

质子交换膜电解槽内部短路故障 特性分析及保护策略

李斌¹, 范辉¹, 何佳伟¹, 李晔², 吴张曦¹, 王海洋²

(1. 智能配用电装备与系统全国重点实验室(天津大学), 天津市 南开区 300072;

2. 智能配用电装备与系统全国重点实验室(河北工业大学), 天津市 北辰区 300401)

Analysis of Internal Short-circuit Characteristics and Protection Strategies for PEM Electrolyzers

LI Bin¹, FAN Hui¹, HE Jiawei¹, LI Ye², WU Zhangxi¹, WANG Haiyang²

(1. State Key Laboratory of Intelligent Power Distribution Equipment and System (Tianjin University),
Nankai District, Tianjin 300072, China;

2. State Key Laboratory of Intelligent Power Distribution Equipment and System (Hebei University of Technology),
Beichen District, Tianjin 300401, China)

ABSTRACT: Internal short-circuit faults in proton exchange membrane (PEM) electrolyzers develop rapidly and pose severe hazards. Rapid and reliable fault identification is crucial for enhancing hydrogen production system safety. Therefore, this paper investigates the characteristics and protection methods for internal short-circuit faults in PEM electrolyzers. Firstly, based on the fundamental principles of electrolytic hydrogen production and polarization characteristics, an equivalent circuit model for the PEM electrolyzer, which accounts for the electric double-layer capacitance effect, is established. Building upon this, combined with DC-DC converter control strategies, a precise calculation method for the transient and steady-state characteristics of electrolyzer internal short-circuit faults is proposed. Based on fault characteristics, protection criteria utilizing steady-state current variation and the sign feature of power variation are proposed, with their operating boundaries analyzed. Finally, extensive simulations demonstrate that the proposed fault analysis method achieves an average relative error below 5% for transient current and below 1% for steady-state current. The proposed protection strategy accurately identifies internal short-circuit faults in PEM electrolyzers.

KEY WORDS: hydrogen production from renewable sources; PEM electrolyzer; short-circuit characteristic; protection strategy

摘要: 质子交换膜(proton exchange membrane, PEM)电解槽内部短路故障发展速度快且危害严重,快速可靠辨识故障对于提升制氢系统安全性具有重要意义。为此,该文开展了PEM电解槽内部短路故障特性与保护方法研究。首先,基于电解制氢的基本原理与极化特性,构建了计及双电层电容效应的PEM电解槽等效电路模型。在此基础上,结合DC-DC变换器控制策略,提出了电解槽内部短路故障暂稳态特性精确计算方法。基于故障特性,提出了基于稳态电流变化量及功率变化量符号特征的保护判据,并分析了其动作边界。最后,大量仿真算例表明:该文所提故障特性分析方法计算的暂态电流平均相对误差小于5%,稳态电流相对误差小于1%,误差较小,所提保护策略能够正确辨识PEM电解槽的内部短路故障。

关键词: 可再生能源制氢; 质子交换膜电解槽; 短路特性; 保护策略

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0818

0 引言

氢能具有绿色环保、易于长期存储、高能量密度等优势,是驱动能源绿色转型的重要载体。目前,氢气的制备方法主要包括化石能源重整制氢、工业副产物制氢与电解水制氢等^[1]。其中,化石能源重整制氢成本低、来源广泛、适合大规模制氢,但会造成严重的环境污染。工业副产物制氢成本低廉,不会产生额外碳排放,但所制取的氢气纯度较低。电解水制氢,特别是可再生能源电解水制氢,不仅绿色环保、制取氢气纯度高,而且可以很好地消纳可再生能源发出的电能,以解决弃风、弃光的问题。

基金项目: 国家自然科学基金“双碳”专项项目(52241702); 国家自然科学基金青年科学基金项目(52207088)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52241702); the National Natural Science Foundation of China (52207088).

题^[2]。因此,世界各国政府相继出台政策和激励措施,促进可再生能源制氢的发展,我国政府对可再生能源制氢也尤为重视^[3]。

碱性电解水制氢(alkaline, ALK)、质子交换膜电解水制氢(proton exchange membrane, PEM)与固体氧化物电解水制氢(solid oxide electrolysis cell, SOEC)为典型的电解水制氢装备。ALK 电解槽成本较低且更为成熟,但动态响应速度较慢,对新能源波动性适应性差,当输入电流不稳定时,易出现安全问题^[4]。而 PEM 电解槽响应速度快、负荷调节范围宽,更能适应可再生能源的波动性与间歇性^[5]。SOEC 电解水技术尚在实验室阶段,尚无大规模商用记录。因此,利用 PEM 电解水技术消纳可再生能源具有非常广阔的研究前景。

快速可靠辨识 PEM 制氢系统故障是提升制氢安全性和经济性的重要保障。膜电极是 PEM 电解槽/燃料电池最薄弱的部件,其大部分损耗和故障都是由于膜的性能退化而导致的。为了分析膜故障机理,文献[6]分析了 PEM 电解槽电堆的老化机理,且在实验过程中出现了由膜穿孔而导致的电堆短路故障,实验结果表明该情况下电压会快速降低到阈值以下,且氧气中氢气的含量逐渐上升。文献[7]通过对 PEM 电解槽施加恒流脉冲进行了膜的加速降解实验,测试结果发现在膜的退化过程中电解小室的电压逐渐上升,5500h 后发生膜穿孔,并导致短路故障。上述研究表明电解槽中膜的退化或者水热管理系统出现故障时,均会产生由膜干引发的内部短路故障,给设备带来不可逆损坏的同时,影响离网系统的安全可靠运行。

与电解槽相比,燃料电池的故障辨识研究较多且较为成熟,能够为电解槽的故障辨识方法研究提供参考与借鉴。文献[8]基于 PEM 燃料电池分段解析模型揭示了水管理故障的形成机理,指出利用进出口气体压力差及电堆输出电压参数能够有效反映设备故障。文献[9]研究了辅机故障与电堆故障之间的联系,利用解析模型和实际测量值产生的残差辨识膜干等故障。上述故障辨识均是利用能够表征内部反应机理的数学解析模型实现的,有助于揭示电堆内部的故障机理。然而,解析模型较为复杂。为此,文献[10-11]利用经验公式和映射关系替代解析模型的复杂数学关系式,并据此提出了设备故障辨识方法。文献[10]通过原位气体分布表征,揭示燃料电池堆水故障与气体分布不均的关联,能预操作识别高风险单体电池,但相邻单体电池间相互作用增加了诊断难度,实时诊断仍有滞后。文献[11]

构建了 PEM 燃料电池等效电路模型,通过辨识特定电阻电容等电气量的变化识别燃料电池正常、膜干燥、水淹和氧气饥饿等状态。上述研究主要聚焦于以健康监测与管理为目标的燃料电池故障诊断方法,尚缺乏适用于电堆内部短路故障辨识的快速保护方法。

本文首先基于 PEM 电解槽的电压模型与双电层电容效应,建立电解槽的等效电路模型。在此基础上,结合控制策略,分析 PEM 电解槽内部短路故障电流暂稳态特性。此外,基于故障电流稳态变化量与功率变化量符号特征,提出电解槽内部短路故障快速保护方法,且对所提保护方法的适应边界进行评估。最后,通过大量的仿真算例验证了所提保护判据在可再生能源离网制氢系统中的可行性。

