

# 光伏耦合电解水制氢系统的建模与仿真

周行<sup>✉</sup>, 李少华, 王慧, 徐春丽, 汤晓舒, 周军

(中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司, 北京 100120)

**摘要:** [目的]提出了一种光伏耦合电解水制氢系统建模的方式,特别是单独搭建了电解槽模块,目的是为了解决电解槽仿真模块与其他系统仿真模块模拟信号不统一和无法联动的问题。电解槽是光伏耦合电解水制氢系统中的关键设备,以往对于电解槽的模型仿真多是基于电化学理论基础,利用信号模型方式建立,这使电解槽与其他电力组件连接时产生了信号传递方式不统一、建模复杂等问题。[方法]为了解决这一问题,提出了利用等效电阻模拟电解槽电气外特性的方法。通过对已知电解槽的工作特性曲线拟合,得到了电解槽工作电流与阻抗的关系式。电解槽等效电阻的信息继承自拟合曲线,并作为负载接入到系统当中。当系统电源产生波动时,电解槽仿真模块可根据系统工况调节负载大小,做到与系统电源联动。[结果]仿真结果表明:所搭建的光伏耦合电解水制氢系统可以根据输入光照信息,准确预测产氢量,并可随光伏电源波动调整负载大小,拟合结果残差值 $\leq \pm 0.2$ 。[结论]此方法简化了光伏耦合电解水制氢仿真系统,统一了仿真信号,并且形成了模块化的仿真组件,方便系统的扩展。仿真输出结果符合电解槽运行实际,达到了预期目标,证明了本仿真方法的可行性。

**关键词:** 碱性电解槽; 光伏耦合制氢; 电解槽仿真; 光伏仿真; 离网制氢

中图分类号: TK91; TQ116.2 文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)03-0104-08

开放科学(资源服务)二维码:



## Modelling and Simulation of Photovoltaic Coupling Water Electrolysis Hydrogen Production System

ZHOU Hang<sup>✉</sup>, LI Shaohua, WANG Hui, XU Chunli, TANG Xiaoshu, ZHOU Jun

(North China Power Engineering Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Beijing 100120, China)

**Abstract:** [Introduction] This study proposes a photovoltaic coupling electrolysis water hydrogen production system modelling method with the purpose of solving the problem of inconsistency and mismatching of the simulation signals between electrolyser and others modules. The electrolyser is the key equipment in the photovoltaic-coupled water electrolysis hydrogen production system. The common simulation model of the electrolyser is mostly based on the electrochemical theory and established by using the signal model, which could cause signal transmission mismatching and increase system complexity. [Method] In order to solve the problems, it was proposing a method of simulating the electrical characteristics of the electrolytic cell by using the equivalent resistance. By fitting the working characteristic curve of the known electrolyser, the relationship between the working current and the impedance of the electrolyser was obtained. The information of the equivalent resistance of the electrolyser was inherited from the fitting curve and connected to the system as a load. When the system power supply fluctuated, the electrolyser simulation module could adjust the load according to the system working conditions, to achieve linkage with the system power supply. [Result] The simulation results show that the built photovoltaic-coupled water electrolysis hydrogen production system can accurately predict the hydrogen production according to the input light condition and enable load adjustment with the fluctuation of photovoltaic power supply, additionally have a residual value of the fitting result of  $\leq \pm 0.2$ . [Conclusion] This method simplifies the photovoltaic coupling electrolysis water hydrogen production simulation system, unifies the simulation signal, and forms system blocks to facilitate system expansion. The simulation output results are in line with the actual operation of the electrolyser and have achieved the expected goal, which proves the feasibility of the simulation method.

收稿日期: 2022-12-08 修回日期: 2023-02-22

基金项目: 中电工程重大科技专项“光伏水电解制氢技术研究与应用示范”(DG3-A03-2022)

**Key words:** alkaline electrolyser; PV coupling hydrogen production; electrolyser simulation; PV simulation; off-grid hydrogen production

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 0 引言

利用可再生能源产生的电能进行电解水制氢被认为是未来的能源发展方向,其产生的绿氢具有清洁无污染、高效可再生等特点,被认为是最具有潜力的能量载体<sup>[1]</sup>。电解水制氢与光伏、风电等具有波动性的能源结合,为解决可再生能源的消纳提供了有效的解决方案,是目前的研究热点<sup>[2-4]</sup>。电解槽的电解过程工况复杂,试验研究耗时长,繁杂且经济性差,研究多采用试验穷举研究方法从经济性角度考虑略有欠缺。电解槽模块组装后,电解小室工况的关键信号难以直接测量。不同电解槽设备由于结构、电极材料的改变,会导致经验公式中的参数需要重新获取,增加了建模的难度。所以在掌握电气特性的基础上搭建具有普适性的通用模型显得尤为重要。在建立通用模型的基础上,进一步研究电解槽性能提升策略,为研究可再生能源制氢系统的控制策略打好基础,在实际工程中具有重要价值<sup>[5-6]</sup>。

