

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230500

# 考虑平抑风光波动的 ALK-PEM 电解制氢系统容量优化模型

杨胜, 樊艳芳, 侯俊杰, 白雪岩

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘要:** 为提高风光资源的利用率, 电解水制氢受到了广泛关注, 但氢能在生产过程中易受到风光波动性的影响。由此, 提出考虑平抑风光波动的碱性-质子交换膜(alkaline-proton exchange membrane, ALK-PEM)电解制氢系统容量优化模型。首先, 为降低风光瞬时功率波动对电解制氢系统安全稳定运行的影响, 采用 EMD 算法分析原始风电和光伏功率的瞬时波动特性, 并经超级电容(supercapacitor, SC)进行平抑, 构建了基于 EMD 的 SC 容量配置模型。其次, 考虑不同电解槽运行特性因素, 将质子交换膜(proton exchange membrane, PEM)电解槽和碱性(alkaline, ALK)电解槽相组合替代单类型电解槽的制氢系统, 提出了 ALK-PEM 电解制氢系统容量优化模型, 以提高制氢系统经济效益。最后, 以某风电场和光伏电站数据为例, 通过仿真计算得到系统的容量规划结果, 验证所提模型在平抑波动和提高可再生能源利用率方面的有效性, 并提高了制氢系统的经济性。

**关键词:** 氢能; ALK-PEM 电解; 经验模态分解; 风光波动性; 容量配置

## Capacity optimization model for an ALK-PEM electrolytic hydrogen production system considering the stabilization of wind and PV fluctuations

YANG Sheng, FAN Yanfang, HOU Junjie, BAI Xueyan

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

**Abstract:** To enhance wind power and photovoltaic utilization, electrolytic hydrogen production has gained attention. However, hydrogen energy is vulnerable to the fluctuations of these resources during production. Therefore, this paper proposes an alkaline-proton exchange membrane (ALK-PEM) capacity optimization model for hydrogen electrolysis to mitigate these fluctuations. First, the EMD algorithm is used to analyze the transient fluctuation characteristics of raw wind and PV. Supercapacitors are employed to smooth these fluctuations, ensuring safe and stable operation of the hydrogen production system. An EMD-based SC capacity allocation model is constructed for this purpose. Second, a capacity optimization model is proposed for the ALK-PEM electrolytic hydrogen production system. By combining proton exchange membrane (PEM) and Alkaline (ALK) electrolyzers, it replaces the single-type electrolyzer system. This approach considers different electrolyzer operational characteristics, thereby improving economic efficiency. Finally, the system's capacity planning is simulated using data from a wind farm and a photovoltaic power plant. This validates the proposed model's effectiveness in smoothing fluctuations, enhancing renewable energy utilization, and improving the system's overall economy.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region (No. 2022D01C365 and No. 2022D01C662).

**Key words:** hydrogen; ALK-PEM electrolysis; EMD; wind and PV fluctuations; capacity configuration

## 0 引言

可再生能源在解决能源枯竭、环境污染和气候

变化等问题上具有重要作用<sup>[1-4]</sup>。氢能作为一种可持续能源载体, 能够与多种能源相互转换, 具备清洁、高效、无污染的特点<sup>[5-6]</sup>。目前, 电解水制氢技术包括碱性(alkaline, ALK)电解、质子交换膜(proton exchange membrane, PEM)电解和高温固体氧化物电解等<sup>[7-8]</sup>。

利用可再生能源制取氢气, 既能充分利用风光资源富裕地区的风电光电, 减少弃风弃光量, 又能

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目资助(2022D01C365, 2022D01C662); 2022 天山英才培养计划项目资助(2022TSYCLJ0019)

通过氢能应对目前能源枯竭、环境污染等挑战，但由于可再生能源发电具有随机性、波动性和间歇性的特点，直接用于制氢会造成电解槽频繁启停，影响电解槽的使用寿命<sup>[9]</sup>。为确保制氢系统安全稳定运行须通过一定的技术手段平抑风光瞬时功率波动。文献[10]为减少风电波动对电网造成的影响，提出一种滑动平均法平滑风电波动，并采用小波分解对波动功率进行二次分配至电池及超级电容(supercapacitor, SC)。文献[11]提出一种结合集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)和模糊控制的混合储能控制策略。文献[12]研究了变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)和神经网络相结合的混合储能系统(hybrid energy storage systems, HESS)优化策略。上述研究都未将风光功率的平抑策略应用于制氢系统，并且使用蓄电池与 SC 配合平抑波动会使得蓄电池频繁充放电，严重影响蓄电池的使用寿命。

在制氢系统的容量配置和优化运行方面：文献[13]为充分利用弃风电量，提高系统收益，提出了一种基于风电场配套的制氢系统容量配置方案，以经济效益最大为目标，利用粒子群算法求解；文献[14]为改善综合能源系统功率不平衡，提高能源运营商收益，降低用户购能成本，设计了考虑氢储能的综合能源系统双层框架；文献[15]为充分提高风电的利用率，提出了一种新的风电-氢系统与输电项目联合优化方案，以最大化年度风氢系统效益为目标，在不同的制氢模式、氢气交易模式和氢气需求水平下，获得了风电输电项目和氢气系统的最佳规模；文献[16]提出了改进差分时序算法对风光制氢系统中多台制氢机组和储能电池进行优化调度研究，所提算法能够很好地解决时段扩大后的出力不匹配问题。上述文献并未考虑风光波动性对制氢系统的影响。文献[17]为解决风电出力不确定性对系统的冲击，提出了考虑机组与负荷灵活性的含氢综合能源系统鲁棒优化方法，仿真表明所提方法能满足系统经济性和灵活性需求，但未对电制氢部分的运行控制进行深入研究。文献[18]提出了一种基于多类型电解制氢协同运行的风光互补制氢系统容量配置模型，通过将 ALK 电解槽与 PEM 电解槽相结合来消纳风光电力，并采用非劣分层遗传算法对模型进行求解，结果表明与单一的 ALK 电解槽制氢相比，该系统的效率与内部收益率均有所提升，但是并未考虑风光波动会造成电解槽频繁启停的问题，也并未考虑用氢需求对系统运行的影响。

综上所述，本文以提高风光资源的利用率、在满足用户用氢需求的同时提高系统运行经济性为研

究背景，对两种类型的电解槽组合协同制氢进行研究，并进一步考虑风光功率波动性对制氢系统的影响。首先，考虑到风光瞬时功率波动会对电解制氢系统安全稳定运行造成严重影响，提出利用 EMD 算法对原始的风光功率进行处理，并按风光并网波动量限值进行重构；其次，将重构得出的高频分量即风光中的瞬时功率波动通过 SC 进行平抑，以此来构建基于 EMD 的 SC 容量配置模型。接着，在考虑两类电解槽不同运行特性、风光出力等条件的基础上，提出 ALK-PEM 电解制氢系统容量优化模型。将经过 SC 平抑后的风光功率供给电解制氢系统产氢，PEM 电解槽与 ALK 电解槽通过自身的响应速度差异来响应新生成的风光功率。最后，以某风电场和光伏电站数据为例进行仿真计算，得到系统的容量规划结果，并与常规制氢方案的规划结果相比较，验证所提模型在平抑波动及提高风光资源利用率方面的有效性，并在一定程度上提高了系统的经济性。

### 1 ALK-PEM 电解制氢系统架构

针对 PEM 电解制氢经济性差及 ALK 电解制氢效率低并受风光波动影响大的问题，提出了 ALK-PEM 电解制氢系统的架构，如图 1 所示。系统由可再生能源发电单元、电解制氢单元、压缩储氢单元及电储能单元组成。

