



## 风光氢储综合能源系统日前经济调度

徐桂芝 梁丹曦 宋洁 康伟 赵雪莹 郜捷

### Day-ahead Economic Dispatch of Wind-photovoltaic-HESS-BESS Integrated Energy System

XU Guizhi, LIANG Danxi, SONG Jie, KANG Wei, ZHAO Xueying, GAO Jie

引用本文:

徐桂芝, 梁丹曦, 宋洁, 等. 风光氢储综合能源系统日前经济调度[J]. 现代电力, 2023, 40(6): 939-946. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0116

XU Guizhi, LIANG Danxi, SONG Jie, et al. Day-ahead Economic Dispatch of Wind-photovoltaic-HESS-BESS Integrated Energy System[J]. Modern Electric Power, 2023, 40(6): 939-946. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0116

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0116>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 计及电转气的区域综合能源系统日前优化调度

A Day-Ahead Optimal Scheduling of Regional Integrated Energy System Considering Power to Gas

现代电力. 2022, 39(5): 554-561 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0132>

#### 基于机会约束的多能源枢纽电气互联综合能源系统日前经济调度

Day-ahead Economic Dispatch for Electricity-Gas Integrated Energy System with Multiple Energy Hubs based on Chance Constraints

现代电力. 2020, 37(2): 197-204 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0966>

#### 基于改进海鸥优化算法的新能源制氢调度研究

Research on Scheduling Optimization of New Energy Based Hydrogen Production Using Improved Seagull Algorithm

现代电力. 2023, 40(5): 669-678 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0095>

#### 基于改进郊狼算法的新能源制氢能量优化调度

Energy Optimal Scheduling of New Energy Hydrogen Production Based on Improved Coyote Algorithm

现代电力. 2022, 39(5): 514-520 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0194>

#### 光储微电网两阶段日前能量管理策略

Two-stage Day-ahead Energy Management Strategy for Microgrid With Photovoltaic Energy Storage

现代电力. 2023, 40(4): 546-553 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0005>

#### 考虑高比例新能源消纳的微能源网日前经济调度

Day-ahead Economic Dispatch of Micro-energy Grid Considering High Proportion of Renewable Energy Consumption

现代电力. 2022, 39(2): 236-245 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0050>

# 风-光-氢-储综合能源系统日前经济调度

徐桂芝, 梁丹曦, 宋洁, 康伟, 赵雪莹, 郜捷

(全球能源互联网研究院有限公司, 北京市 昌平区 102211)

## Day-ahead Economic Dispatch of Wind-photovoltaic-HESS-BESS Integrated Energy System

XU Guizhi, LIANG Danxi, SONG Jie, KANG Wei, ZHAO Xueying, GAO Jie

(Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd, Changping District, Beijing 102211, China)

**摘要:** 为了实现风-光-氢-储综合能源系统实时跟踪电网日前发电计划的优化调度, 并考虑峰谷电价规则, 结合储能系统时空位移特性, 使综合能源系统制氢、氢燃料电池发电经济效益最高, 首先建立了风-光-氢-储各子系统数学模型及以电力经济最优为目标的日前优化调度模型, 综合考虑系统功率平衡、运行状态、安全状态等指标约束, 设定氢储系统优先出力对应的权重系数, 采用智能群优化算法对系统目标函数进行迭代优化求解; 最后根据某地风光负荷数据及分时电价信息, 对所提优化调度方法在 Matlab 中进行分析验证, 得到风-光-氢-储综合能源系统各子系统功率分配情况以实现最优经济性以及对电网日前调度指令的实时跟踪。

**关键词:** 风-光-氢-储综合能源系统; 日前经济调度; 氢储能; 智能群优化算法; 多能耦合

**Abstract:** The objective of this paper is to realize the optimal scheduling of wind-photovoltaic-HESS-BESS integrated energy system for real-time tracking of power grid day-ahead generation schedule. Under the peak-valley electricity price mechanism, combined with the spatial-temporal displacement characteristics of the energy storage system, the comprehensive energy system has the highest income from controlled hydrogen production and hydrogen fuel cell power generation. In this paper, we established the mathematical model of subsystems of wind, photovoltaic, HESS and BESS, and proposed a day-ahead optimal scheduling model aiming at the optimal economic benefits of the power system. Comprehensively considering the constraints of system power balance, operation state and safety state, the paper set the weight coefficient corresponding to the priority output of the HESS and the BESS. The intelli-

**基金项目:** 国家电网公司科技项目(百千瓦级氢利用关键技术研究与示范)(5400-201919487A-0-0-00)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(5400-201919487A-0-0-00)

gent swarm optimization algorithm was used to solve the system objective function iteratively. Finally, according to the wind data, photovoltaic data, load data and time-of-use price information of a certain place, the proposed optimal scheduling method was analyzed and verified in Matlab, and the power distribution of each subsystem of the wind-photovoltaic-HESS-BESS integrated energy system was obtained to achieve the optimal economy and real-time tracking of the day-ahead dispatching instructions of the power grid.