在以往的研究中,已有学者提出了几种描述碱性电解槽工作特性的数学模型,其中从示范项目中根据经验开发的模型能够较准确地代表设备的操作特性而最受关注。文献[7]中提出了电解槽的电压和电流关系的函数方程式用来表达电解槽的瞬态响应,将电解槽与光伏等组件进行直接耦合,但此模型结合直流变流器一同工作就必须包含多个代数环,这会导致电解槽模拟结果的不连贯。文献[8-9]中,学者尝试了移除系统中的开关组件,或利用 LambertW 函数对电解槽的电流、电压公式进行求导,目的是把电解槽的仿真模型转变为信号模型以避免代数环的问题,在模拟过程中直接把发电端电流信息传输给电解槽用以计算产氢量。然而纯信号模型会缺失对其他核心组件的电学性能模拟,会导致系统发电端与用电端的能量不等<sup>[10-12]</sup>。文章中对碱性和 PEM 电解槽进行了建模并与风机、光伏直接耦合,但所提出的多数模型较为复杂。

为了建立可靠的光伏耦合电解水制氢模型,本研究在已有的碱性电解槽仿真模型的研究基础上进

行改进,所构建的系统部分采用 MATLAB-SIMSCAPE 平台内已封装的物理模型,搭建了含光伏最大功率点跟踪的基本光伏系统;对电解槽组件的仿真,依然沿用电解槽电流电压关系的函数方程组,但将函数运算信息继承给一个等效电阻代替电解槽接入到系统电路中,电阻阻值将会随系统电压、电流的变化进行动态调节。这样做的目的是让电解槽组件作为电学模型,加入到整个系统当中,并形成组件间的联动。最终构建的系统模型具有信号形式统一、模块化、易扩展和可复制等特点,为电解槽与多能源系统耦合仿真带来了便利。

## 1 仿真模型理论基础及数学表达式

碱性电解水制氢是一种电化学反应,当直流电通过浸入液体或固体电解质中的两个电极会使水分解成氢气和氧气<sup>[13]</sup>。如图1所示,光伏耦合制氢系统的仿真工作主要分为3块,分别是光伏发电组件、直流电转换控制和电解槽。太阳辐射是光伏系统进行工作的主要能量来源,光伏电池捕捉入射阳光利用半导体的材料特性将光能转化为电能。转化后的电能经直流变流器调节后传输给电解槽<sup>[14]</sup>。电解槽利用电能将纯水分解为氢和氧分子,并通过管道将氢气收集起来,经过气液处理和纯化后,输送到储罐进行存储,因最终的产物是氢气,所以本研究主要针对系统中的光到电、电到氢的过程进行建模以及仿真<sup>[15-16]</sup>。



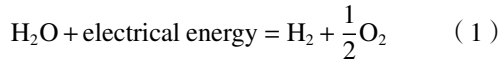
图1 光伏耦合电解水制氢系统流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of photovoltaic coupled water electrolysis hydrogen production system

### 1.1 碱性电解槽建模理论

碱性电解槽的仿真建模参考了 Tijani<sup>[17]</sup> 等人开

发的数学模型,理论基础主要是依据 Ulleberg 的电解槽热力学模型<sup>[18]</sup>,见式(1)。



$$\Delta G = zFV_{\text{rev}} \quad (2)$$

$$V_{\text{rev}} = \Delta G/zF \quad (3)$$

$$V_{\text{rev}} = \frac{237.2 \text{ kJ/mol}}{2 \times 96485 \text{ C/mol}} = 1.229 \text{ V} \quad (4)$$

式中:

$\Delta G$  ——基伯斯自由能(J/mol);

$z$  ——电子数量;

$F$  ——法拉第常数, 96485 C/mol。

$V_{\text{rev}}$  ——可逆过电压(V);

在电解过程中,小室的工作电压是可逆过电压和激活过电压(即电极响应电压)以及电解质的欧姆过电压的总和,见式(5)。 $V_{\text{rev}}$ 也可以看作是电解过程中所需的最小电压。

$$V_{\text{cell}} = V_{\text{rev}} + V_{\text{act}} + V_{\text{ohm}} \quad (5)$$

$$V_{\text{act}} = s \log \left( \frac{t_1 + t_2/T + t_3/T^2}{A} I + 1 \right) \quad (6)$$

$$V_{\text{ohm}} = \frac{r_1 + r_2 T}{A} I \quad (7)$$

式中:

$V_{\text{cell}}$  ——小室的工作电压(V);

$V_{\text{act}}$  ——激活过电压(V);

