

基于内阻特性的燃料电池燃料利用率 建模与分析

周唯逸¹, 娄成宇², 卫东², 徐钰栋¹

(1. 国网浙江电力有限公司乐清市供电公司, 浙江 温州 325600;

2. 中国计量大学机电工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:为优化质子交换膜燃料电池(PEMFC)系统性能,提高PEMFC的燃料利用率,建立基于内阻特性的燃料电池燃料利用率计算模型。分析操作条件(工作温度、工作湿度)对内阻特性和燃料利用率的影响作用;研究等效直流总内阻与燃料利用率的对应关系,将等效直流总内阻最小作为优化条件,通过改变操作条件来降低总内阻和提高燃料利用率;通过交流阻抗和UI输出特性实验,验证模型的有效性和可靠性。研究表明:温度变化对燃料利用率的影响较湿度变化更为明显;燃料利用率随着输出电流密度的增加而提高;当电压输出为12.4 V、供氢流量为18.4 L/min时,通过对燃料电池堆操作条件优化控制,燃料利用率最大提升11.13%,总内阻降低 $1.5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

关键词:质子交换膜燃料电池;操作条件;燃料利用率;内阻特性

中图分类号: TM911 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed26620

Modeling and Analysis of Fuel Cell Fuel Utilization Efficiency Based on Internal Resistance Characteristics

ZHOU Weiyi¹, LOU Chengyu², WEI Dong², XU Yudong¹

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Yueqing Power Supply Company, Wenzhou 325600, Zhejiang, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China)

Abstract: To optimize the performance of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) systems and enhance fuel utilization, a calculation model for fuel utilization based on internal resistance characteristics was established. The effects of operating conditions—specifically, operating temperature and humidity—on internal resistance and fuel utilization were analyzed. The relationship between the equivalent direct current (DC) total internal resistance and fuel utilization was investigated. By taking the minimization of the equivalent DC internal resistance as the optimization objective, operating conditions were adjusted to reduce total resistance and improve fuel utilization. The validity and reliability of the proposed model were verified through electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and UI output characteristic experiments. The results indicate that temperature has a more significant impact on fuel utilization compared to humidity. Fuel utilization increases with rising output current density. Under optimized operating conditions—specifically, at an output voltage of 12.4 V and a hydrogen flow rate of 18.4 L/min—the fuel utilization is improved by up to 11.13%, and the total internal resistance is reduced by $1.5 \Omega \cdot \text{cm}^2$.

Key words: proton exchange membrane fuel cell (PEMFC); operating conditions; fuel utilization; internal resistance characteristic

质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)因具有效率高、响应快、噪

音低和零排放等优点,使其在可再生能源发电领域具有广泛的应用前景^[1-3]。近年来,专家学者针

基金项目:浙江省基础公益研究计划(LGG22E070003)

作者简介:周唯逸(1983—),男,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为新能源发电系统的控制与故障诊断技术研究,

Email: 57590433@qq.com

通讯作者:娄成宇(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向为质子交换膜燃料电池输出性能优化, Email: ley10141226@126.com

对燃料电池堆的电化学反应过程、水热管理状态和输出性能等方面进行深入研究^[4]。Hinaje M等^[5]提出一种新的基于电学类比的动态电路模型,比较了不同输出电流波形下的极化曲线和动态响应。Rezaei Niya S M等^[6]通过实验获得燃料电池阻抗特性的完整工作过程曲线,解析确定电堆阻抗值,进而建立燃料电池堆等效电路。Xia L等^[7]通过研究电堆工作温度、进气流量和催化剂量厚度对输出性能的影响,来降低电堆成本并保持较高输出性能。Zhang L等^[8]通过建立燃料电池水冷凝速率(WCR)模型,研究膜含水量的变化及其对输出性能的影响作用。Khan S S等^[9]提出了一种与负载电流、工作时间和环境温度等因素相关的燃料电池工作温度模型,实验表明该模型具有更好的准确性和通用性。