**Keywords:** wind-photovoltaic-hydrogen-ESS integrated energy system; day-ahead optimal scheduling; hydrogen energy storage system; intelligent swarm optimization algorithm; multi energy coupling

**DOI:** 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0116

## 0 引言

在“碳达峰·碳中和”目标下我国能源清洁化转型是大势所趋, 近年来, 我国可再生能源的装机容量正在迅猛增加, 根据国家能源局统计, 截至 2020 年底, 全国可再生能源发电装机达到 9.34 亿 kW, 同比增长约 17.5%。其中, 风电装机 2.81 亿 kW、光伏发电装机 2.53 亿 kW。然而, 由于多数可再生能源间歇性和供应的不确定性问题, 无法适应不同地点用户的时变负荷需求, 且随着未来能源结构及电网形态的变化, 急需解决对应的功率平衡调度及可再生能源并网稳定问题。大规模储能技术作为电力系统的关键支撑技术, 不仅可以提高常规发电和输电效率, 提高电网运行的安全性和经济性, 也是实现可再生能源平滑波动、削峰填谷, 满足可再生能源大规模接入的重要手段。氢能作为一种能量密度高且具有零碳特性的新型清洁能源, 可长时间储存而不损失能

量。因此,在可再生能源发电领域接入氢储能系统可有效解决可再生能源并网稳定性及时变负荷需求问题,国内外学者针对风-光-氢-储多能耦合技术进行了大量理论分析及试验验证,为可再生能源多能耦合氢能体系的建立提供了充足的理论支撑。

在含氢储系统的综合能源系统优化调度问题上已有许多学者进行了研究,文献[1]设计了一种含“风-光-氢-燃-储”的混合多能源系统实验平台,能够助力我国高比例、大规模可再生能源的发展;文献[2]建立了氢储能系统制、储、输完整的运行控制及优化调度模型,并对水电耦合氢储系统的经济效益进行了分析,并通过实例验证了所提控制策略可有效提高弃水利用率及水电耦合氢能的经济性;文献[3]指出电制氢储能在能源互联网中,不仅能像传统储能技术一样解耦电能的生产和消费之间的关系,还能将电能转化为氢能后在多个不同的能源网络和终端用户间流动。文献[4]对风光互补发电储能制氢系统各子系统构建了数学模型,基于扰动观察法建立了光伏、风力发电系统的最大功率跟踪模型,结合粒子群优化算法提高了系统制氢效率,并通过实例验证了所建模型的可靠性;Issam Abadlia等人设计了一种基于遗传算法优化的混合光伏制氢系统自适应模糊控制策略,并通过MATLAB仿真测试了所提优化策略在混合光伏制氢系统的电网侧具有良好的控制效果[5];AlHajri Ibrahim等人研究了含氢储能与可再生能源发电的综合能源系统的日前优化调度策略,通过对氢储系统出力调度和高峰负荷需求转移至非高峰时段,降低了总运行成本[6];文献[7]提出计及电转气过程能量转换损失和环境成本的日前经济调度优化模型,结果证明在含氢储能的综合能源系统中该调度优化模型具有很好的经济性和环保性。综上所述,目前国内外的研究重点关注氢储系统经济性以及与可再生能源耦合协调控制特性,含制氢储能的综合能源系统日前经济调度优化受到广泛关注,但大量研究基于氢储能系统的单一环节,并未从氢储能系统的制、储、用全生命周期考虑进行含氢储能的综合能源系统日前优化调度,本文将以此为要点展开研究。

本文首先通过分析氢储能系统充放电行为,建立综合能源系统中各子系统的数学模型,以运行调度期间电力经济成本最低为目标,综合考虑

风光氢储各设备之间的耦合关系和协调互动控制原理,以及系统间能量平衡、运行安全约束、能量状态约束等约束条件,实现了风光氢储综合能源系统跟踪日前调度计划的功率逐时分配,得到系统最优调度方案。并基于实际案例分析验证了所提日前经济调度方案的可行性,在风电、光伏、负荷场景不变的情况下对比讨论了氢储能的加入对系统经济效益的影响以及可再生能源波动性的影响,可以为风光氢储综合能源系统进入规模化示范及产业化运营提供一定理论支撑。

## 1 风光氢储综合能源系统结构

含氢储能(hydrogen energy storage system, HESS)的风光氢储综合能源系统结构如图1所示。

风光氢综合能源系统是以解决新能源消纳为目标,利用氢储能的融入调整风力、太阳能、氢能合理出力,从而提高综合能源系统稳定性、解决风光等新能源消纳问题。根据图1可知,风-光-氢-储综合能源系统主要包括分布式发电单元、储能单元以及用电负荷。分布式发电单元主要是风电机组以及光伏发电阵列,储能单元包含锂电池储能系统(battery energy storage system, BESS)和氢储能系统。该综合能源系统工作原理是当电网调度下达的功率指令低于系统内各分布式电源出力时,将风光富电送入电解槽进行电解制氢,相反,则通过氢燃料电池发电弥补调度指令的功率缺额。除此之外,在系统电力供应充足且氢气富余时,可通过氢能供应链将氢气售出获取一定的经济收益。

该系统通过氢储能作为中间环节实现了电氢-氢电转换,将间歇性及波动性强的风力、光伏电力转换为氢气实现中长期储能,并在需要的时候通过氢燃料电池发电接入电网进行电力市场交易。本文的研究基于图1所示系统拓扑展开,对风电、光伏等再生能源的发电数据进行预测,在考虑电网的电力交易的基础上,对风光氢综合能源系统进行日前优化调度,从而实现系统最优经济运行,为新型储能在参与电网清洁化转型过程中实现规模化应用提供理论基础。