$V_{\text{ohm}}$  ——电解质的欧姆过电压(V);

$s$  ——过电压系数(V);

$t_1, t_2, t_3$  ——过电压系数(m<sup>2</sup>/A);

$T$  ——温度(°C);

$r_1, r_2$  ——与温度相关的欧姆电阻参数(Ω);

$A$  ——电极面积(m<sup>2</sup>)。

Øystein Ulleberg 公式:

$$V = V_{\text{rev}} + s \log \left( \frac{t_1 + t_2/T + t_3/T^2}{A} I + 1 \right) + \frac{r_1 + r_2 T}{A} I \quad (8)$$

根据法拉第定律,法拉第效率可以表达为:

$$\eta_F = \frac{(I/A)^2}{f_1 + (I/A)^2} f_2 \quad (9)$$

式中:

$I$  ——电流(A);

$f_1, f_2$  ——与法拉第效率相关的参数(mA<sup>2</sup>/cm<sup>4</sup>)。

摩尔流速(mol/s)为:

$$\dot{n}\text{H}_2 = \eta_F \frac{n_c I}{zF} \quad (10)$$

式中:

$n_c$  ——电池数量。

氢气的体积流量  $Q$ (Nm<sup>3</sup>/h)表示如下:

$$Q = \dot{n}\text{H}_2 \times 3600 \times 0.022414 \quad (11)$$

## 1.2 光伏组件建模理论

光伏组件是由光伏电池串联和并联组成,并根据入射光强的增减改变输出。本研究中,选用了光伏电池的单个二极管等效电路模型作为仿真基础模型。单个电池的电流  $I$  与电压  $V$  的关系<sup>[19]</sup>可以表达为:

$$I = I_{\text{ph}} - I_0 \left( e^{\frac{V+R_s I}{nA T}} - 1 \right) - \frac{V+R_s I}{R_{\text{sh}}} \quad (12)$$

式中:

$I_{\text{ph}}$  ——光生电流(A);

$I_0$  ——二极管的反向饱和电流(A);

$n$  ——理想因子;

$k$  ——玻尔兹曼常数,  $1.380649 \times 10^{-23}$  J/K;

$T$  ——光伏电池温度(°C);

$q$  ——电子电荷(C);

$R_s$  ——电池内部的串联电阻(Ω);

$R_{\text{sh}}$  ——电池内部的并联电阻(Ω)。

## 2 组件模型参数

由于材料、制作工艺等原因,组件模型参数存在差异,所以建立模型对于组件参数的选择是开放性的,以便于对不同设备进行匹配和模拟。在建立仿真模型的过程中需要确定各组件的参数作为仿真运算的初始量,对于电解槽而言,主要是针对其单一小室的特性参数进行定义。因为电解槽槽体是封装好的部件,在运行过程中,很难取得实际的运行参数,所以一般是由设备厂家提供基础的参数取值。本次研究引用了文献[19]中所提及的设备信息和参数进行仿真模型的建立。相比于电解槽,光伏电池的模型参数更加容易获得,本次研究中直接采用了 MATLAB-SIMSCAPE 平台内所封装的光伏电池模型参数,参数数值取自设备厂家。

### 2.1 电解槽参数

表 1 中为电解槽生产厂家所提供的电解槽单个小室的特性参数。电解槽槽体是由多个小室串联或

表 1 电解槽特性参数

Tab. 1 Characteristic parameters of the electrolyzer

参数	符号/单位	数值
反向电压	$V_{rev}/V$	1.229
单个小室电极面积	$A/m^2$	0.25
法拉第常数	$F/(C \cdot mol^{-1})$	96485
电极数量	$z$	2
小室数	$N$	180
电极过电压系数	$s/V$	0.185
	$t_1/(A^{-1} \cdot m^2)$	1.002
电极过电压系数	$t_2/(A^{-1} \cdot m^2 \cdot ^\circ C)$	8.424
	$T_3/(A^{-1} \cdot m^2 \cdot ^\circ C)$	247.3
电解质的欧姆电阻有关的参数	$r_1/(\Omega \cdot m^2)$	8.05e-5
	$r_2/(\Omega \cdot m^2 \cdot ^\circ C^{-1})$	-2.5e-7

并联连接组成。由于连接方式、制作工艺和材料等因素的影响,不同电解槽的特性参数可能存在不同,以产氢量  $500 \text{ Nm}^3/\text{h}$  的碱性电解槽为例,电解小室的数量一般在 180 个。对于相似结构的电解槽,所选用的特性参数具有一定的普适性。

## 2.2 光伏组件参数

光伏阵列由光伏板组成,光伏板内含有多个光

伏电池。表 2 中为本次研究中所选光伏组件单个电池的特性参数。所选组件由 72 个电池串联,2 组并联组合而成。这些参数将用来计算光伏组件在不同工况下的工作情况。

