

风光制绿氢合成氨一体化系统中的多电解槽协同运行策略优化

王树涛¹, 郭东伟¹, 李雪¹, 汪桂明¹, 赵国庆¹, 许达明¹, 张富博¹, 熊轲²

(1. 国网吉林省电力有限公司 白城供电公司, 吉林 白城 137000; 2. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 哈尔滨 150001)

摘要:随着我国风光制绿氢合成氨一体化项目的逐步部署,电解槽不仅需要实现对风光功率的有效跟踪,还必须保障下游制氢合成氨的经济性,给运行策略提出了更高的要求。为此,提出了一种兼顾风光功率跟踪与绿氢合成氨经济性的多电解槽运行策略。首先,构建了风光制绿氢合成氨一体化系统的数学模型。然后,分别考虑风光功率跟踪效果和绿氢合成氨的经济性,基于多目标优化方法,设计了多电解槽协同运行策略的优化方案。针对该多目标优化问题,提出了一种基于改进膝区域的多目标优化算法。最后,利用吉林省大安市风光制绿氢合成氨一体化系统的实际数据进行了验证,结果表明所提出的方法能够平衡电解槽的功率跟踪能力和经济性,提高系统整体运行效率和收益。

关键词:风光制氢;绿氢合成氨;多电解槽运行;多目标优化

Optimization of multi electrolysis cell collaborative operation strategy in the integrated system of wind solar green hydrogen synthesis ammonia

WANG Shutao¹, GUO Dongwei¹, LI Xue¹, WANG Guiming¹, ZHAO Guoqing¹, XU Daming¹, ZHANG Fubo¹, XIONG Ke²

(1. Baicheng Power Supply Company, State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Baicheng 137000, China;
2. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: With the gradual deployment of integrated projects for wind solar green hydrogen synthesis and ammonia synthesis in China, electrolytic cells not only need to achieve effective tracking of wind solar power, but also must ensure the economic viability of downstream hydrogen production and ammonia synthesis, which poses higher requirements for operational strategies. Therefore, a multi-electrolysis cell operation strategy that balances wind and solar power tracking with the economic benefits of green hydrogen synthesis of ammonia is proposed. Firstly, a mathematical model for the integrated system of wind solar green hydrogen synthesis of ammonia is constructed. Then, considering the tracking effect of wind and solar power and the economy of green hydrogen synthesis of ammonia, based on multi-objective optimization methods, an optimization scheme for the coordinated operation strategy of multiple electrolytic cells is designed. A multi-objective optimization algorithm based on improved knee region (IKR) is proposed for this multi-objective optimization problem. Finally, the actual data of the wind solar hydrogen synthesis ammonia integrated system in Da'an City, Jilin Province is used for verification, and the results show that the proposed method can balance the power tracking ability and economy of the electrolytic cell, and improve the overall operating efficiency and revenue of the system.

Key words: wind solar hydrogen production; green hydrogen synthesis of ammonia; multiple electrolytic cell operation; multi-objective optimization

0 引言

随着国际能源转型步伐的加快,新能源保持了快速增长的趋势,但电力系统的安全稳定和消费压力也与日俱增。在政策推动和能源绿色化的背景下,氢能以其零排放、高热值、资源丰富和储存时间

长等优点引起了越来越多的关注^[1]。

随着新能源比重的增加和负荷的多样化,电网的调节能力将降低^[2],电制氢系统可能无法精确的跟踪上游风光的功率,造成较多的弃电^[3]。

目前主要有3种类型的电解槽分别是碱性电解槽(alkaline electrolysis cell, AEC)、质子交换膜电解槽(proton exchange membrane electrolysis, PEM)、固体氧化物电解槽(solid oxide electrolysis cell, SOEC)。

由于SOEC技术仍不成熟,难以进行规模化生产,现有及在建的大型电解制氢项目只涉及AEC和PEM。

在风光制绿氢合成氨一体化项目中选择合适的电解槽至关重要。文献[4]对基于光伏和风能系统的不同制氢方法进行了比较,并对各种类型的电解槽进行了比较研究,对绿色制氢进行了经济评估。文献[5]概述了可再生能源制氢系统的能源管理方法。还对未来建设用于制氢的光伏和风力发电厂的技术和经济可行性进行了分析。

新能源制氢和制氢系统调节时间差异较大^[6],保证电制氢设备高效安全运行的同时优化系统整体效率至关重要。文献[7]针对新能源制氢特性和负荷波动的耦合问题,提出了电-氢协调储能系统的协同调控策略。文献[8]提出了综合能源系统的“源网荷储”协同优化运行方法。