## 2 风光氢储综合能源系统等效数学建模

含氢储能(hydrogen energy storage system,

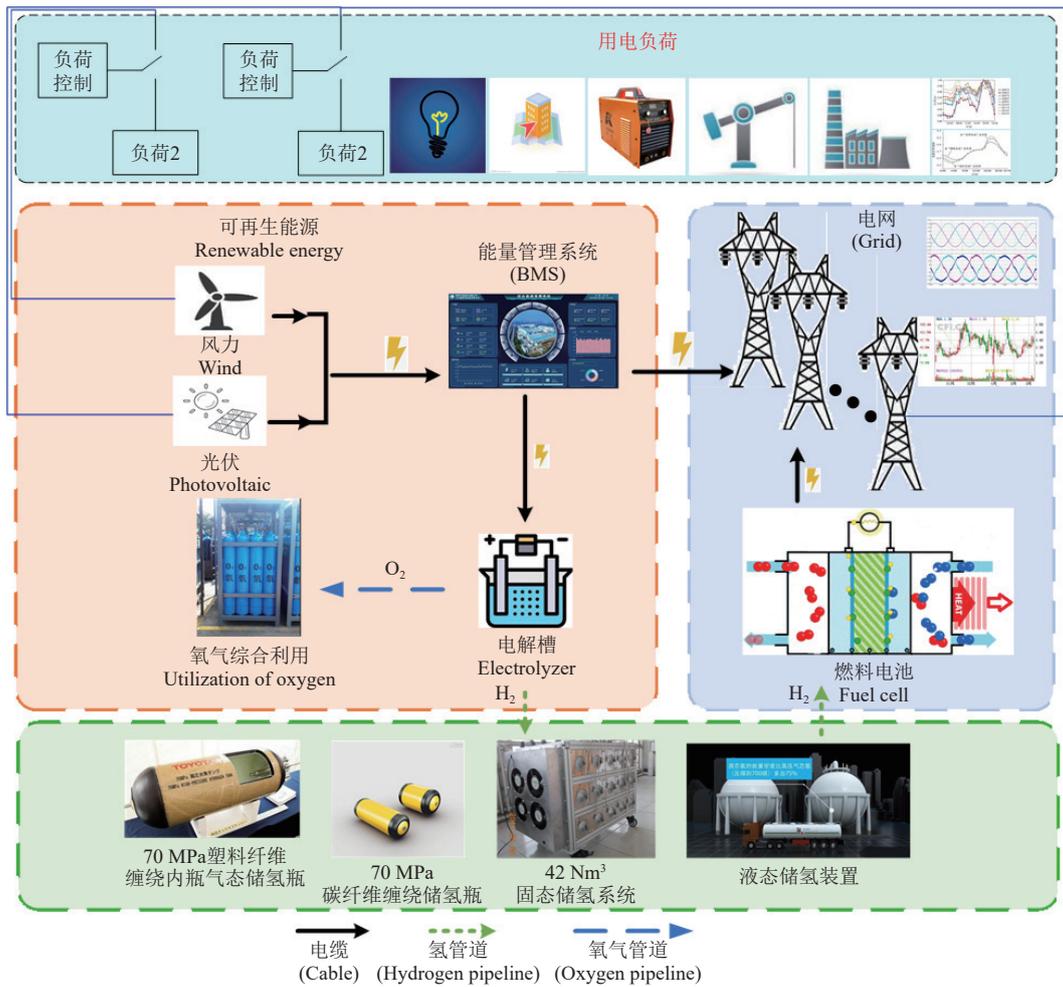


图 1 风光氢储综合能源系统结构

Fig. 1 Wind- photovoltaic-HESS-BESS integrated energy system structure

HESS) 的风光氢储综合能源系统结构如图 1 所示。

### 2.1 电解槽等效数学模型

本文根据碱性电解槽 (alkaline water electrolyzer, AWE)  $U-I$  特性曲线, 结合法拉第定律的电解方程可得典型的电解制氢装置数学模型。其中, AWE 单体电压计算公式为式 (1) 中第一个公式, 但为了使等式体现温度对电解过程的影响, 将式中  $R_{elec}$ 、 $s_{elec}$  等参数进行详细转换, 得到与温度变化相关联的电解槽电压计算公式<sup>[8-10]</sup>:

$$\begin{cases} U_{cell} = U_{rev} + \frac{R_{elec}}{A_{elec}} I_{elec} + s_{elec} \log \left( \frac{I_{elec}}{A_{elec}} + 1 \right) \\ R_{elec} = r_1 + r_2 T_{elec} \\ s_{elec} = s_1 + s_2 T_{elec} + s_3 T_{elec}^2 \\ t_{elec} = t_1 + \frac{t_2}{T_{elec}} + \frac{t_3}{T_{elec}^2} \\ U_{stack} = N_c U_{cell} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $U_{rev}$  为电解槽单元可逆电池电压 (V);

$R_{elec}$  是碱性电解质的欧姆电阻 ( $\Omega \cdot m^2$ ), 其与温度相关;  $r_1$ 、 $r_2$  是电解质欧姆电阻参数;  $T_{elec}$  表示电解槽运行温度 (K);  $A_{elec}$  为电解槽中极板面积 ( $m^2$ );  $I_{elec}$  为电解槽电流 (A);  $s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_3$ 、 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$  表示电极过电压系数;  $U_{stack}$  为 AWE 电堆总电压 (V);  $N_c$  为电解槽串联个数。

