

# 电解水制氢装置聚合模型及其在电力系统运行模拟中的应用

倪瓚, 邵成成, 王秀丽, 王锡凡

(陕西省智能电网重点实验室(西安交通大学), 陕西省 西安市 710049)

## Clustered P2H Model and Its Application in Power System Operation Simulation

NI Zan, SHAO Chengcheng, WANG Xiuli, WANG Xifan

(Shaanxi Key Laboratory on Smart Grid (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

**ABSTRACT:** Rapid consumption of fossil fuels is aggravating global environmental pollution, whereas the development scale of renewable energy sources like wind power is expanding. Power-to-hydrogen (P2H) technology, regarded as an effective solution to mitigate renewable curtailment due to the unpredictability of wind and solar generation, holds a crucial role in power systems dominated by these renewable energy sources. Due to the particularity of its working state, the model of P2H device involves many variables and complex constraints, which complicates operation simulation. In this paper, a clustered modeling method based on integer variables is proposed for P2H devices, which reduces the number of variables and improves the solution efficiency. The effectiveness of the clustered model proposed in this paper is verified by the improved IEEE-RTS79 example, and the performance of solutions under different scales and different parameters are compared. This method can accurately simulate the multiple working states of the P2H device, and accelerate the solution process with higher accuracy, which provides a strong support for solving the optimization problems in power systems with large-scale P2H devices.

**KEY WORDS:** power-to-hydrogen (P2H); multi-state; integer variables; clustered model; large-scale

**摘要:** 随着化石燃料快速消耗, 全球环境污染日趋严重, 以风能为代表的新能源发展规模不断扩大。作为一种缓解因风光不确定性导致弃电问题的有效手段, 电解水制氢技术在以新能源为主导的电力系统中发挥关键作用。由于其工作状态的独特性, 电解水制氢装置的模型涉及众多变量和复杂约束, 增加了运行模拟问题的求解难度。该文针对制氢装置提出一种基于整数变量的聚合建模方法, 减少变量数量、提高

求解效率; 通过改进的 IEEE-RTS79 算例验证所提聚合方法的有效性, 对比不同规模和不同参数下聚合方法的求解效果。该方法能够准确模拟电解水制氢装置的多状态运行特性, 以较高精度实现求解的加速, 为求解含大规模电解水制氢装置的电力系统优化问题提供有力支撑。

**关键词:** 电解水制氢; 多状态; 整数变量; 聚合模型; 大规模

## 0 引言

随着化石燃料快速消耗, 全球碳排放量激增, 多个国家已将碳中和作为战略目标<sup>[1]</sup>。为了削减碳排放, 电力系统中新能源的接入占比大幅增加, 然而其随机性和波动性为电力系统安全运行带来挑战<sup>[2-3]</sup>。电解水制氢技术(power-to-hydrogen, P2H)具有碳排放量少、产氢杂质少等优点<sup>[4]</sup>。将风、光伏发电与电解水制氢相结合, 可以平抑新能源随机性造成的供能波动, 有效解决弃风、弃光以及碳排放问题<sup>[5-7]</sup>。电解水制氢是极具发展前景的制氢方式, 中国电解水制氢装机规模在 2030 年有望达到 80 GW, 2060 年有望达到 500 GW<sup>[8]</sup>。

目前, 针对电解水制氢装置的研究主要集中在不同类型制氢技术建模与含氢综合能源系统规划运行等方面。文献[9]基于 3 种 P2H 技术在成本、灵活性、效率等方面指标的差异, 建立了包括启停、生产及功率模型的 P2H 模块统一运行模型; 文献[10]考虑制氢装置效率和运行功率之间的关系, 针对煤风氢能网, 提出最大化总体收益的综合调度优化策略; 文献[11]基于电制氢装置启停特性, 建立以系统运行成本最低为目标的制氢系统日前出力优化模型; 文献[12]对制氢装置的启停次数进

基金项目: 国家自然科学基金项目(52177113)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52177113).

行限制，构建含氢区域综合能源系统优化运行模型；文献[13]研究风电制氢装置在综合能源系统优化调度中的作用；文献[14]以平抑风电波动为目标优化电氢储能系统容量；文献[15]兼顾经济与消纳要求，对含氢多能互补系统进行配置。然而，针对电解水制氢装置的建模，上述文献未能全面考虑不同类型制氢装置的工作状态及相应切换过程。

电解水制氢装置虽然已达到工业化运行要求，但受限于单一装置的出力上限，工业规模的制氢厂需要数十台制氢装置。例如我国宁夏光伏制氢项目的建设容量高达 100 MW<sup>[7]</sup>，而单台碱性电解水制氢装置的输入功率在 0.1~5 MW 之间。制氢装置的大规模并网会增加电力系统优化运行问题的求解难度，采用机组聚合方法可以减少变量数量，提升求解效率。先前的研究表明，火电机组和光热机组的聚合模型可以有效缩短计算时间。文献[16]提出一种简化聚合方法，基于机组性能的相似性将同类火电机组进行归类，仅用单一的 0-1 变量来表征整类机组的启停状态；文献[17]改进了模型，使用多个整数变量来描述一类机组的状态，适当调整相关约束，以确保其能够应对多台机组同时启停和爬坡的场景；文献[18]将火电聚合建模应用在区域电网聚合框架下，有效兼顾计算效率和求解精度；文献[19]对电-热综合能源系统进行聚合，详细考量电热耦合元件的二维参数，建立更准确的抽凝式供热机组聚合模型；文献[20]介绍一种光热机组聚合建模方法，利用整数变量对同一时刻相同状态的机组进行聚合处理，减小了问题规模，提高了计算效率；文献[21]提出光热机组的快速集群优化方法，有效应用在季节性能源平衡的电力系统长期规划运行中。聚合建模的思路，对于由众多相似制氢装置组成的制氢厂尤为适用。但电解水制氢装置的工作状态、切换过程等运行特性，与火电和光热机组相比有明显差异，需要对具体聚合方法进行研究。

综上，当前研究尚缺乏对不同类型制氢装置进行多状态通用建模，及其在大规模应用场景下所需简化求解方法的设计。因此，本文首先分析不同电解水制氢技术的特点，构建制氢装置多状态单机模型；随后提出一种基于整数变量的制氢装置聚合建模方法，用于建立电解水制氢厂站模型，以提高求解效率；最后通过算例分析，验证该方法在含大规模制氢装置的电力系统运行模拟问题中的有效性。

## 1 电解水制氢装置模型

### 1.1 电解水制氢技术

电解水制氢技术是制氢装置的核心。根据电解技术不同可分为碱性电解 (alkaline water electrolysis, AWE)、质子交换膜电解 (proton exchange membrane electrolysis, PEME) 和高温固体氧化物电解 (solid oxide electrolysis, SOE)。

AWE 技术，利用石棉布或氧化镍作为隔膜，在碱性电解质中将水通过阴极电解生成氢气。该技术作为目前发展最为成熟的制氢方法，因其在工业应用的广泛性和成本效益，在规模化制氢过程中展现出强大竞争力<sup>[22]</sup>。PEME 技术以质子交换膜取代传统隔膜，有效实现了气体与离子的分离。得益于其结构特性，该技术具有高电流密度、快速响应负荷等优势，近年来产业化迅速，但其发展受到高昂成本和催化剂研发难度的限制<sup>[23]</sup>。SOE 技术通过在阴极分解高温水蒸气来产生氢气。一方面，高温电化学过程在热力学和动力学上优于低温，制氢效率高；另一方面，该过程不排放污染物，对环境友好<sup>[24]</sup>。然而，该技术对高温的需求限制了设备的使用寿命，目前仍处于初步示范阶段。整理 3 种电解水制氢技术的特征<sup>[9,25-27]</sup>，如表 1 所示。

