

基于鲁棒模型预测控制的风光氢储耦合系统优化调度

刘越溢, 李虹

(新能源电力系统全国重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003)

摘要: 风光-氢-储耦合一体化系统是提高新能源消纳和促进氢经济发展的重要手段之一, 但风光氢负荷的高随机性和系统模型求解速度慢的问题给系统优化调度带来了困难, 为此提出了一种基于鲁棒模型预测控制(model predict control, MPC)-粒子群(particle swarm optimization, PSO)的多时间尺度优化调度模型。首先, 为更精准地剖析风光负荷中的不确定性因素, 采用变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)技术, 并采用动态时间规整(dynamic time warping, DTW)算法与 K-medoids 聚类方法结合, 得到风光负荷的不确定性以及系统运行场景; 而后, 构建风光-氢-储耦合系统模型和基于鲁棒 MPC-PSO 的多时间尺度优化调度模型; 继而, 采用鲁棒 MPC 和 PSO 算法结合, 实现系统运行滚动优化的快速解耦求解; 最后, 建立风光-氢-储耦合系统仿真算例进行分析。结果表明, 所提方法提升了制氢的经济性和风光消纳率, 与单一鲁棒 MPC 相比所提方法提高了求解效率。

关键词: 储氢; 多时间尺度; 变分模态分解; 动态时间规整; 优化调度

Optimal Scheduling of Wind-Solar-Hydrogen Storage Coupling System Based on Robust Model Predictive Control

LIU Yueyi, LI Hong

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China)

Abstract: The integrated wind-solar-hydrogen storage coupling system is one of the important means to improve the consumption of new energy and promote the development of hydrogen economy, but the high randomness of wind-solar-hydrogen load and the slow solution speed of the system model bring difficulties to the optimal scheduling of the system. Firstly, in order to analyze the uncertainty factors in the wind and solar load more accurately, the variational mode decomposition (VMD) technology is adopted, and the dynamic time warping (DTW) algorithm is combined with the K-medoids clustering method to obtain the uncertainty of the wind and solar load and the system operation scenario. Then, a wind-solar-hydrogen storage coupling system model and a multi-time-scale optimal scheduling model based on robust MPC-PSO are constructed. Then, the combination of robust MPC and PSO algorithm is used to realize the fast decoupling solution of rolling optimization of system operation. Finally, a simulation example of wind-solar-hydrogen-storage coupling system is established for analysis. The results show that the proposed method improves the economy of hydrogen production and the wind and solar absorption rate, and improves the solution efficiency compared with a single robust MPC.

Key words: hydrogen storage; multiple time scales; VMD; DTW; optimal scheduling

0 引言

氢能作为一种清洁且高效的新兴能源, 在全球

能源转型进程中, 引入氢能对于实现我国的“双碳”目标有着积极的推动作用。可再生能源发电的发展为以电解水制氢技术为主导的新能源领域注入了源源不断的生机与动力, 可再生能源制氢前景广阔且将成为未来的主流制氢方式^[1]。现已有多地建立了可再生能源电解水制氢工程, 表明了可再生能源电解水制氢的光明前景。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51607068)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51607068).

目前对可再生能源制氢系统的经济调度的研究,如文献[2]建立了一个包含经济、风光消纳、碳排放多目标的调度模型,采用小生境粒子群算法求解,使系统兼顾了经济性与环保。文献[3]采用概率性序列与机会约束方法有效平衡系统经济性与可靠性,构建的风光制氢合成氨系统模型验证了氢氨混燃的脱碳潜力,推动了能源系统绿色转型。文献[4]基于电力-交通网架结构与新能源分布情况提出配电网集群划分方法,建立多个氢能子系统间的气氢拖车交通运输及储运成本模型,使氢能子系统的选址定容更精细合理,有效降低了系统综合成本。上述文献研究对于风光和负荷等都是确定性优化,没有计及不确定性。然而可再生能源制氢生产需要稳定供应,可再生能源的大幅波动会导致产品品质下降^[5]。文献[6]采用盒式不确定集表征光伏出力和电负荷的不确定性构建了一个基于两阶段结构的鲁棒日前优化模型。文献[7]利用非参数预测技术生成描述系统不确定性的场景集建立了经济随机模型预测控制(model predict control, MPC)模型,提高系统的经济性和鲁棒性。然而,上述文献处理不确定性主要是多场景或鲁棒优化方法,目前缺少计及风光负荷时序不确定性的可再生能源制氢优化调度的研究。

以上研究文献仅关注可再生能源制氢的日前调度。文献[8]建立了综合考虑氢能、混合需求响应和绿证-碳交易机制的日前-日内-实时多时间尺度的优化调度模型,提高了系统经济性、低碳性和灵活性。文献[9]建立日前价格型综合需求响应(integrated demand response, IDR)和日内激励型IDR双重激励响应模型,有效发挥系统需求侧资源的作用,降低系统碳排放量,提高了系统运行稳定性,抑制源荷波动。文献[10]建立了日前-日内多时间尺度主动配电网调度模型,模型考虑了源荷储协同提高了系统灵活性,实现了风光全消纳,降低了系统运行成本。以上文献采用的多时间尺度方法都是非滚动优化,不能根据实时数据不断调整优化策略。文献[11]采用MPC算法利用精度更高的日内预测数据对系统设备进行滚动优化控制,减小了优化结果与实际结果的偏差,提高系统稳定性和经济性。文献[12]对含氢储微网系统进行了深入研究,提出了基于MPC算法的经济调度方案,显著提升了系统的整体经济效益。但上述基于MPC的

模型都是确定性优化,不能得到最优控制结果。文献[13]提出针对光储氢系统的两段式随机MPC方法,该方法提升了系统在运行过程中的经济效益。可再生能源制氢系统对系统的安全性要求较高,但随机MPC允许一定概率下违反约束,会使系统安全性降低^[14-16]。

针对上述风光氢储耦合系统的不确定性优化问题,本文提出一种多层级耦合的氢储系统经济运行模型。首先,通过变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)与动态时间规整(dynamic time warping, DTW)优化的K-medoids聚类算法,构建源-荷不确定性场景生成机制,实现典型运行工况的精准提取。在此基础上,设计鲁棒MPC与粒子群(particle swarm optimization, PSO)的协同决策框架,建立日前-日内的多时间尺度滚动优化模型。最终通过对比仿真实验与敏感性分析验证所建模型在应对源荷波动、提升系统经济性方面的优越性能。