表 2 光伏组件电学特性参数

Tab. 2 Electrical characteristic parameters of photovoltaic modules

参数	数值
开路电压 $V_{oc}/V$	0.67918
短路电流 $I_{sc}/A$	5.73
光生电流 $I_l/A$	5.73
二极管的反向饱和电流 $I_0/A$	1.3195e-7
二极管理想因子 $n$	1.503
硅的能带宽 $\epsilon_g/eV$	1.12
并联阻值 $R_p/\Omega$	1443.27
串联阻值 $R_s/\Omega$	0.00056

## 2.3 日照强度参数

文章参考了某光伏项目在冬季、夏季的单日以及月平均每日的光强分布作为输入条件。从图 2 中可以看出夏季的总体辐射量要比冬季高且时长更长,每月的日平均辐照强度波动在 20% 左右。辐照强度将直接影响光伏组件的输出性能。

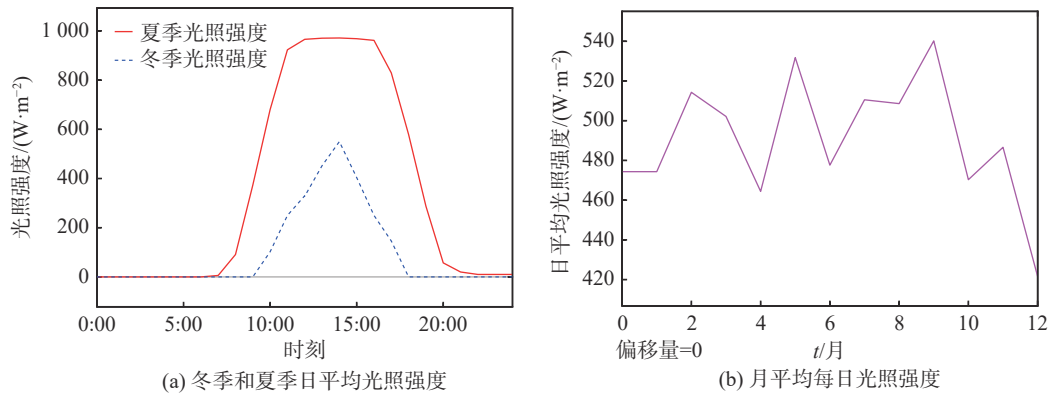


图 2 光照强度分布

Fig. 2 Distribution of light intensity

## 3 光伏耦合制氢系统架构

文章中的仿真模型基于 MATLAB-SIMSCAPE 平台搭建,见图 3,部分系统组件通过物理建模形式建立,目的是更好地模拟各组件的电学性能。整个系统主要分为 3 个部分,分别是光伏阵列、直流变流

器和电解槽。光强分布作为输入条件连接至光伏阵列,所设计的光伏阵列由 480 块光伏板并联和 12 组光伏板串联组合而成,在标准测试环境 ( $1 \text{ kW}/\text{m}^2$ ) 下可提供 2.5 MW 的功率输出。直流变流器连接在光伏阵列和电解槽之间,其功能是根据光强的变化来调节光伏阵列的输出,并实现最大功率点跟踪功



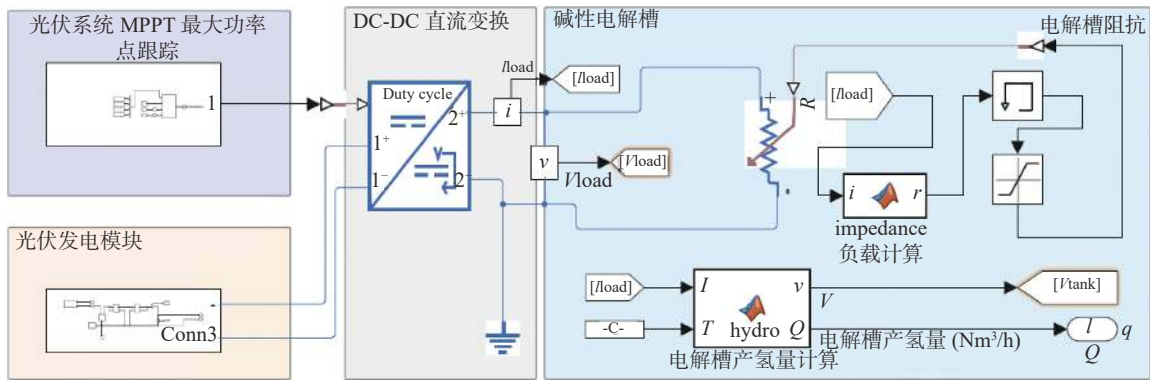


图 3 光伏耦合制氢系统建模图

Fig. 3 Model diagram of photovoltaic coupling hydrogen production system

能。直流变流器采用的是 DC-DC 升降压电路,使用扰动观测(Perturb and Observe, P&O)算法来调节电路占空比<sup>[20]</sup>。