1 PEM 电解槽基本原理与极化特性

1.1 PEM 电解槽工作原理

PEM 电解槽由单体小室串联而成,小室基本结构如图 1 所示,由阴极(cathode)、阳极(anode)、气体扩散层(gas diffusion layer, GDL)、催化层(catalyst layer, CL)、PEM 等部分组成。PEM 膜与催化层共同构成了膜组件(membrane electrode assembly, MEA)^[12]。

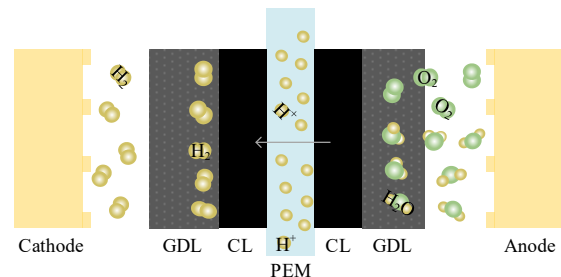
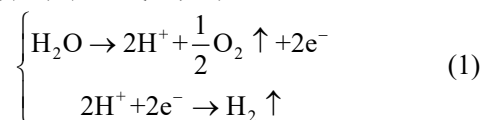


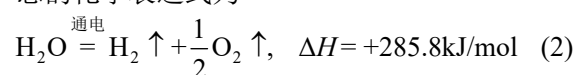
图 1 PEM 电解小室基本结构

Fig. 1 Structure of PEM electrolyzer cell

在单体小室中,催化层是反应发生的场所,阳极流道内的水在催化剂的作用下被分解为氧气与氢离子。质子交换膜允许氢离子通过,而氧气则通过阳极侧气体扩散层后经流道流出电解槽。氢离子在通过质子交换膜后在阴极侧催化层与外部电路的电子发生析氢反应,产生的氢气则通过阴极侧气体扩散层后离开电解槽。阳极侧析氧反应与阴极侧析氢反应的化学表达式^[12]如下:



总的化学表达式为



式中: ΔH 为标准状态下(压力为 101kPa, 温度为 298K)反应发生的过程焓变。

1.2 考虑极化特性的 PEM 电解槽电压模型

PEM 电解槽的电压受极化特性影响, 一般由开路电压、活化过电压、扩散过电压和欧姆过电压构成, 如式(3)所示^[13-15]。

$$U_{\text{cell}} = U_{\text{oc}} + U_{\text{act}} + U_{\text{diff}} + U_{\text{ohm}} \quad (3)$$

式中: U_{oc} 为开路电压; U_{act} 为活化过电压; U_{diff} 为扩散过电压; U_{ohm} 为欧姆过电压。其中扩散过电压幅值较小, 为研究简便可忽略。下文将分别介绍各电压的物理意义与计算方法。

1) 开路电压 U_{oc} 。

开路电压是 PEM 电解水的最小理论电压。在 PEM 电解小室中, 开路电压由能斯特方程计算得出:

$$U_{\text{oc}} = U_0 + \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{P_{\text{H}_2} \sqrt{P_{\text{O}_2}}}{\alpha_{\text{H}_2\text{O}}}\right) \quad (4)$$

式中: R 为理想气体常数; T 为反应温度; F 为法拉第常数; P_{H_2} 为阴极氢气分压; P_{O_2} 为阳极氧气分压; $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水活度; U_0 标准压力下的可逆电压, 其表达式如式(5)所示。

$$U_0 = 1.229 - 0.9 \times 10^{-3}(T - 298) \quad (5)$$

2) 活化过电压 U_{act} 。

活化过电压是电化学反应中阴极和阳极之间电荷转移产生的能量损失, 主要受操作温度、催化剂性能、活性反应部位和电极形态的影响。通常用电化学反应动力方程(butlere-volmer)近似描述活化过电压, 如式(6)所示。

$$\begin{cases} U_{\text{act}} = U_{\text{act.a}} + U_{\text{act.c}} \\ U_{\text{act.a}} = \frac{RT}{\alpha_a F} \ln\left[\frac{j}{2j_{\text{o.a}}} + \sqrt{1 + \left(\frac{j}{2j_{\text{o.a}}}\right)^2}\right] \\ U_{\text{act.c}} = \frac{RT}{\alpha_c F} \ln\left[\frac{j}{2j_{\text{o.c}}} + \sqrt{1 + \left(\frac{j}{2j_{\text{o.c}}}\right)^2}\right] \end{cases} \quad (6)$$

式中: $U_{\text{act.a}}$ 和 $U_{\text{act.c}}$ 分别为阳极和阴极电压; α_a 和 α_c 为阳极和阴极的电荷转移系数; j 是电极上的电流密度, 其大小取决于通过小室的电流和反应面积的大小; $j_{\text{o.a}}$ 和 $j_{\text{o.c}}$ 是阳极和阴极电极上的交换电流密度。

3) 欧姆过电压 U_{ohm} 。

欧姆过电压与电解小室各组成部分的材料性质有关。阴极板与阳极板自身的电阻、阴极板与阳极板之间的电阻、膜电阻和各部分的接触电阻是影响欧姆过电压的重要因素。各组成部分自身及之间的电阻与膜电阻相比较小, 在很多研究中常常只考

虑膜电阻对电解槽运行电压的影响, 因此欧姆过电压的具体表达式如式(7)所示。

$$U_{\text{ohm}} = j \frac{\delta_{\text{ohm}}}{\sigma_{\text{ohm}}} \quad (7)$$

式中: δ_{ohm} 为膜厚度; σ_{ohm} 是膜的电导率, 其值取决于膜自身的材料性质与运行时的温度, 可以根据经验公式得出:

$$\sigma_{\text{ohm}} = (0.005139\lambda - 0.00326) \exp\left[1268\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (8)$$

式中: λ 为膜含水量, 目前在部分研究中 λ 取值范围为 14~25。

2 PEM 电解槽短路故障特性分析

PEM 电解槽在运行时需要合理的水管理和热管理, 以保证 PEM 膜充分湿润, 促进质子传输并起到一定的散热作用, 从而降低电堆的寄生功耗。然而, 当水管理和热管理系统失衡时, 可能导致 PEM 膜含水量降低, 发生膜干现象, 严重时则会导致膜穿孔而造成内部短路故障, 威胁系统运行安全^[5]。为此, 本文首先分析了 PEM 电解槽内部短路故障时的故障特性, 考虑到与水管理和热管理系统响应时间相比, PEM 电解槽响应速度快, 故障后在短时间(秒级甚至毫秒级)达到稳态^[16-17], 因此分析时假设:

1) 正常运行时, 各小室电压一致。出于简化模型以便分析的目的, 目前大部分研究都做此假设。在电解槽实际运行的过程中各小室电压存在差异, 若各小室的工作状态相近, 此差异可以忽略不计^[18]。因此, 虽然假设各小室电压一致可能使得结果有一定误差, 但由于小室电压间差异较小, 该误差也可忽略不计。

2) 故障期间, PEM 电解槽运行温度、阴阳极压强、流速、膜湿度等保持不变。由于发生内部故障后在短时间(秒级甚至毫秒级)达到稳态, 此时由于温度是热量对时间的积分, 因此温度不会发生太大的变化^[19]。而阴阳极压强和流速(空气与水)在运行时与化学反应消耗的原料及生成的产物有关, 短时间内的化学反应也不会对压强与流速造成太大影响。膜湿度与水传输过程中的电渗拖曳、扩散和液压效应有关, 而内部短路故障主要影响电渗拖曳的速率, 但湿度变化也是 3 种效应对时间的积分, 同样不会发生明显变化^[20]。