表 1 电解水制氢技术特征对比

Table 1 Comparison of characteristics of P2H technology

技术类型	AWE	PEME	SOE
制氢效率/%	60~70	70~80	>80
工作温度/°C	50~70	50~80	500~900
工作压强/bar	10~30	20~50	1~15
爬坡能力/h	<50%	<100%	<30%
工作范围/%	[25,100]	[5,100]	[10,100]
待机功率/%	15	15	15
冷启动时间/min	5~15	<10~15	>60
热启动时间/s	60~300	<10	900

### 1.2 电解水制氢装置工作过程

3 种电解水制氢技术，虽然具有不同的工作原理，但每种技术均可以归纳为 3 种主要工作状态及相应切换过程。3 种主要工作状态为：

1) 产氢状态。电解槽较低功率时产生的氢气浓度会达到爆炸极限的下限(4.1%)，过高功率时高额的电流密度会损害电堆材料<sup>[11]</sup>，因此电解槽的功率需要在其限制范围内运行。电解槽的转换效率受制氢功率、环境条件等因素的影响<sup>[28-29]</sup>。

2) 热待机状态。电解槽处于关闭状态，不产生氢气，此时装置需要一定的待机功率去保持必要

的温度和压强。热待机状态可以避免频繁启停,延长装置使用寿命。

3) 关机状态。电解槽关闭,减压并冷却,此时只需要保留控制装置的低功耗。

主要影响电解水制氢装置生产和使用寿命的切换过程为以下3种:

1) 热启动过程。装置从热待机状态过渡到产氢状态。由于装置在热待机状态下已经满足了产氢的基本要求,因此该过程耗时相对较短,根据技术差异介于10s至15min之间。

2) 冷启动过程。装置从关机状态过渡到产氢状态。该过程需要启动装置,对电解槽加热加压使其顺利产氢,耗时根据技术差异从5min到几个h不等。反复的冷启动会影响电解槽的寿命,因此需要对装置的冷启动次数进行限制<sup>[30-32]</sup>。

3) 加热加压过程。装置从关机状态过渡到热待机状态。该过程要求对已经冷却的电解槽进行加热和加压处理。尽管此过程既无法产生氢气又缺乏经济效益,但能够避免装置出现频繁的冷启动。

一台电解槽可视为一台电解水制氢装置。以额定功率为0.6MW的碱性电解水技术为例,图1展示了制氢装置的工作状态和切换过程的示意图。

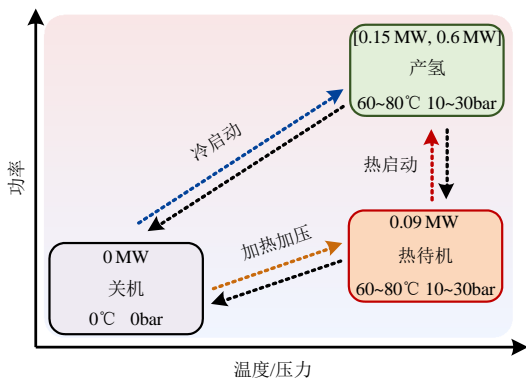


图1 电解水制氢装置工作状态和切换过程关系示意图

Fig. 1 Diagram of relationship between the working state and switching process of the P2H device

### 1.3 电解水制氢装置多状态单机模型

电解水制氢装置多状态单机模型主要采用两个0-1变量描述机组的状态。 $\alpha_h$ 表示装置 $h$ 是否具有合适的温度和压强, $\beta_h$ 表示装置 $h$ 是否产生氢气。多工作状态可用变量对 $(\alpha_h, \beta_h)$ 表示为关机状态(0,0)、热待机状态(1,0)、产氢状态(1,1)。装置产氢前需要达到相应的温度和压强,变量需满足:

$$\alpha_{h,t} \geq \beta_{h,t} \quad (1)$$

使用 $\alpha_h^{st}$ 、 $\alpha_h^{sd}$ 分别描述装置 $h$ 处于 $\alpha$ 的启动和

关停动作变量, $\beta_h^{st}$ 和 $\beta_h^{sd}$ 同理(1表示执行该动作,0表示不执行)。冷启动与加热加压过程时间不可忽略(即 $\alpha_h$ 由0变1),以 $\tau$ 表示启动延时,即装置在启动命令下达后第 $\tau$ 个时段才能从关机状态进入其他状态。同时需要保证,只有在前一时刻变量处于停机状态的装置才能在该时刻启动,反之,只有在前一时刻变量处于开机状态的装置才能在该时刻关停。变量满足:

$$\begin{cases} \alpha_{h,t} - \alpha_{h,t-1} = \alpha_{h,t-\tau}^{st} - \alpha_{h,t}^{sd} \\ \alpha_{h,t}^{st} \leq 1 - \alpha_{h,t-1} \\ \alpha_{h,t}^{sd} \leq \alpha_{h,t-1} \\ \alpha_{h,0} = \alpha_{h,init} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \beta_{h,t} - \beta_{h,t-1} = \beta_{h,t}^{st} - \beta_{h,t}^{sd} \\ \beta_{h,t}^{st} \leq 1 - \beta_{h,t-1} \\ \beta_{h,t}^{sd} \leq \beta_{h,t-1} \\ \beta_{h,0} = \beta_{h,init} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\alpha_{h,init}$ 为 $\alpha$ 的初始状态; $\beta_{h,init}$ 为 $\beta$ 的初始状态。制氢装置只要具有合适的温度和压强便存在待机功率,而装置的输入功率由待机功率和制氢功率共同组成:

$$P_{h,t}^{sb} = \alpha_{h,t} p_h^{sb} \quad (4)$$

$$P_{h,t}^{in} = P_{h,t}^{sb} + P_{h,t}^{p2h} \quad (5)$$

式中: $P_{h,t}^{in}$ 为装置 $h$ 在 $t$ 时段的输入功率; $P_{h,t}^{sb}$ 为装置 $h$ 在 $t$ 时段的待机功率; $p_h^{sb}$ 为装置 $h$ 待机参数; $P_{h,t}^{p2h}$ 为装置 $h$ 在 $t$ 时段的制氢功率。

在一段连续时间内的调度计划中,制氢装置相邻时刻的制氢功率调节需要在一定的技术容许范围内,并且与制氢装置的状态相关。

$$\beta_{h,t} P_{h,min}^{p2h} \leq P_{h,t}^{p2h} \leq \beta_{h,t} P_{h,max}^{p2h} \quad (6)$$

$$P_{h,t}^{p2h} - P_{h,t-1}^{p2h} \leq \beta_{h,t-1} r_h + \beta_{h,t}^{st} P_{h,min}^{p2h} \quad (7)$$

$$P_{h,t-1}^{p2h} - P_{h,t}^{p2h} \leq \beta_{h,t} r_h + \beta_{h,t}^{sd} P_{h,min}^{p2h} \quad (8)$$