PEMFC燃料利用率方面的研究主要集中在计算、优化等方面。Koski P等^[10]通过实验研究分析获得阳极燃料摩尔平衡和成分相关变量,并结合电堆输出电流密度,确定总体燃料利用率。Han I-S等^[11-12]通过对燃料电池堆的结构和供气系统进行创新设计,使燃料利用率得以提升。Ni-shikawa H^[13]采用分割堆叠的方法,将主堆中未反应完全的氢气引入子堆进行二次利用,提高氢气利用率。赵金国等^[14]提出一种氢气再循环控制方案,以减少不必要的氢气损耗。刘鑫桐等^[15]通过建模分析阳极进气相对湿度对PEMFC燃料利用率的影响作用。

上述研究都在不同程度上优化了燃料利用率,取得了较好的优化效果,但现有研究通过增加系统设备或构建堆内新结构提高燃料利用率,这会在一定程度上降低电池的性能和寿命,同时提高系统的成本和复杂性。针对上述问题,本文提出了一种新的计算方法,建立涵盖直流内阻特性的燃料利用率计算模型,采用控制策略优化燃料利用率可以提高电池性能和寿命,为计算、优化质子交换膜燃料电池的燃料利用率提供新思路。在第1节中,建立内阻特性模型、燃料利用率计算模型、电气输出特性模型以及交流阻抗特性模型。在第2节中,仿真研究不同操作条件下的直流内阻特性模型以及燃料利用率计算模型的变化规律。在第3节中,开展交流阻抗特性实验以及UI输出特性实验,验证模型的可靠性和方法的有效性。

1 燃料利用率建模

质子交换膜燃料电池燃料利用率可表示为实际消耗的氢气流量 h_{flow} 与供给到电堆的氢气流量 H_{flow} 的比值。具体表达式如下式所示^[16]:

$$\eta_{\text{fuel}} = \frac{h_{\text{flow}}}{H_{\text{flow}}} = \frac{NmiA}{2FH_{\text{flow}}} \quad (1)$$

式中: N 为电堆中单电池的片数; m 为氢气的摩尔质量(2.016); i 为电堆输出电流密度, A/cm^2 ; A 为电化学反应面积, cm^2 ; F 为Faraday常数(96 485 C/mol); H_{flow} 为电堆阳极侧供氢流量, g/s 。

基于二阶RC等效电路建立燃料电池内阻特性、电气输出特性和交流阻抗模型,如图1所示。图中, R_f 、 R_m 和 R_d 分别为活化内阻、欧姆内阻和浓差内阻; E_{ocv} 和 U 为电堆开路电压和输出电压; C_d 、 C_{dl} 为双层电容。

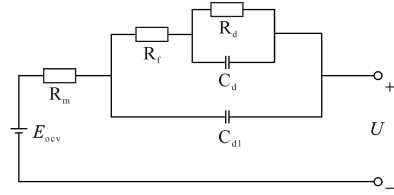


图1 二阶RC等效电路模型

Fig.1 Second order RC equivalent circuit model

燃料电池工作时,由于活化极化、欧姆极化、浓差极化现象,会对燃料电池堆输出性能产生影响。活化内阻 R_f 源于电化学反应初期反应物分子需要克服的能量障碍;欧姆内阻 R_m 源于质子在质子交换膜上传输受到的阻碍;浓差内阻 R_d 源于电化学反应速率远高于反应物传输速率所造成的电极表面反应物浓度急剧下降。结合文献[14], R_f 、 R_m 和 R_d 如下式所示:

$$R_f = \frac{RT_{\text{stack}}}{\alpha n F i} \ln \left\{ T_0 i / \left\{ i_0 T_{\text{stack}} \exp \left[\frac{\Delta G}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{\text{stack}}} \right) \right] \right\} \right\} \quad (2)$$

$$R_m = \frac{t_m \alpha_1 [1 + \alpha_2 i + \alpha_3 (T_{\text{stack}} / \alpha_4)^2 i^{2.5}]}{A(\lambda_m - \alpha_6 - 3i) \exp[\alpha_7 (1 - \alpha_5 / T_{\text{stack}})]} \quad (3)$$

$$R_d = \frac{RT_{\text{stack}} \delta}{AC_g D_{\text{eff}} \rho^2 F^2} \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} \rho = 2 [\beta \tau^2 F / (RT_{\text{stack}})]^{-i/2} \\ D_{\text{eff}} = D_{\lambda} \exp \left[2.416 \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{\text{stack}}} \right) \right] \\ D_{\lambda} = (\gamma_1 - \gamma_2 \lambda_m + \gamma_3 \lambda_m^2 - \gamma_4 \lambda_m^3) \times 10^{-6} \\ \lambda_m = \beta_1 + \beta_2 RH_{\text{stack}} - \beta_3 RH_{\text{stack}}^2 + \beta_4 RH_{\text{stack}}^3 \end{cases} \quad (5)$$