3) 可再生能源发出的功率保持不变。

2.1 PEM 电解槽双电层电容效应

当运行工况发生变化时, 电解槽的动态响应过程主要包括双层电容充电效应、气体扩散反应、反

应物传质、温度变化、水合响应等过程，时间尺度从毫秒级增长至分钟级以上。电解槽内部短路故障时的动态响应特性主要考虑毫秒级时间尺度，因此分析故障特性时，电解槽等值主要以毫秒级时间尺度的双层电容效应为依据。电解槽的双层电容效应主要是指在外部电压的作用下，电荷聚集在电极表面，从而与电解质界面处形成双电层^[21-22]。此外，质子在膜中的迁移和在电极表面的吸附/脱附过程，进一步增强了双电层的形成。

考虑双电层效应的电解小室等效电路如图2所示^[23-24]。图2中： R_{ohm} 为欧姆电阻，其值为欧姆电压(U_{ohm})与电解槽电流(I_{EL})之比，即 U_{ohm}/I_{EL} ； $R_{act.a}$ 与 $R_{act.c}$ 为阳极与阴极活化过电压对应的电阻，其值大小分别为 $U_{act.a}/I_{EL}$ 与 $U_{act.c}/I_{EL}$ ；双层电容值 C_{dl} 由实验测得^[25]。

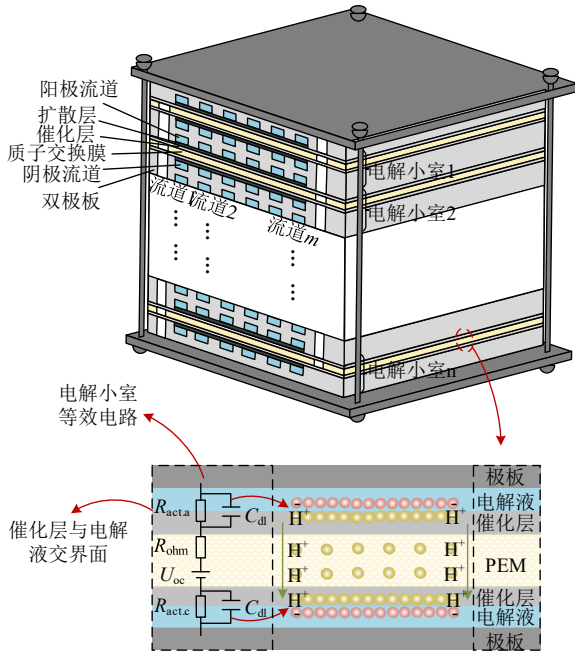


图2 PEM电解槽结构及等效电路模型

Fig. 2 Structure of PEM electrolyzer and equivalent circuit model

双电层电容效应会阻碍化学反应过程中的电荷转移，导致活化过电压不能瞬时变化至稳态值。与阴极相比，阳极的动力学性能较差，阴极的反应速度快，响应时间短，在建模时阴极的双电层分支可以忽略不计。因此，在部分文献中提出如图3最右侧所示的电解小室等效电路模型^[26-28]。

2.2 PEM电解槽内部短路故障暂稳态特性分析

当 n 个电解小室串联的电解槽发生短路故障时，对应的电解槽等值电路如图3所示，其中 R_0 为恒定电阻，用以模拟槽与 buck 电路间的线路及接触电阻；P 为保护所在位置，以保护 P 为界限， f_1

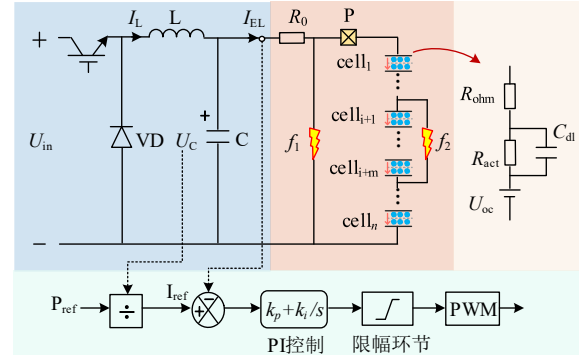


图3 PEM电解槽等效电路模型及控制策略

Fig. 3 Equivalent circuit model and control strategy of PEM electrolyzer

为电解槽的外部连接线发生短路故障； f_2 为电解小室内发生短路故障，其中电解小室短路数目为 m 。根据图3所示的等效电路与控制方式^[29]，可得到求解电解槽短路故障暂态电流的状态方程如式(9)所示，利用数值解法即可求解得到电解槽内部短路时的暂稳态电压与电流值。

$$\begin{cases} \frac{dI_L}{dt} = \frac{DU_{in} - U_C}{L} \\ \frac{dU_C}{dt} = \frac{I_L - I_{EL}}{C} \\ \frac{dD}{dt} = k_p \left(\frac{-P_{ref}}{U_C^2} \frac{dU_C}{dt} - \frac{dI_{EL}}{dt} \right) + k_i \left(\frac{P_{ref}}{U_C} - I_{EL} \right) \\ \frac{dI_{EL}}{dt} = \frac{I_L - I_{EL}}{R_0 C} - \frac{n-m}{R_0} \left(\frac{dU_{oc}}{dt} + \frac{dU_{ohm}}{dt} + \frac{dU_{act}}{dt} \right) \\ \frac{dU_{act}}{dt} = \frac{I_{Cdl}}{C_{dl}} \end{cases} \quad (9)$$

式中： I_L 为 buck 电路电感电流； D 为 PWM 控制信号占空比； U_{in} 为母线电压； U_C 为 buck 电路电容电压； P_{ref} 为功率参考值； k_p 、 k_i 为 PI 控制系数； n 为电解槽串联小室数目； m 为短路小室数目； I_{Cdl} 为通过双电层电容的电流； C_{dl} 为电解小室等效电容值。

四阶龙格库塔常用于解决光滑、非刚性微分方程组，其精度、稳定范围较低阶数值解法更好，计算量较高阶数值解法小，在精度和计算量之间达到了一个非常优秀的平衡点^[30]。因此，本文选取四阶龙格库塔法以求得电解槽内部短路故障后的电解槽暂态电流，其数学格式如式(10)所示。

$$\begin{cases} y_{i+1} = y_i + h(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4)/6 \\ K_1 = f(t_i, y_i) \\ K_2 = f(t_i + h/2, y_i + hK_1/2) \\ K_3 = f(t_i + h/2, y_i + hK_2/2) \\ K_4 = f(t_i + h, y_i + hK_3) \end{cases} \quad (10)$$

式中： t_i 为当前时刻； y_i 为因变量在当前时刻的近

似值; t_{i+1} 为下一时刻; y_{i+1} 为因变量在下一时刻的近似值; h 为计算步长; K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 为各点斜率估计值。

为求解式(9)所示状态方程, 必须先求得故障瞬间电解槽电流 $I_{EL}(0_+)$ 。短路瞬间, 由于 buck 电路端口电容电压 U_C 不能突变, 而小室串联数目变为 $n-m$, 则电解槽电流瞬间增大。根据电容两端电压不能突变的特性, 可以求得短路瞬间电解槽电流为 $I_{ELs}(0_+)$, 如式(11)所示。

$$I_{ELs}(0_+) = \frac{I_{ELs}(0_-)R_0 + nU_{cells}(0_-) - (n-m)U_{cells}(0_+)}{R_0} \quad (11)$$

式中: $I_{ELs}(0_+)$ 与 $I_{ELs}(0_-)$ 分别为故障前后电解槽电流; $U_{cells}(0_+)$ 与 $U_{cells}(0_-)$ 分别为故障前后电解小室电压; n 为电解槽串联小室数目; m 为短路小室数目; R_0 为槽与 buck 电路间的线路及接触电阻。