1 考虑不确定性的典型场景生成

1.1 时间序列分解

目前常用的时间序列分解方法主要有经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)、集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)、DWT等方法,但这些方法都存在许多不足,包括模态混叠、端点效应、筛分迭代停止标准等问题。在此背景之下,本文采用VMD分解方法,VMD分解是一种基于迭代搜索变分模型寻找最佳解以确立每个分解分量中心频率与带宽的方法,此方法具有全然非递归性质,从而能显著规避模态混叠、端点效应等常见困扰。采用VMD分解方法获取风光出力和负荷的模态分量。通过对VMD分解的模态数进行灵敏性分析得到最佳的模态数,详细证明未免赘述已略写,最后取模态数为3,用随机分量表示风光出力和负荷的不确定性。VMD步骤详见文献[17]。

1.2 场景聚类

在实现场景聚类分析过程中通常采用K-means及K-medoids聚类算法。以上算法有易受噪声干扰的影响或依赖初始中心位置等缺点。为解决此问题,本文选择了DTW K-medoids算法替代传统聚类算法。面对相似性较强的风光负荷曲线,采用

DTW K-medoids 方法聚类充分利用 K-medoids 算法对噪声和异常值的鲁棒性以及 DTW 距离度量对时间序列形状和趋势的敏感性,进而获取更为精确且可信的聚类结果。DTW K-medoids 聚类具体步骤如下。

1)首先在样本中随机选择 k 个初始中心点。设聚类中心数据序列和样本数据序列为:

$$P_i = \{p_{(i,1)}, p_{(i,2)}, \dots, p_{(i,m)}\} \quad (1)$$

$$Q_j = \{q_{(j,1)}, q_{(j,2)}, \dots, q_{(j,n)}\} \quad (2)$$

式中: P_i 和 Q_j 分别为聚类中心数据序列和样本数据序列; $p_{(i,m)}$ 和 $q_{(j,n)}$ 分别为聚类中心数据和样本数据; m 和 n 分别为两个序列的总长度。

2)使用 DTW 代价函数计算到中心点的距离对样本进行划分。DTW 代价函数如下。

$$dis(s, l) = \sqrt{(p_{(i,s)} - q_{(j,l)})^2} \quad s \in [1, m], l \in [1, n] \quad (3)$$

$$D(s, l) = dis(s, l) + \min(D(s-1, l), D(s, l-1), D(s-1, l-1)) \quad (4)$$

式中: $dis(s, l)$ 为两个序列各点之间的距离; $D(s, l)$ 为代价函数,即两个序列点之间的累计距离; s 、 l 取最大值时即为两个序列的 DTW 距离。

3)再次计算每个聚类中心。

4)重复步骤 2)、3),直到聚类中心不再变化。

5)确定聚类结果。

2 风光氢储耦合一体化系统模型

2.1 风光氢储耦合一体化系统

风光氢储耦合一体化系统如图 1 所示。该系统由光伏电站、风力发电场、蓄电池系统、电解槽阵列、储氢罐及负荷等六大关键组成部分构成。风光氢储耦合一体化系统能够有效利用和转换电、氢两种能源,满足复杂的能源需求。

2.2 设备模型

2.2.1 电解槽模型

电解槽作为一种重要的能量转换装置,其主要功能是将电能转化为氢能^[18-21]。根据文献[22]可知温度对电解槽效率有影响,因此为避免温度的影响,采用轮流循环启停的方法,使电解槽阵列整体产氢效率波较小,即可以看作整体效率不变。电解槽的模型如下。

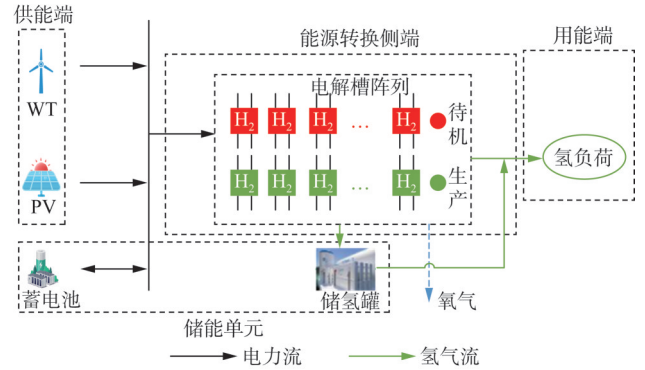


图1 风光氢储耦合一体化系统

Fig. 1 Wind-solar-hydrogen storage coupling integrated system

$$\begin{cases} H_{cl} = \eta_{cl} P_{cl} \\ n_{cl} = H_{cl} \Delta t / L_{h2} \end{cases} \quad (5)$$

氢气量计算方法如下。

$$n_{h2} = H_q \Delta t / L_{h2} \quad (6)$$

式中: H_{cl} 为电解槽输出氢功率; η_{cl} 为电解槽运行效率; P_{cl} 为电解槽消耗电功率; n_{cl} 为电解槽产生的氢气量; L_{h2} 为氢气低热值; n_{h2} 为氢气量; H_q 为氢功率; Δt 为控制时间间隔。

2.2.2 储能系统模型

1) 储氢罐。储氢罐在系统中起到了灵活调度的作用。储氢罐的工作状态与储氢量、压强、储存状态等有关,具体模型如下。

$$\begin{cases} n_{cq} = \int n_{cq,i} - n_{cq,o} dt + n_0 \\ P_{cq} = n_{cq} RT / V_{cq} \\ S_1 = P_{cq} / P_n \end{cases} \quad (7)$$

式中: n_{cq} 为储氢罐内的储氢量; $n_{cq,i}$ 为储氢罐的充入氢气量; $n_{cq,o}$ 为储氢罐的释放氢气量; n_0 为储氢罐的初始氢气量; P_{cq} 为储氢罐的压强; R 为气体常数; T 为储氢罐的开式温度; V_{cq} 为储氢罐的体积; P_n 为储氢罐所承受的最大压强; S_1 为储氢罐的存储状态,取值在 0~1。

2) 蓄电池。蓄电池通过储存和释电能维系统电能平衡。蓄电池的模型如下。

$$S_2(t) = S_2(t-1) + b_2 \frac{P_B \eta_c}{E_o} \Delta t - (1 - b_2) \frac{P_B}{\eta_d E_o} \Delta t \quad (8)$$

式中: S_2 为蓄电池的储能状态; b_2 为充放电标志位; P_B 为蓄电池工作功率; η_c 为蓄电池充电效率; η_d 为蓄电池放电效率; E_o 为蓄电池的额定容量。