文章建立了电解槽的仿真模块,将电流和电解槽温度作为输入条件用来计算电解槽的工作电压以及产氢量。为了减少对系统性能分析时的复杂性,本仿真系统未计及直流变流器及线路的损耗。电解槽作为系统的负载需要接入前端的电路,但是电解槽仿真模块作为信号模型无法直接接入到主电路。因此在研究过程中建立了电解槽的等效负载模型接入到主电路当中,并且令电解槽随主电路输出信息联动。等效负载模型是电解槽输入电流和电阻的函数,函数公式通过对电解槽不同出力工况下的曲线拟合求得。如图 4 所示,利用 10 次方公式可以较准确地拟合该曲线,其残差值 $\leq \pm 0.2$ 。

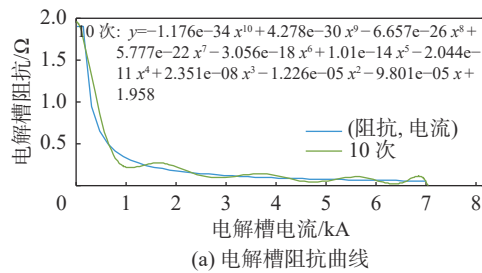
系统的仿真原理以及过程为:光伏电池根据输入光强的不同产生相应的电流和电压,直流变流器根据输入的不同,控制得到相应的输出电流,电流信息传入电解槽模块用来计算产氢量和电解槽的电压。输入光强变化时,该仿真系统可以实时调整负载运行点以及光伏组件的最大功率输出点,最终实现了光伏耦合电解水制氢系统的过程仿真模拟。

#### 4 仿真结果与讨论

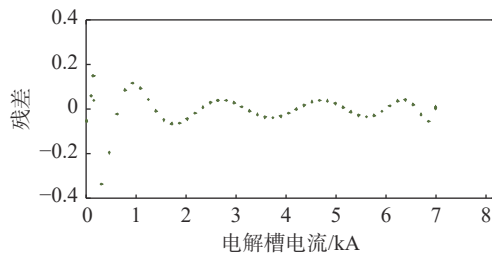
图 5 给定了系统一组简单的输入光照强度变化用来测试仿真系统的正确性。

如图 6 所示,光伏组件电流随光照强度的增加而增加,组件电压经直流变流器调节后保持在最大功率点处。在电解槽温度保持不变在 80 ℃ 的情况

下,电解槽的电流、电压水平与其等效电阻值挂钩,根据前文拟合曲线可知,当反馈电流增加时,电解槽的等效电阻值将会减小。



(a) 电解槽阻抗曲线



(b) 残差曲线

图 4 电解槽等效电阻拟合曲线

Fig. 4 Electrolyser equivalent resistance fitting curve

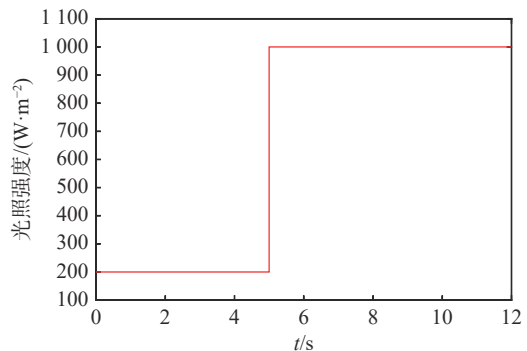


图 5 光照强度变化

Fig. 5 Changes in light intensity

由图7可以看到, 电解槽的等效电阻值随电压、电流值变化, 仿真结果与理论相符。

对直流变流器的控制中, 计算占空比时, 将会考虑电解槽等效电阻的变化。当电阻减小时会令电解槽电压减少、电流增加, 但其总功率会与光伏输出功率持平, 如图8所示。

在无其他电源接入的情况下, 电解槽的产氢能

力与光伏组件的输出成正比, 从图9中可以看到在  $1 \text{ kW/m}^2$  的光照强度下  $2.5 \text{ MW}$  的光伏组件的输出可以满足电解槽  $500 \text{ Nm}^3/\text{h}$  的产氢量, 符合工程经验。

这里采用实际项目的光照条件, 对仿真模型的平均产氢量进行了对比。结合表3和图10, 系统在夏季的产氢能力要明显高于冬季, 这主要是由于冬季光照强度较低且时间较短所造成的。如果考虑设

