

适用于大扰动和波动工况输入的 PEM 电解槽通用等效电路模型

孙晓朋¹, 康伟², 陈梦东², 彭笑东², 徐衍会¹, 邓占锋^{2*}

(1. 华北电力大学, 北京市 昌平区 102206; 2. 北京智慧能源研究院, 北京市 昌平区 102200)

A Universal Equivalent Circuit Model for PEM Electrolyzers Suitable for Large Disturbance and Fluctuating Input Conditions

SUN Xiaopeng¹, KANG Wei², CHEN Mengdong², PENG Xiaodong², XU Yanhui¹, DENG Zhanfeng^{2*}

(1. North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China;

2. Beijing Institute of Smart Energy, Changping District, Beijing 102200, China)

ABSTRACT: With the increasing scale of hydrogen production from renewable energy, the inherent volatility of renewable energy poses a severe challenge to the accurate modeling of proton exchange membrane (PEM) electrolyzers. In this paper, an equivalent circuit model (ECM) of the PEM electrolyzer is proposed to simulate the dynamic electrochemical characteristics of the PEM electrolyzer under the input conditions of large disturbance and fluctuation. In this model, nonlinear resistance and nonlinear capacitance are used to simulate the electrode impedance characteristics and electrical double-layer capacitance characteristics of the PEM electrolyzer, and the relationship among the ECM, polarization curve, and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) is constructed based on the idea of integrating electrochemical and circuit theories. By fitting the polarization curve and EIS test data, the ECM parameters of the PEM electrolyzer are identified. The experimental results show that the model can accurately characterize the dynamic electrochemical behavior of the PEM electrolyzer under different working conditions, with a maximum relative error of only 0.8%. In addition, the model features low complexity, with a simple parameter identification process and good adaptability to electrolyzers with different performance parameters, and can be used in hydrogen power supply, hydrogen production rectifier, and other related fields.

KEY WORDS: hydrogen production from water electrolysis; equivalent circuit model; electrochemical impedance spectroscopy; polarization curve

摘要: 随着可再生能源制氢规模不断扩大, 可再生能源固有的波动性对质子交换膜(proton exchange membrane, PEM)电解槽精确建模提出严峻挑战。该文提出一种 PEM 电解槽等效电路模型(equivalent circuit model, ECM), 用于模拟大扰动和波动工况输入条件下 PEM 电解槽动态电化学特性。该模型利用非线性电阻和非线性电容分别模拟 PEM 电解槽的电极阻抗特性和双电层电容特性, 基于电化学-电路理论融合的思路, 构建出 ECM、极化曲线和电化学阻抗谱(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)三者的关联关系, 通过拟合极化曲线与 EIS 测试数据, 辨识 PEM 电解槽 ECM 参数。实验结果表明, 在不同工况下, 该模型能够精确地表征 PEM 电解槽的动态电化学行为, 最大相对误差仅为 0.8%。此外, 该模型复杂度低, 参数辨识过程简单, 对不同性能参数电解槽都具有较好的适应性, 可用于制氢电源、制氢整流器等相关领域。

关键词: 电解水制氢; 等效电路模型; 电化学阻抗谱; 极化曲线

0 引言

氢能, 作为一种清洁、可持续的无碳能源载体, 在交通、工业和发电等领域具有广泛的应用潜力, 被视为实现能源系统脱碳和减缓气候变化的核心解决方案之一^[1-3]。其中, 电解水制氢技术因其制氢纯度高、产物无污染、原料广泛易得、制备工艺简单等优点, 成为绿色氢能生产的主流路径^[4-5]。

电解水制氢技术与风电、光伏等波动性可再生能源的深度耦合, 为解决新能源消纳与电力系统灵活性不足提供了新思路^[6-9]。尤其质子交换膜(proton exchange membrane, PEM)电解水制氢技术, 因其

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5400-202219164A-1-1-ZN)。

Science and Technology Program of State Grid Corporation of China (5400-202219164A-1-1-ZN)。

分钟级甚至秒级的功率响应能力与宽功率运行范围(5%~150%)，展现出对强波动输入的独特适应性^[10]。然而，PEM 电解槽内部动态过程复杂且难以直接观测，导致其精确建模面临严峻挑战^[11]。在此背景下，等效电路模型(equivalent circuit model, ECM)因其能够将电化学特性转化为可量化分析的电路元件组合，成为电解槽性能评估与优化的关键工具^[12]。基于 ECM，研究者可系统解析电解槽关键参数(如活化阻抗、双电层电容)，预测多工况下的动态响应，并优化运行策略与设备设计^[13]。此外，ECM 在制氢电源拓扑设计^[14]、电网频率调节^[15]、DC/DC 转换器控制^[16-17]及综合能源系统仿真^[18]等工程领域均展现出不可替代的应用价值。

近年来，PEM 电解槽 ECM 研究逐步从静态建模向动态特性解析拓展。早期 Guilbert 团队^[19]首次构建 PEM 电解槽 ECM 框架，并基于电流阶跃法实现参数辨识，奠定了动态建模基础。然而，其模型时间常数与电流密度的强相关性^[20]，暴露出传统静态模型在动态工况下的固有缺陷。为提升精度，Hernández-Gómez 等^[21]提出自适应静态/动态 ECM，但其输入工况适应性局限，难以匹配真实可再生能源场景的波动需求。Immerz 等^[22]通过引入电流源替代电阻元件，实现了短时域动态行为的有效解析，后经 Puranen 团队^[23]改进，模型频率响应范围扩展至 1 Hz。然而，此类模型依赖经验参数修正结构缺陷，导致泛化能力受限。He 等^[24]虽提出多模式控制 ECM 进一步提高了精度，但其参数辨识基于简单的线性拟合假设，无法准确表征电解槽的非线性特性，导致宽域电流波动下的预测误差显著增大。

综上，现有 PEM 电解槽 ECM 多局限于特定输入条件，对波动与大扰动工况下的动态特性表征不足，难以满足新能源系统与电解槽耦合仿真的精度需求。针对上述问题，本文提出一种 PEM 电解槽通用 ECM，该模型利用非线性电阻和非线性电容分别模拟 PEM 电解槽的电极阻抗特性和双电层电容特性。基于电化学-电路理论融合的思路，构建出 ECM、极化曲线与电化学阻抗谱(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)三者的关联关系，通过拟合极化曲线与 EIS 测试数据，辨识 PEM 电解槽 ECM 参数。实验结果表明，在不同工况下，该模型能够精确地表征 PEM 电解槽的动态电化学行为，最大相对误差仅为 0.8%。此外，该模型复杂度低，参数辨识过程简单，对不同性能参数电解槽都