针对以上问题,提出了一种兼顾风光功率跟踪与绿氢合成氨经济性的多电解槽运行策略。首先,构建了风光绿氢合成氨一体化系统的数学模型。然后,分别考虑风光功率跟踪效果和绿氢合成氨的经济性,基于多目标优化方法,设计了多电解槽协同运行策略的优化方案。针对该多目标优化问题,提出了一种基于改进膝区域(improved knee region, IKR)的多目标优化算法。最后,利用吉林省大安市风光制氢合成氨一体化系统的实际数据进行了验证。

1 风光制绿氢合成氨系统建模

风光制绿氢合成氨一体化系统示意图如图1所示。制氢所需的氢气来自电解制氢系统,氮气来自空气分离器,且这些装置所需的电能均由新能源发电提供。

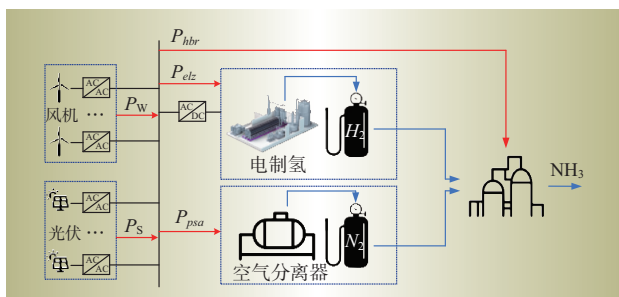


图1 风光制绿氢合成氨一体化系统

Fig. 1 Integrated system for wind solar green hydrogen synthesis of ammonia

首先针对新能源-绿氢-绿氨这一系统中的各个模块进行建模,模拟其在运行中的各项特性。

1.1 电制氢系统建模

电解槽恒定效率模型没有考虑电解槽在变化的运行条件下的动态响应。下面从电解槽的电化

学模型角度进行建模。

电解槽的电压由多个过电压分量组成,如式(1)所示

$$V_{elz,t}^c = V_{elz}^{oc} + V_{elz,t}^{act} + V_{elz,t}^{\Omega} + V_{elz,t}^{con} \quad (1)$$

$$V_{elz}^{oc} = \frac{\Delta G}{2F} + \frac{RT^{Elz}}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2} \sqrt{p_{O_2}}}{p_{H_2O}} \right) \quad (2)$$

$$V_{elz,t}^{act} = \frac{RT^{Elz}}{2F\alpha_a} \ln \left(\frac{j_{elz,t}}{j_{0,a}} \right) + \frac{RT^{Elz}}{2F\alpha_c} \ln \left(\frac{j_{elz,t}}{j_{0,c}} \right) \quad (3)$$

$$V_{elz,t}^{\Omega} = i_{elz,t}^{stack} R^{Elz} \quad (4)$$

$$V_{elz,t}^{con} = \frac{RT^{Elz}}{2F} \ln \left(\frac{J^{lim}}{J^{lim} - j_{elz,t}} \right) \quad (5)$$

式中: $V_{elz,t}^c$ 为电解槽总电压; V_{elz}^{oc} 为电解槽的开路电压,代表发生电解反应所需要的最低电压; $V_{elz,t}^{act}$ 为质子转移反应开始的电极激活过电压,表征了电极发生电解反应的电位损失; $V_{elz,t}^{\Omega}$ 为欧姆过电压,表征了电解槽交换膜,极板,集电器等部件的电压降; $V_{elz,t}^{con}$ 为浓度差过电压,表征了电极电势偏离通电前按总体浓度计算结果的值; ΔG 为吉布斯自由能变化; F 为法拉第常数; R 为气体常数; T^{Elz} 为电解槽运行温度; p 为气体分压; α_a 和 α_c 为阳极和阴极电荷转移系数; J^{lim} 、 $j_{elz,t}$ 、 $j_{0,a}$ 和 $j_{0,c}$ 为极限电流密度、电能槽工作电流密度和阳极阴极电流密度。

1.2 制氢系统建模

氨的小时总产量 A_t 为

$$A_t = \left(\sum_{elz} M_{elz,t} + H_{s,t}^{dchr} - H_{s,t}^{chr} \right) C_{h-t-a} \quad (6)$$

式中: C_{h-t-a} 为氢制氨的转换系数; $M_{elz,t}$ 为产氢量; $H_{s,t}^{dchr}$ 和 $H_{s,t}^{chr}$ 为储氢系统的放和充氢量。