3 多时间尺度优化调度模型

3.1 基于鲁棒 MPC-PSO 的多时间尺度优化调度框架

本文采用多时间尺度优化调度方法分为日前调和日内调度两部分。对于日前调度根据日前短期预测的负荷、光伏出力、风电出力，并对响应速度较慢的设备制定调度计划确定设备启停次数及设备状态。日内调度是在日前调度的基础上根据对负荷、光伏出力、风电出力的超短期预测，对响应速度较快的设备进行调度来减少日前调度的误差。本文日内调度采用鲁棒 MPC 和 PSO 算法进行滚动优化。基于鲁棒 MPC-PSO 的多时间尺度优化调度框架如图 2 所示。

3.2 日前优化调度模型

1) 目标函数

本文设置的前日优化调度的目标以保证风光-氢-储耦合系统的运行成本 F 最低，包括运行维护成本 f_1 、惩罚成本 f_2 。目标函数如下。

$$\min F = f_1 + f_2 \quad (9)$$

(1) 运行维护成本

$$f_1 = \sum_{t=1}^T (c_{pv} P_{pv} + c_{el} H_{el} + c_{cq} H_{cq} + c_{wt} P_{wt} + c_B P_B) \quad (10)$$

式中： c_{pv} 、 c_{wt} 分别为风、光电价； c_{el} 、 c_{cq} 、 c_B 分别为电解槽、储氢罐、蓄电池的单位维护成本； P_{pv} 为光伏的输出功率； P_{wt} 为风电输出功率； H_{cq} 为储氢罐的出力。

(2) 惩罚成本

$$f_2 = \alpha \sum_{t=1}^{24} P_{pv, cur} + \beta \sum_{t=1}^{24} P_{wt, cur} + \sum_{i=1}^2 \gamma_i (S_{i, end} - S_{i, 0})^2 \quad (11)$$

式中： α 、 β 分别为单位弃光惩罚成本和单位弃风惩罚单位成本； γ_i 为储能设备的单位储能状态惩罚成本； $P_{pv, cur}$ 、 $P_{wt, cur}$ 分别为弃光、弃风功率； $S_{i, 0}$ 、 $S_{i, end}$ 分别为储能设备的始末储能状态； i 为 1、2 时分别表示储氢罐、蓄电池。

2) 约束条件

(1) 功率平衡约束

电功率平衡约束可以表示为：

$$P_{wt} + P_{pv} + P_B = P_{el} \quad (12)$$

氢功率平衡约束可以表示为：

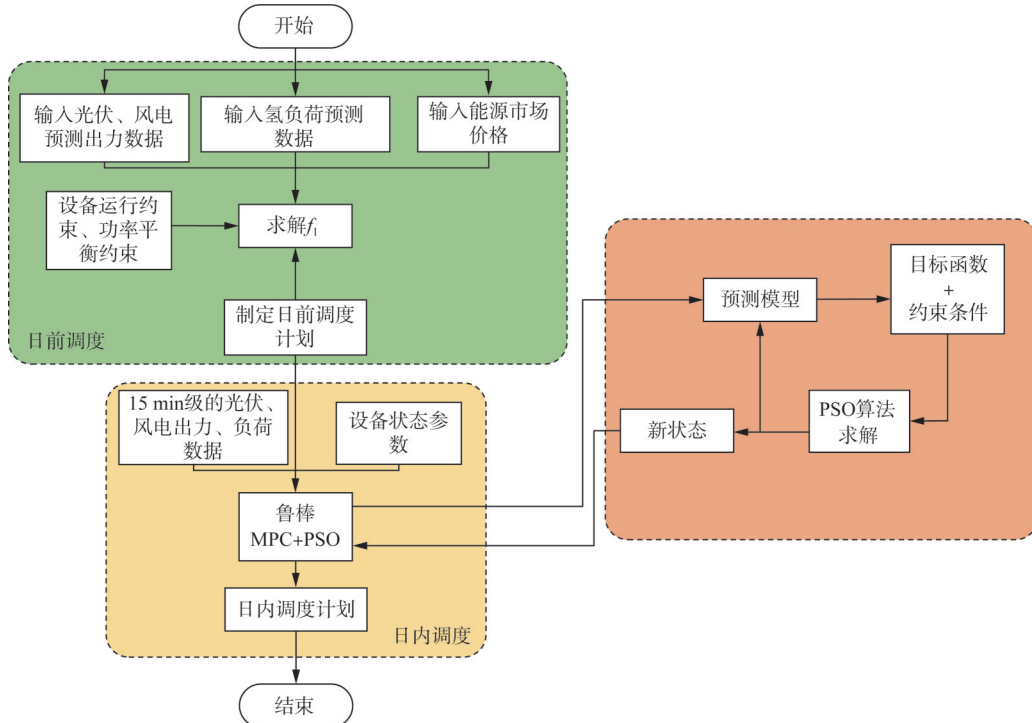


图 2 基于鲁棒 MPC-PSO 的多时间尺度调度模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of multi-time scale scheduling model based on robust MPC-PSO

$$H_{el} + H_{cq} = H_{load} \quad (13)$$

式中 H_{load} 为系统氢负荷。

(2)设备运行约束

$$H_{el, \min} \leq H_{el} \leq H_{el, \max} \quad (14)$$

式中 $H_{el, \max}$ 、 $H_{el, \min}$ 分别为电解槽输出氢功率上下限。

(3)风光出力约束

$$\begin{cases} P_{i, \min} \leq P_i \leq P_{i, \max} \\ P_i \in \{P_{wt}, P_{pv}\} \end{cases} \quad (15)$$

式中 $P_{i, \max}$ 、 $P_{i, \min}$ 分别为分别风光出力上下限。

(3)储能运行约束

$$\begin{cases} P_{j, \min} \leq P_j \leq P_{j, \max} \\ P_j \in \{P_B, H_{cq}\} \\ S_{i, \min} \leq S_i \leq S_{i, \max} \\ S_i \in \{S_1, S_2\} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $P_{j, \max}$ 、 $P_{j, \min}$ 分别为储能系统设备出力上下限; $S_{j, \max}$ 、 $S_{j, \min}$ 分别为储能设备储能状态的上下限; P_j 为储能系统设备工作功率; S_i 为储能设备储能状态。

3.3 日内滚动优化调度模型

针对风光-氢-储耦合一体化系统调度问题, 选取各设备输出功率作为状态变量 $\mathbf{x}(k)=[P_{wt}(k), P_{pv}(k), P_B(k), H_{el}(k), H_{cq}(k)]^T$; 选取储能设备和电解槽工作功率变化量作为控制变量 $\mathbf{u}(k)=[\Delta P_B(k), \Delta H_{el}(k), \Delta H_{cq}(k)]^T$; 选取源荷的波动作为扰动, 该扰动是有界扰动, 且上下界分别为表1所示上下限, $\mathbf{w}(k)=[\Delta P_{wt}(k), \Delta P_{pv}(k), \Delta H_{load}(k)]^T$ 。建立的状态空间模型如下。