具有较好的适应性，可用于制氢电源、制氢整流器等相关领域。

1 实验设置

本研究中电解槽夹具由山东塞克塞斯公司提供，电解槽配备武汉理工商用膜电极，有效面积为 4 cm^2 ，电源由电化学工作站(美国 Gamry 公司制造，型号为 Ref3000)提供。测试过程中维持电解槽运行温度为 60°C ，去离子水供给流速为 160 mL/min 。

1.1 极化曲线测试

实验采用恒电流输入模式对 PEM 电解槽进行极化曲线测试，通过电化学工作站采集稳态电压数据。

1.2 EIS 测试

为获取电解槽的动态阻抗特性，采用恒电流模式进行 EIS 测试，电流密度范围与极化曲线测试一致，交流激励信号的频率跨度为 $0.1\text{ Hz}\sim 10\text{ kHz}$ ，幅值设定为直流电流的 10%。测试数据通过 Gamry Echem Analyst 软件进行等效电路拟合，提取 ECM 关键参数(如电荷转移电阻、双电层电容)。

2 PEM 电解槽 ECM 建模

2.1 PEM 电解水原理

PEM 电解槽在直流电的作用下将水分解为氧气和氢气，实现了电能向化学能的定向转化。其核心结构包括 PEM、阳极与阴极(如图 1 所示)。电解过程中，水分子在阳极发生氧化反应生成氧气、氢离子(H^+)及电子(式(1))，氢离子随后与未分解的水分子结合形成水合氢离子(H_3O^+)，并在电场作用下穿过 PEM 迁移至阴极；与此同时，电子通过外电路传输至阴极参与还原反应(式(2))，最终在阴极生成氢气。总反应如式(3)所示，其能量转换效率直接

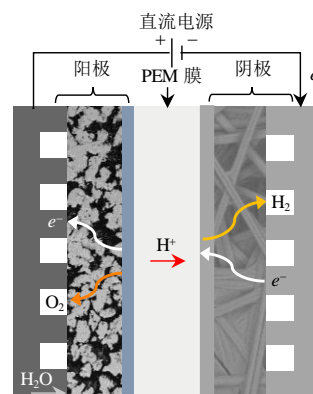
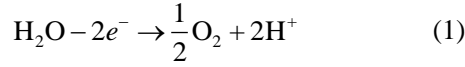


图 1 PEM 电解原理示意图

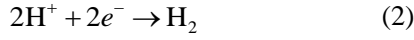
Fig. 1 Schematic diagram of PEM electrolysis principle

受电极动力学特性与膜传导性能的影响。

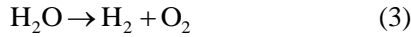
阳极:



阴极:



总电解反应:



2.2 PEM 电解槽 ECM 构建

在构建 PEM 电解槽 ECM 时, 依据其内部结构及物理化学过程特性, 将电解槽细分为阴极、阳极、膜和可逆过电位 4 个关键部分, 具体 ECM 模型详见图 2, 电解槽的电压表达式如式(4)所示:

$$u_{\text{cell}} = u_{\text{rev}} + u_{\text{ohmic}} + u_{\text{anode}} + u_{\text{cathode}} \quad (4)$$

式中: u_{cell} 为电解槽的总过电位; u_{rev} 为可逆过电位; u_{ohmic} 为欧姆过电位; u_{anode} 、 u_{cathode} 分别为阳极和阴极的活化过电位。

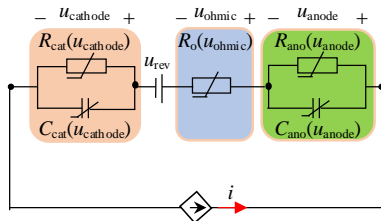


图 2 PEM 电解槽 ECM

Fig. 2 PEM electrolyzer ECM

2.2.1 阴极建模

阴极活化过电位的非线性特征由并联的非线性电阻($R_{\text{cat}}(u_{\text{cathode}})$)与电容($C_{\text{cat}}(u_{\text{cathode}})$)共同表征。其动态响应满足式(5):

$$\frac{du_{\text{cathode}}}{dt} = \frac{i_{\text{input}}}{C_{\text{cat}}(u_{\text{cathode}})} - \frac{u_{\text{cathode}}}{R_{\text{cat}}(u_{\text{cathode}})C_{\text{cat}}(u_{\text{cathode}})} \quad (5)$$

式中: u_{cathode} 为阴极活化过电位; i_{input} 为输入电流; $R_{\text{cat}}(u_{\text{cathode}})$ 为阴极活化电阻; $C_{\text{cat}}(u_{\text{cathode}})$ 为阴极电荷转移处的双电层电容。

2.2.2 阳极建模

阳极动力学特性采用与阴极对称的非线性 RC 结构建模, 其参数($R_{\text{ano}}(u_{\text{anode}})$ 和 $C_{\text{ano}}(u_{\text{anode}})$)随活化过电位 u_{anode} 动态变化, 如式(6)所示:

$$\frac{du_{\text{anode}}}{dt} = \frac{i_{\text{input}}}{C_{\text{ano}}(u_{\text{anode}})} - \frac{u_{\text{anode}}}{R_{\text{ano}}(u_{\text{anode}})C_{\text{ano}}(u_{\text{anode}})} \quad (6)$$

式中: u_{anode} 为阳极活化过电位, $R_{\text{ano}}(u_{\text{anode}})$ 为阳极活化电阻, $C_{\text{ano}}(u_{\text{anode}})$ 为阳极电荷转移处的双电层电容。

2.2.3 膜特性建模

PEM 电解槽的膜特性由串联非线性电阻($R_0(u_{\text{ohmic}})$)表征^[25], 其过电位表达式为:

$$u_{\text{ohmic}} = i_{\text{input}} R_0(u_{\text{ohmic}}) \quad (7)$$

2.2.4 可逆过电位建模

可逆过电位(u_{rev})受温度与压力影响显著^[26], 但本研究聚焦电流波动下的动态特性, 故将其简化为恒压源, 取值通过式(8)计算^[27]。

$$u_{\text{rev}} = E_{\text{rev}} + \frac{RT}{n_{\text{H}_2} F} \ln\left(\frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{input}}}\right) \quad (8)$$