制氢所需的功率为

$$P_t^{hbr} = K^{hbr} A_t \quad (7)$$

式中: K^{hbr} 为换算系数。参考一般工业上的能耗换算系数0.07~0.10 kW/t,选取 K^{hbr} 为0.092 kW/t。

综上,可以给出系统总功率计算式

$$T_{p,t}^{total} = T_{p,t}^{P2H} + P_t^{psa} + P_t^{hbr} \quad (8)$$

$$T_{p,t}^{P2H} = \sum_{elz} P_{elz,t} + \sum_{elz} P_{st}$$

式中: P_t^{hbr} 为制氢系统的功率; $T_{p,t}^{HCl}$ 为系统总功率; P_{st} 为电制氢启停消耗功率。

2 兼顾风光功率跟踪与绿氢合成氨经济性的多电解槽运行策略

2.1 电-氢-氨系统运行目标函数

本文考虑风光功率跟踪效果最好和绿氢合成

氨的收益最高为目标,构建协同运行策略的多目标优化模型。

风光功率跟踪效果用功率偏差率来进行衡量

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^T (P_{re,t} - P_{elz,t})^2} \quad (9)$$

式中: $P_{re,t}$ 为 t 时刻的功率调节指令; $P_{elz,t}$ 为 t 时刻的实际功率值; T 为总运行时间。

绿氢合成氨的收益 C_{profit} 如下

$$C_{profit} = C_{in} - (C_{inv}^{elz} + C_{inv}^{hbr}) - (C_{opt}^{elz} + C_{opt}^{hbr}) \quad (10)$$

式中: C_{in} 为售卖产品收益; C_{inv}^{elz} 和 C_{inv}^{hbr} 分别为制氢和制氨的建设成本; C_{opt}^{elz} 和 C_{opt}^{hbr} 分别为制氢和制氨的运行成本。

2.2 系统运行约束条件

(1) 电功率平衡约束

$$\sum_{n=1}^{N_{elz}} P_{n,t}^{telz} + \sum_{n=1}^{N_{hbr}} P_{n,t}^{thbr} = \sum_{pho}^{PHO} P_{pho,t} + \sum_w^W P_{w,t} \quad (11)$$

式中: $P_{n,t}^{telz}$ 和 $P_{n,t}^{thbr}$ 分别为电制氢系统和合成氨系统在 t 时刻的功率; $P_{pho,t}$ 和 $P_{w,t}$ 分别为光伏和风电在 t 时刻的功率; N_{elz} 、 N_{hbr} 、 PHO 和 W 分别为电解槽,合成氨,光伏和风电的集合。

(2) 电解槽功率约束

不同电解槽在运行时需要满足输出功率不越限以保证安全生产,同时爬坡率也有显著区别。

$$P_{AEC}^{min} \leq P_{AEC} \leq P_{AEC}^{max} \quad (12)$$

$$P_{PEM}^{min} \leq P_{PEM} \leq P_{PEM}^{max}$$

$$R_{D,AEC} \leq P_{AEC,t} - P_{AEC,t-1} \leq R_{U,AEC} \quad (13)$$

(3) 电解槽状态约束

电解槽的状态可以分为生产、待机、冷启动和停机状态。本文使用启停成本惩罚函数来量化冷启动的额外消耗。

本文采用0,1变量对电解槽状态进行约束

$$W_{elz,t} + S_{elz,t} + I_{elz,t} = 1 \quad (14)$$

$$W_{elz,t} + S_{elz,t} + I_{elz,t-1} - 1 \leq Y_{elz,t} \quad (15)$$

$$W_{elz,t-1} + S_{elz,t-1} + I_{elz,t} - 1 \leq Z_{elz,t} \quad (16)$$

式中: $W_{elz,t}$ 、 $S_{elz,t}$ 和 $I_{elz,t}$ 分别为电解槽在 t 时刻处于生产、待机和停机状态的0,1变量。

(4) 合成氨系统约束

合成氨的功率上下限和爬坡率约束为

$$V_{el}^{min} P^{hbr,r} \leq P_t^{hbr} \leq V_{el}^{max} P^{hbr,r} \quad (17)$$

$$R_D^{hbr} \leq P_t^{hbr} - P_{t-1}^{hbr} \leq R_U^{hbr} \quad (18)$$

式中: $P^{hbr,r}$ 为合成氨装置的额定功率; V_{el}^{min} 和 V_{el}^{max} 分别为功率上限和下限; R_D^{hbr} 和 R_U^{hbr} 为合成氨的爬坡率最大值。