根据经验模型, 电解槽在制氢过程中的制氢速率 (即制氢量) 由下式确定:

$$W_{elec} = \eta_F \frac{N_c}{zF} I_{elec} \quad (2)$$

式中:  $F$  为法拉第常数, 取 96485 (C/mol);  $z$  为制氢过程每次反应中转移电子数,  $z=2$ ;  $\eta_F$  为法拉第效率, 是指实际制氢量和理论最大制氢量的比值, 其与电流密度相关 (%), 可由式 (3) 确定;

$$\eta_F = \frac{f_2 (I_{elec}/A_{elec})^2}{f_1 + (I_{elec}/A_{elec})^2} \quad (3)$$

式中:  $f_1$ 、 $f_2$  表示法拉第效率参数 ( $mA^2 \cdot cm^4$ )。

## 2.2 储氢系统等效数学模型

储氢系统主要采用储氢罐，通过电解槽制氢流速可以计算储氢罐中实时氢气压力，具体计算由式(4)确定<sup>[11]</sup>：

$$P_{\text{tank}} = \frac{n_{\text{H}_2}RT_{\text{tank}}}{V_{\text{tank}}} \quad (4)$$

式中： $n_{\text{H}_2}$ 为储氢罐中氢气量（mol）； $R$ 为理想气体常数（J/(mol·K)）； $T_{\text{tank}}$ 为储氢罐温度（K）； $V_{\text{tank}}$ 为储氢罐储氢量（m<sup>3</sup>）。

净储氢量由下式计算得到

$$n_{\text{H}_2} = \int_{t_1}^{t_2} (W_{\text{elec}} - W_{\text{fc}})dt \quad (5)$$

储氢罐的氢气压力状态为

$$P_{\text{SOHP}} = P_{\text{tank}}/P_{\text{tank}}^{\text{max}} \quad (6)$$

式中： $P_{\text{tank}}^{\text{max}}$ 为储氢罐氢压上限。

## 2.3 氢燃料电池等效数学模型

根据质子交换膜燃料电池（proton exchange membrane fuel cell, PEMFC）的电化学特性构建其等效数学模型，PEMFC内部有欧姆损耗以及激活损耗，因此PEMFC实际输出电压要低于开路电压，因此，PEMFC单体电池实际输出电压由式(7)确定<sup>[12-14]</sup>

$$\begin{cases} U_{\text{act}} = NA_{\text{fc}} \ln(i_{\text{fc}}/i_0) \frac{1}{sT_{\text{delay}} + 1} \\ U_{\text{ohm}} = R_{\text{ohm}}i_{\text{fc}} \end{cases} \quad (7)$$

式中： $N$ 为单体电池数量； $A_{\text{fc}}$ 为塔菲尔斜率； $i_{\text{fc}}$ 为燃料电池输出电流（A）； $i_0$ 为交换电流（A）； $T_{\text{delay}}$ 为时间常数； $R_{\text{ohm}}$ 为燃料电池内阻（Ω）。

燃料电池对氢气的需求量表示为

$$W_{\text{fc}} = Ni_{\text{fc}}/zF \quad (8)$$

## 2.4 风-光-储各单元数学模型

风力发电系统主要由风力涡轮机、液压系统、永磁同步电机、控制器和逆变器等部分组成，风机开始阶段捕获风能并带动风车驱动器运行，风力发电机完成启动。当风机启动后，转子转速升高，发电机定子侧输出功率降低，风力发电系统等效数学模型详见参考文献[9,12,15-16]；光伏发电技术主要是基于半导体的光电效应，即让不均匀半导体或半导体与金属结合的不同部位之间产生电位差的现象，光伏阵列通常由多个太阳能单体电池封装而成，其典型数学模型详见参考文献[17-18]；锂电储能单元数学模型参考文献[19]。

## 3 风-光-氢-储综合能源系统结构及日前优化模型

在风-光-氢-储综合能源系统中，如何最大化风光资源利用率以及保证系统经济性是本文解决的关键问题。本文根据风光及负荷日前预测数据和日前电网调度指令，电网峰谷价差，制定日前氢储系统制氢、氢燃料电池发电的出力以及电池储能系统出力调度计划，保证综合能源系统内各储能系统充分消纳可再生能源电力以及最小化购电成本。基于粒子群优化（particle swarm optimization, PSO）的日前优化调度策略总体框架如图2所示。

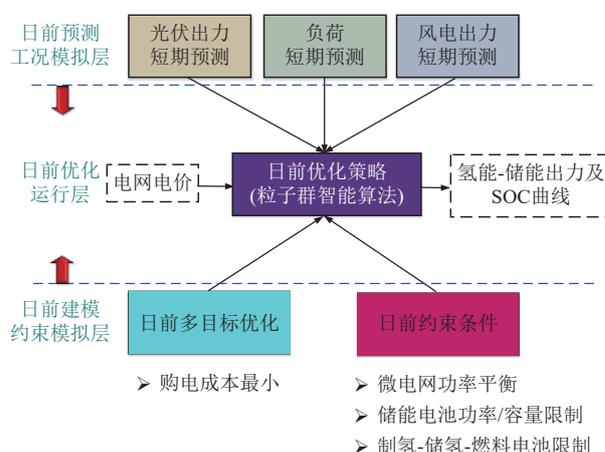


图2 风光氢储综合能源系统日前优化控制框图

Fig. 2 Day-ahead optimization control block diagram of wind-photovoltaic-hydrogen-ESS integrated energy system