式中: E_{rev} 为标准温度和压力下的可逆电压; P_{output} 为电解槽的输出压力; P_{input} 为电解槽的输入压力; n_{H_2} 为氢气的化学计量数; R 为理想气体常数; F 为法拉第常数。

2.3 PEM 电解槽 ECM 参数辨识

在本节中, 详细描述了如何通过极化曲线和 EIS 测试来辨识 PEM 电解槽 ECM 的关键参数, 具体流程如图 3 所示。

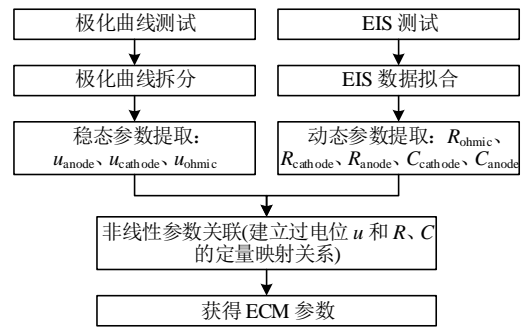


图 3 ECM 参数辨识流程

Fig. 3 ECM parameter identification process

2.3.1 基于极化曲线的稳态参数提取

通过恒电流极化曲线测试, 获取电解槽稳态电压数据。基于电化学机理, 对总电压(u_{cell})进行多物理量解耦获得 u_{anode} 、 u_{cathode} 、 u_{ohmic} , 具体流程如下:

1) 阳极活化过电位。

阳极活化过电位反映了阳极反应的动力学特性, 其计算基于 Butler-Volmer 方程^[28]。在活化过电位区域(图 4(a)), 阳极反应的动力学主要由活化能垒控制, 方程可简化为:

$$i = i_0 e^{\frac{\alpha F u_{\text{anode}}}{RT}} \quad (9)$$

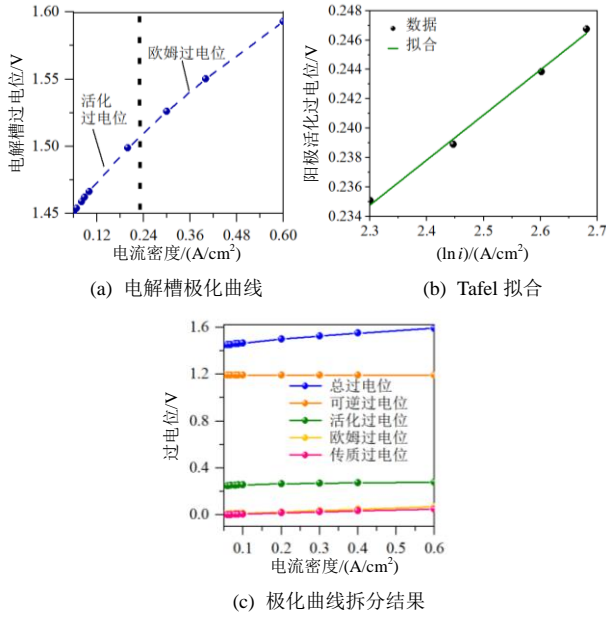


图 4 极化曲线拆分过程

Fig. 4 Polarization curve splitting process

式中: i 为电流密度; i_0 为交换电流密度; α 为电荷传递系数; R 为气体常数; T 为绝对温度。

对式(9)进一步整理, 得到阳极活化过电位和电流密度 i 的关系, 如式(10)所示:

$$u_{\text{anode}} = \frac{RT}{\alpha F} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (10)$$

式(10)可简化为 Tafel 方程形式:

$$u_{\text{anode}} = a + b \ln i \quad (11)$$

式中: $a = -[RT/(\alpha F)] \ln i_0$; $b = RT/(\alpha F)$ 。

在极化曲线(图 4(a))的活化过电位区域, 绘制阳极活化过电位(u_{anode})与电流密度对数($\ln i$)的关系图(即图 4(b)), 对图 4(b)进行线性拟合, 得到截距 a 和斜率 b , 带回式(11)可计算出 u_{anode} 。此外, 根据截距 a 和斜率 b 还可计算出电荷传递系数 α 和交换电流密度 i_0 :

$$\alpha = \frac{RT}{bF} \quad (12)$$

$$i_0 = e^{-\frac{a}{b}} \quad (13)$$

2) 欧姆过电位。

在图 4(a)所示的欧姆过电位区域, 电压降与电流之间的关系遵循欧姆定律, 其表达式如下:

$$u_{\text{ohmic}} = i_{\text{input}} R_{\text{ohmic}} \quad (14)$$

式中: u_{ohmic} 为欧姆过电位; R_{ohmic} 为欧姆电阻。

3) 阴极活化过电位。

阴极活化过电位如式(15)所示:

$$u_{\text{cathode}} = u_{\text{cell}} - u_{\text{rev}} - u_{\text{ohmic}} - u_{\text{anode}} \quad (15)$$

2.3.2 基于 EIS 的动态参数辨识

通过恒电流模式 EIS 测试获取电解槽阻抗数据, 并利用式(16)对 Nyquist 图进行等效电路拟合, 获取阻抗参数: R_{ohmic} 、 R_{cathode} 、 R_{anode} 、 C_{cathode} 、 C_{anode} 。

$$Z = \frac{R_{\text{cathode}}}{1 + j\omega R_{\text{anode}} C_{\text{anode}}} + \frac{R_{\text{cathode}}}{1 + j\omega R_{\text{cathode}} C_{\text{cathode}}} + R_{\text{ohmic}} \quad (16)$$

式中: Z 为整个电路的总阻抗; ω 为频率; j 为虚数单位; R_{cathode} 、 C_{cathode} 分别为阴极电荷转移电阻和阴极双电层电容; R_{anode} 、 C_{anode} 分别为阳极电荷转移电阻和阳极双电层电容; R_{ohmic} 为欧姆电阻。

2.3.3 ECM 非线性参数辨识

基于 2.3.1、2.3.2 节中获得的参数, 建立 R_{cathode} 、 C_{cathode} 与 u_{cathode} 、 R_{anode} 、 C_{anode} 与 u_{anode} 、 R_{ohmic} 与 u_{ohmic} 的非线性函数关系, 即 $R_{\text{cat}}(u_{\text{cathode}})$ 、 $C_{\text{cat}}(u_{\text{cathode}})$ 、 $R_{\text{ano}}(u_{\text{anode}})$ 、 $C_{\text{ano}}(u_{\text{anode}})$ 、 $R_0(u_{\text{ohmic}})$ 。