3 基于IKR的多目标优化算法

本文所建立的多电解槽协同运行调度模型可以作为多目标优化问题进行求解。为了对模型中的多个目标进行平衡,提高求解效率,可以通过寻找目标函数的解构成的膝区域(knee region, KR)。在多目标优化问题中,全局最优点处于KR之内,KR中的解在多目标之间的平衡性上表现也较好。通过寻找KR,可以使目标解快速收敛,找到多组可接受的次优解,并在被缩减的解集中快速寻找最优解。首先,给出闵可夫斯基距离的定义

$$d(A, B) = \sqrt[p]{\sum_{i=1}^n |x_{A,i} - x_{B,i}|^p} \quad (19)$$

式中: $x_{A,i}$ 和 $x_{B,i}$ 为向量 A 和向量 B 的第 i 个分量。

膝点(knee point, KP)能提升解向量的最大值,设解集中的KP为 x^*

$$x^* = \arg \min \sqrt[p]{\sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - f_{i,min}}{F_i} \right|^p} \quad (20)$$

$$F_i = |f_{i,max} - f_{i,min}| \quad (21)$$

式中: F_i 为解向量 i 各维度的差值的最大值; $f_{i,max}$ 和 $f_{i,min}$ 分别为第 i 个向量值的最大值和最小值。

KP构成的区域即为KR,可以由式(33)表示

$$\Psi(x^*) = \arg \min \left(\sqrt[p]{\sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - f_{i,min}}{F_i} \right|^p}, r^2 \right) \quad (22)$$

式中: r 为KR的半径。

对于本文的多目标求解问题,参数 p 决定了闵可夫斯基距离的计算方式,对目标偏好的敏感度及算法收敛速度均有显著影响。具体而言:当 $p=1$ 时,退化为曼哈顿距离,KR对目标之间的偏好差异响应更加明显,适用于各目标权重不均衡的情形;当 $p=2$ 时,为欧氏距离,适用于目标间无明显偏好、追求均衡折中解的情形;当 $p \rightarrow \infty$ 时,退化为切比雪夫距离,对最差目标维度最为敏感,收敛速度最快但可能损失解的多样性。

本文中,风光功率跟踪性能与绿氢合成氨经济性两个目标之间存在明显的权衡关系,系统对功率跟踪偏差率具有更强的约束要求,因此两个目标并非等权重。为此,本文选取 $p=1$,使KR对目标偏好响应更加灵敏,有助于在帕累托前沿中快速识别兼顾功率跟踪与经济性的膝点区域,从而提升调度方案的实用性与收敛效率。