式中: α 为电化学反应速率参数; n 为电化学反应转移电子数; T_0 为电堆标准工作温度; T_{stack} 为电堆实际工作温度,K; i_0 为 T_0 温度下的交换电流密度; i 为 T_{stack} 温度下的输出电流密度, A/cm^2 ; ΔG 为标况下吉布斯自由能变化, J/mol ; t_m 为质子交换膜厚度, μm ; $\alpha_1\sim\alpha_7$ 为模型经验参数; λ_m 为质子交换膜的含水量; RH_{stack} 为电堆工作湿度; $\beta_1\sim\beta_4$ 为模型经验参数; δ 为扩散层厚度, μm ; C_g 为反应物的总浓度, mol/L ; D_{eff} 为运行状态的水迁移系数; β 为电导率系数, $\beta\approx 6$; D_λ 为初始状态的水迁移系数, $\text{J}/(\text{K}\cdot\text{mol})$; $\gamma_1\sim\gamma_4$ 为模型经验参数; F 为法拉第常数; R 为理想气体常数。

结合式(2)~式(5)可得等效直流总内阻 R_{stack} 如下式所示:

$$R_{\text{stack}} = R_f + R_m + R_d$$

$$= \frac{RT_{\text{stack}}}{\alpha n F i} \ln \left\{ T_0 i / \left\{ i_0 T_{\text{stack}} \exp \left[\frac{\Delta G}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{\text{stack}}} \right) \right] \right\} \right\} +$$

$$\frac{t_m \alpha_1 [1 + \alpha_2 i + \alpha_3 (T_{\text{stack}} / \alpha_4)^2 i^{2.5}]}{A (\lambda_m - \alpha_6 - 3i) \exp [\alpha_7 (1 - \alpha_5 / T_{\text{stack}})]} +$$

$$\frac{RT_{\text{stack}} \delta}{AC_g D_{\text{eff}} \rho^2 F^2}$$
(6)

由图1可知,电气输出特性和交流阻抗特性模型如下式所示:

$$U = E_{\text{ocv}} - iR_{\text{stack}} = E_{\text{ocv}} - i(R_f + R_m + R_d) \quad (7)$$

$$Z = R_m + \frac{R_f + R_d + R_f R_d j \omega C_d}{j \omega C_{dl} (R_f + R_d + R_f R_d j \omega C_d) + R_d j \omega C_d + 1}$$
(8)

结合式(1)、式(6)、式(7),建立涵盖内阻特性的燃料电池燃料利用率的计算模型,如下式所示:

$$\eta_{\text{fuel}} = \frac{NmA(E_{\text{ocv}} - U)}{2FR_{\text{stack}}H_{\text{flow}}} \quad (9)$$

2 基于内阻模型的燃料利用率仿真分析

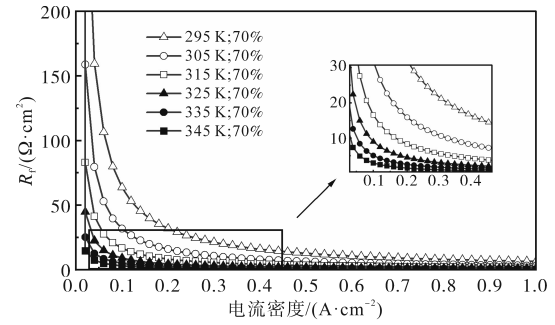
本节基于所建立的燃料电池内阻特性模型和燃料利用率计算模型进行仿真研究,分析操作条件变化对等效直流内阻和燃料利用率的影响作用。操作条件的选取对电堆运行至关重要,工作温度过高,会引起催化剂失活,堆内水分蒸发较快,质子传输阻力增加;工作温度过低,会使催化剂效率大幅下降,电化学反应不充分;工作湿度过高,形成的液态水会影响反应气体传输,影