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{D}\mathbf{w}(k) \quad (17)$$

$$\text{式中: } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

日内滚动优化是为了避免源荷预测不准确对日内调度的影响, 日内调度代价函数为日内设备实际出力和日前调度计划的偏差最小, 使用PSO算法对代价函数求解。

$$\begin{cases} J = \min \left(\sum_{i=1}^5 \|x_i(k) - x_{i, \text{ref}}(k)\|_Q^2 + \sum_{j=1}^3 \|u_j(k)\|_G^2 \right) \\ x_i \in \{P_{wt}, P_{pv}, P_B, H_{el}, H_{cq}\} \\ x_{i, \text{ref}} \in \{P_{wt, \text{ref}}, P_{pv, \text{ref}}, P_{B, \text{ref}}, H_{el, \text{ref}}, H_{cq, \text{ref}}\} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $P_{wt, \text{ref}}$ 、 $P_{pv, \text{ref}}$ 、 $P_{B, \text{ref}}$ 、 $H_{el, \text{ref}}$ 、 $H_{cq, \text{ref}}$ 分别为日前调度得到的风电出力、光伏出力、蓄电池出力、电解槽出力、储氢罐出力; $x_i(k)$ 为状态变量 k 时刻的第 i 个设备预测出力, i 为 1~5 时分别表示风电、光伏、蓄电池、电解槽、储氢罐设备; $x_{i, \text{ref}}(k)$ 为状态变量 k 时刻第 i 个设备参考出力; $u_j(k)$ 为控制变量 k 时刻的第 j 个设备功率变化量; x_i 为各设备预测出力; $x_{i, \text{ref}}$ 为各设备的参考出力, 即日前各设备出力; $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{G}$ 分别为状态变量和控制变量的权重矩阵。

4 算例分析

本文算例选择一个风光-氢-储耦合系统, 对基于鲁棒MPC的多时间尺度模型, 采用图3所示求解框架进行求解。成本参数见文献[23]。

4.1 时间序列分解及场景聚类

1) 基于VMD算法的时间序列分解。

将3个月的风光负荷数据以天为单位进行VMD分解, 分解为长期分量、周期分量和随机分量, 各分量分解结果如图4所示。由图4可知, 长期分量虽有波动, 但长期来看比较稳定, 对于风光负荷的周期分量也明显有周期趋势, 而随机分量没有明显的规律, 因此用随机分量来表示风光负荷的不确定性。

表1 随机分量波动分量上/下限

Tab. 1 Upper and lower limits of the random component

分类	fluctuate the component	
	下限	上限
光伏	-10.43	11.28
风电	-8.61	9.27
氢负荷	-6.18	6.42

2) 基于DTW K-medoids的典型场景聚类。

针对风光氢曲线数据, 分别采用K-means聚类、K-medoids聚类和DTW K-medoids聚类进行处理分析, 聚类结果如图5所示。第一种方法选取的聚类结果是质心, 后两种方法选取的聚类结果都为真实值。对于风光氢聚类结果, 第一种方法对噪声信号具有一定的敏感度, 导致结果偏离实际, 波动

较大^[23-24]。第二种方法采用的是欧氏距离,没有反应出时间序列的相似性,导致风电出力结果波动较大^[25-26]。而本文所提方法结果波动最小,且风光负荷结果形状也更合理,因为本文方法是在考虑了时间序列数据的形状和结构后选取的真实值,其结果更符合实际。

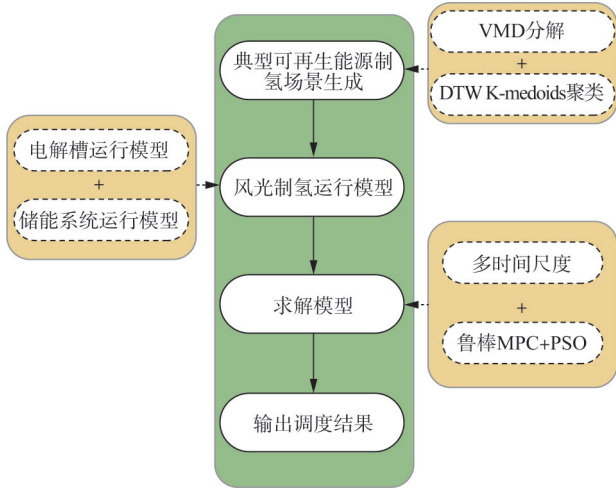


图3 风光氢储耦合一体化系统调度模型求解图

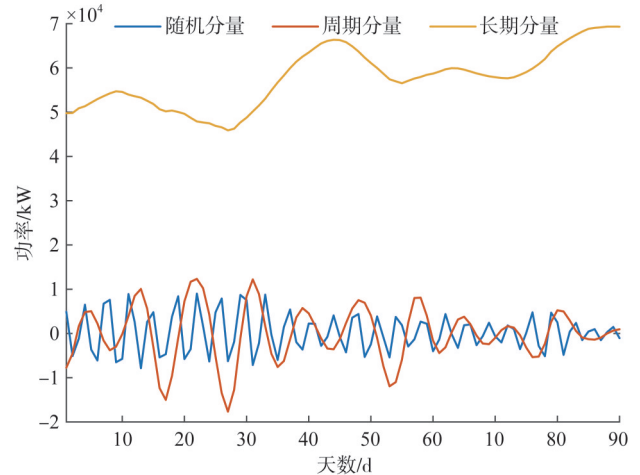
Fig. 3 Solution diagram of the scheduling model of the wind-solar-hydrogen storage coupling integrated system

4.2 风光氢储耦合系统经济性分析

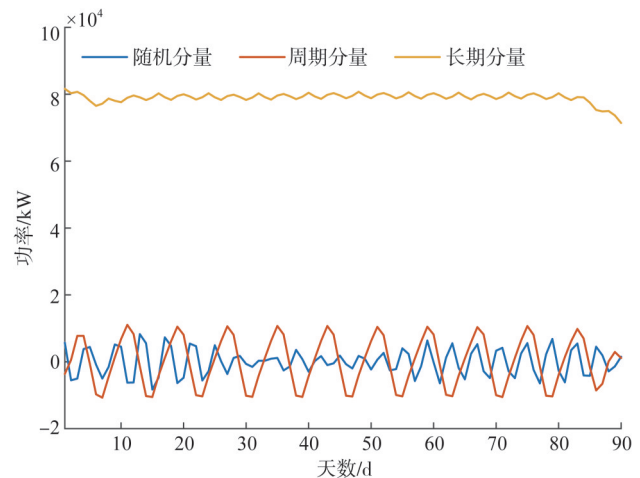
为说明本文方法对风光氢储耦合系统优化调度的影响,本文设置3组对比场景:1)考虑不确定性的多时间尺度非滚动优化方法;2)基于常规MPC的多时间尺度优化方法;3)本文所提方法。