### 3.1 目标函数

本研究以日前对于光伏、风电、负荷小时级预测数据为次日模拟场景，综合最小化系统运行周期内的总的电力交易成本 $E_{\text{cost}}$ 作为优化的目标函数，考虑风光氢储综合能源系统功率平衡以及氢储能、锂电储能功率和容量约束，结合电网分时电价提出基于粒子群优化算法的风-光-氢-储综合能源系统日前能量优化管理方法，对自然日内各子系统出力进行重新分配，使最终系统总电力交易成本达到最低值，实现了对综合能源系统的日前优化调度安排。

$$E_{\text{cost}} = \sum_{t=1}^{23} (E_{\text{Hydrogen}}(t) + E_{\text{Battery}}(t)) \quad (9)$$

式中： $E_{\text{cost}}$ 、 $E_{\text{Hydrogen}}(t)$ 、 $E_{\text{Battery}}(t)$ 分别表示系统总电力交易成本、氢储能系统 $t$ 时刻内出力成本、

电池储能系统  $t$  时刻内出力成本。

氢储能和锂电储能系统出力成本计算公式如式 (10)。

$$\begin{cases} E_{\text{Hydrogen}}(t) = P_{\text{Hydrogen}}(t)P_{\text{rice}}[1:23] \\ E_{\text{Battery}}(t) = P_{\text{Battery}}(t)P_{\text{rice}}[1:23] \\ P_{\text{Hydrogen}}(t) = w_1 P'_{\text{Hydrogen}} \\ P_{\text{Battery}}(t) = w_2 P'_{\text{Battery}} \\ w_1 + w_2 = 1 \\ w_1 > w_2 \end{cases} \quad (10)$$

式中： $P_{\text{rice}}[1:23]$ 表示一天中每时刻电网电价，即电网制定的分时电价； $P'_{\text{Hydrogen}}$ 、 $P'_{\text{Battery}}$ 分别表示两类储能系统不考虑优先级理论出力功率； $P_{\text{Hydrogen}}(t)$ 、 $P_{\text{Battery}}(t)$ 分别表示  $t$  时刻氢、电池储能系统实际出力功率； $w_1$ 、 $w_2$ 分别是氢储系统和锂电池储能系统出力权重。

根据目标函数的建立，即可将日前优化调度问题转换为对目标函数求最值问题，找到当目标函数最小时各个储能设备能量分配关系即可得到日前优化调度结果。

### 3.2 约束条件

1) 风光氢储综合能源系统能量平衡约束。

$$P_{\text{wind}}(t) + P_{\text{pv}}(t) + P_{\text{bess}}(t) + P_{\text{hess}}(t) = P_{\text{load}}(t) \quad (11)$$

式中： $P_{\text{wind}}(t)$ 、 $P_{\text{pv}}(t)$ 、 $P_{\text{bess}}(t)$ 、 $P_{\text{hess}}(t)$ 、 $P_{\text{load}}(t)$ 分别表示某一时刻风力、光伏、锂电池储能、氢储能出力功率及电负荷实时需求功率。

2) 安全运行区间约束。

$$\begin{cases} P_{\text{wind}}^{\min} \leq P_{\text{wind}}(t) \leq P_{\text{wind}}^{\max} \\ P_{\text{pv}}^{\min} \leq P_{\text{pv}}(t) \leq P_{\text{pv}}^{\max} \\ P_{\text{bess}}^{\min} \leq P_{\text{bess}}(t) \leq P_{\text{bess}}^{\max} \\ P_{\text{hess}}^{\min} \leq P_{\text{hess}}(t) \leq P_{\text{hess}}^{\max} \end{cases} \quad (12)$$

式中： $P_X^{\min}$ 和 $P_X^{\max}$ 分别表示对应分布式电源或储能系统的运行功率上下限。

3) 储能系统运行状态约束。

$$\begin{cases} 0 \leq S_{\text{OC}}(t) \leq S_{\text{OCmax}} \\ 0 \leq P_{\text{SOHP}}(t) \leq P_{\text{SOHPmax}} \end{cases} \quad (13)$$

式中： $S_{\text{OCmax}}$ 、 $P_{\text{SOHPmax}}$ 分别表示锂电储能系统荷电状态、氢储能系统氢压状态上下限。

### 3.3 日前优化算法求解流程

上述含制氢储能的综合能源系统日前优化调度问题采用智能群优化算法进行求解，在 MATLAB 中使用 m 语言编程实现，算法开始初

始化风-光-氢-储综合能源系统数学模型各参数，设定 $P_X^{\min}$ 、 $P_X^{\max}$ 、 $S_{\text{OCmax}}$ 、 $S_{\text{OHPmax}}$ 等变量赋初值，设定目标函数并在目标函数中结合峰谷电价，采用粒子群优化算法对目标函数迭代求解，直到达到最大迭代次数算法结束，得到日前 24 h 的最优解集。具体算法求解流程如图 3 所示。