式中: $P_{h,min}^{p2h}$ 为装置 $h$ 制氢功率最小值; $P_{h,max}^{p2h}$ 为装置 $h$ 制氢功率最大值; $r_h$ 为装置 $h$ 爬坡速率。

制氢装置以制氢功率将电能转换为氢气<sup>[33]</sup>,公式可以描述为

$$H_{h,t}^{p2h} = \eta_h^{p2h} P_{h,t}^{p2h} \quad (9)$$

式中: $H_{h,t}^{p2h}$ 为装置 $h$ 在 $t$ 时段产生氢气的能量; $\eta_h^{p2h}$ 为电氢转换效率。

3种电解水制氢技术的工作过程大致相同,可以归纳为上述多状态单机模型,但他们在参数上存在显著差异,如制氢效率、功率上下限以及启动延

时等关键指标。以启动延时  $\tau$  为例，在 15 min 时间尺度下，AWE 与 PEME 的  $\tau$  为 1，SOE 的  $\tau$  为 4。

## 2 电解水制氢厂站模型

由于单台制氢装置容量较小，工业规模的电解水制氢厂站通常由数十台制氢装置以及配套设备构成，涉及变量众多。同时单台制氢装置在运行过程中需要考虑多状态切换，涵盖约束复杂。因此，电解水制氢厂站模型的大量变量和约束条件，使得含有大规模制氢装置的电力系统优化运行问题的求解难度显著增加。为了有效应对这一挑战，需要采用聚合方法，通过简化模型，减少变量数量，提高计算效率。

### 2.1 简单放大方法

简单放大方法作为传统的聚合方法，将一类的所有机组等效合并为一台大机组，仅用单个 0-1 变量表示整类机组的启停状态。该等效机组的规模参数如待机参数、制氢功率上下限以及爬坡速率等，可以通过单机参数根据机组数量累加获得，而电氢转换效率、启动延时等参数，则与单机参数保持一致。该方式要求所有机组在启动与关闭时必须保持同步，无法准确描述机组群体内部的运行状态，很难实现对实际情况的精确模拟<sup>[20]</sup>。

### 2.2 制氢装置聚合建模方法

为了克服简单放大方法的局限性，本文提出一种制氢装置聚合建模方法(简称为制氢聚合方法)，将多台参数相同或相近的制氢装置聚合为一类，用  $m$  表示类编号。每类装置包含关机、产氢、热待机 3 个状态，分别使用  $a$ 、 $b$ 、 $c$  3 个整数变量表示各状态的台数(所有整数变量取值为 0、1、2、 $\dots$ 、 $N_m$ ， $N_m$  为该类装置的台数)。为保证 3 种状态的总和为该类装置总台数，需要有约束：

$$a_{m,t} + b_{m,t} + c_{m,t} = N_m \quad (10)$$

由于冷启动和加热加压过程时间不可忽略，以  $t_m$  表示启动延时。同时要求当前时刻状态  $a$  启动动作的装置数量  $a_{m,t}^{\text{st}}$ ，应小于等于前一时刻未处于状态  $a$  的装置数量；当前时刻状态  $a$  关停动作的装置数量  $a_{m,t}^{\text{sd}}$ ，应小于等于前一时刻处于状态  $a$  的装置数量。则状态  $a$  的约束条件可表示为

$$\begin{cases} a_{m,t} - a_{m,t-1} = a_{m,t}^{\text{st}} - a_{m,t-1}^{\text{sd}} \\ a_{m,t}^{\text{st}} \leq N_m - a_{m,t-1} \\ a_{m,t}^{\text{sd}} \leq a_{m,t-1} \\ a_{m,0} = a_{m,\text{init}} \end{cases} \quad (11)$$

式中  $a_{m,\text{init}}$  为状态  $a$  的初始装置数量。

其他状态切换过程的时间忽略不计，则状态  $b$  和状态  $c$  的约束条件为：

$$\begin{cases} b_{m,t} - b_{m,t-1} = b_{m,t}^{\text{st}} - b_{m,t}^{\text{sd}} \\ b_{m,t}^{\text{st}} \leq N_m - b_{m,t-1} \\ b_{m,t}^{\text{sd}} \leq b_{m,t-1} \\ b_{m,0} = b_{m,\text{init}} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} c_{m,t} - c_{m,t-1} = c_{m,t}^{\text{st}} - c_{m,t}^{\text{sd}} \\ c_{m,t}^{\text{st}} \leq N_m - c_{m,t-1} \\ c_{m,t}^{\text{sd}} \leq c_{m,t-1} \\ c_{m,0} = c_{m,\text{init}} \end{cases} \quad (13)$$

式中： $b_{m,t}^{\text{st}}$  为类  $m$  装置  $t$  时段状态  $b$  启动动作的装置数量； $b_{m,t}^{\text{sd}}$  为状态  $b$  关停动作的装置数量； $c_{m,t}^{\text{st}}$  为状态  $c$  启动动作的装置数量； $c_{m,t}^{\text{sd}}$  为状态  $c$  关停动作的装置数量； $b_{m,\text{init}}$  为  $b$  的初始装置数量； $c_{m,\text{init}}$  为  $c$  的初始装置数量。

为了准确描述制氢装置在不同状态之间的转换过程，额外引入 6 个整数变量。根据实际状态逻辑，得到如下约束：

$$\begin{cases} a_{m,t}^{\text{st}} = N_{ba-m,t} + N_{ca-m,t} \\ b_{m,t}^{\text{st}} = N_{ab-m,t-t_m} + N_{cb-m,t} \\ c_{m,t}^{\text{st}} = N_{ac-m,t-t_m} + N_{bc-m,t} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} a_{m,t}^{\text{sd}} = N_{ab-m,t} + N_{ac-m,t} \\ b_{m,t}^{\text{sd}} = N_{ba-m,t} + N_{bc-m,t} \\ c_{m,t}^{\text{sd}} = N_{ca-m,t} + N_{cb-m,t} \end{cases} \quad (15)$$

式中： $N_{ab-m,t}$  为类  $m$  装置  $t$  时段状态从  $a$  转向  $b$  的装置数量； $N_{ac-m,t}$  为状态从  $a$  转向  $c$  的装置数量； $N_{ba-m,t}$  为状态从  $b$  转向  $a$  的装置数量； $N_{bc-m,t}$  为状态从  $b$  转向  $c$  的装置数量； $N_{ca-m,t}$  为状态从  $c$  转向  $a$  的装置数量； $N_{cb-m,t}$  为状态从  $c$  转向  $b$  的装置数量。

此外，制氢装置还涉及功率约束，参照装置单机约束式(4)–(9)，可以得到类聚合装置  $m$  的相应约束：

$$P_{m,t}^{\text{sb}} = c_{m,t} p_m^{\text{sb}} \quad (16)$$

$$P_{m,t}^{\text{in}} = P_{m,t}^{\text{sb}} + P_{m,t}^{\text{p2h}} \quad (17)$$

$$b_{m,t} P_{m,\text{min}}^{\text{p2h}} \leq P_{m,t}^{\text{p2h}} \leq b_{m,t} P_{m,\text{max}}^{\text{p2h}} \quad (18)$$

$$P_{m,t}^{\text{p2h}} - P_{m,t-1}^{\text{p2h}} \leq (b_{m,t} - b_{m,t}^{\text{st}}) r_m + (b_{m,t}^{\text{st}} - b_{m,t}^{\text{sd}}) P_{m,\text{min}}^{\text{p2h}} \quad (19)$$

$$P_{m,t-1}^{\text{p2h}} - P_{m,t}^{\text{p2h}} \leq (b_{m,t} - b_{m,t}^{\text{st}}) r_m + (b_{m,t}^{\text{st}} - b_{m,t}^{\text{sd}}) P_{m,\text{min}}^{\text{p2h}} \quad (20)$$

$$H_{m,t}^{\text{p2h}} = \eta_m^{\text{p2h}} P_{m,t}^{\text{p2h}} \quad (21)$$

式中下标  $m$  为类  $m$  装置的变量和参数, 具体含义与单机类似。针对类  $m$  装置的规模参数的取值, 若各装置参数之间基本相同, 则直接沿用单机参数; 若各装置参数之间存在较小差异, 则采用加权平均方法确定<sup>[34]</sup>。