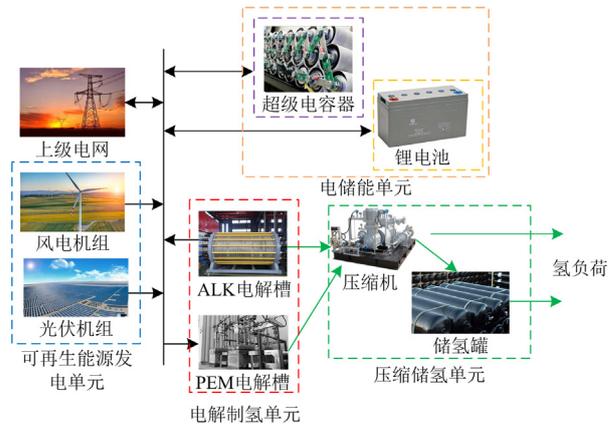


图 1 ALK-PEM 电解制氢系统架构图

Fig. 1 Structure diagram of ALK-PEM electrolytic hydrogen production system

电解制氢单元由 ALK 电解槽和 PEM 电解槽组成。ALK 电解槽对电源质量要求较高，而 PEM 电解槽的成本较高，约为 ALK 电解槽的 3 倍<sup>[19]</sup>。另外，ALK 电解槽在功率调节范围和动态响应速度方面相对较弱，而 PEM 电解槽与可再生能源电力的匹配特性较好<sup>[20]</sup>。因此本文考虑将这两类电解槽进行组合研究，由二者一起联合制氢组成电解制氢单

元, 以充分发挥各自的优点。通过确定二者在系统中的最佳配比, 提高整个制氢系统的经济性。ALK 电解槽与 PEM 电解槽的相关参数如表 1 所示<sup>[21-22]</sup>。

表 1 电解槽参数对比

Table 1 Comparison of electrolytic tank parameters

相关参数	ALK 电解槽	PEM 电解槽
电解效率/%	60~75	70~90
功率调制范围/%	40~100	5~120
冷启动时长/min	60	5
能耗/(kWh·m <sup>-3</sup> )	4.5~5.5	3.8~5.0

由于风光发电的瞬时功率波动会严重威胁制氢系统安全稳定运行, 本文考虑使用 SC 平抑风瞬时功率波动, 以此提高制氢系统的可靠性和安全性。因此本系统中锂电池和 SC 一起构成了电储能单元。

## 2 面向功率分配的各单元控制策略设计

### 2.1 电解制氢单元控制策略

本文考虑使 ALK 电解槽承担制氢功率中较为平滑的功率分量, 功率调制范围为 40%~100% 的额定功率, 如式(1)所示, 而 PEM 电解槽则承担制氢功率中较为波动的功率分量, 功率调制范围为 5%~120% 的额定功率, 如式(2)所示。

$$0.4P_{AELN} \leq P_{AEL} \leq P_{AELN} \quad (1)$$

$$0.05P_{PEMN} \leq P_{PEM} \leq 1.2P_{PEMN} \quad (2)$$

式中:  $P_{AELN}$ 、 $P_{PEMN}$  分别为 ALK 电解槽与 PEM 电解槽的额定功率;  $P_{AEL}$ 、 $P_{PEM}$  分别为 ALK 电解槽与 PEM 电解槽的电解功率。

文献[23]研究了功率波动对 ALK 电解槽的影响, 研究表明在大功率波动的输入条件下, 将功率波动控制在一定范围内, 可以显著降低 ALK 电解制氢能耗。本文通过 SC 平抑风光功率中的瞬时波动, 能够降低风光功率波动对电解制氢的影响。但原始风光功率经平抑过后也具有一定的波动性, 为此本文采用以下功率分配策略合理分配至不同类型的电解槽, 提高系统的运行经济性。

1) 当电解功率小于等于风光发电功率, 即  $P_t^{ele} \leq P_t^{Wind,PV}$  时, 考虑让 ALK 电解槽承担尽可能高的制氢功率, 使 PEM 电解槽承担剩余制氢。ALK 电解功率  $P_t^{AEL}$  与 PEM 电解功率  $P_t^{PEM}$  分别如式(3)和式(4)所示。

$$P_t^{AEL} = \min(P_t^{AEL,max}, P_t^{ele} - P_t^{PEM,min}) \quad (3)$$

$$P_t^{PEM} = \max(P_t^{ele} - P_t^{AEL,max}, P_t^{PEM,min}) \quad (4)$$

式中:  $P_t^{AEL,max}$  为 ALK 电解槽在  $t$  时刻所能承受的最高制氢功率;  $P_t^{PEM,min}$  为 PEM 电解槽在  $t$  时刻所

能承受的最低制氢功率。

$$P_t^{AEL,max} = \min(P_{t-1}^{AEL} + \Delta P_{AEL}^{max}, P_{AELN}) \quad (5)$$

$$P_t^{PEM,min} = \max(P_{t-1}^{PEM} - \Delta P_{PEM}^{max}, 0.05P_{PEMN}) \quad (6)$$

式中,  $\Delta P_{AEL}^{max}$ 、 $\Delta P_{PEM}^{max}$  分别为 ALK 电解槽与 PEM 电解槽的最大的爬坡功率。

2) 由于 PEM 电解制氢效率较高, 利用 PEM 电解槽制氢可以节约向电网购电成本。因此, 当电解功率大于风光发电功率, 即  $P_t^{ele} > P_t^{Wind,PV}$  时, 考虑让 PEM 电解槽承担主要制氢任务, 使 ALK 电解槽以尽可能低的功率运行。ALK 电解功率与 PEM 电解功率分别如式(7)、式(8)所示。

$$P_t^{AEL} = \max(P_t^{AEL,min}, P_t^{ele} - P_t^{PEM,max}) \quad (7)$$

$$P_t^{PEM} = \min(P_t^{ele} - P_t^{AEL,min}, P_t^{PEM,max}) \quad (8)$$

$$P_t^{AEL,min} = \max(P_{t-1}^{AEL} - \Delta P_{AEL}^{max}, 0.4P_{AELN}) \quad (9)$$

$$P_t^{PEM,max} = \min(P_{t-1}^{PEM} + \Delta P_{PEM}^{max}, 1.2P_{PEMN}) \quad (10)$$

式中:  $P_t^{AEL,min}$  为  $t$  时刻 ALK 电解槽的最低电解功率;  $P_t^{PEM,max}$  为  $t$  时刻 PEM 电解槽的最高电解功率。

### 2.2 SC 运行控制策略

对各典型日风光功率进行经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)<sup>[24-25]</sup>处理, 得到风光功率的各阶固有模态函数(intrinsic modal functions, IMF), 如果分别对各阶 IMF 单独进行处理会增加很多不必要的工作量, 因此结合风光电源并网波动量限制, 将其重构为低频分量和高频分量<sup>[26-27]</sup>。由于篇幅限制, 本文不再赘述 EMD 的具体分解和重构过程, 具体过程可参考文献[28-29]。原始的风光功率经 EMD 分解, 并参考风光功率并网标准进行重构后, 低频分量直接进入电解制氢单元产氢; 高频分量须经 SC 进行平抑。基于 EMD 的风光功率分配流程如图 2 所示。风光功率高频分量经 SC 平抑前后的示意图如图 3 所示。图 3 中,  $t_0$  为某一时刻,  $\Delta t$  为时间间隔, 取 5 min。

$$P_t^{ya} = P_t^{dp} + P_t^{sp} \quad (11)$$

$$P_t^{SC} = P_t^{SC,dis} - P_t^{SC,ch} \quad (12)$$

$$\begin{cases} P_t^{SC,dis} = -P_t^{sp}, & P_t^{sp} \leq 0 \\ P_t^{SC,ch} = P_t^{sp}, & P_t^{sp} > 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$P_t^{py} = P_t^{SC} + P_t^{sp} \quad (14)$$

$$P_t^{Wind,PV} = P_t^{dp} + P_t^{py} \quad (15)$$

式中:  $P_t^{ya}$  为  $t$  时刻原始的风光功率;  $P_t^{dp}$ 、 $P_t^{sp}$  分别为  $t$  时刻风光功率经 EMD 分解后重构的低频分量和高频分量;  $P_t^{SC,dis}$  和  $P_t^{SC,ch}$  分别为 SC 的放电功率和充电功率;  $P_t^{py}$  为  $P_t^{SC}$  经 SC 平抑后的功率;  $P_t^{SC}$ 、