4 算例分析

4.1 算例概况及模型

本文选用吉林省白城市 2024 年 1 月到 2024 年 12 月的风光历史数据,算例相关参数见表 A-1。

4.2 电解槽功率跟踪能力分析

使用 10 s 级的风光数据对不同电解槽构成的电制氢系统进行仿真。仿真结果如图 2、图 3 和图 4 所示。

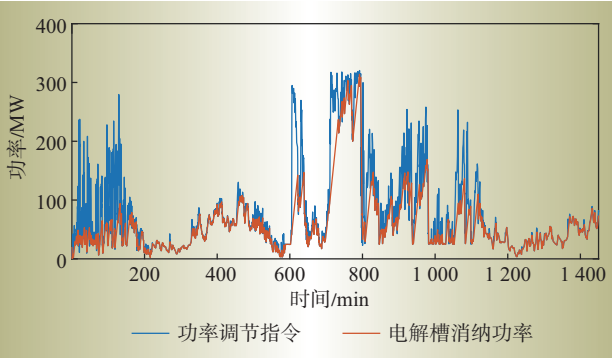


图2 碱性电解槽功率调节曲线
Fig. 2 Power regulation curve of alkaline electrolytic cell

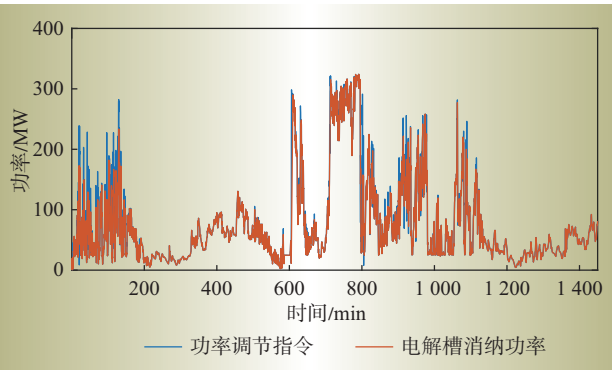


图3 PEM电解槽功率调节曲线
Fig. 3 Power regulation curve of PEM electrolytic cell

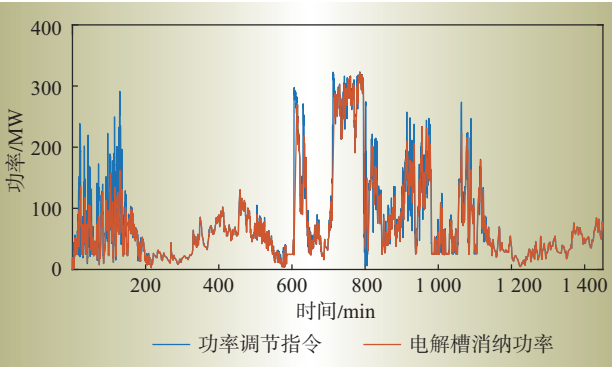


图4 混合电解槽功率调节曲线
Fig. 4 Power regulation curve of hybrid electrolytic cell

在新能源功率波动较大时,纯碱性电解槽难以保证功率跟踪的效果,会导致弃电率大幅上升,产氢能力下降等问题。由图 2 可以看出,碱性电解槽

在新能源功率平稳时功率跟踪能力较好,但在新能源功率快速波动的时间段只能在较小范围内进行功率调节,导致了较大的弃电量。

PEM 电解槽的动态性能更加优越,制氢效率更高,能够快速进行功率调节。此外,PEM 电解槽的功率运行范围也更大,可以在低功率状态下长时间保持待机状态。这种特性使 PEM 电解槽和高波动性和随机性的新能源有着良好的匹配性。如图 3 所示的仿真显示 PEM 电解槽能够基本完全跟踪新能源功率,避免弃电的发生。

但是,PEM 电解槽的单位投资成本显著高于碱性电解槽,技术相对更不成熟。在实际进行投资建设时,通常考虑混合使用碱性电解槽和 PEM 电解槽以取得经济性和功率跟踪性能的平衡。如图 4 所示,混合电解槽采用 40%PEM 电解槽的混合比例,相对纯碱性电解槽显著提升了功率跟踪能力。表 1 给出了不同电解槽的功率调节指令偏差率。

表1 功率调节指令偏差率

Table 1 Deviation rate of power regulation command %

功率跟踪效果	碱性 电解槽	PEM 电解槽	混合 电解槽
功率跟踪偏差率	13.4	1.7	4.4
上调偏差率	17.4	2.2	7.1
下调偏差率	4.3	1.4	2.8

4.3 多电解槽协同运行策略的优化方案分析

图 5 给出了在白城风光功率典型日 1 内,基于 IKR 的多目标优化算法得出的绿氢制氢日前调度曲线。图 6 给出了非支配排序遗传算法 III(non-dominated sorting genetic algorithm III, NSGA-III)算法的调度曲线。

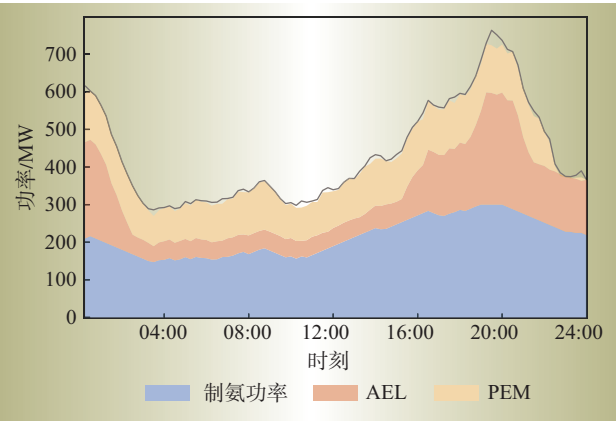


图5 典型日 1 基于 IKR 算法的日前调度曲线
Fig. 5 Day ahead scheduling curve based on improved knee region algorithm in typical day 1

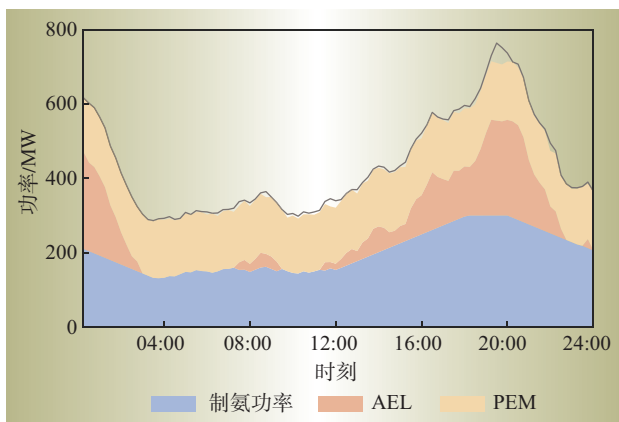


图6 典型日1基于NSGA-III算法的日前调度曲线

Fig. 6 Day ahead scheduling curve based on NSGA-III algorithm in typical day 1

04:00—08:00和10:00—13:00时段是风光功率高波动时段。从图中可以看出,NSGA-III算法优化后给出的调度方法为了能够更好进行功率跟踪,大量调度PEM电解槽进行制氢虽然一定程度上降低了弃电量,但是碱性电解槽长时间关停已处于停机状态,再次启动需要进行长时间的冷启动过程并且需要消耗大量启动功率,导致了在冷启动阶段电解槽功率不足,功率跟踪性能下降,制氢功率也有一定程度的降低。