电解槽内部发生短路故障后, 由于恒功率的控制策略, 电解槽电流经历暂态的波动, 将会进入稳态。根据图 3 所示的电解槽内部短路故障等值电路以及电解槽的恒功率控制策略, 可以推导得到电解槽在故障后稳态运行阶段的电流, 如式(12)所示。

$$I_{EL} = \frac{-(n-m) + \sqrt{(n-m)^2 + 4R_0P_{ref}}}{2R_0} \quad (12)$$

由式(12)可知, 由于小室稳态电压 U_{cell} 随稳态电流 I_{EL} 单调增加, 功率参考值不变, 小室串联数目 $n-m$ 较故障前减小, 则故障后稳态电流 I_{EL} 增大。

综合式(11)与式(12), 可以推得电解槽内部短路故障后电解槽电流随时间变化的趋势。短路故障瞬间, 电解槽电流瞬时增大, 随后降至较正常运行时更高的值, 进入稳态。

3 电解槽内部短路故障辨识判据及适应边界评估

由于膜穿孔造成的短路故障可能会在几秒内摧毁电堆, 对系统安全性危害较大, 因此需要配置快速、可靠的保护判据, 以识别电解槽的短路故障。通过前文分析可知, 电解槽内部短路故障时的短路电流稳态值会比正常运行时更大。因此, 本文利用电解槽内部故障的短路电流特征, 提出电解槽内部短路故障保护判据并对其动作边界进行分析。

3.1 电解槽内部短路故障辨识判据

对于电解槽内部短路故障, 由于故障前后的稳态电流发生改变, 可利用短路前后稳态电流的变化量 ΔI_{EL} 作为辨识内部短路故障的依据。然而, 考虑到供电系统中的新能源功率增大时, 将导致电解槽

的电流也有所增大, 若仅利用电流变化量辨识内部短路故障时, 无法可靠区分电解槽内部短路故障和外部新能源功率增大的情况。根据图 3 所示的控制方式可知, 由于功率参考值不变, 而故障后稳态电流 I_{EL} 增大, 将导致稳态电容电压 U_C 下降。而对于新能源功率增大的情况, 此时电解槽稳态电流也会增大, 但是由于 U_{cell} 随 I_{EL} 单调变化, 此时串联小室数目没有变化, 因此 U_C 随 I_{EL} 增大而增大。综上, 可利用故障后的电解槽电流变化量 ΔI_{EL} 与电压变化量 ΔU_C 的乘积符号, 即功率变化量符号特征判断是否为功率波动, 若该值大于 0, 则是功率变化引起的电解槽稳态电流增大, 否则为电解槽发生内部短路故障。因此, 本文提出了如式(13)所示的电解槽内部短路辨识判据。

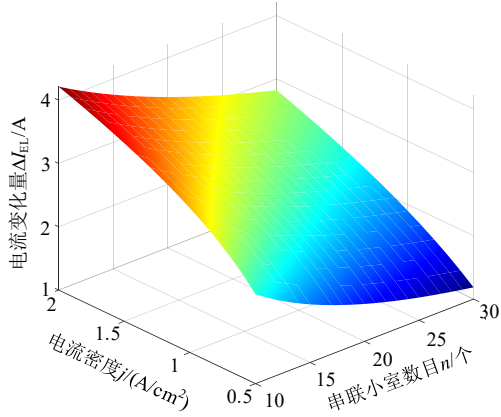
$$\begin{cases} \Delta I_{EL} > \Delta I_{set} \\ \Delta U_C \Delta I_{EL} < 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: ΔI_{EL} 为电解槽故障电流变化量; ΔU_C 为端口电容电压变化量; ΔI_{set} 为电流整定值。当电解槽电流变化量 ΔI_{EL} 大于整定值 ΔI_{set} , 且与端口电压变化量的乘积小于 0 时, 判定电解槽发生内部短路故障。

需要说明的是, 为防止正常运行时保护误动, 电流变化量判据定值整定时必须躲过正常运行时电解槽电流波动的最大值。通过分析可知, 电解槽正常运行时电流幅值的变化量受电解槽的电流密度与膜面积影响, 因此定值整定时需要考虑电解槽膜面积和正常运行时的电流密度范围。然而, 在低电流密度下, PEM 电解槽的性能与效率有所下降, 且氧中氢含量可能会升高, 发生爆炸的风险大大提高。当电流密度较高时, 可能会导致电解槽温度升高, 质子交换膜变薄, 影响电解槽的寿命, 不利于电解槽长期运行。因此, 本文分析时取电解槽正常工作电流密度 $0.5 \sim 2 \text{ A/cm}^2$ ^[31]。以膜面积为 100 cm^2 的电解槽为例, 按照 0.5% 的电流纹波计算, 电解槽运行在 2 A/cm^2 时, 电流波动值最大, 记整定值为 ΔI_{set} , 则电流变化量判据的整定值应为 $\Delta I_{set} = k_{rel} \times 2 \times 100 \times 0.5\%$, 其中 k_{rel} 为可靠系数。

3.2 电解槽短路故障保护判据的动作边界分析

根据本文提出的保护判据可知, 判定电解槽内部发生短路故障, 需满足电流变化量 ΔI_{EL} 大于电流整定值 ΔI_{set} , 其中电流整定时需要躲开正常运行时的电流波动。然而, 电流变化量的大小取决于短路小室数目与电流密度, 如图 4 所示, 其中设膜面积为 100 cm^2 , 短路小室数为 1。

图4 $m=1$ 时, ΔI_{EL} 随电流密度与串联小室数目的变化Fig. 4 When $m=1$, the variation of ΔI_{EL} with current density and number of series-connected cells

根据图4可知, ΔI_{EL} 随电流密度减小而减小, 随串联小室数目减小而增大。因此, 当电解槽在低电流密度发生故障且电解槽故障小室数目占比较小时, 故障电流变化量可能会小于电流变化量判据定值, 而使得保护无法灵敏辨识故障。因此, 本文进一步分析了所提保护判据的动作边界。

由本文第2.2节的分析可知, 对于由 n 个电解小室串联构成的电解槽, 当内部发生短路故障时, 短路的小室数目越少, 故障导致的电流变化量越小, 当电流变化量小于电流整定值时, 保护不能正确动作。因此, 可据此计算出在不同的串联小室数目 n 与膜面积 S 情况下, 保护判据能够正确动作的短路小室数目临界值。若短路小室数目大于等于该临界值, 则在任何电流密度下发生内部短路故障, 保护均能正确动作, 如式(14)所示。

$$m_{lim} = \left\lceil n - \frac{I_{EL}^2 R_0 + n I_{EL} U_{cell} - (I_{EL} + \Delta I_{set})^2 R_0}{(I_{EL} + \Delta I_{set}) U_{cells}} \right\rceil \quad (14)$$

式中: m_{lim} 为使得保护正确动作的临界短路小室数目; I_{EL} 、 U_{cell} 为电流密度为 0.5 A/cm^2 运行时电解小室的稳态电流、电压; U_{cells} 为故障后电解小室的稳态电压; ΔI_{set} 的可靠系数取 1.05。

根据式(14), 可以得到保护判据的适应边界如图5所示。可见膜面积相同时, 电解槽串联小室数目越少, 保护正确动作对应的短路小室数最小值越小, 保护动作可行域越大, 灵敏性越高; 串联小室数目相同时, 膜面积越小, 电流整定值 ΔI_{set} 减小, 保护正确动作对应的短路小室数最小值也越小, 保护动作可行域越大, 灵敏性越高。由上述分析可知, 串联小室数和膜面积影响了电解槽保护判据的动作边界, 串联小室数越少、膜面积越小, 使得保护可靠动作的最小短路小室数目越少, 即保护动作可行域越大, 灵敏性越高。尽管本文所提保护策略不