在宏观层面对制氢厂进行调度时, 往往只关注参与装置的数量。制氢聚合方法, 在装置参数相同或相近的情况下, 将简单放大方法中的一组 0-1 变量转换为的一组 0-N 整数变量, 保留了制氢厂装置的数量特征, 同时充分考虑装置的多状态特性, 使得对大规模制氢系统的运行模拟更为精确。

### 3 含氢电力系统优化运行模拟模型

本文以最小化火电机组、电解水制氢厂以及新能源机组在内的电力系统综合运行成本为目标, 考虑相关机组约束、配套装置约束以及系统约束, 建立含氢电力系统的优化运行模拟模型。在日前调度的基础上, 将新能源和负荷的不确定量作为系统备用容量进行优化考量, 根据新能源和负荷的预测数据, 确定火电机组和电解水制氢厂的运行计划。

#### 3.1 目标函数

模型的目标函数为

$$\min F = C_{PG} + C_{WC} + C_{P2H} \quad (22)$$

式中:  $C_{PG}$  为火电机组运行成本;  $C_{WC}$  为新能源弃电成本;  $C_{P2H}$  为电解水制氢厂运行成本。

$C_{PG}$  包含火电机组燃料费用和启停费用。  $C_{WC}$  为新能源实际消纳量与预测量的差值与弃电系数  $C^{cur}$  的乘积。  $C_{P2H}$  包含制氢装置产氢时的耗水成本  $C_w$  和启停成本  $C_{SS}$ 。

若采用多状态单机模型建立制氢厂模型(简称为单机精确模型), 则制氢厂运行成本为厂内多个单一制氢装置运行成本的累加。若采用制氢聚合方法, 其运行成本为厂内不同制氢装置类群运行成本的累加, 可以描述为

$$\begin{cases} C_w = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^{N_m} C_w^m P_{m,t}^{p2h} \Delta t \\ C_{SS} = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^{N_m} (C_{m,t}^{Hboot} + C_{m,t}^{Hshut}) \Delta t \end{cases} \quad (23)$$

式中:  $C_w$  为消耗单位电功率制氢的耗水成本;  $C_{m,t}^{Hboot}$  为  $t$  时段类  $m$  装置的启动成本;  $C_{m,t}^{Hshut}$  为  $t$  时段类  $m$  装置的关机成本。

启动成本主要包含状态由  $a$  转  $b$  所需成本(冷启动成本)、状态由  $b$  转  $c$  所需成本(热启动成本)和状

态由  $a$  转  $c$  所需成本(加热加压成本), 停机成本与  $a^{st}$  变量相关, 具体表述为

$$\begin{cases} C_{m,t}^{Hboot} = C_{m,cb} N_{ab-m,t} + C_{m,wb} N_{cb-m,t} + C_{m,wp} N_{ac-m,t} \\ C_{m,t}^{Hshut} = C_{m,shut} a_{m,t}^{st} \end{cases} \quad (24)$$

式中:  $C_{m,cb}$  为类  $m$  装置的单次冷启动成本;  $C_{m,wb}$  为单次热启动成本;  $C_{m,wp}$  为单次加热加压成本;  $C_{m,shut}$  为单次停机成本。

#### 3.2 约束条件

##### 1) 火电机组约束。

式(25)和(26)描述了火电机组状态与启停动作之间的关系; 式(27)确保火电机组在不违反运行界限的情况下提供出力以及上下备用; 式(28)和(29)限制了机组的爬坡速率; 式(30)和(31)限制了机组的最小开停机时间。

$$u_{g,t} - u_{g,t-1} = y_{g,t} - z_{g,t} \quad (25)$$

$$y_{g,t} + z_{g,t} \leq 1 \quad (26)$$

$$u_{g,t} P_g^{Gmin} + R_{g,t}^- \leq P_{g,t}^G \leq u_{g,t} P_g^{Gmax} - R_{g,t}^+ \quad (27)$$

$$P_{g,t}^G - P_{g,t-1}^G \leq u_{g,t-1} \Delta P_{U,g} + y_{g,t} P_g^{Gmin} \quad (28)$$

$$P_{g,t-1}^G - P_{g,t}^G \leq u_{g,t} \Delta P_{D,g} + z_{g,t} P_g^{Gmin} \quad (29)$$

$$T_{g,\min}^{on} (u_{g,t} - u_{g,t-1}) + \sum_{\tau=t-T_{g,\min}^{on}-1}^{t-1} u_{g,\tau} \geq 0 \quad (30)$$

$$T_{g,\min}^{off} (u_{g,t-1} - u_{g,t}) + \sum_{\tau=t-T_{g,\min}^{off}-1}^{t-1} (1 - u_{g,\tau}) \geq 0 \quad (31)$$

式中:  $u_{g,t}$ 、 $y_{g,t}$ 、 $z_{g,t}$  分别为火电机组开停机状态、启动和关闭动作 0-1 变量;  $P_{g,t}^G$  为火电机组出力;  $P_g^{Gmax}$ 、 $P_g^{Gmin}$  为机组出力上下限;  $R_{g,t}^+$ 、 $R_{g,t}^-$  为机组的向上、向下备用量;  $\Delta P_{U,g}$ 、 $\Delta P_{D,g}$  为机组的向上、向下爬坡速度限制;  $T_{g,\min}^{on}$ 、 $T_{g,\min}^{off}$  为火电机组最小开机和停机时间。

##### 2) 电解水制氢厂约束。

电解水制氢厂约束包含制氢装置约束式(1)–(21), 单机精确模型采用约束式(1)–(9), 简单放大方法采用约束式(1)–(9)的等效合并形式, 制氢聚合方法采用约束式(10)–(21)。

##### 3) 储氢装置约束。

为了保证储氢罐安全运行, 需要对其容量进行限制。储氢装置的约束可以描述为:

$$E_{m,t} - E_{m,t-1} = H_{m,t}^{p2h} - H_{m,t}^{h2p} \quad (32)$$

$$E_{m,\min} \leq E_{m,t} \leq E_{m,\max} \quad (33)$$

$$E_{m,0} = E_{m,\text{init}} \quad (34)$$

式中： $E_{m,t}$  为储氢罐  $m$  在  $t$  时段的储氢量； $H_{m,t}^{h2p}$  为氢燃料电池装置  $m$  在  $t$  时段消耗氢气的能量； $E_{m,\min}$  为储氢罐  $m$  的最小容量； $E_{m,\max}$  为储氢罐  $m$  的最大容量； $E_{m,\text{init}}$  为初始储氢量。