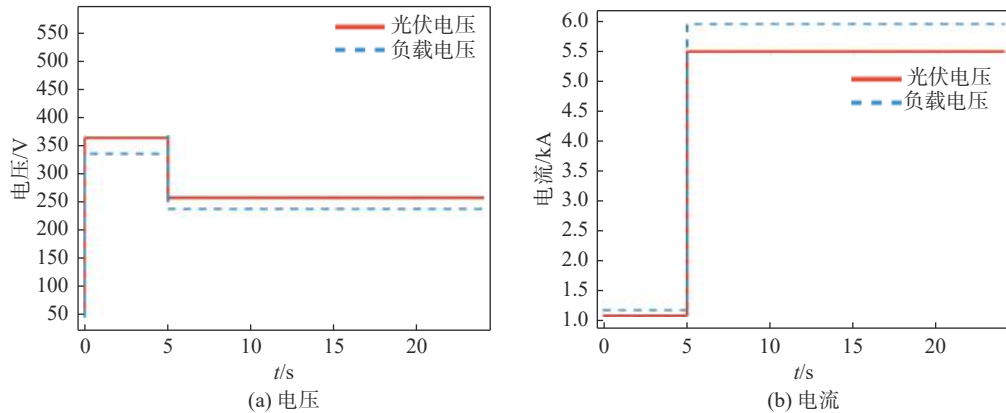


图6 光伏组件以及电解槽电压、电流变化

Fig. 6 Photovoltaic modules and electrolyser voltage and current changes

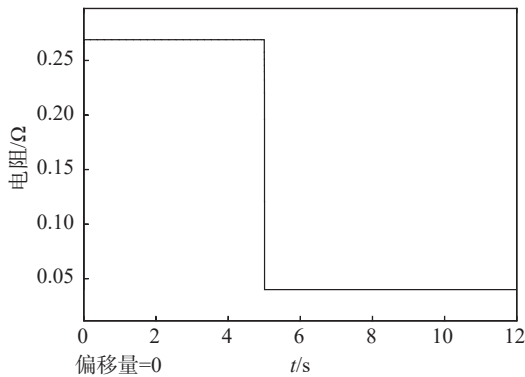


图7 电解槽等效电阻变化

Fig. 7 Change of equivalent resistance of electrolyser

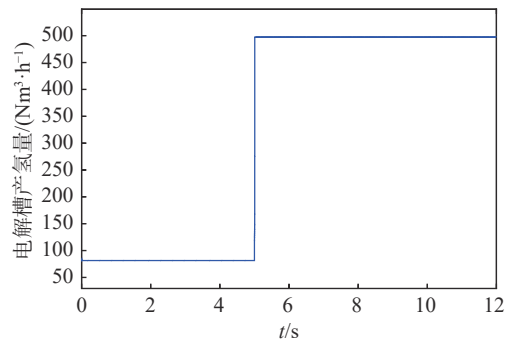


图9 电解槽产氢量变化

Fig. 9 Hydrogen production rate

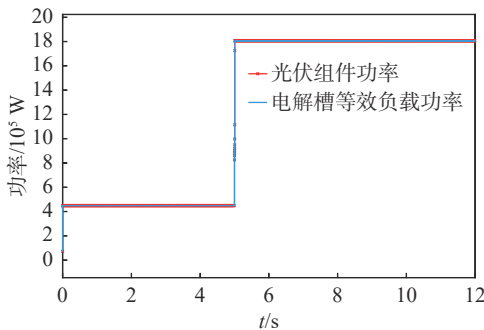


图8 光伏组件以及电解槽等效电阻功率

Fig. 8 Power of the photovoltaic module and electrolyser equivalent resistance

备运行损耗, 系统在低光照情况下的产氢能力将会进一步减小。

对每月的日平均产氢量进行了模拟。如图11所示, 除12月以外, 电解槽的月平均日产氢能力有12%的浮动并保持在  $240 \text{ Nm}^3/\text{h}$  左右。由于冬季的低入射光强, 造成了数值在12月份的降低。参考表4, 受每月天数不同和季节的影响, 系统的年产氢量为  $830.131 \text{ kNm}^3$ , 输入某项目的实际数据, 可输出符合工程实际数据。

表 3 夏季和冬季产氢时间和产氢量

Tab. 3 Hydrogen production period and production volume in summer and winter

夏季产氢时间	平均产氢量/Nm <sup>3</sup>	冬季产氢时间	平均产氢量/Nm <sup>3</sup>
8:00—9:00	4.7	—	—
9:00—10:00	10	—	—
10:00—11:00	297	10:00—11:00	5.14
11:00—12:00	406	11:00—12:00	8.38
12:00—13:00	425	12:00—13:00	9.9
13:00—14:00	427	13:00—14:00	130
14:00—15:00	427	14:00—15:00	238
15:00—16:00	426	15:00—16:00	170
16:00—17:00	423	16:00—17:00	94
17:00—18:00	364	17:00—18:00	6.3
18:00—19:00	251	—	—
19:00—20:00	106	—	—
20:00—21:00	3.4	—	—
总产氢小时数	日产氢量/Nm <sup>3</sup>	总产氢小时数	日产氢量/Nm <sup>3</sup>
13	3570.1	8	661.72