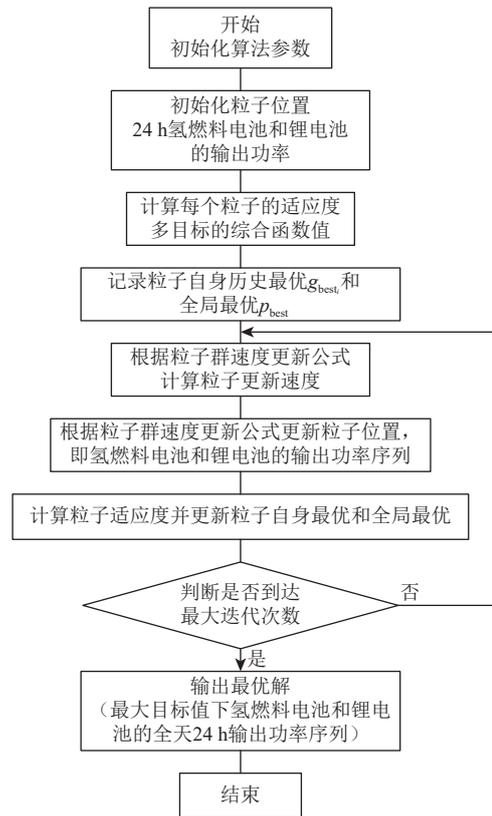


图 3 日前优化算法求解流程

Fig. 3 Solution flow of day-ahead optimization algorithm

## 4 案例分析及仿真验证

### 4.1 案例原始数据分析

算例中风、光发电预测数据及日前负荷预测数据通过某地历史数据预测得到，采集当地风力、光伏发电历史数据，采样间隔为 1 min，得到日前风光负荷功率预测曲线如图 4 所示，风光负荷功率差额见图 5，控制算法的目的即以最优经济性填补系统功率差额。其他设备相关参数见表 1。其中锂电储能系统容量为 50 kW/100 kW·h，氢储系统 100 kW/200 kW·h。

图 6 给出了某市商业用电峰谷电价规则，本文所采用的优化调度策略考虑峰谷价差因素，在电价高峰期减少或避免综合能源系统中储能系统

表1 风光氢储综合能源系统内各设备参数  
Table 1 Parameters of various equipment in the wind-photovoltaic-HESS-BESS integrated energy system

设备	功率下限/kW	功率上限/kW	初始状态
风电	$p_{wind}^{min}=0$	$p_{wind}^{max}=200$	—
光伏	$p_{pv}^{min}=0$	$p_{pv}^{max}=200$	—
负荷	$p_{load}^{min}=0$	$p_{load}^{max}=400$	—
锂电储能	$p_{bess}^{min}=0$	$p_{bess}^{max}=50$	$S_{OCmax}=0.5$
氢储能	$p_{hess}^{min}=0$	$p_{hess}^{max}=100$	$P_{SOHPmax}=0.5$

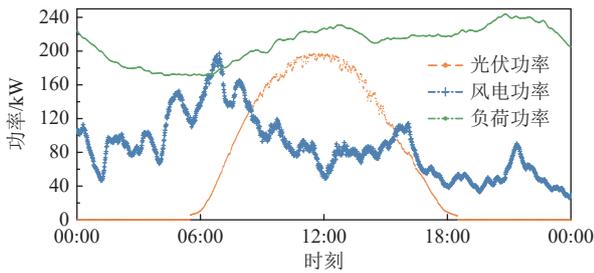


图4 风光负荷日前预测曲线

Fig. 4 Day ahead forecasting curve of wind, photovoltaic and load power

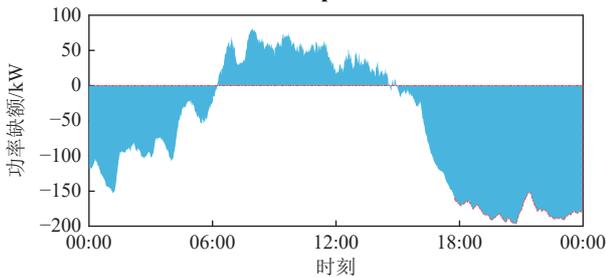


图5 风光负荷功率差额

Fig. 5 Wind power, photovoltaic power and load power difference

充电行为,在电价低谷时,主要由风光发电为负荷供电,储能系统从电网购电储能。

#### 4.2 优化调度结果

根据上述已有数据结合电网分时电价带入基于粒子群优化算法的氢能利用日前能量优化调度

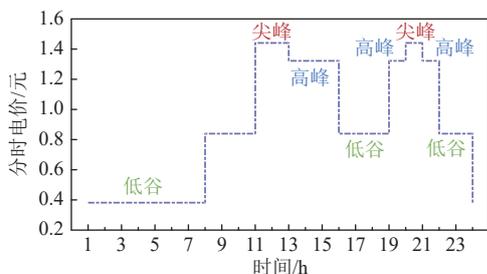
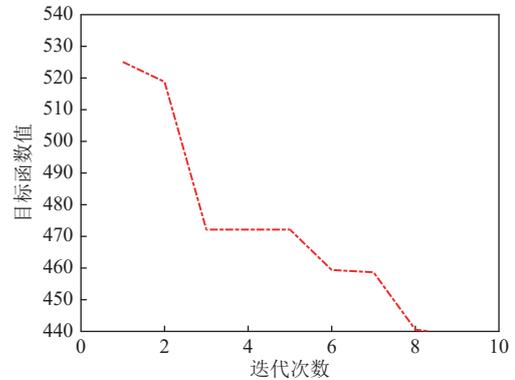


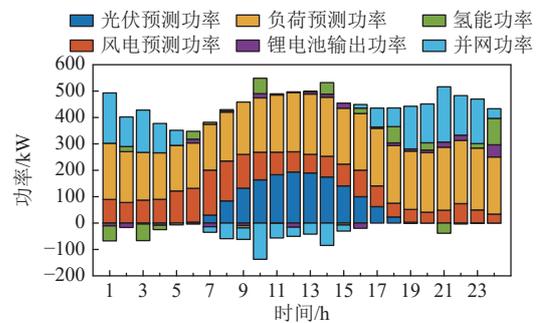
图6 某市商业用电峰谷电价规则曲线

Fig. 6 Regulation of peak valley electricity price for commercial use in a chosen city