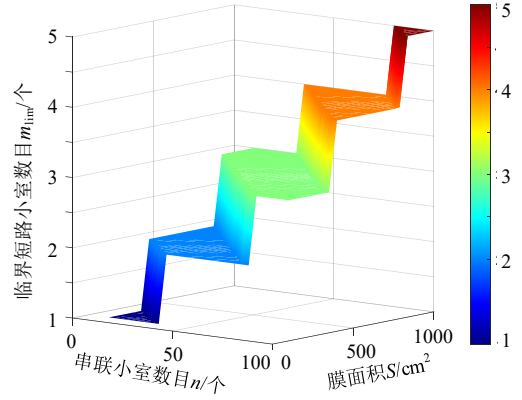


图5 保护判据动作边界

Fig. 5 Operation boundary of protection criterion

适用于电流密度较低的情况下发生短路小室数目较少的内部短路故障的情况, 但内部短路故障在高电流密度下更有可能发生, 且短路小室数目越多故障越严重。因此, 虽然本文所提保护策略在串联小室数目较多与膜面积较大的情况下, 不能正确动作于所有内部短路故障, 但快速切除了严重故障, 对保障电解槽安全稳定运行具有一定意义。

4 仿真实验

为了验证电解槽内部短路故障暂稳态特性与保护判据的动作边界, 本文基于电磁暂态仿真软件构建了电解槽的仿真模型, 系统参数如附录表 A1 所示。为验证电解槽内部短路故障特性和保护动作性能, 本文设置电解槽的串联小室数目为 40 个, 膜面积为 100 cm^2 。

4.1 故障暂稳态特性分析精确性验证

基于所构建的电解槽模型, 本文首先验证了电解槽内部短路故障特性分析的可行性和精确性。如图6所示为电解槽发生内部短路故障的故障特性仿真和计算结果。其中, 图6为电流密度在 0.5 A/cm^2 和 1 A/cm^2 时, 短路小室数目分别为 $m=1$ 与 $m=3$ 的电解槽电流值, 其中仿真值如蓝线所示, 理论计算值如红线所示。

由图6可知, 电解槽发生内部故障时, 电解槽电流将瞬间增大, 然后振荡衰减至稳态值, 整个暂态过程持续约 15ms。本文以式(15)所示的平均相对误差 (M_{RE}) 评估所提故障暂态特性分析方法的精确性。

$$M_{RE} = \frac{1}{l} \sum_i \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \quad (15)$$

式中: y_i 为仿真值; $\hat{y}_i$ 为理论值; l 为故障后 15ms 内所包含的数据点。根据式(14)和图6所示的仿真结果可知, 当一个小室发生短路时, 若正常运行电流密度为 0.5 A/cm^2 , 短路电流计算方法 MRE 为

1.27%; 若正常运行电流密度为 $1\text{A}/\text{cm}^2$, 短路电流计算方法 M_{RE} 为 0.80%。

经历过暂态波动后, 电解槽电流会稳定至较高值。如图 6 所示, 短路小室数为 1, 正常运行电流密度分别为 $0.5\text{A}/\text{cm}^2$ 与 $1\text{A}/\text{cm}^2$ 时, 仿真得到的故障后电解槽电流稳态值为 50.67A 与 101.59A, 与理论计算值(50.55A 和 101.64A)相比, 相对误差分别为 0.24%和 0.04%。

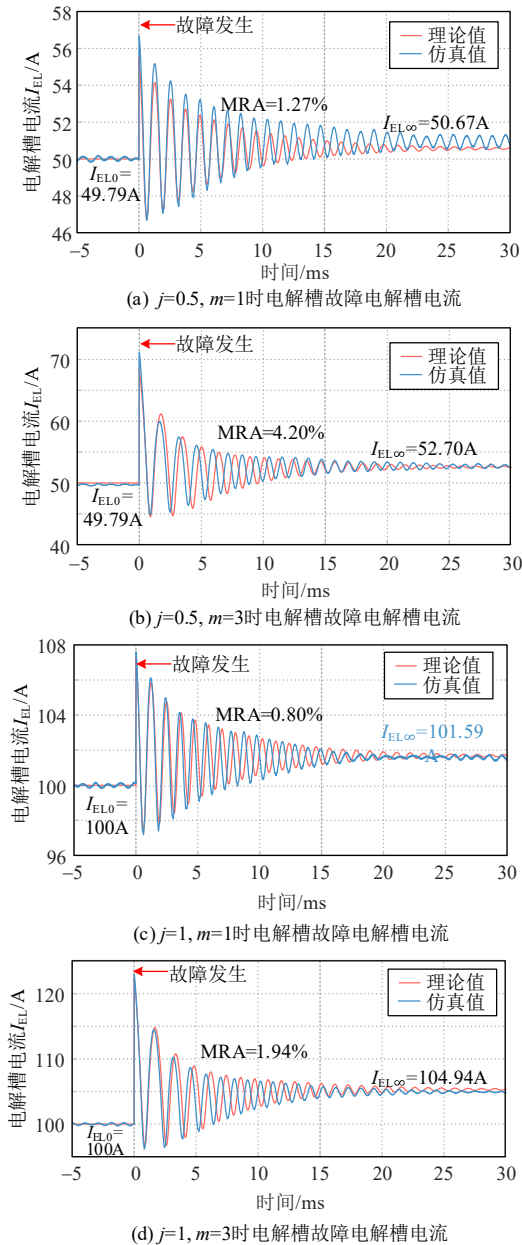


图 6 电解槽内部短路故障电流特性

Fig. 6 Current characteristics of internal short circuit fault in electrolyzer

为了更好验证本文所提短路电流计算方法的可行性, 本文验证了不同运行情况、不同数量短路小室故障时的故障电流误差, 如附录表 A2 所示。可见, 本文所提短路电流计算方法 M_{RE} 小于 5%, 稳态电流计算相对误差均小于 1%。

4.2 故障稳态电流变化量影响因素

根据 3.2 节中电解槽内部短路故障特性分析可知, 电流密度越大、短路小室数目越多, 故障稳态电流变化量越大。为验证这一特性, 本文分别给出了正常运行电流密度一定时故障稳态电流变化量随短路小室数目变化的仿真结果, 以及短路小室数目一定时电流变化量随正常运行时电流密度变化的仿真结果, 如图 7 与图 8 所示。

如图 7(a)所示, 当电解槽正常运行时的电流密度为 $0.5\text{A}/\text{cm}^2$, 短路小室数目分别为 1、3、5 时, 对应的故障稳态电流变化量分别为 0.88、2.91、5.11A。此外, 当电流密度为 $1\text{A}/\text{cm}^2$, 短路小室数目由 1 增大为 5 时, 电流变化量从 1.59A 增大到 8.44A; 当电流密度为 $2\text{A}/\text{cm}^2$, 短路小室数目由 1 增大为 5 时, 电流变化量从 2.51A 增大到 12.81A。可见, 在正常运行电流密度一定时, 故障稳态电流变化量随着短路小室数目的增大而增大。