3 结果和讨论

3.1 PEM 电解槽 ECM 参数辨识结果

首先, 通过极化曲线测试获取了 $0.02 \sim 0.6 \text{ A/cm}^2$ 电流密度范围内的稳态电压数据(图 4(a)), 并基于 2.3.1 节的过电位分解方法提取 u_{anode} 、 u_{cathode} 、 u_{ohmic} 的定量值(图 4(c)), 如表 1 所示; 接着, 通过 EIS 测试, 获取了 PEM 电解槽在 $0.02 \sim 0.6 \text{ A/cm}^2$ 的阻抗数据(图 5(a)), 利用式(16)拟合, 得到不同电流密度下 EIS 的电阻和电容值, 如表 2 所示。最后, 基于极化曲线与 EIS 数据拟合, 获得 ECM 参数如式(17)—(21):

$$R_{\text{cat}}(u_{\text{cathode}}) = 0.00123u_{\text{cathode}}^{-0.22639} \quad (17)$$

$$R_{\text{ano}}(u_{\text{anode}}) = 1.084 \times 10^{-12} u_{\text{anode}}^{-17.73102} \quad (18)$$

表 1 不同电流下极化曲线的拆分结果

Table 1 Deconvolution results of polarization curves at different currents

电流密度/(A/cm ²)	u_{ohmic} /mV	u_{cathode} /mV	u_{anode} /V
0.02	2.39	0.277	234.81
0.04	4.78	0.198	244.03
0.06	7.17	1.340	249.43
0.08	09.56	3.430	253.26
0.10	11.95	5.690	256.23
0.20	23.91	16.860	265.45
0.30	35.86	26.580	270.85
0.40	47.81	34.910	274.68
0.50	59.76	41.810	277.60
0.60	71.72	48.440	280.08

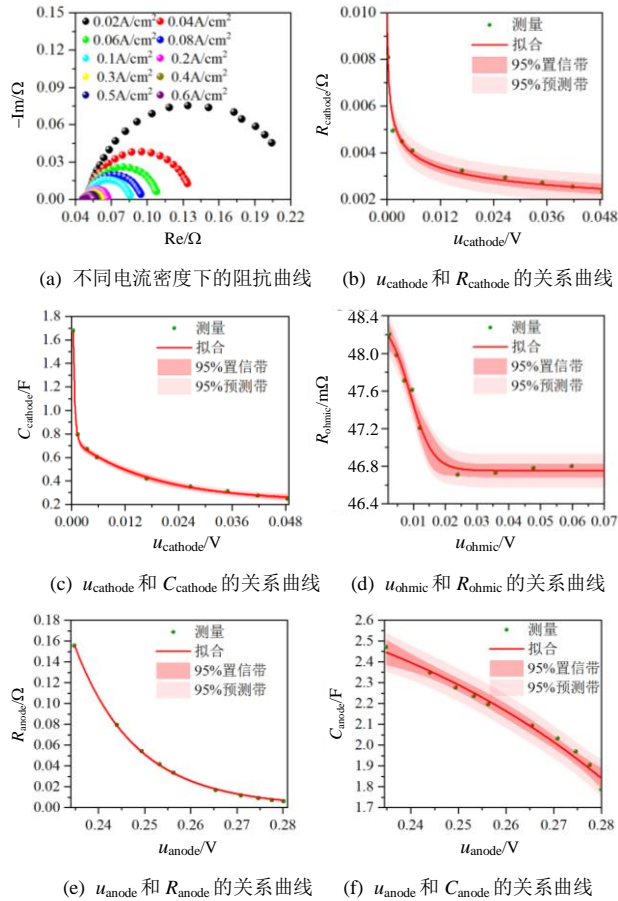


图5 分析曲线

Fig. 5 Relationship curves

表2 不同电流下EIS的辨识结果

Table 2 Identification results of EIS at different currents

电流密度/(A/cm ²)	R _{ohmic} /Ω	R _{cathode} /Ω	R _{anode} /Ω	C _{cathode} /F	C _{anode} /F
0.02	48.20	8.09	155.50	1.6780	2.470
0.04	47.98	5.86	79.34	1.0920	2.349
0.06	47.71	4.95	54.02	0.7943	2.276
0.08	47.61	4.49	41.39	0.6689	2.236
0.10	47.21	4.09	33.49	0.6025	2.198
0.20	46.71	3.24	16.84	0.4220	2.092
0.30	46.73	2.94	11.51	0.3515	2.032
0.40	46.78	2.70	8.83	0.3128	1.969
0.50	46.80	2.54	7.23	0.2770	1.904
0.60	46.76	2.33	6.22	0.2507	1.788

$$C_{cat}(u_{cathode}) = 0.22584 + 1.77601 \cdot e^{\left(\frac{-u_{cathode}}{4.30833 \times 10^{-4}}\right)} + 0.52707 \cdot e^{\left(\frac{-u_{cathode}}{0.01788}\right)} \quad (19)$$

$$C_{ano}(u_{anode}) = -0.01285 \cdot e^{\left(\frac{u_{anode}}{0.0628}\right)} + 3.0109 \quad (20)$$

$$R_0(u_{ohmic}) = 0.04675 + 0.0016 / \left[1 + e^{\left(\frac{u_{ohmic} - 0.00898}{0.00357}\right)}\right] \quad (21)$$

图5(b)—(f)的实验结果表明, R_{cathode}、R_{anode}均

随活化过电位的升高呈幂函数衰减。这一趋势表明,活化过电位的增加显著降低了电荷转移能垒,从而加速电极反应动力学。值得注意的是,阴极衰减速率系数(0.00123)远大于阳极(1.084 × 10⁻¹²),这意味着阴极的电荷转移响应速度较阳极更快;阳极幂指数绝对值更高(17.73102 vs. 0.22639),表明阳极对活化过电位的变化更为敏感,尤其是在活化过电位较大的情况下,随着活化过电位的增加, R_{anode}会以更快的速度下降。

C_{cathode}、C_{anode}随着活化过电位的增加而减小。C_{cathode}减小的速率会受到两个不同衰速度减的指数项的影响,第1个指数项指数部分的分母(4.30833 × 10⁻⁴)决定了该指数项随 u_{cathode} 增大而迅速衰减,第2个指数项指数部分的分母(0.01788)决定了其衰减速度相对较慢,随着 u_{cathode} 的增加逐渐衰减,这种分段现象表现出阴极电容复杂的非线性特性。C_{anode}随着电压的增加持续减小,且减小的速率较为均匀,没有明显的阶段性变化。