策略汇总,对目标函数进行迭代求解。由最低购电成本可以确定系统中氢、锂电储能系统的日前24 h的调度情况,综合能源系统内各类型设备日前优化调度出力曲线如图7所示。



(a) 优化算法迭代次数



(b) 综合能源系统日前调度出力曲线

图7 综合能源系统日前调度优化迭代曲线及各单元出力曲线

Fig. 7 Day-ahead scheduling optimization iteration curve of integrated energy system and output curve of each unit

由图7结合分时电价曲线可以看出,在0:00—8:00之间,由于风光出力无法满足负荷需求且电价较低,适当从电网购得低价电力资源以满足负荷需求并进行充电或制氢储能;白天8:00—16:00,随着电价达到高峰,负荷不断增大,此时储能系统出力售出电力辅助电网平衡负荷需求并获得较大经济收益;进入夜晚16:00—24:00间,储能系统再次购入低价电力进行储能,为第二天运行做准备。通过上述氢储能系统及锂电储能系统的优化调度,可以最大化风光利用率,减少弃风弃光并缓解电网调度压力,此外储能运行商也可获得较大经济收益。

锂电储能和氢储能系统日前优化出力曲线及荷电状态/氢压状态变化曲线如图8和图9所示。

由图8—9可以看出,氢储系统与锂电储能出力情况接近,即电网电价较低或风力光伏发电功

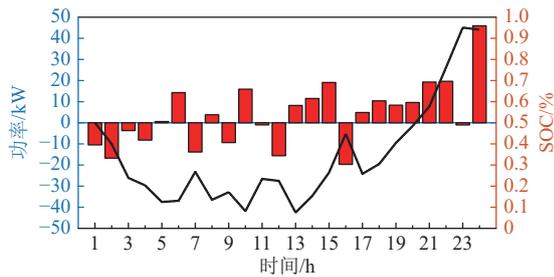


图8 锂电储能日前优化输出功率及SOC变化曲线

Fig. 8 Day-ahead BESS optimized output power and SOC change curve

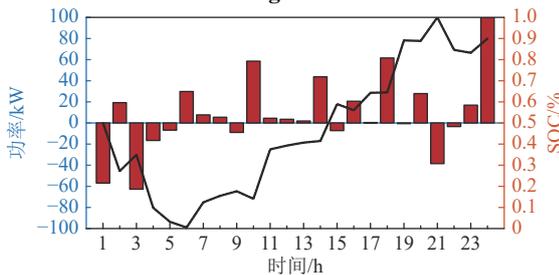


图9 氢储能日前优化出力功率及SOHP变化曲线

Fig. 9 Day-ahead HESS optimized output power and SOHP change curve

率较高时充电(制氢)储能,在电网电价较高、风力光伏发电供给负载不足时进行放电(氢燃料电池发电)。风-光-氢-储混合能源系统接收到上级日前调度指令后,本文提出的日前优化调度策略利用风光负荷预测数据及某市峰谷电价数据对综合能源系统中氢储系统和锂电池储能系统次日的出力进行优化调度,其中制氢量及氢燃料电池发电量设定用于表示氢储系统充放电行为。通过合理安排制氢、燃料电池功率以及锂电储能系统充放电功率,保证风-光-氢-储综合能源系统跟踪发电计划以及系统电交易经济效益最高。

## 5 结语

本文提出了一种结合峰谷电价的经济型指标,考虑了系统风光消纳量、负荷动态需求以及系统功率平衡约束,基于现有风力及光伏发电数据、负荷功率数据,建立风-光-氢-储综合能源系统中各子系统数学模型以及日前优化调度模型,并采用粒子群优化算法对模型进行迭代求解,实现了风-光-氢-储综合能源系统日前优化出力调度,最终得到的是电交易成本最低的储能出力方案。但本文研究重点在于控制策略及优化算法,基于所搭建数学模型将数据嵌入其中来进行程序的验证并给出结果。

但本文的研究内容中,设定的系统经济性目标函数时未考虑电网对风光可再生能源发电系统弃风弃光惩罚以及碳交易所带来的经济效益,需要进一步改进,结合当前开放的碳交易市场进行经济型分析,以使双碳目标下氢能作为零碳能源经济效益最大化;以及将日前优化调度与日内滚动优化相结合,结合超短期预测技术,为风光氢储综合能源系统的优化调度提供更精度的实时协调控制,使得系统可以更精确地跟踪电网调度指令将会是今后重点研究方向。

## 参考文献

- [1] 江岳文,江新琴.含“风-光-氢-燃-储”的混合多能源系统实验平台设计[J].实验技术与管理,2021,38(05):20-25.  
JIANG Yuewen, JIANG Xinqin. Design on experimental platform of hybrid multi-energy system with “Wind-photovoltaic-hydrogen-fuel cell-battery” [J]. Experimental Technology and Management, 2021, 38(05): 20-25 (in Chinese).
- [2] 杨阳,王孝群,练冲,等.径流式水电站弃能利用的制氢系统优化研究[J].水力发电学报,2021,40(06):21-30.  
YANG Yang, WANG Xiaoqun, LIAN Chong, et al. Optimization of hydrogen production system for energy curtailment utilization of run-of-river hydropower station [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(06): 21-30 (in Chinese).
- [3] 卫志农,张思德,孙国强,等.计及电转气的电-气互联综合能源系统削峰填谷研究[J].中国电机工程学报,2017,37(16):4601-4609.  
WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, et al. Power-to-gas considered peak load shifting research for integrated electricity and natural-gas energy systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4601-4609 (in Chinese).
- [4] 李文磊.风光互补发电储能制氢系统研究[D].邯郸:河北工程大学,2019.
- [5] ABADLIA I, HASSAINE L, BEDDAR A, et al. Adaptive fuzzy control with an optimization by using genetic algorithms for grid connected a hybrid photovoltaic-hydrogen generation system [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(43): 22589-22599.
- [6] ALHAJRI I, AHMADIAN A, ELKAMEL A. Stochastic day-ahead unit commitment scheduling of integrated electricity and gas networks with hydrogen energy storage (HES), plug-in electric vehicles (PEVs) and renewable energies [J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 67 (prepublish): 102736-102736.