4) 氢燃料电池约束。

氢燃料电池以输出功率将氢能转化为电能回馈电网，其输出功率具有一定范围限制。上述约束可以描述为：

$$H_{m,t}^{h2p} = P_{m,t}^{h2p} / \eta_m^{h2p} \quad (35)$$

$$P_{m,\min}^{h2p} \leq P_{m,t}^{h2p} \leq P_{m,\max}^{h2p} \quad (36)$$

式中： $P_{m,t}^{h2p}$  为氢燃料电池在  $t$  时段的放电功率； $\eta_m^{h2p}$  为氢电转换效率； $P_{m,\min}^{h2p}$  为放电功率最小值； $P_{m,\max}^{h2p}$  为放电功率最大值。

5) 新能源运行约束。

$$0 \leq P_{w,t}^W \leq A_{w,t}^W \quad (37)$$

式中： $A_{w,t}^W$  为新能源机组  $w$  在  $t$  时段的预测值； $P_{w,t}^W$  为新能源机组  $w$  在  $t$  时段的实际消纳值。

6) 系统约束。

式(38)和(39)对系统的上下备用进行约束，式(40)描述了系统功率平衡约束，式(41)为线路传输容量约束，具体形式如下：

$$\sum_{g=1}^{N_G} \min(\Delta P_{U,g}, R_{g,t}^+) \geq U_t \quad (38)$$

$$\sum_{g=1}^{N_G} \min(\Delta P_{D,g}, R_{g,t}^-) \geq D_t \quad (39)$$

$$\sum_{g=1}^{N_G} P_{g,t}^G + \sum_{w=1}^{N_W} P_{w,t}^W + \sum_{m=1}^{N_M} (P_{m,t}^{h2p} - P_{m,t}^{\text{in}}) = \sum_{n=1}^{N_D} P_{n,t}^D \quad (40)$$

$$F_{l,\min} \leq \sum_{g=1}^{N_G} G_{l,g}^G P_{g,t}^G + \sum_{w=1}^{N_W} G_{l,w}^W P_{w,t}^W + \sum_{m=1}^{N_M} G_{l,m}^M (P_{m,t}^{h2p} - P_{m,t}^{\text{in}}) - \sum_{n=1}^{N_D} G_{l,n}^D P_{n,t}^D \leq F_{l,\max} \quad (41)$$

式中： $U_t$ 、 $D_t$  分别为系统上下备用容量； $N_G$ 、 $N_W$ 、 $N_M$  分别为火电机组、新能源机组、制氢及配套装置的数量； $N_D$  为负荷节点数； $P_{n,t}^D$  为时段  $t$  节点  $n$  处负荷值； $F_{l,\max}$ 、 $F_{l,\min}$  为线路  $l$  的传输潮流上下限； $G_{l,g}^G$ 、 $G_{l,w}^W$ 、 $G_{l,m}^M$ 、 $G_{l,n}^D$  分别为火电机组、新能源机组、制氢装置以及各节点的转移分布因子矩阵。

## 4 算例分析

### 4.1 系统算例介绍

算例改编自 IEEE-RTS79<sup>[35]</sup>，拥有 24 个节点，

38 条输电线路，最大负荷 2850 MW。风电装机 1000 MW，储氢装置储氢时长 10 h，氢燃料电池装机 60 MW，电解水制氢装置装机 120 MW，选用已成熟产业化的碱性电解水技术，其冷启动延时  $t_m$  为 1。相关装置和系统参数见表 2。风电出力曲线来自我国西北某省统计数据，负荷曲线来自 RTS79 算例，如图 2 所示。系统优化总时段为 24 h，时间间隔为 15 min。运算程序基于 Matlab 平台，以 Gurobi 为求解器，优化相对间隙设为 0.1%。

表 2 电解水制氢装置及系统相关参数

Table 2 Parameters of P2H device and the system

参数	数值	参数	数值
$P_{\max}^{p2h}$ /MW	0.6	$C_{wp}$ /美元	10
$P_{\min}^{p2h}$ /MW	0.15	$C_{ct}$ /美元	10
$p^{sb}$ /MW	0.09	$C_{wb}$ /美元	5
$\eta^{p2h}$	0.7	$C_{\text{shut}}$ /美元	0
$\eta^{h2p}$	0.5	$C^w$ / (美元/MW)	0.15
$P_{\max}^{h2p}$ /MW	0.3	$E_{\text{init}}$ /pu	0.5
$P_{\min}^{h2p}$ /MW	0.075	$C^{\text{cur}}$ / (美元/MW)	100

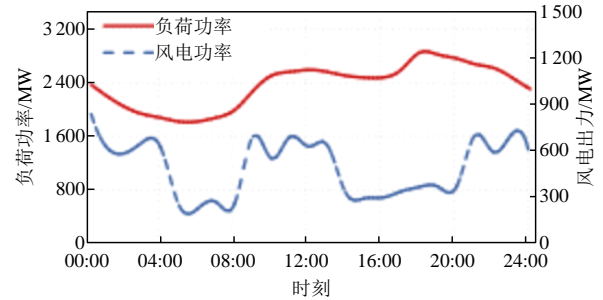


图 2 风电出力和负荷曲线

Fig. 2 Wind power and load curves

### 4.2 基础算例分析

将电解水制氢厂中 200 台制氢装置进行聚合，分别应用精确单机模型、简单放大方法和制氢聚合方法对含氢电力系统进行模拟计算。不同方法下的求解结果及制氢功率分别见表 3 和图 3。为了对比简单放大方法和制氢聚合方法的求解精度和加速效果，本文采用系统成本偏差  $\Delta_{\text{cost}}$ 、制氢功率偏差  $\Delta_{p2h}$ 、产氢状态数偏差  $\Delta_{uc}$ 、加速比  $\alpha_{ac}$  等 4 个指标以评价聚合方法的优劣<sup>[20]</sup>。

由表 3 可知，制氢聚合方法具有较高的求解精

表 3 不同方法求解结果对比

Table 3 Comparison of solutions to different methods

指标	系统成本/美元	$\Delta_{\text{cost}}$ / %	求解时间/s	$\alpha_{ac}$	$\Delta_{p2h}$ / %	$\Delta_{uc}$ / %
精确单机模型	718 084.2		3 339.61			
简单放大方法	718 834.2	1.04	88.22	37.86	2.16	6.3
制氢聚合方法	718 139.7	0.08	63.33	52.73	0.37	1.46

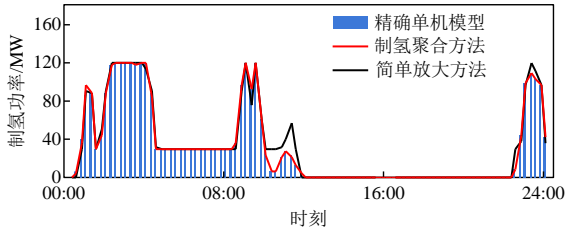


图3 不同方法下的制氢功率对比

Fig. 3 Comparison of P2H power to different methods

度和较快的求解速度,其系统成本偏差仅为0.08%,功率偏差和状态数偏差也较小,能够精准描绘制氢厂内众多制氢装置的运行状态。相比于简单放大方法,此方法可以快速运算确定含氢电力系统中各类机组的运行计划,加速比提升约39.3%,具有明显的求解速度优势。