R_{ohmic}随欧姆过电位的变化呈现显著的分段特性(图5(d))。低电压区(u_{ohmic} < 15 mV): R_{ohmic}以幂函数关系快速下降,表明在此电压阈值下,即使是微小的电压提升也能显著降低电解槽的内阻。高电压区(u_{ohmic} ≥ 15 mV): R_{ohmic}趋于稳定,此时电压对电阻的影响减弱。该阈值效应与PEM内质子传导机制密切相关,这一现象揭示了通过适当提高电压,可有效降低内阻,从而优化整体能效。

3.2 稳态工况条件测试

为了验证模型在稳态工况下的准确性,对模型进行了稳态极化曲线测试,使用式(22)的相对误差 E_r 和平均误差 E_m 来评估模型的性能。如下所示,图6展示了稳态工况测试的仿真结果,其中 E_r 为0.069%, E_m 为1.12 mV,模型与实验数据吻合度较好,可以准确反映电解槽的稳态行为。

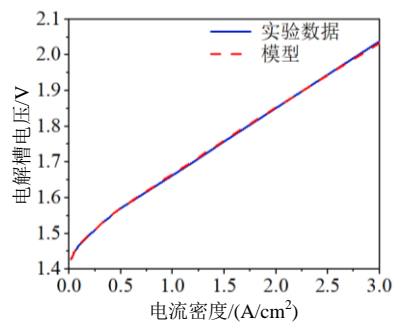


图6 稳态工况测试结果

Fig. 6 Test results for steady state operating conditions

$$\begin{cases} E_r = \frac{100}{n_d} \sum_{k=1}^{n_d} \frac{|u_{\text{exp},k} - u_{\text{sim},k}|}{u_{\text{exp},k}} \\ E_m = \frac{\sum_{k=1}^{n_d} |u_{\text{exp},k} - u_{\text{sim},k}|}{n_d} \end{cases} \quad (22)$$

式中： $u_{\text{exp},k}$ 为第 k 个数据点的实验电压值； $u_{\text{sim},k}$ 为第 k 个数据点的模拟电压值； n_d 为数据点的总数。

3.3 动态工况条件测试

为验证模型在动态输入条件下的响应能力，对电解槽在不同电流密度切换工况下的动态特性进行了测试。根据 PEM 电解槽的典型运行范围及极端工况需求，测试条件设定为额定电流密度(1.5 A/cm²)的 5%(低负荷)、80%(常规负荷)、100%(额定负荷)、150%(过载)及 200%(极限过载)。测试结果如图 7 所示，图中 E_r 整体为 0.226%。实验结果表明，模型在不同电流密度阶跃切换时均能准确跟踪电解槽的实际电压变化。

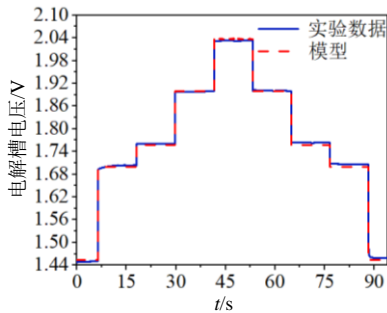


图 7 动态工况测试结果

Fig. 7 Dynamic working condition test results

3.4 波动工况条件测试

为验证模型在波动输入条件下的适应性，采用方波、三角波和正弦波三种典型周期信号作为激励源，分别从相同频率不同幅值和相同幅值不同频率两个维度展开测试，评估其在波动场景中的适用性。

3.4.1 相同频率、不同幅值条件测试

在相同频率下，分别设定电流密度波动范围为额定值的 5%~80%(低幅值波动)、5%~100%(常规幅值波动)、5%~150%(高幅值波动)及 5%~200%(极端幅值波动)。测试结果如图 8—10 所示，表 3 列出对

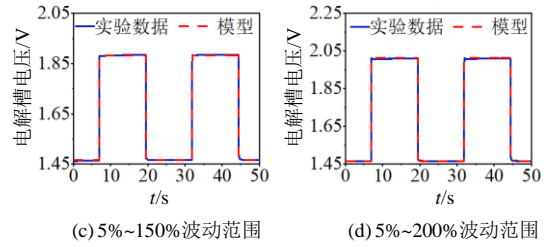
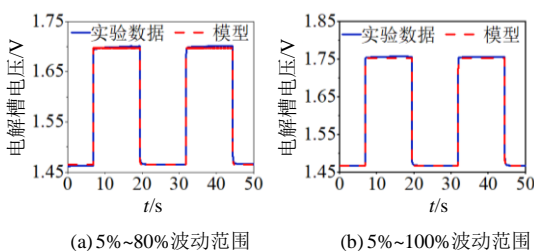