- [7] 刘继春,周春燕,高红均,等.考虑氢能-天然气混合储能的电-气综合能源微网日前经济调度优化[J].电网技术,2018,42(01):170-179.  
LIU Jichun, ZHOU Chunyan, GAO Hongjun, *et al.* A day-ahead economic dispatch optimization model of integrated electricity-natural gas system considering hydrogen-gas energy storage system in microgrid[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(01): 170-179(in Chinese).
- [8] 尹文良,刘琳,张存山,等.含制氢储能的混合传动风电系统建模与运行特性分析[J].电力自动化设备,2020,40(10):64-70.  
YIN Wenliang, LIU Lin, ZHANG Cunshan, *et al.* Modeling and operation performance analysis of hybrid drive wind power generation system with hydrogen energy storage[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(10): 64-70(in Chinese).
- [9] 蔡国伟,陈冲,孔令国,等.风电/光伏/制氢/超级电容器并网系统建模与控制[J].电网技术,2016,40(10):2982-2990.  
CAI Guowei, CHEN Chong, KONG Lingguo, *et al.* Modeling and control of grid-connected system of wind/PV/electrolyzer and SC[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(10): 2982-2990(in Chinese).
- [10] 袁铁江,胡克林,关宇航,等.风电-氢储能与煤化工多能耦合系统及其氢储能子系统的EMR建模[J].高电压技术,2015,41(7):2156-2164.  
YUAN Tiejia, HU Kelin, GUAN Yuhang, *et al.* Modeling on hydrogen producing progress in emr based wind power-hydrogen energy storage and coal chemical pluripotent coupling system[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(7): 2156-2164(in Chinese).
- [11] PANAHANDI B, BARD J, OUTZOURHIT A, *et al.* Simulation of PV-wind-hybrid systems combined with hydrogen storage for rural electrification[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(6): 4185-4197.
- [12] 秦梦珠,张国月,齐冬莲.风电-氢能耦合系统建模及仿真[J].电子技术,2016,45(08):18-23.  
QIN Mengzhu, ZHANG Guoyue, QI Donglian. Modeling and simulation of the integrated system of wind-hydrogen[J]. *Electronic Technology*, 2016, 45(08): 18-23(in Chinese).
- [13] RUNTZ K J, LYSTER M. Fuel cell equivalent circuit models for passive mode testing and dynamic mode design[C]//Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2005. IEEE, 2006.
- [14] KHAYRULLINA A G, BLINOV D, BORZENKO V. Novel kW scale hydrogen energy storage system utilizing fuel cell exhaust air for hydrogen desorption process from metal hydride reactor[J]. *Energy*, 2019, 183(Sep.15): 1244-1252.
- [15] 王侃宏,赵政通,罗景辉,等.风光互补发电制氢储能系统模拟仿真研究及性能分析[J].节能,2019,38(11):79-84.  
WANG Kanhong, ZHAO Zhengtong, LUO Jinghui, *et al.* Simulation and performance analysis of hydrogen storage system for wind solar complementary power generation[J]. *Energy Conservation*, 2019, 38(11): 79-84(in Chinese).
- [16] GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ J G, SALAS-CABRERA R, VÁZQUEZ-BAUTISTA R, *et al.* A novel MPPT PI discrete reverse-acting controller for a wind energy conversion system[J]. *Renewable Energy*, 2021, 178: 904-915.
- [17] VILLALVA M G, GAZOLI J R, FILHO E R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, 24(5): 1198-1208.
- [18] TEBIBEL H, LABED S. Design and sizing of stand-alone photovoltaic hydrogen system for HCNG production[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(8): 3625-3636.
- [19] 郭佑民,戴银娟,付石磊.城轨车用复合动力储能系统蓄电池SOC和SOH估计[J].铁道科学与工程学报,2020,17(11):2920-2928.  
GUO Youmin, DAI Yinjuan, FU Shilei. Estimation of battery SOC and SOH for urban rail vehicle composite power energy storage system[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2020, 17(11): 2920-2928(in Chinese).

收稿日期:2022-04-12

作者简介:

徐桂芝(1976),女,博士,教授级高级工程师,主要研究方向为新型储能与能源转化、灵活交流输电技术, E-mail: lyxTGY@126.com;

梁丹曦(1992),女,硕士,工程师,研究方向为能源存储、转化及利用, E-mail: ldxsgcc@126.com;

宋洁(1982),女,硕士,高级工程师,研究方向为新型储能与能源转化技术, E-mail: projTG@126.com;

康伟(1983),女,硕士,主要从事新型储能与能源转化工作, E-mail: 1477734607@qq.com;

赵雪莹(1994),女,硕士,主要研究方向为新型储能与能源转化技术, E-mail: sgctg123@126.com;

郝捷(1982),男,硕士,主要从事新能源发电并网技术研究, E-mail: gjsgcc123@126.com。