本节首先对比不同场景的经济成本和新能源消纳率,以说明本文策略对系统的提升,具体结果如表2所示。对比场景1和场景2可知,采用MPC算法能够在一定程度上降低经济成本,由表2可知降低2.03%,新能源消纳率提升了1.5%,这是因为MPC滚动优化考虑了能源系统的复杂性和动态调整需求,有助于促进经济运行的高效化。对比场景2和场景3,可知,本文所提方法降低了4.15%的系统经济成本,新能源消纳提升了1.2%,因为鲁棒MPC更适合对不确定性的处理,而常规MPC对不确定性的处理相对较差。

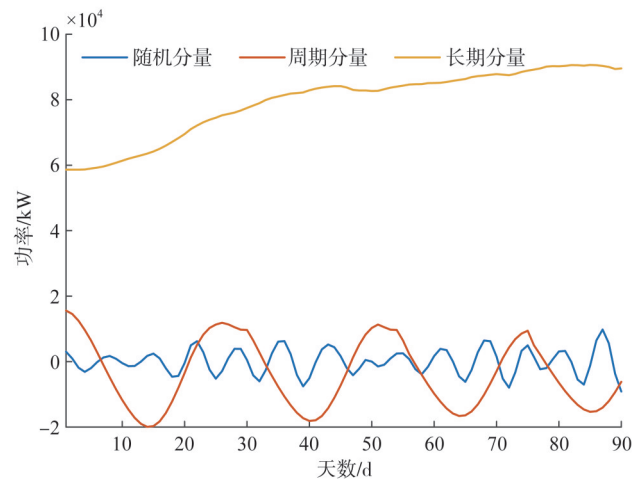
为进一步说明本文策略对系统的影响,对比日前调度和日内调度,日前调度对风光负荷的日前预测不准确,日内实际风光负荷功率与日前预测结果相比波动较大,系统无法及时响应波动,而日内调



(a) 光伏出力分解



(b) 风电出力分解



(c) 氢负荷分解

图4 VMD分解

Fig. 4 VMD decomposition

度制定的调度计划更能适应风光负荷功率的波动。在日内调度中,采用鲁棒MPC-PSO算法进行调度

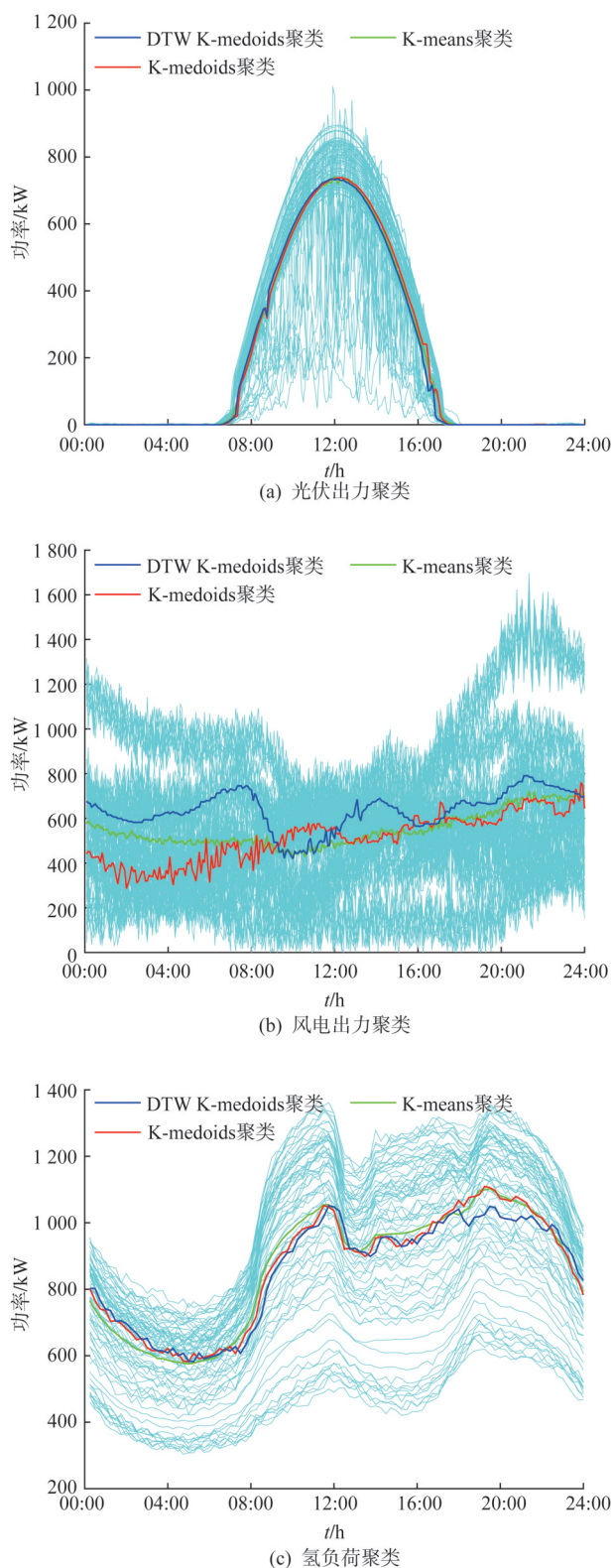


图5 DTW K-medoids聚类结果

Fig. 5 DTW K-medoids clustering results

优化。场景3的日前、日内调度结果分别如图6—7所示。在4时—10时,风电出力水平较高给电解槽

表2 不同场景下的经济成本

Tab. 2 Economic costs in different scenarios

场景	运行成本/元	新能源消纳/%	成本降低百分比/%
场景1	25 583.4	92.8	
场景2	25 064.5	94.3	2.03
场景3	24 521.1	95.5	4.15

