-time-scale rolling optimization in CCHP system[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2023, 44(2): 298-308.
- [17] 吴艳娟, 张亦炫, 王云亮. 计及多重需求响应的综合能源系统多时间尺度低碳运行[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(2): 21-32.
- WU Yanjuan, ZHANG Yixuan, WANG Yunliang. Multi-time scale low carbon operation integrated energy system considering multiple integrated demand responses[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(2): 21-32.
- [18] 孔令国, 于家敏, 蔡国伟, 等. 基于模型预测控制的离网电氢耦合系统功率调控[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(9): 3139-3149.
- KONG Lingguo, YU Jiamin, CAI Guowei, et al. Power regulation of off-grid electro-hydrogen coupled system

- based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 3139-3149.
- [19] 林旗力, 戚宏勋, 黄晶晶, 等. 碱性-质子交换膜水电解复合制氢平准化成本分析[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(11): 3572-3580.
LIN Qili, QI Hongxun, HUANG Jingjing, et al. Levelized cost of combined hydrogen production by water electrolysis with alkaline-proton exchange membrane[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(11): 3572-3580.
- [20] 黄启帆, 陈洁, 曹喜民, 等. 基于碱性电解槽和质子交换膜电解槽协同制氢的风光互补制氢系统优化[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(12): 168-174.
HUANG Qifan, CHEN Jie, CAO Ximin, et al. Optimization of wind-photovoltaic complementation hydrogen production system based on synergistic hydrogen production by alkaline electrolyzer and proton exchange membrane electrolyzer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(12): 168-174.
- [21] 杨晓辉, 袁志鑫, 肖锦扬, 等. 考虑电池寿命的混合储能微电网优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 22-31.
YANG Xiaohui, YUAN Zhixin, XIAO Jinyang, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage microgrid considering battery life[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 22-31.
- [22] 郑文迪, 雷克波, 王向杰, 等. 考虑气-固两相储氢特性的电-氢充电站安全运行策略[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(18): 6965-6978.
ZHENG Wendi, LEI Kebo, WANG Xiangjie, et al. Safe operation strategy of electric-hydrogen charging station with gas-solid hydrogen storage characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(18): 6965-6978.
- [23] 闫群民, 刘语忱, 董新洲, 等. 基于 CEEMDAN-HT 的平抑光伏出力混合储能容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 43-53.
YAN Qunmin, LIU Yuchen, DONG Xinzhou, et al. Hybrid energy storage capacity optimization configuration for smoothing PV output based on CEEMDAN-HT[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 43-53.
- [24] SUN Q, WANG X, LIU Z, et al. Multi-agent energy management optimization for integrated energy systems under the energy and carbon co-trading market[J]. Applied Energy, 2022, 324: 119646.
- [25] HAN S, HE M, ZHAO Z, et al. Overcoming the uncertainty and volatility of wind power: day-ahead scheduling of hydro-wind hybrid power generation system by coordinating power regulation and frequency response flexibility[J]. Applied Energy, 2023, 333: 120555.
- [26] TANG F, HU W, ZHANG X, et al. Research on operation strategy of wind-solar-hydro power generation system based on pre-day and real-time two stage joint optimization model[C] // 2022 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia), July 8-11, 2022, Shanghai, China: 1145-1149.
- [27] 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.
- [28] DENG Z, JIANG Y. Optimal sizing of wind-hydrogen system considering hydrogen demand and trading modes[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(20): 11527-11537.
- [29] 左冠林. 考虑低碳制氢的微网优化配置与经济运行研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
ZUO Guanlin. Research on optimal configuration and economic operation of microgrid considering low-carbon hydrogen production[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [30] 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): 48-60.
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): 48-60.
- [31] 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): 8205-8215.
ZUO Fengyuan, ZHANG Yuqiong, ZHAO Qiang, 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 CSEE, 2022, 42(22): 8205-8215.

收稿日期: 2024-04-27; 修回日期: 2024-08-04

作者简介:

杨胜(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为可再生能源制氢系统优化运行; E-mail: 3053201521@qq.com

樊艳芳(1971—), 女, 通信作者, 硕士, 教授, 研究方向为新能源并网技术与综合能源系统。E-mail: fyf3985@xju.edu.cn

(编辑 周金梅)