$P_t^{\text{Wind,PV}}$  分别为  $t$  时刻 SC 的输出功率和经 SC 平抑后的风光功率。

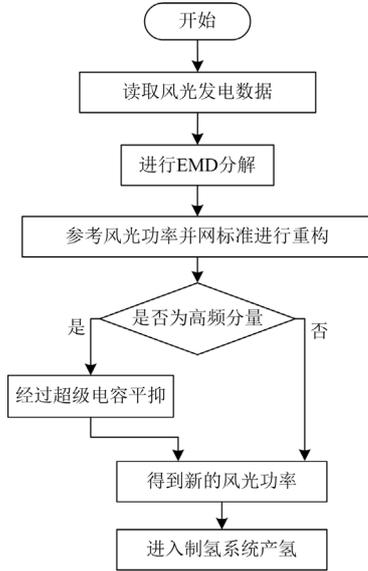


图 2 基于 EMD 风光功率分配流程图

Fig. 2 EMD-based wind and PV power distribution flow chart

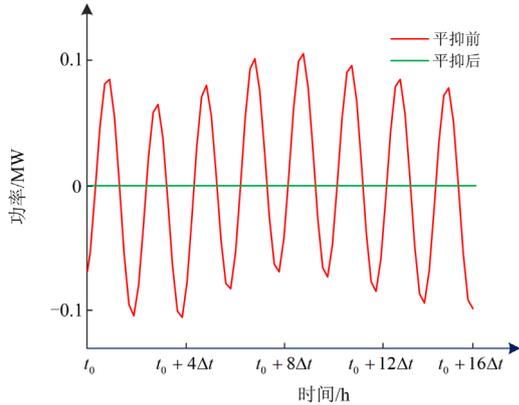


图 3 高频分量平抑前后示意图

Fig. 3 Schematic diagram before and after high-frequency component smoothing

### 2.3 锂电池运行控制策略

锂电池的主要作用是削峰填谷，即在风光出力变化时，保证电解功率的平滑输出。具体而言，当风光出力在某些时段高于电解功率而在另一些时段低于电解功率时，锂电池出力维持电功率平衡，满足制氢需求。如果风光出力不足，并加上储能供电也无法满足电解功率需求，那么就需要通过向上级电网购电来弥补缺额。反之，如果风光出力在满足电解功率后仍有剩余，则通过锂电池进行消纳，若仍有剩余就选择低价出售给电网，以获得一定的收益，以此来补贴系统的运行支出。

$$\begin{cases} P_t^{\text{ch}} = P_t^{\text{Wind,PV}} - P_t^{\text{ele}}, & 0 \leq P_t^{\text{Wind,PV}} - P_t^{\text{ele}} \leq P_t^{\text{ch,max}} \\ P_t^{\text{dis}} = P_t^{\text{ele}} - P_t^{\text{Wind,PV}}, & 0 \leq P_t^{\text{ele}} - P_t^{\text{Wind,PV}} \leq P_t^{\text{dis,max}} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} P_t^{\text{ch,max}} = \min[P_{\text{ch}}^{\text{max}}, (S_{\text{bat,max}} - S_{\text{bat,t}})/\Delta t] \\ P_t^{\text{dis,max}} = \min[P_{\text{dis}}^{\text{max}}, (S_{\text{bat,t}} - S_{\text{bat,min}})/\Delta t] \end{cases} \quad (17)$$

$$S_{\text{bat,t}} = E_{\text{bat}} \cdot H_{\text{bat,t}} \quad (18)$$

$$\begin{cases} P_t^{\text{sell}} = P_t^{\text{Wind,PV}} - P_t^{\text{ele}}, & P_t^{\text{Wind,PV}} - P_t^{\text{ele}} > P_t^{\text{ch,max}} \\ P_t^{\text{buy}} = P_t^{\text{ele}} - P_t^{\text{Wind,PV}}, & P_t^{\text{ele}} - P_t^{\text{Wind,PV}} > P_t^{\text{dis,max}} \end{cases} \quad (19)$$

式中： $P_t^{\text{dis}}$ 、 $P_t^{\text{ch}}$  分别为  $t$  时刻锂电池的放电功率与充电功率； $P_{\text{ch}}^{\text{max}}$ 、 $P_{\text{dis}}^{\text{max}}$  分别为锂电池的充、放电功率上限； $P_t^{\text{ch,max}}$ 、 $P_t^{\text{dis,max}}$  分别为  $t$  时刻锂电池的最大可承受充电功率与放电功率； $S_{\text{bat,t}}$  为  $t$  时刻锂电池的电量； $S_{\text{bat,max}}$ 、 $S_{\text{bat,min}}$  分别锂电池所允许的电量上限和下限； $H_{\text{bat,t}}$  为锂电池  $t$  时刻的荷电状态； $E_{\text{bat}}$  为锂电池组的容量； $P_t^{\text{sell}}$ 、 $P_t^{\text{buy}}$  分别为  $t$  时刻向电网售电和购电的功率。

### 2.4 压缩储氢单元控制策略

电解制氢单元生产的氢气经过压缩机加压输送到管道中，为氢负荷提供所需氢气。同时，储氢罐也发挥着辅助电解槽维持氢气供需平衡的作用。储氢罐的存在使得制氢系统无须实时跟随用氢需求的变化而变动制氢功率，从而平滑了氢负荷波动。具体的运行控制过程是，若电解槽的产氢速率大于等效氢负荷的耗氢速率，则储氢罐储存氢气，其储氢速率如式(21)所示；若电解槽的产氢速率小于等于等效氢负荷的耗氢速率，则储氢罐释放氢气，其释放速率如式(22)所示。

$$n_t^{\text{in}} = n_t^{\text{ele}} - n_t^{\text{load}}, \quad n_t^{\text{ele}} > n_t^{\text{load}} \quad (20)$$

$$n_t^{\text{out}} = n_t^{\text{load}} - n_t^{\text{ele}}, \quad n_t^{\text{ele}} \leq n_t^{\text{load}} \quad (21)$$

式中： $n_t^{\text{out}}$ 、 $n_t^{\text{in}}$  分别为储氢罐的放气速率与进气速率； $n_t^{\text{ele}}$  为电解槽产氢速率； $n_t^{\text{load}}$  为等效氢负荷耗氢速率。

## 3 ALK-PEM 电解制氢系统的容量配置模型

### 3.1 面向平抑风光波动的 SC 容量配置模型

为满足电解制氢系统对电源质量的需求，使制氢系统能够可靠、稳定运行，本文采用 SC 平抑风光功率中的瞬时功率波动分量。基于本文所提的 SC 运行控制策略，以风光电源并网条件为标准，建立以经济性最优为目标的 SC 容量配置模型。

#### 3.1.1 目标函数

SC 容量配置以平抑风光瞬时功率波动为目的，

尽可能减少 SC 投资年折现成本、弃风弃光惩罚成本以及运行维护成本。

$$\min : C_{tz}^{SC} + C_{SC}^{om} + \sum_{t=1}^T C_t^{off} \quad (22)$$

式中:  $C_{tz}^{SC}$ 、 $C_{SC}^{om}$  分别为 SC 的投资年折现成本与运行维护成本;  $C_t^{off}$  为弃风弃光产生的惩罚成本。

$$C_t^{off} = \lambda_{sq} \cdot \sum_{i=1}^T (P_t^{sp} - P_t^{SC,ch} - P_{jz}) \cdot \Delta t, P_t^{sp} > P_{jz} \quad (23)$$

式中:  $\lambda_{sq}$  为弃风弃光的单位惩罚成本;  $P_{jz}$  为 SC 平抑风光功率所选取的基准功率。

通常 SC 平抑瞬时功率波动所采用的都是以 0 为基准功率,但由于 SC 的能量转化效率并非 100%, 本文取 90%, 这将导致负向部分比正向部分少补偿 19% 的能量。为修正负向功率平抑不足的问题以达到更好的平抑效果, 本文采取将基准功率适当下移, 以此来弥补负向功率补偿不足的问题。由此需要对式(13)进行修正, 具体如式(25)所示。

$$-P_{max}^{sp} \leq P_{jz} \leq 0 \quad (24)$$

$$\begin{cases} P_t^{SC,ch} = \max(P_t^{sp} - P_{jz}, P_{SC,ch}^{max}), P_t^{sp} \geq P_{jz} \\ P_t^{SC,dis} = \max(P_{jz} - P_t^{sp}, P_{SC,dis}^{max}), P_t^{sp} < P_{jz} \end{cases} \quad (25)$$

$$P_t^{Wind,PV} = P_t^{ya} - P_t^{SC,ch} + P_t^{SC,dis} - P_{jz} \quad (26)$$

式中:  $P_{max}^{sp}$  为原风光功率负向功率最大值;  $P_{SC,ch}^{max}$ 、 $P_{SC,dis}^{max}$  分别为 SC 的充、放电功率上限。