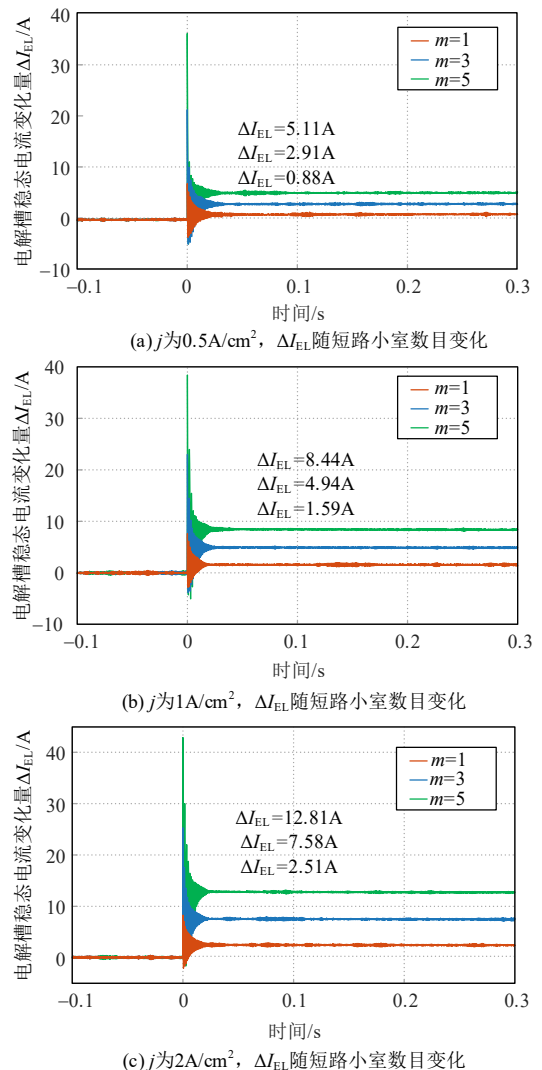


图 7 电流变化量 ΔI_{EL} 随短路小室数目变化
Fig. 7 Variation of ΔI_{EL} with the number of short-circuited cells

如图 8(a)所示,当短路小室数目为 3,电解槽正常运行时的电流密度分别为 0.5、0.8、1.2、1.6、2 A/cm² 时,对应的故障稳态电流变化量分别为 2.91、4.15、5.59、6.66、7.58A。此外,当短路小室数目为 4,电解槽正常运行时的电流密度由 0.5A/cm² 增大为 2A/cm² 时,电流变化量从 3.98A 增大到 10.18A;当短路小室数目为 5,电解槽正常运行时的电流密度由 0.5A/cm² 增大为 2A/cm² 时,电流变化量从 5.11A 增大到 12.81A。可见,在短路小室数目一定时,故障稳态电流变化量随着电解槽正常运行时的电流密度增大而增大。

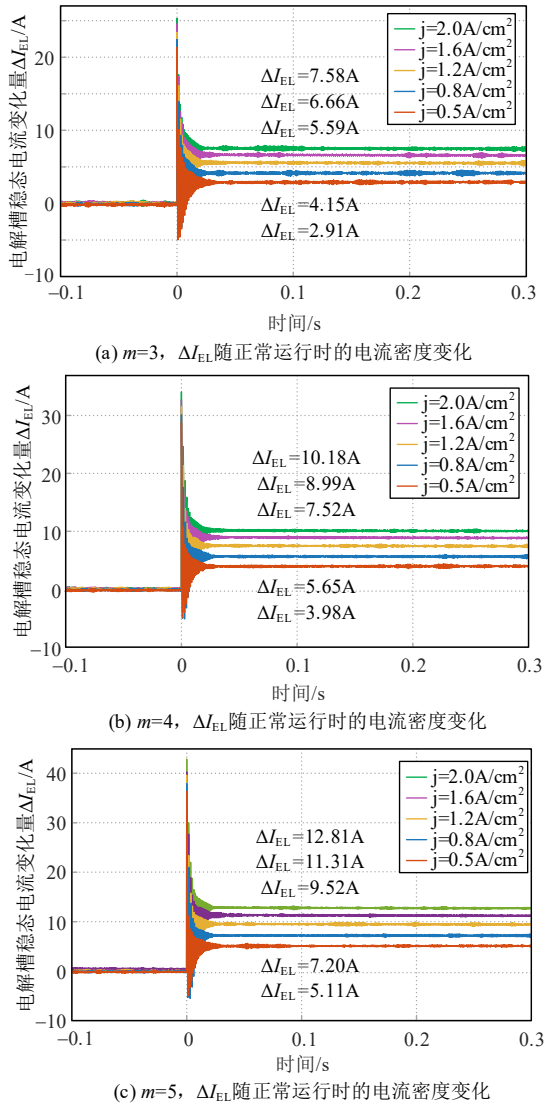


图 8 电流变化量 ΔI_{EL} 随正常运行时的电流密度变化
Fig. 8 Variation of ΔI_{EL} with current density during normal operation

4.3 保护方法可行性与适应边界验证

为证明所提保护方法的可行性,本文验证了不同电流密度下,不同数目短路小室故障时的保护动作性能。需要说明的是,根据本文所提整定原则,对于膜面积为 100cm² 的电解槽,若可靠系数取

1.05,则电流变化量判据整定值 ΔI_{set} 为 1.05A。以电流密度为 1.2A/cm² 为例,保护动作情况如图 9 所示。其中,逻辑值 DR1 为电流变化量判据的判别结果,当电流变化量 ΔI_{EL} 大于 ΔI_{set} ,DR1 为 1;DR2 为功率变化量符号特征判据的辨识结果,当 $\Delta I_{EL} \Delta U_C$ 小于 0,DR2 为 1,仅当 DR1&DR2=1 时,为电解槽内部短路故障。

由图 9(a)可知,当电流密度为 1.2A/cm² 时,内部短路故障中 1 个小室短路的电流变化量为 1.84A,大于整定值。正常运行电流密度一定时,短路小室数越多,故障稳态电流变化量越大。因此,该电流密度下,故障稳态电流变化量均大于保护动作整定值,DR1=1。

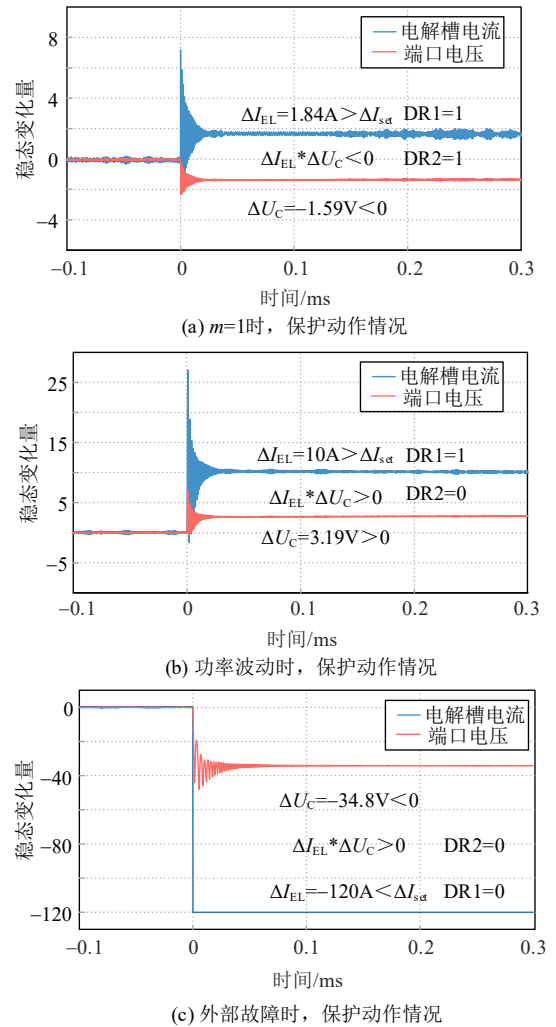


图 9 电流密度为 1.2A/cm² 时,保护动作情况
Fig. 9 Performances of the proposed protection criterion when current density is 1.2A/cm²