本文使用的基于IKR算法的调度结果较好的平衡了碱性电解槽和PEM电解槽的功率配比。在风光功率高波动时段压低碱性电解槽的功率,提高PEM电解槽功率以保证功率跟踪性能。

选取风光高波动时段中波动最大的11:00附近的一段10 s级风光功率数据,给出具体的电解槽运行调度结果。由于在此时间尺度上,制氢的功率基本不能进行调节,故将制氢功率作为固定负载不考虑其对电解槽短时间功率调度的影响。图7给出了基于IKR的多目标优化算法的电解槽短时调度曲线。图8给出了NSGA-III算法得出的调度曲线。对两种电解槽均采用分组轮换控制的方式,以10个电解槽为1组进行调度。从图8中可以看出,本文使用的基于IKR算法调度结果中碱性电解槽的功率较大,在风光功率突然增大出现尖峰时功率跟踪能力相对较差,但是配合合理的大时间尺度调度策略,在风光功率出现短时高发时,能够更好地维持碱性电解槽和PEM电解槽总功率也处于高水平,保证了总体上有较好的功率跟踪效果。NSGA-III算法得出的短时调度曲线过于注重局部的跟踪效果,调用大量PEM电解槽应对功率尖峰。

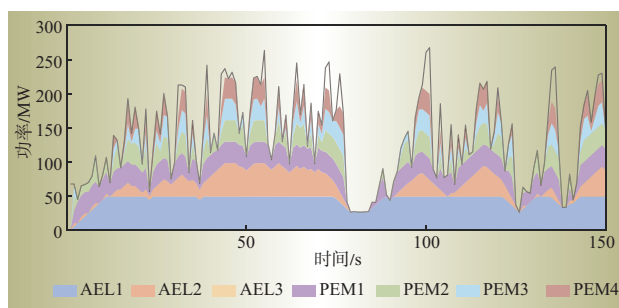


图7 基于IKR算法的短时调度曲线

Fig. 7 Short term scheduling curve based on improved knee region algorithm

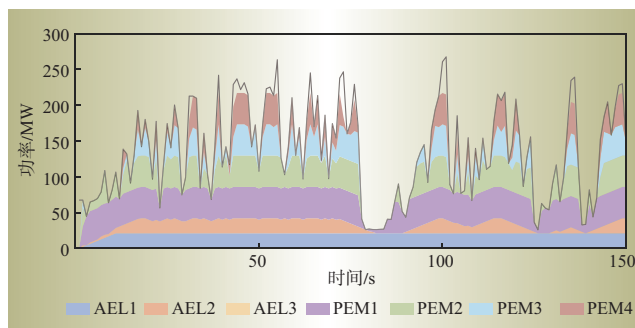


图8 基于NSGA-III算法的短时调度曲线

Fig. 8 Short term scheduling curve based on NSGA-III algorithm

附图A-1、图A-2、图A-3和图A-4给出了两个典型日中两种算法的日前优化调度曲线;可以看出,本文使用的基于IKR算法调度结果中碱性电解槽的功率较大,在风光功率突然增大出现尖峰时功率跟踪能力相对较差,但是配合合理的大时间尺度调度策略,在风光功率出现短时高发时,能够更好地维持碱性电解槽和PEM电解槽总功率也处于高水平,保证了总体上有较好的功率跟踪效果。NSGA-III算法得出的短时调度曲线过于注重局部的跟踪效果,调用了大量PEM电解槽应对功率尖峰,但没有很好的进行长时间功率平衡的优化。

表2给出了3个典型日中,两种算法的功率跟踪偏差率和综合制氢收益的对比。然后将偏差率量化为弃电惩罚成本后给出了综合收益的对比。

表2 优化结果对比

Table 2 Comparison of optimization results

典型日	基于IKR的多目标 优化算法			NSGA-III进化算法		
	功率跟踪偏差率/%	制氢总收益/万元	综合收益/万元	功率跟踪偏差率/%	制氢总收益/万元	综合收益/万元
典型日1	3.36	86.4	78.8	3.13	78.6	71.5
典型日2	2.28	81.1	75.9	3.91	82.9	74.1
典型日3	4.24	95.4	85.8	4.21	89.1	79.6

由表2对比两种多目标优化算法在不同典型日的优化结果,典型日1中风光功率在02:00至16:00时段长时间处于较低水平,制氢功率容易被储氢罐内剩余氢量限制;本文使用的基于IKR的多目标优化算法能够在日前调度的层面合理调度储氢罐内余氢,提高总体制氢功率;典型日2中风光功率波动总量不大,但是存在很多尖峰,导致电解槽的短时调度难以完全跟上功率调节指令,基于IKR的多目标优化算法适当降低了制氢功率,利用更高比例的PEM电解槽进行短时调节,大幅降低了功率跟踪偏差率;典型日3中风光功率波动幅度偏高,给日前调度带来了一定困难。基于IKR的多目标优化算法能够在保证功率跟踪性能不受影响的前提下,提高制氢总收益,在多目标之间取得较好的平衡。采用基于IKR的多目标优化算法后,综合收益约提升了7.1%,同时平均功率跟踪偏差率也下降了约13%,更加符合大安风光制绿氢合成氨一体化示范项目“健康-安全-环保”的理念。