图 8 方波激励下电解槽的仿真结果

Fig. 8 Simulation results of electrolyzer under square wave excitation

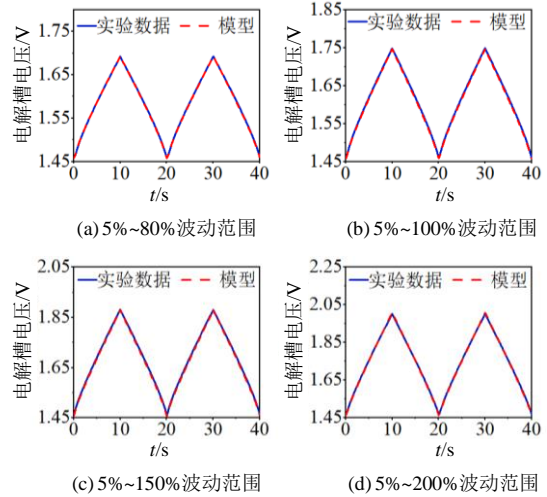


图 9 三角波激励下电解槽的仿真结果

Fig. 9 Simulation results of electrolyzer with triangular wave excitation

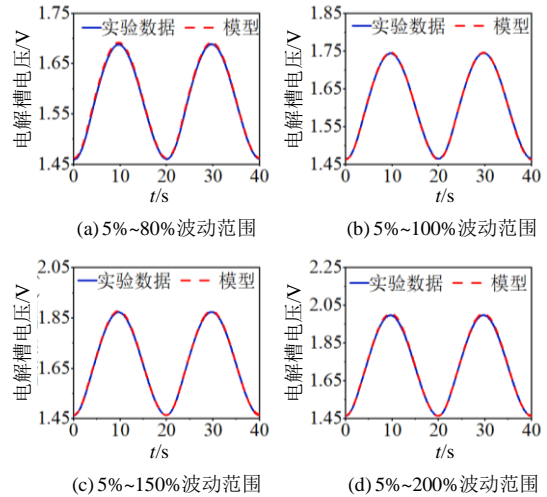


图 10 正弦波激励下电解槽的仿真结果

Fig. 10 Simulation results of electrolyzer under sinusoidal excitation

应的 E_r 和 E_m 。实验结果表明，模型在不同幅值波动条件下的最大误差(E_r 为 0.3% 和 E_m 为 4.9 mV)均在理想范围内。

由表 3 可知，三角波在低幅值波动的误差最低，而正弦波在低幅值波动的误差最高。随着波动范围

表3 相同频率、不同幅值条件测试结果

Table 3 Test results under the same frequency and different amplitude conditions

激励源	波动范围/%	E_r /%	E_m /mV
方波	5~80	0.109	2.00
	5~100	0.116	1.90
	5~150	0.070	1.20
	5~200	0.118	2.10
三角波	5~80	0.060	0.90
	5~100	0.193	3.10
	5~150	0.300	4.90
	5~200	0.187	3.20
正弦波	5~80	0.187	2.97
	5~100	0.078	1.25
	5~150	0.132	2.30
	5~200	0.221	4.10

的增加,方波的误差相对稳定,三角波的误差先增大后减小,正弦波的误差先减小后增大。这些结果表明,不同的波动范围对电解槽的响应表现出明显的差异。因此,在电解槽设计和操作过程中,必须考虑激励源的类型及其波动范围,以确保系统能够在不同工况下保持最优的性能。

3.4.2 相同幅值、不同频率条件测试

固定电流密度波动范围为5%~150%(高幅值),测试频率覆盖0.1、1、10及100Hz。仿真结果如图11—13所示,表4列出对应的 E_r 和 E_m 。实验结

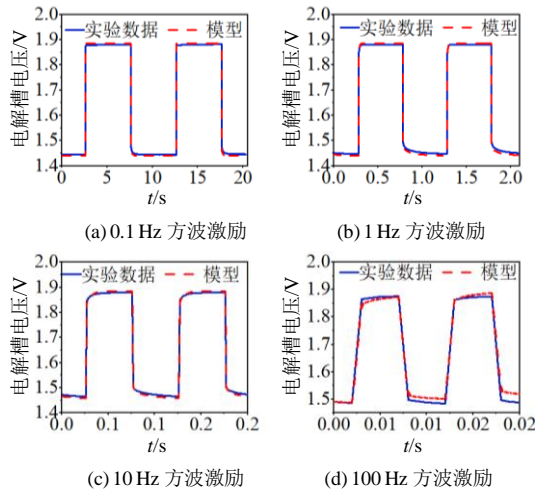


图11 方波激励下电解槽的仿真结果

Fig. 11 Simulation results of electrolyzer under square wave excitation

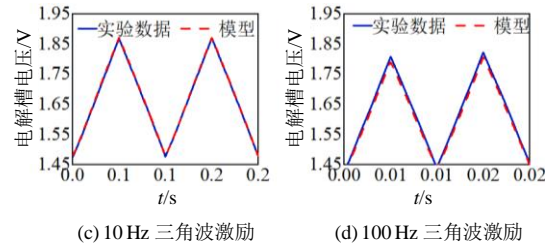
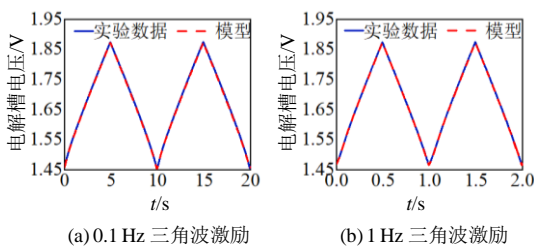


图12 三角波激励下电解槽的仿真结果

Fig. 12 Simulation results of electrolyzer under triangular wave excitation

图13 正弦波激励下电解槽的仿真结果

Fig. 13 Simulation results of electrolyzer under sinusoidal excitation

表4 不同频率、相同幅值条件测试结果

Table 4 Test results under different frequencies and the same amplitude conditions

激励源	频率/Hz	E_r /%	E_m /mV
方波	0.1	0.304	4.8
	1	0.382	6.0
	10	0.372	6.0
	100	0.795	12.7
三角波	0.1	0.130	2.2
	1	0.070	1.2
	10	0.181	3.0
正弦波	100	0.665	11.0
	0.1	0.234	4.0
	1	0.190	3.2
	10	0.080	1.3
	100	0.584	9.6

果表明,模型在不同频率条件下的最大误差(E_r 为0.795%和 E_m 为12.7 mV)均在比较理想的范围内。

由表4知,方波激励下,随着频率的增加, E_r 和 E_m 总体呈上升趋势,三角波和正弦波激励下,随着频率的增加 E_r 和 E_m 先降低后增加。3种波形均在在100 Hz时出现最大误差,这与PEM电解槽

的时间常数密切相关，当激励周期接近或短于时间常数时，模型难以完全跟踪瞬时变化。因此，在实际应用选择合适的激励源和频率对于确保电解槽性能的准确测量至关重要。

3.5 非线性电容对 ECM 性能的影响

为探究非线性电容对 ECM 性能的优化作用，将图 2 所示 ECM 中的非线性电容替换为线性电容元件，并选取方波、正弦波和三角波 3 种典型周期信号作为测试激励源。首先在频率 1 Hz、幅值波动范围 5%~150% 的工况下，通过参数扫描法确定线性电容最优值为 1.9 F，此时系统取得最小误差指标 ($E_r = 0.252\%$, $E_m = 3.8 \text{ mV}$)。为进一步验证非线性电容的优势，设置频率提升至 100 Hz 且保持幅值波动范围不变，固定线性电容值为 1.9 F 进行对比实验。线性电容的 ECM 如图 14(a) 所示，仿真结果展示在图 14(b)~(d) 中，表 5 列出相应的 E_r 和 E_m 。