由图3可知,制氢聚合方法的制氢功率曲线更接近精确单机模型的功率曲线,而简单放大方法由于功率限制的局限性,在制氢功率低于最小功率(30MW)的时段,将功率视作30MW或0MW进行近似处理,进而使得该方法在其他时段无法达到精确近似。

### 4.3 灵敏度分析

为了进一步探究本文提出的电解水制氢装置聚合方法在不同制氢装置规模下的求解效果,对算例中制氢装置数量进行扩大,分别为原来的2、3和4倍,并全部聚合为一类。

两种不同方法得到的系统成本偏差如图4所示。随着制氢装置规模的逐步增长,两种方法对于含氢电力系统运行成本的偏差也在增加。制氢聚合方法的系统成本偏差控制在0.2%以内,仅为简单放大方法的0.7%~7.7%,更加精确。

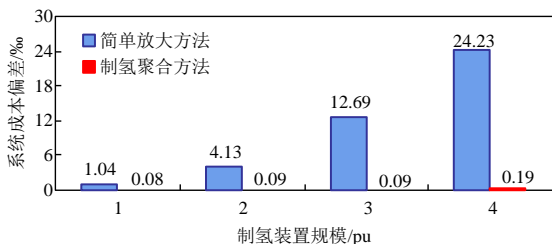


图4 不同方法和规模下系统成本偏差

Fig. 4 System cost errors of different methods

两种方法在不同制氢装置规模下的制氢功率偏差和状态偏差如图5所示。由图可知,简单放大方法的制氢功率偏差为1.88%~4.91%,运行状态偏差为3.32%~15.64%。而制氢聚合方法的功率偏差仅为0.37%~0.92%,运行状态偏差仅为1.27%~2.07%,相比简单放大方法精度更高。

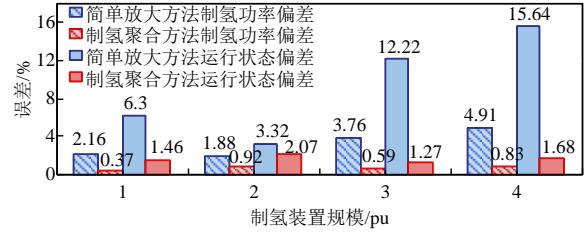


图5 不同方法和规模下的制氢功率和状态误差

Fig. 5 P2H power and state errors of different methods

图6展示了3种不同方法在不同制氢装置规模下的求解时间和加速比。制氢厂精确单机模型的求解时间随制氢装置规模的增长从最初的3339s(200台,120MW)急剧增长至41626s(800台,480MW)。由于未来氢需求提高,这样的求解时间显然不能满足含有大规模电解水制氢装置的制氢厂的求解要求。制氢聚合模型与简单放大模型的求解时间相比于精确单机模型均缩小了一至两个数量级,尤其是随着系统算例规模的扩大,其加速效果更加明显。

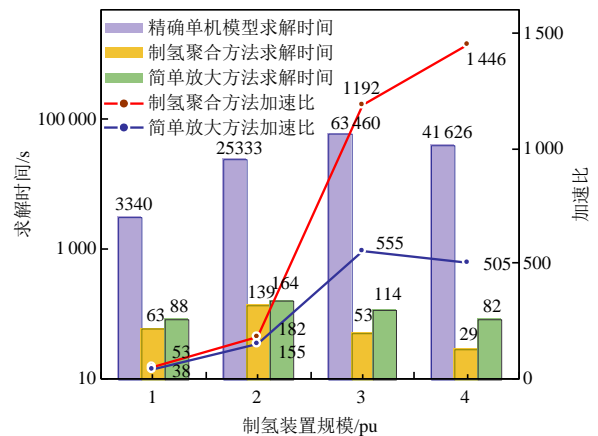


图6 不同方法和规模下求解时间与加速比

Fig. 6 Solution time and acceleration ratio of different methods

为了探究规模显著增大的制氢装置系统不同聚类数量对于加速效果和求解精度影响,本文将制氢装置聚合为1、2和3类(记为C1、C2和C3),制氢装置规模扩大2至4倍(记为E2、E3和E4),采用简单放大方法和制氢聚合方法(记为M2、M3),进行算例验证。各类中具体的装置数量见表4。

表4 不同聚类的制氢装置数量

Table 4 Numbers of P2H devices in different clusters

装置规模/pu	C1	C2	C3
1	200	(100,100)	(70,70,60)
2	400	(200,200)	(140,130,130)
3	600	(300,300)	(200,200,200)
4	800	(400,400)	(270,270,260)

图7 展示了在不同制氢装置规模和聚类数量

下，应用不同聚合方法时的系统成本偏差与加速比。由图可知，实心标记点(M3)主要位于虚线标记点(M2)的左侧，表明在不同装置规模和聚类数量的条件下，制氢聚合方法的系统成本偏差更小，均小于 0.3%；而同颜色的实心标记点均高于虚线标记点，意味着制氢聚合方法具有更大的加速比。随聚类数量的增加，两种聚合方法的求解精度有所提升，加速效果显著降低。然而在制氢装置规模较小时(E2)，两种聚合方法的加速效果基本一致，且聚类数量的增加对于制氢聚合方法求解精度的提升幅度相对较小，但达到了一个相当高的水平，其中点(E2,C3,M3)的成本偏差为 0.04%，加速比为 163。

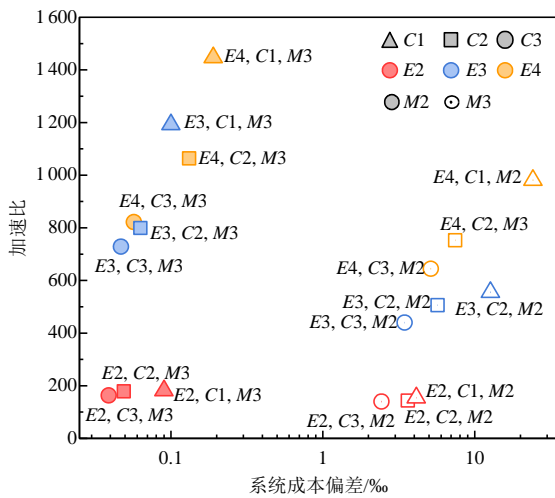


图 7 不同聚类数量下系统成本偏差与加速比  
Fig. 7 Cost errors and acceleration ratio of different clustering numbers

#### 4.4 不同参数下制氢装置聚合效果分析

为了进一步探究制氢聚合方法在电解水制氢厂中含有不同参数装置的实际应用效果，以下针对 4 个特定场景进行算例对比分析。场景 1 为对照组，场景 2、3、4 分别用于探究不同制氢容量、不同储氢容量以及不同制氢技术装置聚合后的效果。

1) 场景 1，电解水制氢厂中制氢装置额定功率与数量分为 0.6MW(50 台), 0.6MW(50 台), 0.6MW(50 台)，储氢时长为 10h，其他参数与表 2 相同。

2) 场景 2，电解水制氢厂中制氢装置功率与数量分为 0.6MW(50 台), 1.2MW(50 台), 3 MW(50 台)，其他参数成比例变化，储氢时长为 10h。