需要说明的是,当发生功率波动时,也会出现电流变化量大于保护判据定值的情况。如图 9(b)所示,当输入功率增大,使得电流变化量增大为 10A,大于电流变化量判据的整定值,此时 DR1=1。为防止保护误动,需要配合功率变化量符号特征排除功

率波动影响。根据仿真结果可知,当输入功率增加时,电压变化量和电流变化量均大于0,判据 $\Delta U_C \Delta I_{EL} > 0$,功率变化量符号特征判据的辨识结果DR2为0,因此DR1&DR2=0,保护不会误动。而对于内部短路故障,如图9(a)所示,电流变化量 ΔI_{EL} 为1.84A大于0,故障电压变化量 ΔU_C 为-1.59V,小于0,因此判据 $\Delta U_C \Delta I_{EL} < 0$,DR2=0,此时保护判据能够可靠准确动作。

此外,当电解槽发生如图3中所示的外部故障(f_1)时,仿真结果如图9(c)所示,此时电流变化量为-120A,电压变化量为-34.8V,二者同号,即 $\Delta U_C \Delta I_{EL} > 0$,且电流变化量小于整定值,因此保护能够可靠不动作。

然而,当正常运行电流密度较低时,电解槽发生短路的电解小室数目较少时,电流变化量较小,此时可能会导致保护灵敏度不足,无法准确动作。根据本文提出的保护适应边界计算方法可知,对于串联小室数目 n 为40,膜面积 S 为100cm²的情况,电解槽在0.5A/cm²的运行状态下只有一个小室发生短路故障时,仿真结果如图10(a)所示,此时故障电流变化量为0.88A,小于整定值,保护无法灵敏动作。而当短路小室数大于1时,如图10(b)所示,当短路小室数为2时故障稳态变化量为1.88A,大于整定值,此时保护能够可靠动作,与本文3.2节的分析结果一致。

为了更好地验证本文所提保护方法的可行性,本

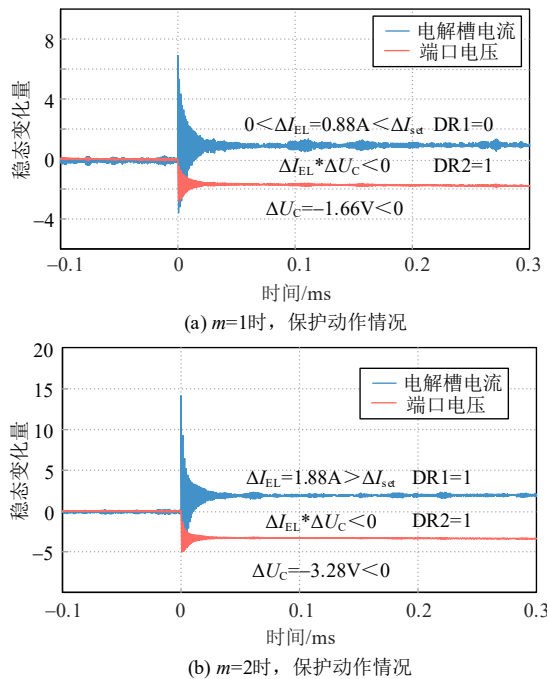


图10 电流密度为0.5A/cm²时,保护动作情况

Fig. 10 Performances of the proposed protection criterion when current density is 0.5A/cm²

文验证了不同运行情况、不同数量短路小室故障时的保护动作性能,如附录表A3所示。可见,依赖电流变化量和功率符号特征判据能够有效辨识电解槽内部短路故障。此外,本文所提方法能够基于电解槽参数定量计算出保护的适应边界,为保护的定值整定提供理论指导。

5 结论

近年来,氢能技术和产业在我国取得了显著进展,PEM电解制氢技术作为氢能发展的重要方向,然而其内部短路故障特性与保护方法的研究十分有限。为此,本文首先揭示了PEM电解槽短路故障电流暂稳态特性:在恒功率控制策略下,基于PEM电解槽等效电路列写状态方程,利用四阶龙格库塔法精确计算了电解槽故障暂态电流,所提计算方法暂态电流平均相对误差小于5%,稳态电流相对误差小于1%;PEM电解槽内部故障短路的稳态电流值较大,且随着短路小室的数目与正常运行时的电流密度增大而增大。

此外,本文提出了基于故障电流变化量及功率变化量符号特征的综合保护判据。所提保护判据能够准确辨识内部短路、外部短路与功率波动的情况。在此基础上,分析了所提保护判据的适应边界,发现串联小室数越少、膜面积越小,使保护可靠动作的最小短路小室数目越少,即保护动作可行域越大,灵敏性越高。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 李志伟, 赵雨泽, 吴培, 等. 基于制氢设备精细建模的综合能源系统绿氢蓝氢协调低碳优化策略[J]. 电网技术, 2024, 48(6): 2317-2326.
LI Zhiwei, ZHAO Yuze, WU Pei, et al. Low-carbon dispatching strategy of integrated energy system with coordination of greenhydrogen and blue hydrogen based on fine modeling of hydrogen production equipment [J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2317-2326(in Chinese).
- [2] 王文烨, 姜飞, 张新鹤, 等. 含规模氢能综合利用的高比例风光多能源系统低碳灵活调度[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 197-206.
WANG Wenye, JIANG Fei, ZHANG Xinhe, et al. Low-carbon and flexible dispatch of high-proportion wind-photovoltaic multi-energy system with comprehensive utilization of large-scale hydrogen energy [J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 197-206(in Chinese).
- [3] 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).