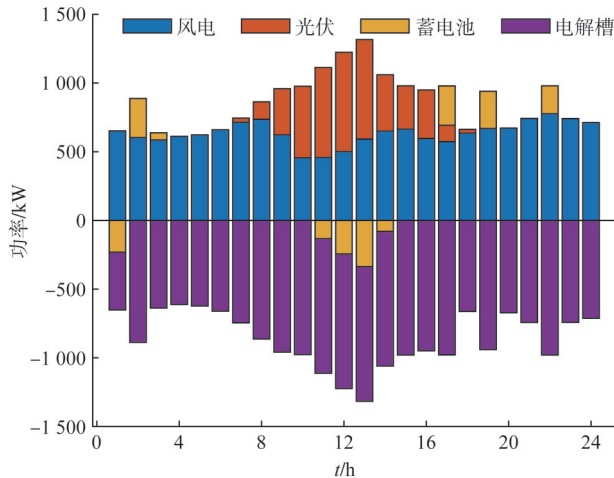
供电,电解槽出力较高在满足了氢负荷之后,将多余的氢气存储在储氢罐中,以便在电解槽出力不足时,满足氢负荷供应。在13时—15时,日内阶段与日前阶段相比风电出力减少,光伏出力增大,多余电能储存在蓄电池,将电解槽产生的过量氢气储存于储氢罐内。在18时—24时,此时主要由风电给电解槽供电,在风电出力不足时蓄电池出力为电解槽供电,电解槽出力不能满足氢负荷供应,储氢罐将存储的氢气释放,以此来确保氢负荷的稳定供给。在其余时间段内,日内阶段的调度结果与日前阶段的差异相对较小。算例表明,本文所提方法具有优越的性能,不仅能够有效处理风光负荷的不确定性变化,而且也能显著提升可再生能源制氢系统的经济效益。

灵敏性:风光电价和氢气售价同样会影响系统制氢收益,设置氢气售价在2~3元/ Nm^3 ,风光电价在0.2~0.3元/ kWh 条件下,当风电场电价发生变动时,光伏电站电价将保持不变,反之亦然。将所提方法和传统常规方法系统利润对比,如图8所示。由结果可知,氢气售价越高,风光电价越低时所提方法对系统利润的提升越高。

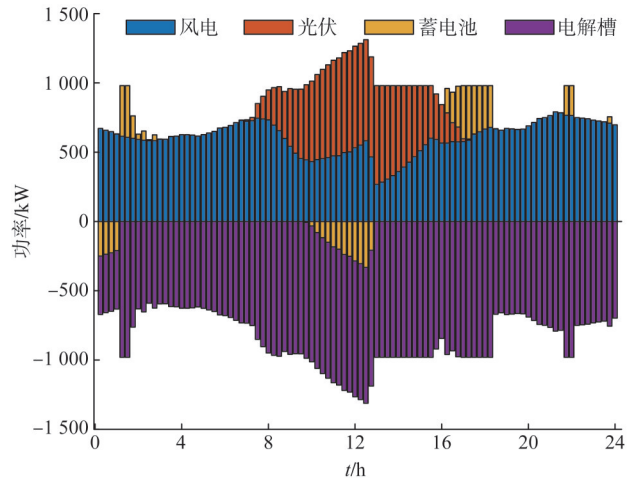
为更好地评估系统的性能,测试储能系统初始状态对系统运行的影响,设置蓄电池初始SOC为0.2~0.8,储氢罐初始SOC值为0.2~0.8条件下,评估储能的储能循环效率和系统的弃风弃光率的变化。测试结果如表3—4所示。由结果可知,蓄电池和储氢罐的初始状态在0.4~0.6之间时对系统运行最佳,且此时储能系统使用寿命较高。

4.3 求解算法对比分析

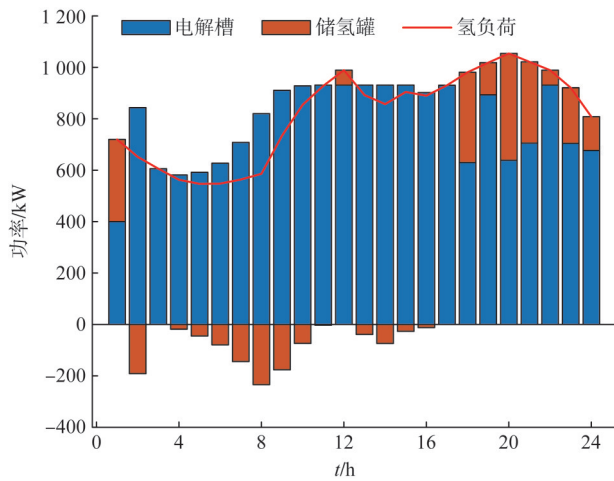
为说明本文所提算法的优越性,对比本文算法和单一鲁棒MPC算法的求解速度,结果如表5所示。由结果可知,本文所提方法在求解效率方面比单一鲁棒MPC有所提升。为进一步验证鲁棒MPC-PSO算法性能,扩大算例范围两种算法分别对3、5、10、15天日内调度进行求解,结果如图



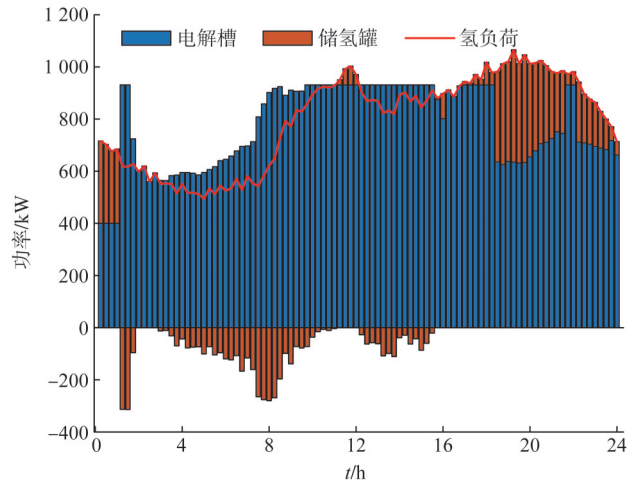
(a) 日前电功率平衡



(a) 日内电功率平衡



(b) 日前氢功率平衡



(b) 日内氢功率平衡

图6 日前调度结果

Fig. 6 Result of the day-ahead scheduling

图7 日内调度结果

Fig. 7 Intraday scheduling results

9所示,由结果可知,随着求解规模的增大,鲁棒 MPC-PSO 算法与鲁棒 MPC 算法求解速度差距增大。

5 结论

本文基于风光-氢-储耦合系统,研究考虑了风光氢时序不确定性和鲁棒 MPC 的多时间尺度优化模型,并提出一种鲁棒 MPC-PSO 求解方法。基于算例测试结果,可得如下结论。