3) 场景 3，电解水制氢厂中储氢装置的储氢时长与数量分为 5h(50 台), 10h(50 台), 20h(50 台)，其他参数与表 2 相同。

4) 场景 4，电解水制氢厂中设置 AWE 装置 0.6MW(50 台)，PEME 装置 0.6MW(50 台)，SOE

装置 0.6MW(50 台)，储氢时长为 10h，各设备参数见附表 A1。

本文将每个场景中的制氢装置聚合为 3 类，表 5 对比了两种方法的聚合误差，上标 “\*” 表示制氢聚合方法的结果。图 8 对比了两种方法在加速效果上的差异。

表 5 不同场景的聚合误差

Table 5 Errors after clustering in different cases

场景	$\Delta cost/\%$	$\Delta cost^*/\%$	$\Delta P_{2H}/\%$	$\Delta P_{2H}^*/\%$	$\Delta U_C/\%$	$\Delta U_C^*/\%$
1	0.81	0.09	2.66	0.72	5.65	1.03
2	1.28	0.19	3.56	1.29	6.25	1.67
3	1.94	0.18	6.58	0.89	8.13	1.4
4	1.27	0.13	4.3	1.51	14.46	1.53

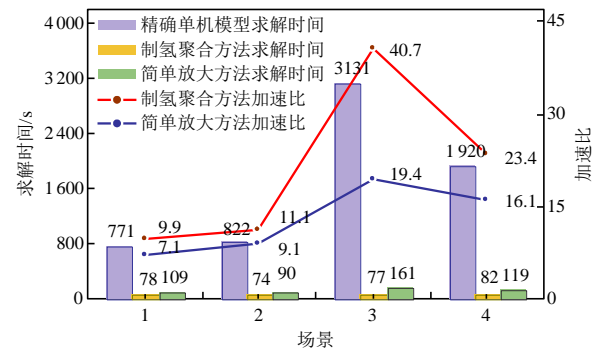


图 8 不同场景的求解时间和加速比  
Fig. 8 Solution time and acceleration ratio in different cases

由表 5 可知，对比场景 1 和场景 2、3、4，当制氢厂内的制氢装置参数不同时，将其等效聚合为一类，相较于参数一致的情况，简单放大方法和制氢聚合方法的误差会有所增大。不论是哪种场景，制氢聚合方法的精确度更高，系统成本偏差最大仅为 0.19%，制氢功率与运行状态偏差在 2% 以内，反映了该方法在应对复杂情况时的有效性。由图 8 可知，将制氢厂内参数不同的装置聚合为一类时，制氢聚合方法的求解时间小于 100s，将精确单机模型的求解时长缩小了一个数量级。

总体而言，参数不同的制氢装置聚合后制氢聚合方法产生的误差略有增加，但是仍在可接受的范围内，且相比于简单放大方法依旧具有明显的精度优势与可观的加速效果。

## 5 结论

作为一种缓解因风光不确定性导致弃电问题的有效手段，电解水制氢技术在新型电力系统中发挥关键作用。为了解决大规模电解水制氢装置在运行过程中由于变量繁多和约束复杂而导致的求解

困难的问题,本文提出了一种基于整数变量的制氢装置聚合建模方法。通过 IEEE-RTS79 算例验证了所提方法的有效性,得到如下结论:

1) 分析了电解水制氢装置的技术差异,详细考虑了工作状态和状态切换过程,构建了适用于3种电解水制氢技术的多状态通用模型,以实现制氢装置运行的准确模拟。

2) 基于少量整数变量建立制氢装置聚合模型,减少变量和约束数目。制氢聚合方法的系统成本偏差小于0.2%,求解时间缩小1~2个数量级,相较于传统简单放大方法在不同规模和参数下具有明显的求解优势。

后续研究将考虑更为综合的氢需求,同时精细化制氢装置的功率模型,以更准确地模拟电解水制氢厂站的调度策略。

## 参考文献

- [1] 康重庆, 杜尔顺, 李姚旺, 等. 新型电力系统的“碳视角”: 科学问题与研究框架[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 821-833.  
KANG Chongqing, DU Ershun, LI Yaowang, et al. Key scientific problems and research framework for carbon perspective research of new power systems[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 821-833(in Chinese).
- [2] 李晖, 刘栋, 姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6258.  
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6258(in Chinese).
- [3] 张子扬, 张宁, 杜尔顺, 等. 双高电力系统频率安全问题评述及其应对措施[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 1-24.  
ZHANG Ziyang, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Review and countermeasures on frequency security issues of power systems with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 1-24(in Chinese).
- [4] 俞红梅, 邵志刚, 侯明, 等. 电解水制氢技术研究进展与发展建议[J]. 中国工程科学, 2021, 23(2): 146-152.  
YU Hongmei, SHAO Zhigang, HOU Ming, et al. Hydrogen production by water electrolysis: progress and suggestions[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(2): 146-152(in Chinese).
- [5] 张沈习, 王丹阳, 程浩忠, 等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 189-207.  
ZHANG Shenxi, WANG Danyang, CHENG Haozhong, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 189-207(in Chinese).
- [6] 郜捷, 宋洁, 王剑晓, 等. 支撑中国能源安全的电氢耦合系统形态与关键技术[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(19): 1-15.  
GAO Jie, SONG Jie, WANG Jianxiao, et al. Form and key technologies of integrated electricity-hydrogen system supporting energy security in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(19): 1-15(in Chinese).
- [7] 潘光胜, 顾钟凡, 罗恩博, 等. 新型电力系统背景下的电制氢技术分析与发展[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(10): 1-13.  
PAN Guangsheng, GU Zhongfan, LUO Enbo, et al. Analysis and prospect of electrolytic hydrogen technology under background of new power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(10): 1-13(in Chinese).
- [8] 刘玮, 万燕鸣, 熊亚林, 等. “双碳”目标下我国低碳清洁氢能进展与展望[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(2): 635-642.  
LIU Wei, WAN Yanming, XIONG Yalin, et al. Outlook of low carbon and clean hydrogen in China under the goal of “carbon peak and neutrality” [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(2): 635-642(in Chinese).
- [9] 李佳蓉, 林今, 邢学韬, 等. 主动配电网中基于统一运行模型的电制氢(P2H)模块组合选型与优化规划[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4021-4032.  
LI Jiarong, LIN Jin, XING Xuetao, et al. Technology portfolio selection and optimal planning of power-to-hydrogen (P2H) modules in active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4021-4032(in Chinese).
- [10] 魏繁荣, 随权, 林湘宁, 等. 考虑制氢设备效率特性的煤风氢能源网调度优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1428-1439.  
WEI Fanrong, SUI Quan, LIN Xiangning, et al. Energy control scheduling optimization strategy for coal-wind-hydrogen energy grid under consideration of the efficiency features of hydrogen production equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1428-1439(in Chinese).