- [4] 郭富民, 徐广强, 王小君, 等. 基于 8760h 生产模拟的离网风光储氢系统规划方法[J]. 电网技术, 2024, 48(5): 2227-2235.
GUO Fumin, XU Guangqiang, WANG Xiaojun, et al. A planning method for stand-alone wind-solar hydrogen storage system based on 8760 hours production simulation[J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 2227-2235(in Chinese).
- [5] 李亚楼, 王丹丹, 赵飞, 等. 电力多元转换(Power-to-X):技术路径、应用与挑战[J]. 电网技术, 2024, 48(5): 1809-1820.
LI Yalou, WANG Dandan, ZHAO Fei, et al. Path, application and challenge of power-to-X[J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 1809-1820(in Chinese).
- [6] MILLET P, RANJBARIA, DE GUGLIELMO F, et al. Cell failure mechanisms in PEM water electrolyzers[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(22): 17478-17487.
- [7] GRIGORIEV S A, DZHUS K A, BESSARABOV D G, et al. Failure of PEM water electrolysis cells: case study involving anode dissolution and membrane thinning[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(35): 20440-20446.
- [8] ESMAILI Q, NIMVARI M E, JOUYBARI N F, et al. Model based water management diagnosis in polymer electrolyte membrane fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(31): 15618-15629.
- [9] POLVERINO P, FRISK E, JUNG D, et al. Model-based diagnosis through structural analysis and causal computation for automotive polymer electrolyte membrane fuel cell systems[J]. Journal of Power Sources, 2017, 357: 26-40.
- [10] REN Peng, FU Xi, PEI Pucheng, et al. Bridging the gap between prediction and real-time diagnosis of water failures in proton exchange membrane fuel cell stacks via gas distribution characterization[J]. Applied Energy, 2025, 389: 125755.
- [11] SHI Yong, HE Wei, XIE Bao, et al. PEMFC fault diagnosis based on an equivalent circuit and OS-ELM framework[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(1): 1277-1287.
- [12] FALCÃO D S, PINTO A M F R. A review on PEM electrolyzer modelling: guidelines for beginners[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 261: 121184.
- [13] 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.
- [14] XU Yanhui, DENG Zilin. Bi-level planning of microgrid considering seasonal hydrogen storage and efficiency degradation of electrolyzer [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2025, 61(1): 1385-1398.
- [15] DANG Jian, YANG Fuyuan, LI Yangyang, et al. Experiments and microsimulation of high-pressure single-cell PEM electrolyzer[J]. Applied Energy, 2022, 321: 119351.
- [16] TÜMER B, YILDIZ D Ş, ARKUN Y. Water and thermal management in PEM fuel cells using feasible humidity plots and model predictive controllers[J]. Computers & Chemical Engineering, 2025, 192: 108905.
- [17] WU Zhangxi, LI Ye, LI Bin, et al. A coordinated configuration scheme for hydrogen-electric energy storage based on transient response characteristics[J]. Renewable Energy, 2025, 241: 122386.
- [18] CHEN Jingxian, WANG Sen, SUN Yongwen, et al. Multi-dimensional performance evaluation and energy analysis of proton exchange membrane water electrolyzer[J]. Applied Energy, 2025, 377: 124457.
- [19] WANG Benfei, XIN Dingnan, FU Qing, et al. A control-oriented comprehensive model of PEM electrolyzer considering double-layer capacitance[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 93: 866-877.
- [20] ASIABAN S, BOZALAKOV D, VANDEVELDE L. Development of a dynamic mathematical model of PEM electrolyser for integration into large-scale power systems[J]. Energy Conversion and Management: X, 2024, 23: 100610.
- [21] GROß A, SAKONG S. Modelling the electric double layer at electrode/electrolyte interfaces[J]. Current Opinion in Electrochemistry, 2019, 14: 1-6.
- [22] SAKONG S, HUANG Jun, EIKERLING M, et al. The structure of the electric double layer: atomistic versus continuum approaches[J]. Current Opinion in Electrochemistry, 2022, 33: 100953.
- [23] HERNÁNDEZ-GÓMEZ Á, RAMÍREZ V, GUILBERT D, et al. Cell voltage static-dynamic modeling of a PEM electrolyzer based on adaptive parameters: development and experimental validation[J]. Renewable Energy, 2021, 163: 1508-1522.
- [24] MAOXinke, 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.
- [25] CHENG Xiang, LIN Jin, ZHANG Mingjun, et al. Power controller design for electrolysis systems with DC/DC interface supporting fast dynamic operation: a model-based and experimental study[J]. Applied Energy, 2025, 378: 124848.
- [26] GUILBERT D, VITALE G. Variable parameters model of a PEM electrolyzer based model reference adaptive system approach[C]/Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe. Madrid: IEEE, 2020.
- [27] 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.
- [28] DOZEIN M G, DE CORATO A M, MANCARELLA P. Virtual inertia response and frequency control ancillary services from hydrogen electrolyzers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(3): 2447-2459.
- [29] HOSSAIN A, ISLAM R, HOSSAIN A, et al. Control strategy review for hydrogen-renewable energy power system[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 72: 108170.
- [30] DUJARDIN G, LACROIX-VIOLET I. Paper A-and I -stability of Runge-Kutta collocation methods[J]. Applied Numerical Mathematics, 2024, 202: 158-172.
- [31] HU Song, GUO Bin, DING Shunliang, et al. A comprehensive review of alkaline water electrolysis mathematical modeling[J]. Applied Energy, 2022, 327: 120099.



李斌

在线出版日期: 2025-09-25。

收稿日期: 2025-06-06。

作者简介:

李斌(1976), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统保护与控制, E-mail: libin_tju@126.com;

范辉(2001), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为可再生能源离网制氢系统电能传输变换与保护控制技术, E-mail: fanhui@tju.edu.cn;

何佳伟(1991), 男, 博士, 副研究员, 通信作者, 主要研究方向为新型电力系统保护与控制, E-mail: hejiawei_tju@126.cn。

(责任编辑 徐梅)

表 A1 PEM 电解槽参数
Table 1 Parameters of PEM Electrolyzer

参数	说明	数值
n	电解槽串联小室数目/(个)	40
S	膜面积/(cm ²)	100
j	电流密度/(A/cm ²)	变量
R	理想气体状态常数/(J/(kg.K))	8.3145
T	电解小室运行温度/(K)	323
F	法拉第常数/(C/mol)	96485
P_{H_2}	阴极氢气分压/(atm)	35
P_{O_2}	阴极氢气分压/(atm)	1
α_{H_2O}	水活度	1
α_a	阳极电荷转移系数	2
α_c	阴极电荷转移系数	0.5
$j_{o,a}$	阳极交换电流密度/(A/cm ²)	1×10^{-6}
$j_{o,c}$	阴极交换电流密度/(A/cm ²)	1×10^{-3}
σ_{ohm}	膜电导率/(S/cm)	变量
δ_{ohm}	膜厚度/(cm)	0.02
λ	膜含水量	20
C_{dl}	电层电容/(F/cm ²)	750

表 A2 电解槽不同故障情况下故障电流计算误差
Table 2 Calculation Error of Fault Current under Various Fault Conditions in the Electrolyzer

电流密度 j /(A/cm ²)	短路小室数目 m (个)	暂态 MRE/%	稳态电流理论值/A	稳态电流仿真值/A	稳态相对误差/%
1.6	1	0.62	162.33	162.22	0.07
	3	1.19	167.14	166.66	0.29
	5	1.51	172.21	171.31	0.53
1.2	1	0.67	121.91	121.84	0.06
	3	1.45	125.91	125.59	0.25
	5	2.48	130.25	129.52	0.56
1	1	0.80	101.64	101.59	0.04
	3	1.94	105.16	104.94	0.22
	5	1.99	109.03	108.44	0.54
0.5	1	1.27	50.55	50.67	0.24
	3	4.20	52.51	52.70	0.36
	5	4.79	54.82	54.90	0.15

表 A3 电解槽不同故障情况下保护动作情况
Table 3 The performances of the proposed protection criterion under various fault conditions in the electrolyzer

电流密度 j /(A/cm ²)	短路小室数目 m (个)	ΔI_{EL} (A)	ΔU_C (V)	DR1	DR2	结果
1.6	1	2.22	-1.59	1	1	动作
	3	6.66	-4.67	1	1	动作
	5	11.31	-7.72	1	1	动作
	外部故障	-160	-30.9	0	0	不动
	功率波动	10	2.62	1	0	不动
1.2	1	1.84	-1.59	1	1	动作
	3	5.59	-4.69	1	1	动作
	5	9.52	-7.77	1	1	动作
	外部故障	-120	-34.8	0	0	不动
	功率波动	10	2.65	1	0	不动
0.8	1	1.30	-1.48	1	1	动作
	3	4.15	-4.64	1	1	动作
	5	7.20	-7.76	1	1	动作
	外部故障	-80	-39.7	0	0	不动
	功率波动	10	2.78	1	0	不动
0.5	1	0.88	-1.66	0	1	不动
	3	2.91	-4.89	1	1	动作
	5	5.11	-8.09	1	1	动作
	外部故障	-50	-43.9	0	0	不动
	功率波动	10	3.19	1	0	不动