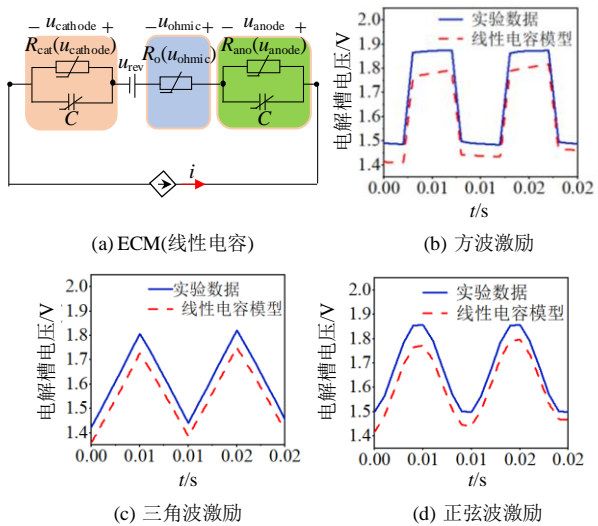


图 14 线性电容 ECM 仿真结果

Fig. 14 Linear capacitor ECM simulation results

表 5 线性电容 ECM 测试结果

Table 5 Linear capacitance ECM test results

激励源	$E_r/\%$	E_m/mV
方波	0.795	12.7
三角波	0.665	11.0
正弦波	0.584	9.6

实验数据表明，线性电容 ECM 的误差指标显著高于非线性电容 ECM。具体而言，线性电容 ECM 的最大 E_r (4.752%) 是非线性电容 ECM (0.795%) 的 6 倍。该对比结果有力证明了非线性电容在拓宽 ECM 工作带宽、提升动态响应精度方面的显著优势。

3.6 不同电解槽测试

为验证模型在复杂工况下的通用性及抗干扰

能力，选取膜电极有效面积为 25 cm^2 (典型实验室规模) 的 PEM 电解槽作为测试载体，并采用非理想化直流电源模拟工业场景中存在的电能质量扰动。仿真结果如图 15 所示，由表 6 知，模型的 E_r 为 0.212%、 E_m 为 3.4 mV，模型整体表现出较好的准确性。

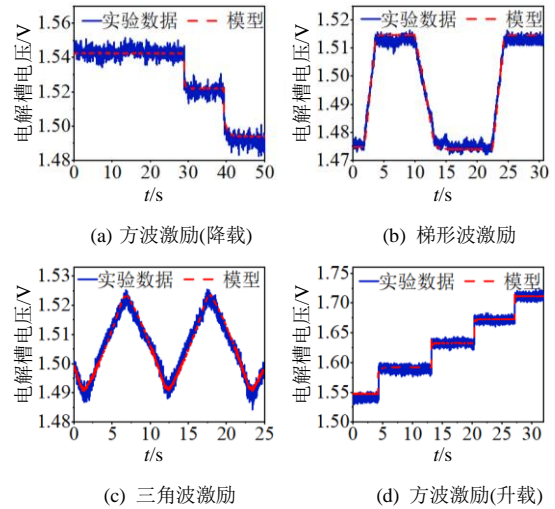


图 15 电极面积为 25 cm^2 电解槽仿真结果

Fig. 15 Simulation results of electrode area of 25 cm^2 electrolyzer

表 6 电极面积为 25 cm^2 电解槽测试结果

Table 6 Test results for electrolytic cell with an electrode area of 25 cm^2

激励源	$E_r/\%$	E_m/mV
上阶梯波	0.182	2.8
梯形波	0.111	1.7
三角波	0.104	1.6
下阶梯波	0.212	3.4

3.7 不同方法对比

为了评估本文 ECM 的准确性，统一使用式(22) 相对误差 E_r 和平均误差 E_m 作为比较基准。在额定电流 $5\% \rightarrow 80\% \rightarrow 100\% \rightarrow 200\% \rightarrow 100\%$ 的动态测试工况下，与文献[20-21,24]中的 ECM 进行对比实验，相关结果展示在图 16 中，表 7 列出不同 ECM 的

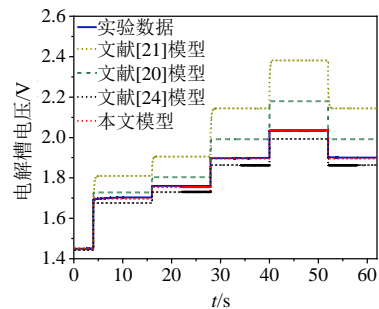


图 16 不同方法对比

Fig. 16 Comparison of different methods

表7 不同方法准确性对比结果

Table 7 Comparison of accuracy results of different methods

方法	$E_r/\%$	E_m/mV
文献[21]	10.661	202.3
文献[20]	3.882	74.3
文献[24]	1.719	31.9
本文方法	0.202	3.7

E_r 和 E_m 。从表7可以看出,提出方法的相对误差仅为0.2%,低于文献[20-21,24]。

4 结论

现有 PEM 电解槽 ECM 多基于稳态或小范围扰动输入条件,无法适应新能源电力系统耦合场景中频繁出现的波动、大扰动等工况。针对上述问题,本文提出一种 PEM 电解槽 ECM,用于模拟大扰动和波动工况输入条件下 PEM 电解槽动态电化学特性。

1) 引入非线性电阻和非线性电容分别模拟 PEM 电解槽的电极阻抗特性和双电层电容特性,相较于线性 RC 网络,该结构使电流密度适用范围扩展约 200%。

2) 基于电化学-电路理论融合的思路,构建出 ECM、极化曲线与 EIS 三者的关联关系,通过拟合极化曲线与 EIS 测试数据,辨识 PEM 电解槽 ECM 参数。

3) 在不同工况下,该模型能够精确地表征 PEM 电解槽的动态电化学行为,最大相对误差仅为 0.8%。此外,该模型复杂度低,参数辨识过程简单,且对不同性能参数电解槽具有较好的适应性。

后续研究会开展在线参数辨识算法,通过实时监测极化曲线和 EIS 变化,动态更新模型参数以适配电解槽老化场景。

参考文献

[1] KOJIMA H, NAGASAWA K, TODOROKI N, et al. Influence of renewable energy power fluctuations on water electrolysis for green hydrogen production [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(12): 4572-4593.

[2] KUMAR S S, LIM H. An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production[J]. Energy Reports, 2022, 8: 13793-13813.

[3] 倪瓚, 邵成成, 王秀丽, 等. 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[J/OL]. 中国电机工程学报, 2024 [2025-06-13]. <http://kns.cnki.net/>

kcms/detail/11.2107.tm.20241202.1746.014.html.