### 3.1.2 约束条件

SC 运行特性约束如式(27)一式(32)所示。

$$0 \leq P_t^{SC,dis} \leq P_{SC,dis}^{max} \quad (27)$$

$$0 \leq P_t^{SC,ch} \leq P_{SC,ch}^{max} \quad (28)$$

$$P_t^{SC,ch} \cdot P_t^{SC,dis} = 0 \quad (29)$$

$$H_{SC,t} = (1 - \eta_{SC}^{loss}) H_{SC,t-1} + \left( \frac{\eta_{SC,ch} \cdot P_t^{SC,ch}}{E_{SC}} - \frac{P_t^{SC,dis}}{\eta_{SC,dis} \cdot E_{SC}} \right) \Delta t \quad (30)$$

$$\eta_{SC,ch} \sum_{t=1}^T (P_t^{SC,ch} \cdot \Delta t) - \frac{1}{\eta_{SC,dis}} \sum_{t=1}^T (P_t^{SC,dis} \cdot \Delta t) = 0 \quad (31)$$

$$H_{SC}^{min} \leq H_{SC,t} \leq H_{SC}^{max} \quad (32)$$

式中:  $H_{SC,t}$  为 SC 组  $t$  时刻的荷电状态;  $H_{SC}^{max}$ 、 $H_{SC}^{min}$  分别为 SC 的荷电状态上、下限;  $\eta_{SC}^{loss}$  为 SC 的自放电系数;  $E_{SC}$  为 SC 组的容量;  $\eta_{SC,ch}$ 、 $\eta_{SC,dis}$  分别为 SC 的充、放电效率。

## 3.2 电解制氢系统容量配置模型

为兼顾电解制氢系统的经济性和应对风光波动性的能力,基于本文所提制氢系统的运行控制策略,

构建了 ALK-PEM 电解制氢系统容量优化模型。

### 3.2.1 目标函数

在本文所构建的系统中,以 ALK-PEM 电解制氢系统综合成本最小为目标,考虑电储能削峰填谷、电储能的运维成本、购电成本、售电收益、设备投资年折现成本,对系统的运行控制进行优化并对所涉及设备进行容量规划。

$$\min : C_{tz} + C_{om} + \sum_{t=1}^T (C_t^{buy} - C_t^{sell}) + \sum_{t=1}^T C_t^{bat} \quad (33)$$

式中:  $C_{tz}$  为系统设备投资年折现成本;  $C_{om}$  为各设备的运行维护成本;  $C_t^{buy}$  为系统向电网的购电成本;  $C_t^{sell}$  为风光机组向上级电网售电获取的收益;  $C_t^{bat}$  为蓄电池的运行成本。

$$C_{tz} = \sum_{j=1}^N U^j \cdot C^j \cdot L^j \quad (34)$$

$$U^j = \frac{r^j (1 + r^j)^{y^j}}{(1 + r^j)^{y^j} - 1} \quad (35)$$

$$C_{om} = \sum_{j=1}^N A^j \cdot C^j \cdot L^j \quad (36)$$

$$C_t^{sell} = \lambda \cdot P_t^{sell} \cdot \Delta t \quad (37)$$

$$C_t^{buy} = e_t^{price} \cdot P_t^{buy} \cdot \Delta t \quad (38)$$

$$C_t^{bat} = c_{com} \cdot |P_t^{bat}| \cdot \Delta t \quad (39)$$

式中:  $U^j$ 、 $C^j$ 、 $L^j$ 、 $r^j$ 、 $y^j$ 、 $A^j$  分别为第  $j$  类设备的投资回收系数、单位容量投资成本、装机容量、折现率、寿命、运行维护成本占其投资成本比例;  $e_t^{price}$  为分时电价;  $\lambda$  为单位售电电价;  $c_{com}$  为锂电池的单位电量维护成本;  $P_t^{bat}$  为锂电池的充放电功率,具体可由式(40)表示。

$$P_t^{bat} = P_t^{dis} - P_t^{ch} \quad (40)$$

### 3.2.2 约束条件

#### 1) 电功率平衡约束

$$P_t^{Wind,PV} + P_t^{bat} + P_t^{buy} - P_t^{ele} - P_t^{sell} = 0 \quad (41)$$

$$P_t^{ele} = P_t^{AEL} + P_t^{PEM} \quad (42)$$

#### 2) 电解槽特性约束

$$|P_t^{AEL} - P_{t-1}^{AEL}| = \Delta P_{AEL}^{max} \quad (43)$$

$$P_{AEL}^{min} \leq P_t^{AEL} \leq P_{AEL}^{max} \quad (44)$$

$$|P_t^{PEM} - P_{t-1}^{PEM}| = \Delta P_{PEM}^{max} \quad (45)$$

$$P_{PEM}^{min} \leq P_t^{PEM} \leq P_{PEM}^{max} \quad (46)$$

式中:  $P_{AEL}^{max}$ 、 $P_{AEL}^{min}$  分别为 ALK 电解槽的功率上限和下限;  $P_{PEM}^{max}$ 、 $P_{PEM}^{min}$  分别为 PEM 电解槽的功率上限和下限。

## 3) 锂电池特性约束

$$0 \leq P_t^{\text{dis}} \leq P_{\text{dis}}^{\text{max}} \quad (47)$$

$$0 \leq P_t^{\text{ch}} \leq P_{\text{ch}}^{\text{max}} \quad (48)$$

$$P_t^{\text{ch}} \cdot P_t^{\text{dis}} = 0 \quad (49)$$

$$H_{\text{bat},t} = H_{\text{bat},t-1} + \left( \frac{\eta_{\text{ch}} \cdot P_t^{\text{ch}}}{E_{\text{bat}}} - \frac{P_t^{\text{dis}}}{\eta_{\text{dis}} \cdot E_{\text{bat}}} \right) \Delta t \quad (50)$$

$$\eta_{\text{ch}} \sum_{t=1}^T (P_t^{\text{ch}} \cdot \Delta t) - \frac{1}{\eta_{\text{dis}}} \sum_{t=1}^T (P_t^{\text{dis}} \cdot \Delta t) = 0 \quad (51)$$

$$H_{\text{bat}}^{\text{min}} \leq H_{\text{bat},t} \leq H_{\text{bat}}^{\text{max}} \quad (52)$$

式中,  $H_{\text{bat}}^{\text{max}}$ 、 $H_{\text{bat}}^{\text{min}}$  分别为荷电状态上下限。式(51)保证了调度周期起始和结束时刻需要的电量相等。

## 4) 储氢罐特性约束

$$S_{\text{OH},t} = S_{\text{OH},t-1} + \frac{\eta_{\text{HS}} \cdot n_t^{\text{in}} - n_t^{\text{out}}}{\eta_{\text{HS}}} \cdot \Delta t \quad (53)$$

$$S_{\text{OH}}^{\text{min}} \leq S_{\text{OH},t} \leq S_{\text{OH}}^{\text{max}} \quad (54)$$

$$p_t^{\text{HS}} = p_{t-1}^{\text{HS}} - \left( \frac{R \cdot T^{\text{HS}}}{V_{\text{HS}}} \right) \cdot (\eta_{\text{HS}} \cdot n_t^{\text{in}} - n_t^{\text{out}} / \eta_{\text{HS}}) \Delta t \quad (55)$$

$$\eta_{\text{HS}} \sum_{t=1}^T (n_t^{\text{in}} \cdot \Delta t) - \frac{1}{\eta_{\text{HS}}} \sum_{t=1}^T (n_t^{\text{out}} \cdot \Delta t) = 0 \quad (56)$$

$$p_{\text{min}}^{\text{HS}} \leq p_t^{\text{HS}} \leq p_{\text{max}}^{\text{HS}} \quad (57)$$

式中:  $S_{\text{OH},t}$  为  $t$  时刻储氢罐的等效荷电状态;  $E_{\text{HS}}$  为储氢管的最大储氢量;  $\eta_{\text{HS}}$  为储氢罐充放氢效率;  $p_t^{\text{HS}}$  为  $t$  时刻储氢罐的压强;  $V_{\text{HS}}$  为储氢罐的体积;  $R$  为理想气体常数;  $T^{\text{HS}}$  为热力学温度;  $p_{\text{max}}^{\text{HS}}$ 、 $p_{\text{min}}^{\text{HS}}$  分别为储氢罐压强的上下限。