响输出性能;工作湿度过低,会导致电堆出现膜干故障,使用寿命降低。仿真参数如表1所示。

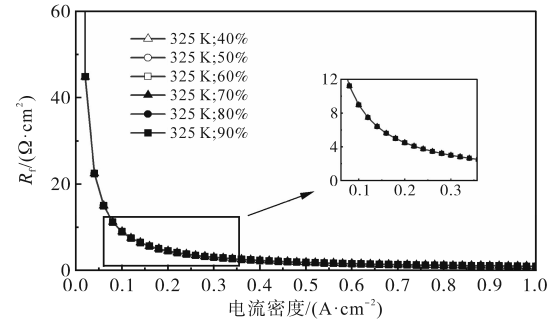
表1 仿真参数表

Tab.1 Simulation parameters table			
参数	数值	参数	数值
T	293~353 K	δ	80 μm
C_g	4 mol/L	A	180 cm^2
i	0.01~1 A/cm^2	N	16
E_{ocv}	16 V	t_m	0.051 mm
RH	35%~95%	H_{flow}	18.4 L/min

仿真研究操作条件的变化对活化内阻 R_f 、欧姆内阻 R_m 和浓差内阻 R_d 的影响作用,仿真结果如图2~图4所示。



(a)不同工作温度、不同电流密度下 R_f 变化规律



(b)不同工作湿度、不同电流密度下 R_f 变化规律

图2 活化内阻 R_f 的变化规律

Fig.2 Variation law of activation internal resistance R_f

电化学反应初始阶段,反应物在催化剂作用下消耗能量克服活化能垒,由分子态转换为离子态,驱动电子传输。由图2分析可知,工作湿度在70%下,低电流密度段($i \leq 0.2 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$),活化能垒较大,电化学反应速率较慢,工作温度从295 K提升至345 K,有利于克服活化能垒, R_f 从159.39 $\Omega\cdot\text{cm}^2$ 降至31.87 $\Omega\cdot\text{cm}^2$ 并随着输出电流密度的增大进一步降低;中电流密度段($0.2 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2} \leq i \leq 0.6 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$),工作温度从295 K提升至345 K的过程中,电化学反应增强,反应面积增加, R_f 从26.56 $\Omega\cdot\text{cm}^2$ 减小至5.29 $\Omega\cdot\text{cm}^2$;高电流密度段($i > 0.6 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$),电化学反应更充分,反应传热过程趋于平衡, R_f 减小至5 $\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以下并不再有较大

幅度变化。在不同电流密度段,电堆工作温度不变,改变工作湿度,活化内阻 R_i 无明显变化。故适当提升电堆工作温度,能够有效降低电化学反应能垒,提高催化剂活性,加快反应速率,降低 R_i 对输出性能的影响。