NI Zan, SHAO Chengcheng, WANG Xiuli, et al. Clustered P2H model and its application in power system operation simulation[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2024[2025-06-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20241202.1746.014.html>(in Chinese).

[4] NORMAN E A, MAESTRE V M, ORTIZ A, et al. Steam electrolysis for green hydrogen generation. State of the art and research perspective[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 202: 114725.

[5] MAKHSOOS A, KANDIDAYENI M, POLLET B G, et al. A perspective on increasing the efficiency of proton exchange membrane water electrolyzers: a review [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(41): 15341-15370.

[6] ARSAD A Z, HANNAN M A, AL-SHETWI A Q, et al. Hydrogen electrolyser technologies and their modelling for sustainable energy production: a comprehensive review and suggestions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(72): 27841-27871.

[7] SALEHMIN M N I, HUSAINI T, GOH J, et al. High-pressure PEM water electrolyser: a review on challenges and mitigation strategies towards green and low-cost hydrogen production[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 268: 115985.

[8] 田雪沁, 姚红雨, 袁铁江, 等. 考虑动态调节特性的光伏直接耦合制氢系统容量优化配置[J/OL]. 中国电机工程学报, 2024[2025-06-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20240708.1322.005.html>.

TIAN Xueqin, YAO Hongyu, YUAN Tiejiang, et al. Capacity optimization configuration of photovoltaic hydrogen production direct coupling system considering dynamic regulation characteristics[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2024[2025-06-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20240708.1322.005.html>(in Chinese).

[9] 田雪沁, 姚红雨, 袁铁江. 基于 DRL 的光伏-电解槽直接耦合制氢系统运行优化方法[J/OL]. 中国电机工程学报, 2024[2025-03-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20241029.1741.002.html>.

TIAN Xueqin, YAO Hongyu, YUAN Tiejiang. Optimization method for operation of photovoltaic electrolytic cell direct coupling system based on DDPG [J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2024[2025-03-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20241029.1741.002.html> (in Chinese).

[10] 徐衍会, 陈浩维, 胡俊杰. 光伏电解水制氢典型工况及质子交换膜电解堆性能衰减研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(19): 6228-6243.

XU Yanhui, CHEN Haowei, HU Junjie. Study on typical working conditions of hydrogen production by photovoltaic electrolysis of water and performance degradation of proton exchange membrane electrolytic

- stacks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(19): 6228-6243(in Chinese).
- [11] 孔令国, 孙佳琦, 王士博, 等. 波动工况下 PEM 电解槽负荷一维机理建模及动态响应[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(13): 5074-5086.
KONG Lingguo, SUN Jiaqi, WANG Shibo, et al. One-dimensional mechanism modeling and dynamic response of PEM electrolysis load under fluctuating conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(13): 5074-5086(in Chinese).
- [12] MAJUMDAR A, HAAS M, ELLIOT I, et al. Control and control-oriented modeling of PEM water electrolyzers: a review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(79): 30621-30641.
- [13] MAO Xinke, TIAN Yizhi, YANG Aimei, et al. Identification of equivalent circuit parameters for proton exchange membrane (PEM) electrolyzer engineering models[J]. IEEE Access, 2024, 12: 15509-15524.
- [14] KIM J, SHRINGARPURE K, FAN Jun, et al. Equivalent circuit model for power bus design in multi-layer PCBs with via arrays[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2011, 21(2): 62-64.
- [15] DOZEIN M G, JALALI A, MANCARELLA P. Fast frequency response from utility-scale hydrogen electrolyzers[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(3): 1707-1717.
- [16] MENG Xin, CHEN Maolin, HE Mingzhi, et al. A novel high power hybrid rectifier with low cost and high grid current quality for improved efficiency of electrolytic hydrogen production[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(4): 3763-3768.
- [17] YODWONG B, GUILBERT D, HINAJE M, et al. Proton exchange membrane electrolyzer emulator for power electronics testing applications[J]. Processes, 2021, 9(3): 498.
- [18] CHEN Jing, LI Fan, LI Haoran, et al. Novel dynamic equivalent circuit model of integrated energy systems[J]. Energy, 2023, 262: 125266.
- [19] GUILBERT D, VITALE G. Experimental validation of an equivalent dynamic electrical model for a proton exchange membrane electrolyzer[C]//Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe). Palermo: IEEE, 2018: 1-6.
- [20] GUILBERT D, VITALE G. Dynamic emulation of a PEM electrolyzer by time constant based exponential model[J]. Energies, 2019, 12(4): 750.
- [21] HERNÁNDEZ-GÓMEZ Á, RAMIREZ V, GUILBERT D, et al. Development of an adaptive static-dynamic electrical model based on input electrical energy for PEM water electrolysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(38): 18817-18830.
- [22] IMMERZ C, BENSMANN B, TRINKE P, et al. Understanding electrical under-and overshoots in proton exchange membrane water electrolysis cells[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2019, 166(15): F1200-F1208.
- [23] PURANEN P, HEHEMANN M, KÜTEMEIER P, et al. Using the nonlinearity of a PEM water electrolyzer cell for its dynamic model characterization[J]. Electrochimica Acta, 2024, 507: 145085.
- [24] HE Mingzhi, NIE Gongzhe, YANG Haoran, et al. A generic equivalent circuit model for PEM electrolyzer with multi-timescale and stages under multi-mode control[J]. Applied Energy, 2024, 359: 122728.
- [25] EL-SHAFIE M. Hydrogen production by water electrolysis technologies: a review[J]. Results in Engineering, 2023, 20: 101426.
- [26] OLIVIER P, BOURASSEAU C, BOUAMAMA P B. Low-temperature electrolysis system modelling: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 78: 280-300.
- [27] JÄRVINEN L, PURANEN P, KOSONEN A, et al. Automated parametrization of PEM and alkaline water electrolyzer polarisation curves[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(75): 31985-32003.
- [28] HAN Bo, STEEN S M, MO Jingke, et al. Electrochemical performance modeling of a proton exchange membrane electrolyzer cell for hydrogen energy[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(22): 7006-7016.



孙晓朋

收稿日期: 2025-03-12。

作者简介:

孙晓朋(1995), 男, 博士研究生, 研究方向为电解水制氢, sunxiaopeng1996@163.com;

*通信作者: 邓占锋(1976), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为电解水制氢等, correspond_deng@163.com。

(责任编辑 李泽荣)