## 5) 氢平衡约束

$$n_t^{\text{ele}} + n_t^{\text{out}} - n_t^{\text{in}} - n_t^{\text{load}} = 0 \quad (58)$$

## 6) 购售电量约束

$$0 \leq P_t^{\text{buy}} \leq P_{\text{buy}}^{\text{max}} \quad (59)$$

$$0 \leq P_t^{\text{sell}} \leq P_{\text{sell}}^{\text{max}} \quad (60)$$

式中,  $P_{\text{buy}}^{\text{max}}$ 、 $P_{\text{sell}}^{\text{max}}$  分别为制氢系统向上级电网购电和售电的上限。

## 4 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, 风电机组容量为 7 MW, 光伏机组容量为 4 MW。等效氢负荷参考文献[13], 本文假设加氢站的日均需求量为 1500 kg/天。ALK 电解槽、PEM 电解槽、SC、锂电池等设备的相关参数参考文献[30-32], 并根据目前的市场价格做出相应调整, 具体如表 2 和表 3 所示。分时电价数据<sup>[33]</sup>如表 4 所示。考虑到电解槽功率响应的的时间量级, 仿真所使用的

单位时间尺度为  $\Delta t = 5 \text{ min}$ <sup>[17]</sup>。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 2 设备参数表

Table 2 Equipment parameters

设备	单位成本	运维成本比例/%	转换效率/%
ALK 电解槽	3100 元/kW	4	75
PEM 电解槽	8000 元/kW	5	85
锂电池组	500 元/kWh	4	90
	2700 元/kW		
SC	10 000 元/kWh	2	90
储氢罐	15 000 元/m <sup>3</sup>	2	90

表 3 其他参数

Table 3 Other parameters

参数	数值
锂电池 SOC 上下限	0.9, 0.1
锂电池寿命/年	10
锂电池单位电量维护成本/(元/kWh)	0.05
SC 自放电率/%	0.5
SC 寿命/年	15
储氢罐压强上下限/MPa	5, 0.5
储氢罐寿命/年	20
ALK 电解槽寿命/年	20
PEM 电解槽寿命/年	15
年折现率/%	5.75
向电网售电电价/(元/kWh)	0.3

表 4 分时电价表

Table 4 Times-of-use electricity pricing

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

采用 k-means 算法对全年的风光机组数据进行聚类, 具体过程参考文献[34], 得出 6 个典型的风光出力场景, 具体场景聚类结果如图 4 所示。本文对风光功率波动量的定义是当前时刻的风光功率测量值减去前一刻的风光功率测量值, 具体如式(61)所示。

$$\Delta P_t^{\text{WT,PV}} = P_t^{\text{WT,PV}} - P_{t-1}^{\text{WT,PV}} \quad (61)$$

式中:  $\Delta P_t^{\text{WT,PV}}$  为  $t$  时刻的风光功率波动量;  $P_t^{\text{WT,PV}}$ 、 $P_{t-1}^{\text{WT,PV}}$  分别为  $t$  时刻与  $t-1$  时刻的风光发电功率。

参考文献[24]将各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, 并选取中位数作为该典型场景的典型日, 从而从 6 个典型场景中

得到 6 个典型日。各典型日的风光出力曲线如图 5 所示。

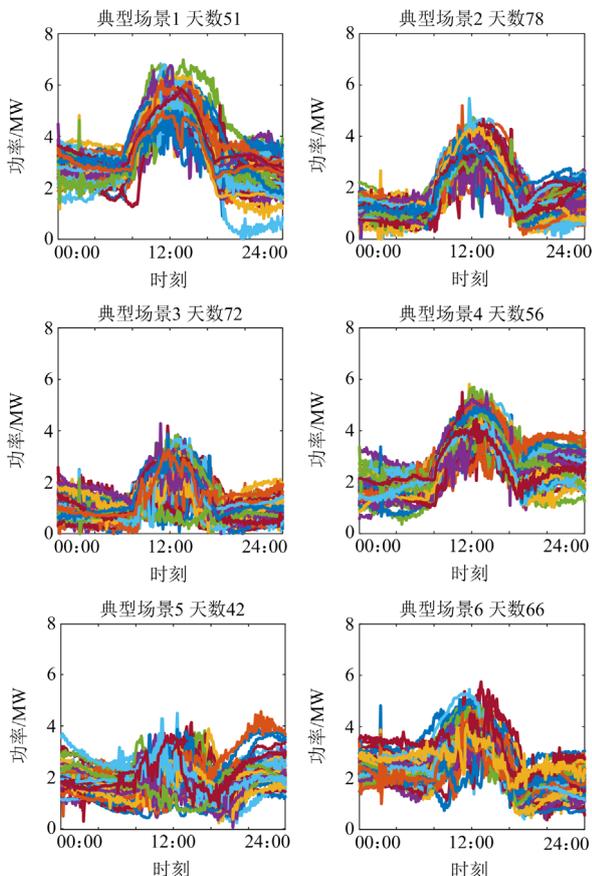


图 4 各典型场景风光功率聚类图

Fig. 4 Clustering diagram of wind and PV power for each typical scenario

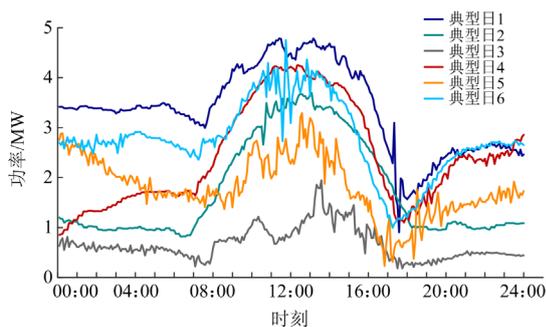


图 5 各典型日风光功率曲线图

Fig. 5 Wind and PV power curves for each typical day

#### 4.1 SC 的容量配置分析

对比图 5 和图 6 可知, 经 EMD 分解重构后的低频分量较原风光功率曲线平滑。由图 7 所示, 风光功率曲线经 EMD 分解并重构后的高频分量可近似看作正负对称的包络线, 高频部分的能量和近似为 0, 因此可以通过功率型储能 SC 来平抑这部分瞬时

功率波动。依据 3.1 节所介绍的 SC 容量配置模型, 以平抑风光功率波动为目的, 尽可能减少 SC 的投资及运行维护成本, 利用 Gurobi 求解器对模型进行求解。最终得出 SC 的容量为 184.9 kWh。经 SC 平抑后 6 个典型日的累计弃风弃光量为 33.4 kWh。以典型日 4 为例, 最终的平抑前后的高频分量如图 8 所示。可以看出, 风光功率中的瞬时功率波动分量经 SC 平抑后, 近似是一条直线, 即功率相当于一个恒定值, 由于本文考虑到了 SC 的充放电效率对平抑结果的影响, 根据 3.1 节所提的方法找到最优

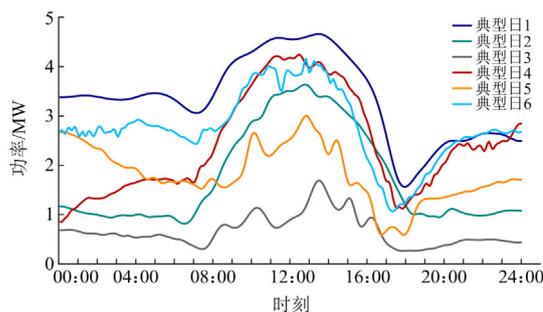


图 6 风光功率低频重构分量

Fig. 6 Low-frequency reconfiguration components in wind and PV power

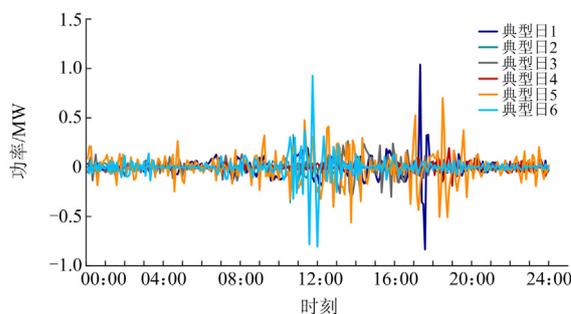


图 7 风光功率高频重构分量

Fig. 7 High-frequency reconfiguration components in wind and PV power

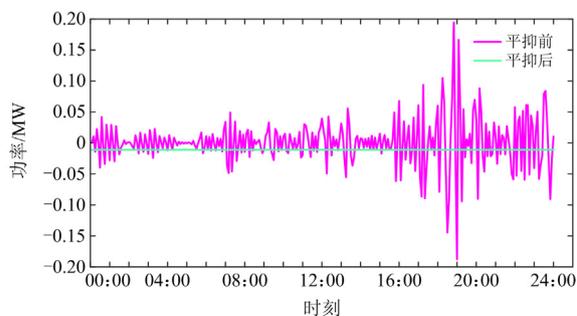


图 8 平抑前后的高频分量

Fig. 8 High frequency component before and after smoothing

的基准功率为-11 kW，因此平抑后的功率不为 0 而为-11 kW。通过使用 SC 平抑风光中的瞬时功率波动，可极大地提高新能源消纳，减少可再生能源的浪费，降低了因风光功率波动而对系统运行产生的安全威胁的几率。