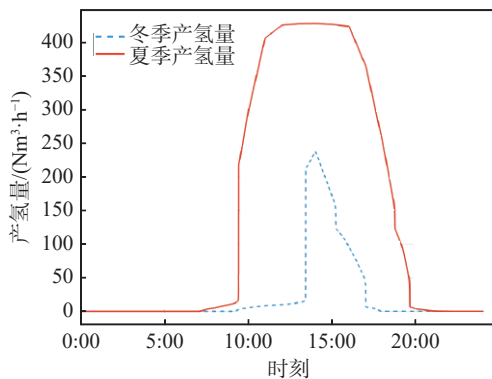


图 10 电解槽冬季和夏季产氢量平均值

Fig. 10 The average hydrogen production of electrolyzer in winter and summer

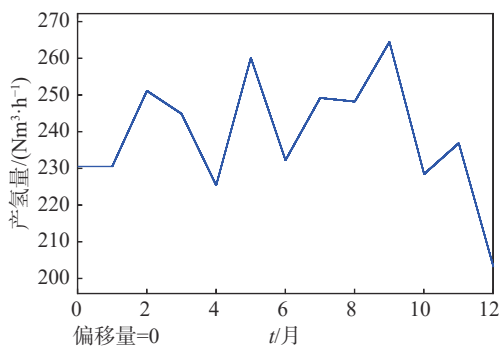


图 11 电解槽每个月的日产氢量

Fig. 11 Electrolyzer average daily hydrogen production for each month

表 4 月平均产氢能力

Tab. 4 Monthly average hydrogen production rate

月份	每月产氢量/kNm <sup>3</sup>	月份	每月产氢量/kNm <sup>3</sup>
1	68.030	7	73.331
2	66.766	8	73.036
3	72.153	9	75.240
4	64.410	10	67.146
5	76.570	11	67.545
6	66.120	12	59.784
年产氢量/kNm <sup>3</sup>		830.131	

## 5 结论

本研究针对光伏耦合电解水制氢系统提出了一种改进的建模方式,通过构建电解槽等效电阻的方式解决了信号传递方式不统一,模拟过程复杂等问题。系统模型可以适应光伏电源的波动从而进行动态负载调节,电解槽负载拟合残差值 $\leq \pm 0.2$ 。通过代入实际项目的天气数据,模拟了不同工况下的电解槽平均产氢能力。研究成果可为可再生能源电解水制氢整体系统的运行状态的评估提供参考,对于实现电解槽参数的优化同样具有工程价值。目前在本次研究中,只考虑了电解槽的电气特性,所以设定了电解槽的工作温度保持在 80 °C 不变,未来的工作将会把电解槽的温升特性和储氢系统作为研究重点并加入到仿真过程当中。

### 参考文献:

- [1] BRAUNS J, TUREK T. Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: a review [J]. *Processes*, 2020, 8(2): 248. DOI: 10.3390/pr8020248.
- [2] ZHANG F, ZHAO P C, NIU M, et al. The survey of key technologies in hydrogen energy storage [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2016, 41(33): 14535-14552. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.293.
- [3] DAHBI S, MAZOZI I, EL OUARIACHI M, et al. Implementation of a multi-control architecture in a photovoltaic/grid/electrolysis system for usual use and clean storage by hydrogen production [J]. *International journal of renewable energy research*, 2017, 7(4): 1825-1835. DOI: 10.20508/ijrer.v7i4.6275.g7226.
- [4] MANDAL B, SIRKAR A, SHAU A, et al. Effects of geometry of electrodes and pulsating DC input on water splitting for production of hydrogen [J]. *International journal of renewable energy research*, 2012, 2(1): 99-102. DOI: 10.1097/00005344-199000153-00003..