1) 本文所提的 VMD 分解和 DTW K-medoids 聚类方法,能够更好地表达出风光负荷的不确定性,构建更符合实际的系统运行场景。

2) 本文所提出的基于鲁棒 MPC 的多时间尺度模型,能够显著提升系统的经济性和风光消纳率。

3) 将鲁棒 MPC 和 PSO 算法结合,在保证日内实时滚动调度同时提高了模型的高效求解优化问题。

在后续的研究中,将进一步聚焦制氢企业与能源市场的动态博弈机制,例如基于演化博弈论或主从博弈模型,量化分析企业技术路线选择与电力、燃气等能源市场价格波动之间的耦合效应;探讨多重不确定性如碳价政策突变、电解槽效率波动等,对系统运行或博弈均衡点的冲击;研究需求响应机制如氢储能参与电力现货市场、工业用户柔性负荷调度等应用,推动氢能需求侧的市场化参与。为氢能产业与企业战略规划提供更具弹性的理论支撑。

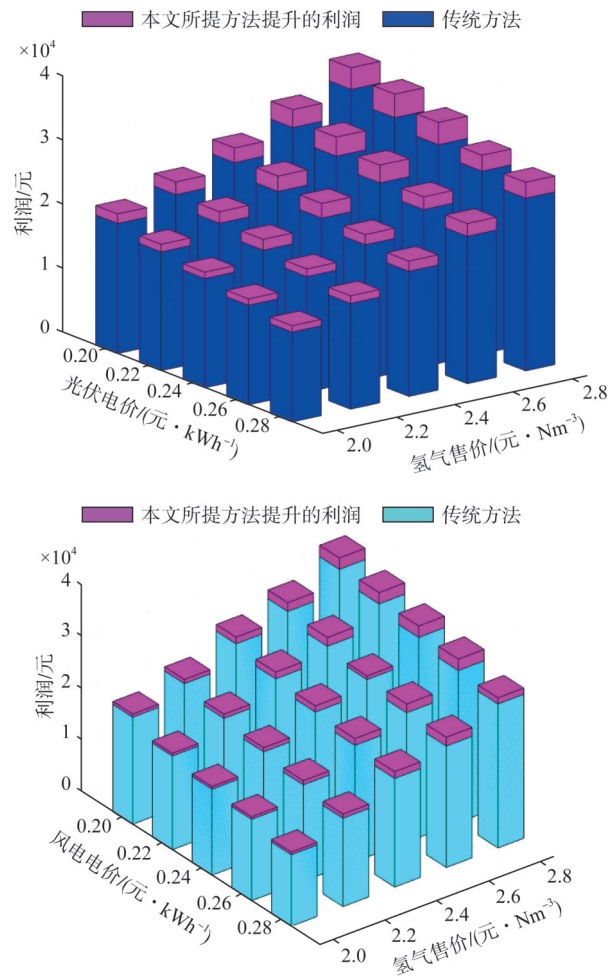


图 8 不同风光电价和氢气售价下传统方法和本文所提方法所得利润

Fig. 8 Profits from the traditional method and the method proposed in this paper under different wind and solar prices and hydrogen prices

表 3 蓄电池初始状态的影响			
Tab. 3 Influence of the initial state of the battery			
初始 $S_2/\%$	循环效率/ $\%$	弃风弃光率/ $\%$	日均循环次数
20	85.2	3.9	2.3
40	94.5	4.1	1.8
60	93.8	5.3	1.6
80	89.6	6.4	1.2

表 4 储氢罐初始状态的影响			
Tab. 4 Impact of the initial state of the hydrogen storage tank			
初始 $S_1/\%$	循环效率/ $\%$	弃风弃光率/ $\%$	日均循环次数
20	89.6	3.5	2.5
40	95.4	4.2	1.9
60	96.2	4.8	1.5
80	90.4	5.6	1.3

表 5 两种模型结果对比	
Tab. 5 Comparison of the results of the two models	
算法	求解时长/s
鲁棒 MPC	17.37
鲁棒 MPC-PSO	16.55

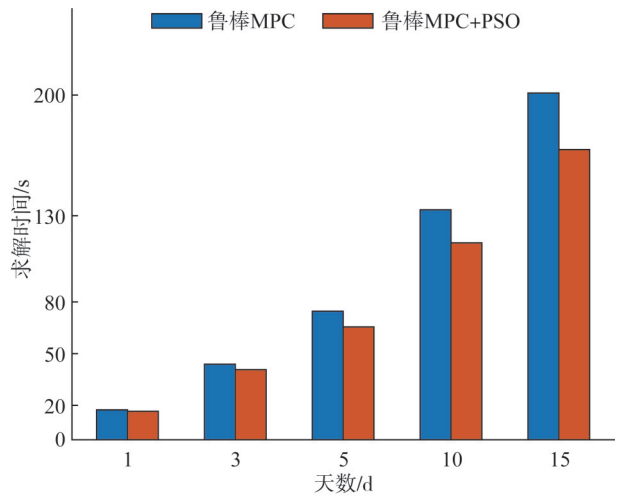


图 9 两种算法求解速度对比

Fig. 9 Comparison of the solution speed of the two algorithms

参考文献

[1] 庄富豪, 吴军, 朱瑞金, 等. 绿电制氢产业关键技术现状及展望[J/OL]. 综合智慧能源, 1 – 9[2025 – 03 – 11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1461.TK.20250218.1123.002.html>.
ZHUANG Fuhao, WU Jun, ZHU Ruijin, et al. Current status and prospects of key technologies in the green hydrogen production industry [J/OL]. Comprehensive Smart Energy, 1 – 9 [2025 – 03 – 11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1461.TK.20250218.1123.002.html>.

[2] 孙靓雨, 林泽源, 李伟. 考虑氢储能的多目标综合能源优化配置方案研究[J]. 高压电器, 2024, 60(7):88 – 96.
SUN Liangyu, LIN Zeyuan, LI Wei. Research on multi-objective comprehensive energy optimal allocation scheme considering hydrogen energy storage [J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(7):88 – 96.

[3] 师旭露, 邢海军, 汪航, 等. 基于机会约束的风光制氢合成氨系统低碳优化调度[J/OL]. 高电压技术, 1 – 14[2025 – 03 – 11]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20241090>.
SHI Xulu, XING Haijun, WANG Hang, et al. Low-carbon optimal scheduling of wind-solar hydrogen production and ammonia synthesis system based on opportunity constraint[J/OL]. High Voltage Tecnolgy, 1 – 14[2025 – 03 – 11]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20241090>.