#### 4.2 各电解制氢方案容量配置对比分析

本文采用 3 种运行控制策略进行对比分析。

方案 1：采用本文所提方式对风光波动功率进行处理，但以单一 ALK 电解制氢，而不采用 ALK-PEM 电解制氢相互配合的方式。

方案 2：在方案 1 的基础上将单一 ALK 电解制氢方式替换为单一 PEM 电解制氢方式。

方案 3：在方案 2 的基础上用 ALK-PEM 电解制氢替代单一 PEM 电解制氢方式，即本文所提方式进行电解制氢。

将本文设定的 3 种规划方案分别在设定的场景下进行仿真计算，各个设备的容量规划结果如表 5 所示。由于锂电池寿命较短，在系统设定的运行周期 20 年内至少需要更换一次，所以在各个方案中锂电池都配置了两组<sup>[27]</sup>。

表 5 设备容量配置表

Table 5 Equipment capacity configuration

设备	方案 1	方案 2	方案 3
ALK 电解槽/MW	3.68	—	2.94
PEM 电解槽/MW	—	2.93	1.40
锂电池容量/MWh	2.34×2	605×2	593×2
锂电池功率/MW	0.77×2	200×2	196×2
储氢罐/m <sup>3</sup>	180	197	208

由表 5 的容量配置结果所示，由于 ALK 电解制氢效率较低，所以为满足相同的用氢需求，方案 1 单配置 ALK 电解槽需要较大的容量(3.68 MW)。为满足 ALK 电解制氢对电能质量的要求，则需要配置大容量的锂电池储能，来平抑功率波动以使制氢功率更加平稳。方案 2 和方案 3 由于使用了 PEM 电解槽，所以无须配置大规模的储能来平抑功率波动，减少了储能的投入。方案 2 和方案 3 容量配置的差别主要在于电解槽容量规划不同。方案 2 由于没有配置 ALK 电解槽，制氢全靠 PEM 电解槽完成，导致 PEM 电解槽的容量配置较大。方案 3 中 ALK 电解槽承担着主要的制氢任务，所以配置的规模较大，约为 PEM 电解槽的 2 倍。

结合表 5 和表 6 可以发现，方案 1 尽管配置了大容量的锂电池和 ALK 电解槽，但是由于锂电池单位投资成本低，并且 ALK 电解槽价格也较低，所以前期的设备总投资成本最低，但由于锂电池的

寿命较短，并需要更换和维护，所以最终导致方案 1 系统年综合成本比方案 3 高。虽然仿真计算表明在年综合成本方面，方案 1 只比方案 3 高 1 万元，但由于使用了大量锂电池，在实际过程中随着时间的推移，实际容量会衰减，需要及时更换和维护，会造成大量成本支出。本文对锂电池的建模较为简单，其成本方面的考虑也更偏于保守，因此方案 3 较方案 1 在实际环境下会更优。方案 2 由于 PEM 电解槽的前期投资成本高，并且 PEM 电解槽的运行维护费用也高于 ALK 电解槽，导致整个系统的经济性最差。这也表明了 ALK-PEM 电解制氢系统可以减少 PEM 电解槽和储能的配置容量，在一定程度上可以提高整个系统的经济性。

表 6 系统运行费用

Table 6 System operating costs

	万元		
	方案 1	方案 2	方案 3
设备投资成本	2066	2810	2511
设备年折现成本	227	286	240
系统年综合成本	635	649	634

#### 4.3 ALK-PEM 电解制氢系统运行分析

对本文所提 ALK-PEM 电解制氢系统在本算例情景下进行计算仿真分析。为节约篇幅，本节将对 6 个典型日中具有代表性的典型日 1、3 和 4 进行展开分析，各单元运行结果如下所述。

图 9—图 11 分别为典型日 1、3 和 4 的电功率平衡图。典型日 1 的风光出力较为充足，在满足氢负荷需求的情况下仍有很多富余的电力售给电网，以获取一定的收益。典型日 3 和 4 出现了风光出力不足的情况，需要向电网购电以满足用户用氢需求。当制氢功率缺额比较大时，ALK-PEM 电解制氢系统选择从电网购电，而不是通过锂电池组来获取电力，并且在风光出力较大、满足用氢需求后仍有较大的余量，ALK-PEM 电解制氢系统会选择将这部分多余的可再生能源电力出售给上级电网，原因是：(1) 如图 9 所示，当风光资源比较充足而制氢功率需求不大的情况下，若是将大量的风光电力存储在锂电池中，则会导致锂电池的容量须配置很大，增加投资成本，且由于风光出力已经满足制氢需求，导致存储在锂电池中的电能无法释放；(2) 风光功率整体波动较大情况下，如果要利用锂电池削峰填谷，维持功率平衡，就意味着需要配置大规模的锂电池以满足需求，将导致前期锂电池组的投资成本急剧增加；(3) 由图 10 可以看出，该典型日的风光整体出力不足，在这种情况下无法通过配置大量的锂电池来满足制氢需求。因此，在功率缺额较大与风光资源充

足的情况下选择与上级电网进行功率交互, 以满足用氢需求、降低资源的浪费。由于本文制氢所用的风光功率是经过 SC 平抑后的功率, 符合风光并网条件, 无须担心风光中的瞬时功率波动分量会影响电力系统的安全稳定运行。因此系统中所配备的锂电池储能容量很小, 只有 593 kWh。本文所使用的锂电池储能主要是为了弥补小功率缺额, 起到一定的削峰填谷作用。