5 结束语

本文针对目前风光制绿氢合成氨一体化项目中风光功率波动性大,导致风光功率的有效跟踪和制氢收益的最大化两者无法同时兼顾的问题,提出了一种兼顾风光功率跟踪与绿氢合成氨经济性的多电解槽运行策略。通过在不同典型日的优化调度结果分析得出以下结论:

(1) 通过在NSGA-III进化算法中加入膝区域限制条件,可以显著提升可行解集的集中程度和求解的收敛速度。同时基于IKR的NSGA-III算法的膝区域解在多个优化目标上平衡性较好。

(2) 几个典型日的日前调度和短时调度的结果表明,在日前调度中,本文使用的算法能更好的考虑不同电解槽的特性,平衡电解槽组的功率配比,合理使用储氢罐作为缓冲削峰填谷。

(3) 综合收益的对比结果表明,本文所提的算法在不同的风光功率特征情况下都能对综合收益进行优化。综合收益约提高4.0%~7.5%,平均功率跟踪偏差率降低13%。风光功率波动大且尖峰多时,该算法会在总体上保证功率跟踪偏差率基本不上升的基础上提升制氢收益。

本文提出的兼顾风光功率跟踪与绿氢合成氨经济性的多电解槽运行策略可为绿电-绿氢-绿氨”一体化项目提供可靠的调度策略。随着电氢氨一体化项目的二期建设,后续研究将结合该算法研究风电长期功率不确定性对调度策略的影响。D

附录见本刊网络版(<http://dsm.ijournals.cn>)。

参考文献:

- [1] 孙鹤旭,李争,陈爱兵,等. 风电制氢技术现状及发展趋势[J]. 电工技术学报,2019,34(19):4 071-4 083.
SUN Hexu, LI Zheng, CHEN Aibing, et al. Current status and development trend of hydrogen production technology by wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(19):4 071-4 083.
- [2] 魏小曼,余昆,陈星莺,等. 基于Affinity propagation和K-means算法的电力大用户细分方法分析[J]. 电力需求侧管理,2018,20(1):15-19,35.
WEI Xiaoman, YU Kun, CHEN Xingying, et al. Analysis of power large user segmentation based on Affinity propagation and K-means algorithm[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(1):15-19, 35.
- [3] 于丽芳,李燕雪,朱明晔,等. 电-氢-碳综合能源系统协同经济调度[J]. 电力需求侧管理,2022,24(6):63-69.
YU Lifang, LI Yanxue, ZHU Mingxi, et al. Coordinated economic dispatch of electricity-hydrogen-carbon integrated energy system[J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(6):63-69.
- [4] BENGHANEM M, MELLIT A, ALMOHAMADI H, et al. Hydrogen production methods based on solar and wind energy: a review[J]. Energies, 2023, 16.
- [5] ZHANG S, WEI Y, GUO X, et al. Overview of US patents for energy management of renewable energy systems with hydrogen[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(26):9 574-9 591.
- [6] LU X, et al. Optimization of power allocation for wind hydrogen system multi-stack PEM water electrolyzer considering degradation conditions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(15):5 850.
- [7] 王靖,蒋迎花,康丽霞,等. 可再生能源制氢与波动氢气负荷耦合系统的调控策略[J]. 高校化学工程学报, 2021,35(2):336-347.
WANG Jing, JIANG Yinghua, KANG Lixia, et al. Regulating strategies for coupling systems to match hydrogen production using renewable energy with fluctuating hydrogen demands[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2021, 35(2):336-347.
- [8] 帅挽澜,朱自伟,李雪萌,等. 考虑风电消纳的综合能源系统“源-网-荷-储”协同优化运行[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(19):18-26.
SHUAI Wanlan, ZHU Ziwei, LI Xuemeng, et al. “Source-grid-load-storage” collaborative optimization operation of integrated energy system considering wind power consumption[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19):18-26.