- [5] BILGIN O. Evaluation of hydrogen energy production of mining waste waters and pools [C]//Proceedings of the International Conference on Renewable Energy Research and Applications, Palermo, Italy, November 22-25, 2015. Palermo: IEEE, 2015: 557-561.
- [6] KOIWA K, TAKAHASHI R, TAMURA J. A study of hydrogen production in stand-alone wind farm [C]//IEEE Power Electronics Society (PELS). Proceedings of the International Conference on Renewable Energy Research and Applications, Nagasaki, Japan, November 11-14, 2012. Nagasaki: IEEE, 2012: 1-6.
- [7] MARTINEZ D, ZAMORA R. MATLAB SIMSCAPE model of an alkaline electrolyser and its simulation with a directly coupled PV module [J]. *International journal of renewable energy research*, 2018, 8(1): 552-560.
- [8] GARCÍA-VALVERDE R, MIGUEL C, MARTÍNEZ-BÉJAR R, et al. Optimized photovoltaic generator-water electrolyser coupling through a controlled DC-DC converter [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2008, 33(20): 5352-5362. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2008.06.015](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.06.015).
- [9] DAHBI S, ABOUTNI R, AZIZ A, et al. Optimised hydrogen production by a photovoltaic-electrolysis system DC/DC converter and water flow controller [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2016, 41(45): 20858-20866. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2016.05.111](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.111).
- [10] 戴凡博. PEM电解水制氢催化剂及直接耦合光伏发电系统建模研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- DAI F B. Study of catalyst in PEM water electrolysis and directly coupling photovoltaic system simulation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [11] 周涣, 田易之. 光伏-PEM制氢直接耦合系统建模与仿真 [J]. *现代电子技术*, 2022, 45(19): 178-181. DOI: [10.16652/j.issn.1004-373x.2022.19.032](https://doi.org/10.16652/j.issn.1004-373x.2022.19.032).
- ZHOU H, TIAN Y Z. Modeling and simulation of photovoltaic-PEM hydrogen production direct coupling system [J]. *Modern electronics technique*, 2022, 45(19): 178-181. DOI: [10.16652/j.issn.1004-373x.2022.19.032](https://doi.org/10.16652/j.issn.1004-373x.2022.19.032).
- [12] 江悦, 沈小军, 吕洪, 等. 碱性电解槽运行特性数字孪生模型构建及仿真 [J]. *电工技术学报*, 2022, 37(11): 2897-2908. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.210501](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.210501).
- JIANG Y, SHEN X J, LÜ H, et al. Construction and simulation of operation digital twin model for alkaline water electrolyzer [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2022, 37(11): 2897-2908. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.210501](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.210501).
- [13] 郭常青, 伊立其, 闫常峰, 等. 太阳能光伏-PEM水电解制氢直接耦合系统优化 [J]. *新能源进展*, 2019, 7(3): 287-294. DOI: [10.3969/j.issn.2095-560X.2019.03.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-560X.2019.03.012).
- GUO C Q, YI L Q, YAN C F, et al. Optimization of photovoltaic-PEM electrolyzer direct coupling systems [J]. *Advances in new and renewable energy*, 2019, 7(3): 287-294. DOI: [10.3969/j.issn.2095-560X.2019.03.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-560X.2019.03.012).
- [14] 张财志. 太阳能电解水制氢系统的建模与仿真研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- ZHANG C Z. Modeling and simulation for solar-hydrogen system [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [15] 蔡国伟, 孔令国, 彭龙, 等. 基于氢储能的主动型光伏发电系统建模与控制 [J]. *太阳能学报*, 2016, 37(10): 2451-2459. DOI: [10.3969/j.issn.0254-0096.2016.10.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0096.2016.10.001).
- CAI G W, KONG L G, PENG L, et al. Modeling and control of active PV generation system based on hydrogen storage [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2016, 37(10): 2451-2459. DOI: [10.3969/j.issn.0254-0096.2016.10.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0096.2016.10.001).
- [16] 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. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2016.10.009](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2016.10.009).
- CAI G W, CHEN C, KONG L G, et al. Modeling and control of grid-connected system of wind/PV/electrolyzer and SC [J]. *Power system technology*, 2016, 40(10): 2982-2990. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2016.10.009](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2016.10.009).
- [17] TIJANI A S, YUSUP N A B, RAHIM A H A. Mathematical modelling and simulation analysis of advanced alkaline electrolyzer system for hydrogen production [J]. *Procedia technology*, 2014, 15: 798-806. DOI: [10.1016/j.protcy.2014.09.053](https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.09.053).
- [18] ULLEBERG Ø. Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach. *International journal of hydrogen energy* [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2003, 28(1): 21-33. DOI: [10.1016/S0360-3199\(02\)00033-2](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00033-2).
- [19] NGOH S K, NJOMO D. An overview of hydrogen gas production from solar energy [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2012, 16(9): 6782-6792. DOI: [10.1016/j.rser.2012.07.027](https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.027).
- [20] NKANGA E R E, NDOH D Z N, NTONDA J N, et al. Modeling of hydrogen production in an alkaline electrolyser system connected with a solar photovoltaic panel or a wind turbine: case study; douala-cameroon [J]. *Journal of power and energy engineering*, 2021, 9(10): 1-18. DOI: [10.4236/jpee.2021.910001](https://doi.org/10.4236/jpee.2021.910001).

## 作者简介:



周行

周行 (通信作者)

1988-, 男, 山东莱芜人, 工程师, 博士, 主要从事氢能、新能源研究工作(email)zhouhang@ncpe.com.cn。

(编辑 叶筠英)