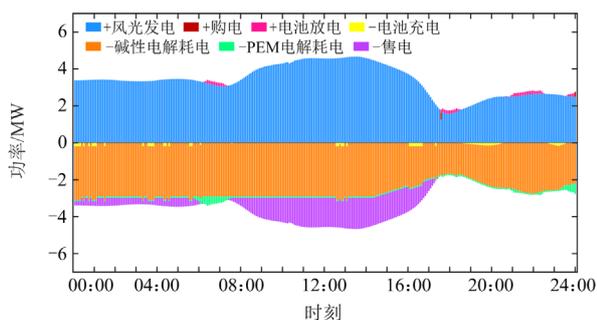


图 9 典型日 1 电功率平衡图

Fig. 9 Electrical power balance diagram in typical day 1

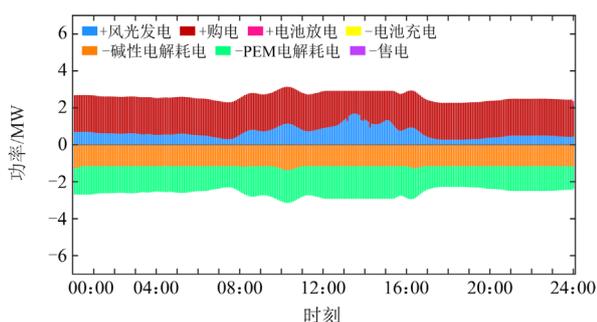


图 10 典型日 3 电功率平衡图

Fig. 10 Electrical power balance diagram in typical day 3

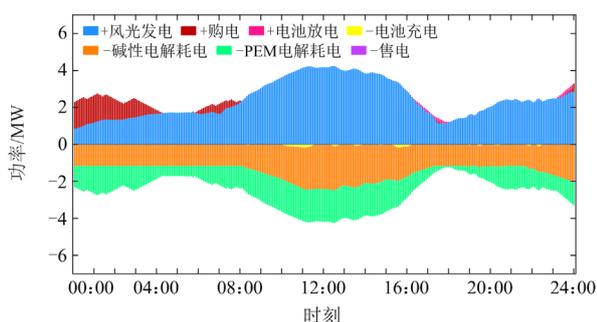


图 11 典型日 4 电功率平衡图

Fig. 11 Electrical power balance diagram in typical day 4

由图 9—图 11 可以看出, 各个典型日的 ALK 电解槽制氢功率都较为恒定, 并未出现较大的功率波动; PEM 电解槽的制氢功率变化幅度较大, 这主

要源于风光功率具有一定的波动性, 也符合本文所提两类电解槽协同制氢的运行控制策略。ALK 电解槽以持续较为稳定的功率进行氢气生产, PEM 电解槽主要用来响应风光功率波动。这也与两类电解槽不同的动态响应特性对应, ALK 电解槽动态响应速度慢, 功率调节范围较窄; PEM 电解槽动态响应速度快, 可实现宽功率调制。充分利用二者之间动态响应速度差异, 达到对风光资源的充分利用, 提高制氢安全性, 并且在一定程度上降低了制氢成本, 提高了 ALK-PEM 电解制氢系统的经济性。并在大多数典型日下, ALK 电解槽承担着主要的制氢任务, 这是因为 ALK 电解槽的运行维护成本较低, 投资成本也较低, 因此优化得出 ALK 电解槽的投资规模约为 PEM 电解槽的 2 倍。在典型日 3 中, 由于风光功率整体不足, ALK 电解槽大多数时段内都以最低电解功率运行, PEM 电解槽承担主要制氢任务, 这是由于 PEM 电解槽的制氢效率高, 使用 PEM 电解制氢可以减少向电网购电的成本。

由于本文考虑分时电价, 可以发现除典型日 3(风光整体出力严重不足)外, 其余典型日的购电基本都发生在谷时和平时。向电网售电并没有考虑分时电价, 而是选择了低于电网谷时电价的价格, 本文取 0.3 元/kWh, 所以售电发生在风光出力充足的情况下, 不受分时电价的影响。

图 12—图 14 为氢平衡图, 氢平衡图与电平衡图是相对应的, 电解槽作为将电、氢转化的桥梁, 将系统的电环节与氢环节相互联系起来。由图 12—图 14 可知, ALK 电解槽和 PEM 电解槽所起的作用是满足用氢需求; 储氢罐作为氢能的补充, 在风光功率充足时, 在电解槽大量制氢过程中, 存储多余的氢能, 在制氢速率无法满足用氢需求时, 释放氢能保证氢能供需平衡, 起到削峰填谷的作用。从图 12—图 14 中也能看出, 两类电解槽的制氢变化幅度受氢负荷需求的影响较小。这也就说明了由于储氢

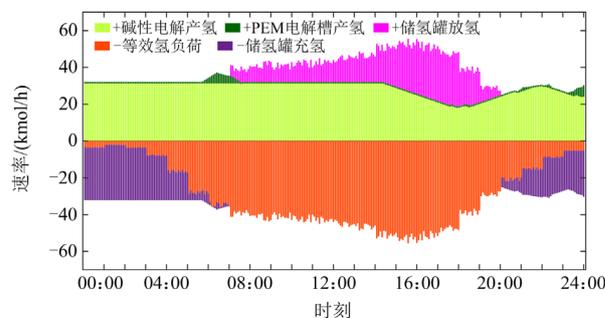


图 12 典型日 1 氢平衡图

Fig. 12 Hydrogen balance diagram in typical day 1

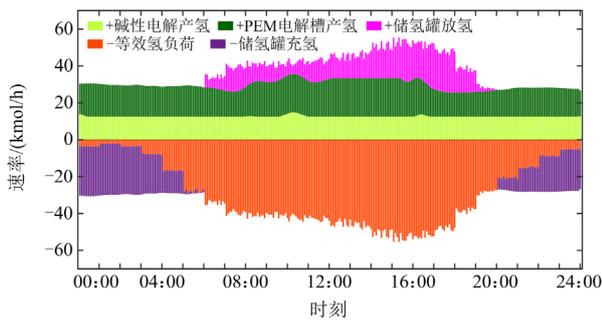


图 13 典型日 3 氢平衡图

Fig. 13 Hydrogen balance diagram in typical day 3

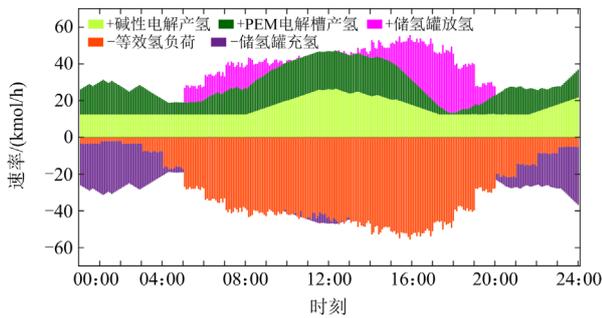


图 14 典型日 4 氢平衡图

Fig. 14 Hydrogen balance diagram in typical day 4

罐的存在可以降低电解槽的容量配置，并且使得电解槽一直处于运行状态，极大减少电解槽的启停次数，也在一定程度上提高了电解槽的使用寿命。

### 5 结论

本文针对目前大规模可再生能源接入的新型电力系统对系统中各设备的运行造成影响的问题，在常规的制氢系统的基础上加入 SC 对风光发电功率中的瞬时功率波动进行平抑。针对单一的 ALK 电解槽制氢存在动态响应能力差以及单一的 PEM 电解槽制氢前期投资成本高、运维成本高的问题，提出了将两种类型的电解槽相组合协同制氢的方式，最终构建了平抑风光波动的 ALK-PEM 电解制氢系统模型，并通过 Matlab 与 Gurobi 求解器进行仿真计算，得出了各设备的容量配置规模与系统在各个典型日的运行出力情况。

1) 在本算例中，通过采用 ALK 电解槽与 PEM 电解槽相组合制氢的方式，相较于采用单一 PEM 电解槽制氢方式降低了约 11% 的设备投资成本，年综合成本方面也减少了 15 万元。尽管采用单一 ALK 电解制氢方式在前期投资成本最低，但需要大量的锂电池储能平抑风光波动以达到 ALK 电解槽对电能质量的要求，并且在实际运行过程中锂电池容量会

衰减，需要更换维护，会造成大量成本支出。因此，在实际环境中，本文所提 ALK-PEM 电解制氢方式在提升系统运行经济性方面具有一定优势。

2) 使用 EMD 分析原始风光功率波动性并通过 SC 平抑风光瞬时功率波动，极大地降低了弃风弃光电量，并且避免了风光功率中的瞬时波动分量对电网以及制氢系统的安全稳定运行造成威胁，为制氢系统的容量配置提供较为平稳的风光功率数据。

本文考虑了风光波动性对电解制氢系统的影响，但所提的风光瞬时功率的平抑策略设计较为简单，对两类电解槽的建模也较为简单，并忽略了温度、压强等因素的变化对制氢的影响；同时对 ALK-PEM 电解制氢系统各单元的运行控制策略也需要采用更全面的设计，需要再进一步研究。

### 参考文献

- [1] OLABI A G, ABDELKAREEM M A. Renewable energy and climate change[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 158.
- [2] GIELEN D, BOSHELL F, SAYGIN D, et al. The role of renewable energy in the global energy transformation[J]. Energy Strategy Reviews, 2019, 24: 38-50.
- [3] 杨洁, 吴志强, 范宏. 基于实时电价的含储能可再生能源系统协同调度策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(4): 46-53. YANG Jie, WU Zhiqiang, FAN Hong. Collaborative scheduling strategy for renewable energy systems with energy storage based on real time price[J]. Smart Power, 2023, 51(4): 46-53.
- [4] 朱志芳, 许苑, 岑海凤, 等. 考虑需求侧响应的园区综合能源系统优化配置[J]. 智慧电力, 2022, 50(1): 37-44. ZHU Zhifang, XU Yuan, CEN Haifeng, et al. Optimal configuration of park-level integrated energy system considering demand response[J]. Smart Power, 2022, 50(1): 37-44.
- [5] KOVAČ A, PARANOS M, MARCIUŠ D. Hydrogen in energy transition: a review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(16): 10016-10035.
- [6] 赵雪莹, 李根蒂, 孙晓彤, 等. “双碳”目标下电解制氢关键技术及其应用进展[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(5): 436-446. ZHAO Xueying, LI Gendi, SUN Xiaotong, et al. Key technology and application progress of hydrogen production by electrolysis under peaking carbon dioxide emissions and carbon neutrality targets[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(5): 436-446.
- [7] 张琪. 基于可再生能源水电解制氢技术发展概述[J]. 当代化工研究, 2023(2): 14-16. ZHANG Qi. Overview of the development of hydrogen production technology by water electrolysis based on