[4] 邱洁, 梁财豪, 朱永强, 等. 考虑氢能储运特性的配电网集群划分与氢能系统选址定容策略[J]. 中国电力, 2024, 57(8): 12 – 22.
QIU Jie, LIANG Caihao, ZHU Yongqiang, et al. Cluster configuration of electric-hydrogen coupled distribution network

- considering hydrogen energy transport characteristics [J]. *Electric Power*, 2024, 57(8):12–22.
- [5] 丁显, 冯涛, 何广利, 等. 风电光伏波动性电源对电解水制氢电解槽影响的研究进展[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(10):3275–3284.
- DING Xian, FENG Tao, HE Guangli, et al. Research progress of the influence of wind power and photovoltaic of power fluctuation on water electrolyzer for hydrogen production [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(10):3275–3284.
- [6] 王瑞琪, 王新立, 郭光华, 等. 农村光-氢-沼储能综合能源系统建模与鲁棒优化调度[J]. *中国电力*, 2023, 56(5):89–98.
- WANG Ruiqi, WANG Xinli, GUO Guanghua, et al. Modeling and robust optimal dispatch of rural integrated energy system considering PV-hydrogen-methane energy storage characteristics [J]. *Electric Power*, 2023, 56(5):89–98.
- [7] 黄宇, 周新鹏, 郭浩德, 等. 风光氢耦合系统的经济随机模型预测控制方法研究[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(8):144–153.
- HUANG Yu, ZHOU Xinpeng, GUO Haode, et al. Research on predictive control method of economic stochastic model for wind-solar-hydrogen coupling system [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2024, 45(8):144–153.
- [8] 郭尊, 安之, 魏楠, 等. 计及氢能多环节利用和混合需求响应的综合能源系统多时间尺度低碳优化[J]. *供用电*, 2024, (2):52–63, 72.
- GUO Zun, AN Zhi, WEI Nan, et al. Multi-time scale low-carbon optimization of an integrated energy system considering the multi-link utilization of hydrogen energy and mixed demand response [J]. *Distribution & Utilization*, 2024, 41(2):52–63, 72.
- [9] 刘光宇, 韩东升, 刘超杰, 等. 考虑双重需求响应及阶梯型碳交易的综合能源系统双时间尺度优化调度[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(5):218–225.
- LIU Guangyu, HAN Dongsheng, LIU Chaojie, et al. Dual time scale optimal scheduling of integrated energy system considering dual demand response and stepped carbon trading [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(5):218–225.
- [10] 董哲源, 徐天奇, 李琰, 等. 考虑源荷储协同的主动配电网多时间尺度优化调度[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(24):10321–10329.
- DONG Zheyuan, XU Tianqi, LI Yan, et al. Multi-time scale optimal scheduling of active distribution network considering source load storage coordination [J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(24):10321–10329.
- [11] 陈宇星, 梁芙蓉, 尤炜, 等. 含分布式光伏的配电网模型预测控制优化方法[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(6):100–109.
- CHEN Yuxing, LIANG Furong, YOU Wei, et al. Predictive control optimization method for distribution network model with distributed photovoltaics [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(6):100–109.
- [12] 李佳欣, 王智伟. 基于模型预测控制的风光储综合能源系统优化调度[J]. *分布式能源*, 2024, 9(1):43–53.
- LI Jiaxin, WANG Zhiwei. Optimal scheduling of wind-solar-storage integrated energy system based on model predictive control [J]. *Distributed Energy Resources*, 2024, 9(1):43–53.
- [13] 贾士铎, 康小宁, 田博文, 等. 计及出行行为调整的综合能源系统双层博弈优化策略[J]. *西安交通大学学报*, 2024, 58(4):54–63.
- JIA Shiduo, KANG Xiaoning, Tian Bowen, et al. Optimization strategy of two-layer game in integrated energy system considering travel behavior adjustment [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2024, 58(4):54–63.
- [14] 杨茂, 崔宇, 马苗苗, 等. 考虑时间差异性的综合能源系统多层协调优化调度[J]. *可再生能源*, 2023, 41(9):1239–1246.
- YANG Mao, CUI Yu, MA Miaomiao, et al. Multi-layer coordination and optimal scheduling of integrated energy system considering time differences [J]. *Renewable Energy*, 2023, 41(9):1239–1246.
- [15] CHUNJUN H, YI Z, SHI Y, et al. Economic and resilient operation of hydrogen-based microgrids: an improved MPC-based optimal scheduling scheme considering security constraints of hydrogen facilities [J]. *Applied Energy*, 2023 (335):120762.1–120762.10.
- [16] 王翰林, 赵建立, 张沛超, 等. 光储氢集成系统的随机模型预测控制方法[J/OL]. *电力自动化设备*, 1–17 [2024–12–3]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202405029>.
- WANG Hanlin, ZHAO Jianli, ZHANG Peichao, et al. Stochastic model predictive control of pv-storage-hydrogen integrated system [J/OL]. *Electric Power Automation Equipment*, 1–17 [2024–12–3]. <http://doi.org/10.16081/j.epae.202405029>.
- [17] 周兴昊, 马瑞, 田滨滨, 等. 基于VMD分解降噪的输电线路金具缺陷探测技术[J/OL]. *控制工程*, 1–9 [2024–12–3]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1476>.
- ZHOU Xinghao, MA Rui, TIAN Binbin, et al. Noncontact detection technology for transmission line fittings based on acoustic video defect perception [J/OL]. *Control Engineering*, 1–9 [2024–12–3]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1476>. TP. 20241126.0929.003.html.
- [18] WANG X, LI B, WANG Y, et al. A bargaining game-based profit allocation method for the wind-hydrogen-storage combined system [J]. *Applied Energy*, 2022(310):118472.
- [19] 伊国通, 赵辉, 王红君, 等. 基于分布鲁棒优化的风光氢微电网容量配置方法研究[J]. *可再生能源*, 2024, 42(11):1519–1526.
- YI Guotong, ZHAO Hui, WANG Hongjun, et al. Research on capacity allocation method of wind-solar-hydrogen microgrid based on distributed robust optimization [J]. *Renewable Energy*, 2024, 42(11):1519–1526.
- [20] 商伟情. 多场景风光耦合制氢系统优化配置研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- [21] 张韶华, 王必恒, 石城, 等. 基于分布鲁棒优化的电热综合能源配网系统与氢能源站协同优化[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(12):36–43.
- ZHANG Shaohua, WANG Biheng, SHI Cheng, et al. Cooperative distributionally robust dispatch of integrated electricity-heat energy distribution system and hydrogen fueling stations [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(12):36–43.
- [22] 张文韬, 周家辉, 徐钢, 等. 计及电解槽自保温的风光制氢系统研究[J]. *现代化工*, 2024(4):204–208, 215.
- ZHANG Wentao, ZHOU Jiahui, XU Gang, et al. Research on wind-solar energies-driven hydrogen production system considering self-insulation at electrolyzer cell [J]. *Modern Chemical Industry*, 2024, 44(4):204–208, 215.

(下转第 118 页 Continued on Page 118)