(责任编辑 孙 晶 方德康)

附录 A

表 A-1 算例参数
Table A-1 Parameters of case study

参数	取值
碱性电解槽功率成本/(元·kW ⁻¹)	1 610
碱性电解槽效率/%	72
PEM 电解槽功率成本/(元·kW ⁻¹)	9 600
PEM 电解槽效率/%	80
高压储氢罐投资系数/(元·m ⁻³)	2 000
氧气罐投资系数/(元·m ⁻³)	600
储氢、储氧罐年运行成本/(元·m ⁻³)	100
折现率/%	5
储氢罐压力/Mpa	75
储氧罐压力/Mpa	0.8
氢气充放效率/%	98
氢制氨转换系数/(t·Nm ⁻³)	5.06×10 ⁻⁴
售氨价格/(元·t ⁻¹)	3 250

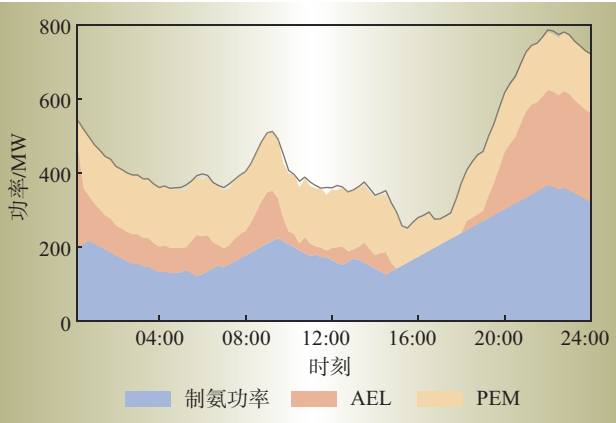


图 A-1 典型日 2 基于 IKR 算法的日前调度曲线

Fig. A-1 Day ahead scheduling curve based on improved knee region algorithm in typical day 2

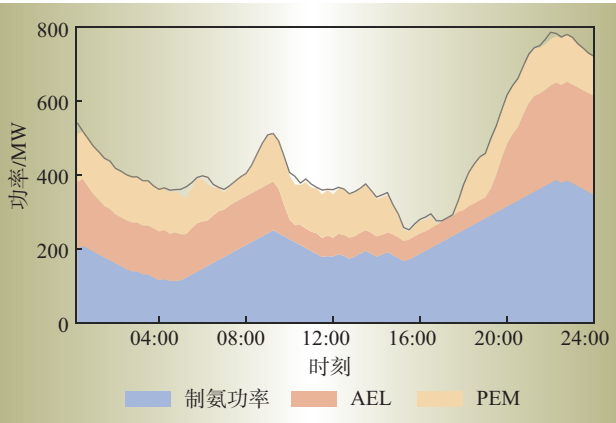


图 A-2 典型日 2 基于 NSGA-III 算法的日前调度曲线

Fig. A-2 Day ahead scheduling curve based on NSGA-III algorithm in typical day 2

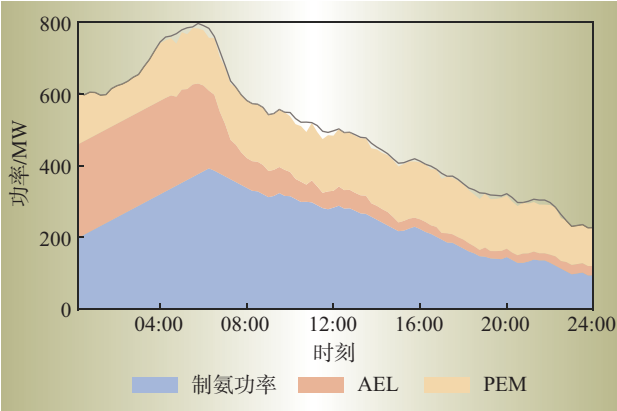


图 A-3 典型日 3 基于 IKR 算法的日前调度曲线

Fig. A-3 Day ahead scheduling curve based on improved knee region algorithm in typical day 3

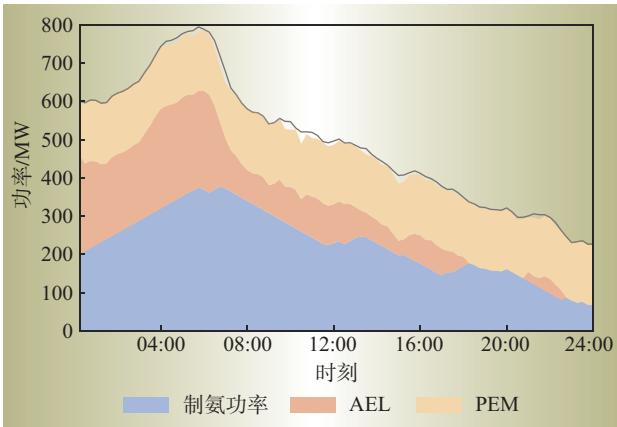


图 A-4 典型日 3 基于 NSGA-III 算法的日前调度曲线

Fig. A-4 Day ahead scheduling curve based on NSGA-III algorithm in typical day 3