- Chinese).
- [11] 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(in Chinese).
- [12] 任洲洋, 罗潇, 覃惠玲, 等. 考虑储氢物理特性的含氢区域综合能源系统中长期优化运行[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3324-3332.
- REN Zhouyang, LUO Xiao, QIN Huiling, et al. Mid/long-term optimal operation of regional integrated energy systems considering hydrogen physical characteristics[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3324-3332(in Chinese).
- [13] 郭梦婕, 严正, 周云, 等. 含风电制氢装置的综合能源系统优化运行[J]. 中国电力, 2020, 53(1): 115-123, 161.
- GUO Mengjie, YAN Zheng, ZHOU Yun, et al. Optimized operation design of integrated energy system with wind power hydrogen production[J]. Electric Power, 2020, 53(1): 115-123, 161(in Chinese).
- [14] 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]. 中国电机工程学报, 2024, 44(4): 1397-1405.
- YUAN Tiejia, GUO Jianhua, YANG Zijuan, et al. Optimal allocation of power electric-hydrogen hybrid energy storage of stabilizing wind power fluctuation [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(4): 1397-1405(in Chinese).
- [15] 李湃, 黄越辉, 张金平, 等. 多能互补发电系统电/热/氢储能容量协调优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(13): 5158-5168.
- LI Pai, HUANG Yuehui, ZHANG Jinping, et al. Capacity coordinated optimization of battery, thermal and hydrogen storage system for multi-energy complementary power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(13): 5158-5168(in Chinese).
- [16] SEN S, KOTHARI D P. An equivalencing technique for solving the large-scale thermal unit commitment problem[M]//HOBBS B F, ROTHKOPF M H, O' NEILL R P, et al. The Next Generation of Electric Power Unit Commitment Models. Boston: Springer, 2001: 211-225.
- [17] LANGRENE N, VAN ACKOOIJ W, BREANT F. Dynamic constraints for aggregated units: formulation and application[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011. 26(3): 1349-1356.
- [18] 李湃, 范越, 黄越辉, 等. 基于电源聚合-分解模型的新能源电力系统月度发电计划优化方法[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3281-3289.
- LI Pai, FAN Yue, HUANG Yuehui, et al. Monthly generation scheduling method of renewable energy power system based on power plant aggregation & decomposition models[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3281-3289(in Chinese).
- [19] 吕泉, 张佳伟, 张娜, 等. 含多元灵活性资源的省级电-热综合能源系统耦合平衡分析模型[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 95-102.
- LYU Quan, ZHANG Jiawei, ZHANG Na, et al. Coupling balance analysis model of provincial integrated electricity-heat energy system with multi-type flexibility resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 95-102(in Chinese).
- [20] 邵成成, 冯陈佳, 李丁, 等. 光热发电机组聚合模型及其在电力系统运行模拟中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3507-3515.
- SHAO Chengcheng, FENG Chenjia, LI Ding, et al. Clustered CSP model and its application in power system operation simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3507-3515(in Chinese).
- [21] LI Jing, LU Tianguang, YI Xinning, et al. Concentrated solar power for a reliable expansion of energy systems with high renewable penetration considering seasonal balance[J]. Renewable Energy, 2024, 226: 120089.
- [22] SEBBAHI S, ASSILA A, BELGHITI A A, et al. A comprehensive review of recent advances in alkaline water electrolysis for hydrogen production [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 82: 583-599.
- [23] 杨燕梅, 李汶颖, 李航, 等. 电解水制氢标准体系研究与需求分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(8): 3072-3077.
- YANG Yanmei, LI Wenying, LI Hang, et al. Research and requirement analysis on standards system of water electrolysis for hydrogen production[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(8): 3072-3077(in Chinese).
- [24] 张文强, 于波. 高温固体氧化物电解制氢技术发展现状与展望[J]. 电化学, 2020, 26(2): 212-229.
- ZHANG Wenqiang, YU Bo. Development status and prospects of hydrogen production by high temperature solid oxide electrolysis[J]. Journal of Electrochemistry, 2020, 26(2): 212-229(in Chinese).
- [25] LANGE H, KLOSE A, LIPPMANN W, et al. Technical

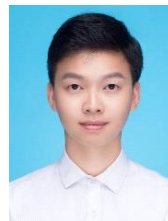
- evaluation of the flexibility of water electrolysis systems to increase energy flexibility: a review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(12): 15771-15783.
- [26] ZHANG Shuhao, ZHANG Nan. Review on integrated green hydrogen polygeneration system-electrolysers, modelling, 4E analysis and optimization[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 414: 137631.
- [27] YU Ziyou, DUAN Yu, FENG Xingyu, et al. Clean and affordable hydrogen fuel from alkaline water splitting: past, recent progress, and future prospects[J]. Advanced Materials, 2021, 33(31): 2007100.
- [28] 江岳文, 杨国铭, 陈宇辛, 等. 考虑电解槽动态制氢效率的氢网运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(8): 3014-3026.  
JIANG Yuewen, YANG Guoming, CHEN Yuxin, et al. Optimal operation for the hydrogen network under consideration of the dynamic hydrogen production efficiency of electrolyzers[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8): 3014-3026(in Chinese).
- [29] 孙东阳, 于继轩, 阮俊霖, 等. 基于制氢装置效率特性的风储制氢电厂优化控制策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(12): 53-61.  
SUN Dongyang, YU Jixuan, RUAN Junlin, et al. Optimal control strategy of wind-energy storage hydrogen production power plant based on efficiency characteristics of hydrogen production device[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(12): 53-61(in Chinese).
- [30] 张泽熙, 杨争林, 郑亚先, 等. 电氢市场主体参与电力市场的路径及发展展望[J]. 电网技术, 2024, 48(4): 1403-1417.  
ZHANG Zexi, YANG Zhenglin, ZHENG Yaxian, et al. The path and development prospects for the participation of hydrogen-electricity market participants in the electricity market[J]. Power System Technology, 2024, 48(4): 1403-1417(in Chinese).
- [31] KIAEE M, INFIELD D, CRUDEN A. Utilisation of alkaline electrolysers in existing distribution networks to increase the amount of integrated wind capacity[J]. Journal of Energy Storage, 2018, 16: 8-20.
- [32] PAN Guangsheng, GU Wei, LU Yuping, et al. Optimal planning for electricity-hydrogen integrated energy system considering power to hydrogen and heat and seasonal storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2662-2676.
- [33] LI Jiarong, LIN Jin, HEUSER P M, et al. Co-planning of regional wind resources-based ammonia industry and the electric network: a case study of Inner Mongolia [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(1): 65-80.
- [34] PALMINTIER B S, WEBSTER M D. Heterogeneous unit clustering for efficient operational flexibility modeling [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1089-1098.
- [35] Probability Methods Subcommittee. IEEE reliability test system[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, PAS-98(6): 2047-2054.

## 附录 A

表 A1 场景 4 中 3 种电解水制氢装置参数

Table A1 Parameters of three P2H devices in case 4

参数	AWE	PEME	SOE
$P_{\max}^{p2h}$ /MW	0.6	0.6	0.6
$P_{\min}^{p2h}$ /MW	0.15	0.03	0.06
$P^{sb}$ /MW	0.09	0.09	0.09
$\eta^{p2h}$	0.7	0.8	0.9
$\eta^{h2p}$	0.5	0.5	0.5
$P_{\max}^{h2p}$ /MW	0.3	0.3	0.3
$P_{\min}^{h2p}$ /MW	0.075	0.075	0.075
$\tau$	1	1	4
$r$ / (MW/15min)	0.075	0.15	0.045



倪瓚

在线出版日期: 2024-12-03。

收稿日期: 2024-06-24。

作者简介:

倪瓚(2001), 男, 硕士研究生, 研究方向为电氢耦合系统规划与运行, nizan2001@stu.xjtu.edu.cn;

邵成成(1989), 男, 副教授, 研究方向为电力能源系统规划与运行、电动汽车充电负荷调度;

王秀丽(1961), 女, 教授, 研究方向为电力系统规划、电力市场等;

王锡凡(1936), 男, 院士, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析规划、电力市场与新型输电方式等。

(责任编辑 邱丽萍)