- renewable energy[J]. *Modern Chemical Research*, 2023(2): 14-16.
- [8] 李建林, 李光辉, 马速良, 等. 碳中和目标下制氢关键技术进展及发展前景综述[J]. *热力发电*, 2021, 50(6): 1-8.  
LI Jianlin, LI Guanghui, MA Suliang, et al. Overview of the progress and development prospects of key technologies for hydrogen production under the goal of carbon neutrality[J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(6): 1-8.
- [9] 葛磊蛟, 崔庆雪, 李明玮, 等. 风光波动性电源电解水制氢技术综述[J]. *综合智慧能源*, 2022, 44(5): 1-14.  
GE Leijiao, CUI Qingxue, LI Mingwei, et al. Review on water electrolysis for hydrogen production powered by fluctuating wind power and PV[J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2022, 44(5): 1-14.
- [10] 马速良, 蒋小平, 马会萌, 等. 平抑风电波动的混合储能系统的容量配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(8): 108-114.  
MA Suliang, JIANG Xiaoping, MA Huimeng, et al. Capacity configuration of the hybrid energy storage system for wind power smoothing[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(8): 108-114.
- [11] 谢超, 张建文, 李星. 基于 EEMD 与模糊控制的混合储能控制策略[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(20): 124-129.  
XIE Chao, ZHANG Jianwen, LI Xing. Hybrid energy storage control strategy based on EEMD and fuzzy control[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(20): 124-129.
- [12] 吴倩, 王洋, 王琳媛, 等. 计及波动平抑与经济性的风光储系统中混合储能容量优化配置[J]. *电测与仪表*, 2022, 59(4): 112-119.  
WU Qian, WANG Yang, WANG Linyuan, et al. Optimal capacity allocation of hybrid energy storage system in wind-solar-battery system considering fluctuation smoothing and economy[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2022, 59(4): 112-119.
- [13] 梅建春, 钱君霞, 赵盛杰, 等. 考虑电解水制氢消纳弃风电量的制氢容量规划[J]. *湖北电力*, 2022, 46(2): 9-14.  
MEI Jianchun, QIAN Junxia, ZHAO Shengjie, et al. Hydrogen production capacity planning considering hydrogen production from electrolytic water to absorb abandoned wind power[J]. *Hubei Electric Power*, 2022, 46(2): 9-14.
- [14] 栗然, 彭湘泽, 吕慧敏, 等. 考虑氢储能和需求响应的综合能源系统双层优化配置[J/OL]. *华北电力大学学报(自然科学版)*: 1-9[2023-07-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20220712.1201.004.html>.  
LI Ran, PENG Xiangze, LÜ Huimin, et al. Two-layer optimal configuration for integrated energy system regarding hydrogen storage and demand response[J/OL]. *Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition)*: 1-9[2023-07-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20220712.1201.004.html>.
- [15] DENG Zhihong, JIANG Yuewen. Optimal sizing of wind-hydrogen system considering hydrogen demand and trading modes[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(20): 11527-11537.
- [16] 董砚, 卢禹, 雷兆明, 等. 风光储制氢下多制氢机组优化调度研究[J]. *高技术通讯*, 2022, 32(1): 77-83.  
DONG Yan, LU Yu, LEI Zhaoming, et al. Research on optimal scheduling of multiple hydrogen production units under wind/ photovoltaic/ energy-storage hydrogen production[J]. *High Technology Letters*, 2022, 32(1): 77-83.
- [17] 韩子娇, 那广宇, 董鹤楠, 等. 考虑灵活性供需平衡的含电转氢综合能源系统鲁棒优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(6): 161-169.  
HAN Zijiao, NA Guangyu, DONG Henan, et al. Robust optimal operation of integrated energy system with P2H considering flexibility balance[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(6): 161-169.
- [18] 郑博, 白章, 袁宇, 等. 多类型电解协同的风光互补制氢系统与容量优化[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(23): 8486-8496.  
ZHENG Bo, BAI Zhang, YUAN Yu, et al. Hydrogen production system and capacity optimization based on synergistic operation with multi-type electrolyzers under wind-solar power[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(23): 8486-8496.
- [19] 冯云, 曹田田, 宋海涛, 等. 分布式制氢技术进展及成本分析[J]. *石油炼制与化工*, 2022, 53(11): 11-16.  
FENG Yun, CAO Tiantian, SONG Haitao, et al. Progress and cost analysis of distributed hydrogen production technology[J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2022, 53(11): 11-16.
- [20] 马晓锋, 张舒涵, 何勇, 等. PEM 电解水制氢技术的研究现状与应用展望[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(6): 420-427.  
MA Xiaofeng, ZHANG Shuhan, HE Yong, et al. Research status and application prospect of PEM water electrolysis technology for hydrogen production[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2022, 43(6): 420-427.
- [21] BUTTLER A, SPLIETHOFF H. Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 2440-2454.
- [22] 郭博文, 罗聃, 周红军. 可再生能源电解制氢技术及催化剂的研究进展[J]. *化工进展*, 2021, 40(6): 2933-2951.  
GUO Bowen, LUO Dan, ZHOU Hongjun. Recent advances in renewable energy electrolysis hydrogen production

- technology and related electrocatalysts[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(6): 2933-2951.
- [23] 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.
- [24] 张程, 刘佳静, 蔡思静, 等. 基于 MEEMD 与 MP 的电网低频振荡模态识别[J]. *智慧电力*, 2022, 50(4): 89-95. ZHANG Cheng, LIU Jiajing, CAI Sijing, et al. Low frequency oscillation modal identification of power grid based on MEEMD and MP[J]. *Smart Power*, 2022, 50(4): 89-95.
- [25] 鄢仁武, 林穿, 宋微浪, 等. 基于 EEMD 和卷积神经网络的高压断路器故障诊断[J]. *高压电器*, 2022, 58(4): 213-220. YAN Renwu, LIN Chuan, SONG Weilang, et al. Research on circuit breaker fault diagnosis based on EEMD and convolutional neural network[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(4): 213-220.
- [26] 袁铁江, 郭建华, 杨紫娟, 等. 平抑风电波动的电-氢混合储能容量优化配置[J/OL]. *中国电机工程学报*: 1-10[2023-07-21]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.222572>. YUAN Tiejia, GUO Jianhua, YANG Zijuan, et al. Optimal allocation of power electric-hydrogen hybrid energy storage of stabilizing wind power fluctuation[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*: 1-10[2023-07-21]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.222572>.
- [27] 杨海晶, 饶宇飞, 李朝晖, 等. 基于随机模拟和 EMD 的含风光电力系统 AGC 调频储能定容[J]. *电力科学与技术学报*, 2022, 37(5): 58-65, 99. YANG Haijing, RAO Yufei, LI Zhaohui, et al. Energy storage capacity determination for AGC frequency modulation in the power system with wind and photovoltaic power based on the stochastic simulation and EMD[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2022, 37(5): 58-65, 99.
- [28] 丁明, 缪乐颖, 车建峰, 等. 基于波动过程匹配技术的短期风电功率预测[J]. *电网技术*, 2018, 42(11): 3652-3659. DING Ming, MIAO Leying, CHE Jianfeng, et al. Short-term wind power forecasting based on fluctuation process matching technology[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(11): 3652-3659.
- [29] 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.
- [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] 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 Tiejia, 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 侯慧, 戈翔迪, 吴细秀, 等. 运行与规划协同的电热氢联供系统最优容量配置研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(24): 144-151. HOU Hui, GE Xiangdi, WU Xixiu, et al. Optimal capacity allocation of an electricity heat hydrogen cogeneration system based on coordinated operation and planning[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(24): 144-151.

收稿日期: 2023-05-03; 修回日期: 2023-07-23

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电力系统保护; E-mail: fyf3985@xju.edu.cn

侯俊杰(1993—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统运行与保护控制。E-mail: 826686025@qq.com

(编辑 周金梅)