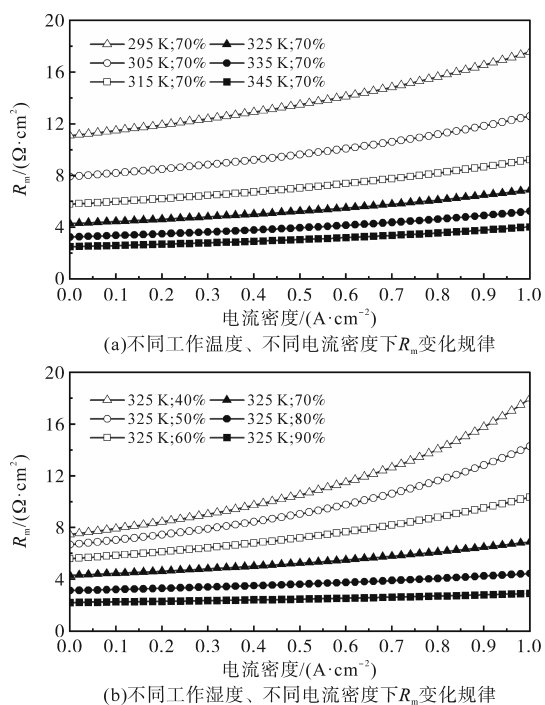


图3 欧姆内阻 R_m 的变化规律

Fig.3 Variation law of ohm internal resistance R_m

质子迁移率反应了质子在质子交换膜中的动力学特性,是影响欧姆内阻 R_m 的主要原因。由图3分析可知,工作湿度在70%、工作温度在335 K以下时,提升工作温度能够促进膜上水分子流动,提高膜电导率,增强质子迁移率, R_m 减小。当温度高于335 K时,由于工作温度过高,电化学反应产生的水分不足以弥补加快蒸发的水分,导致膜含水量不足,质子迁移率下降, R_m 呈现缓慢升高趋势,在中高电流密度段($i \geq 0.2 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$),电化学反应剧烈,产生的水分足够,膜含水量不足得到缓解, R_m 增大速率趋缓。工作温度在325 K时,提升工作湿度,能够提高膜水合能力,有效增强质子迁移率,降低 R_m 。同时由于质子拖电现象无法避免,随着输出电流密度增加, R_m 会缓慢上升。故选取适宜的操作条件能够有效降低欧姆内阻 R_m 对输出性能的影响。

当燃料电池堆内部反应物传输无法及时满足电化学反应时,会导致质子传输遇到浓度梯度,产生浓差极化现象,影响燃料电池堆的输出性能。由图4可知,浓差内阻 R_d 随着电化学反应

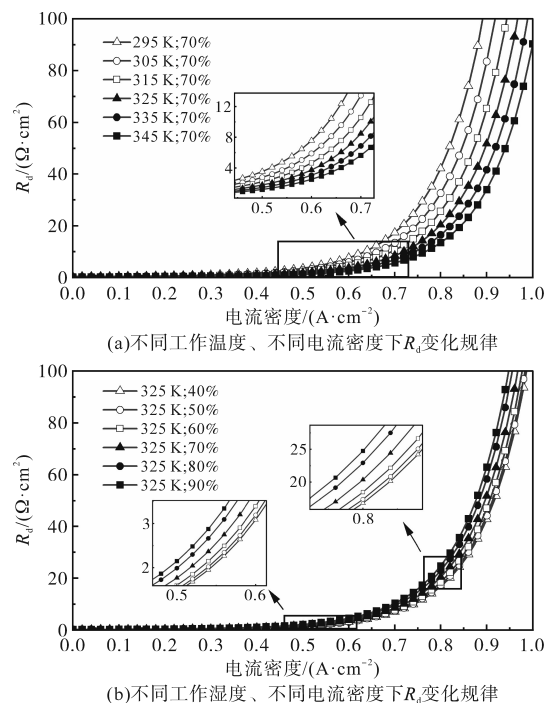


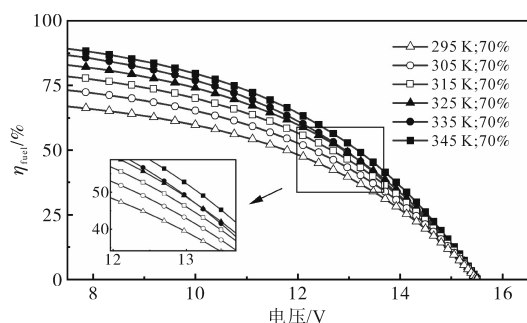
图4 浓差内阻 R_d 的变化规律

Fig.4 Variation law of concentration internal resistance R_d

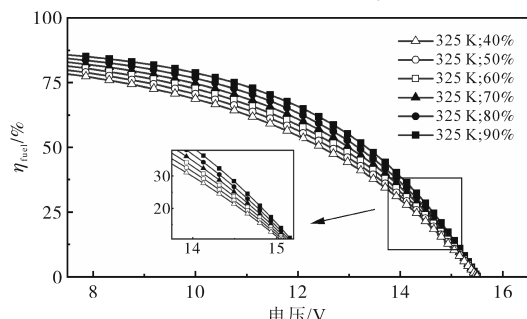
的加剧和输出电流密度的增大,整体呈增大趋势。中低电流密度段($i \leq 0.6 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$),电化学反应不够剧烈,质子传输受浓度梯度影响较小, R_d 数值小,变化不明显;高电流密度段($i \geq 0.6 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$),电化学反应速率骤增,反应物传输速率无法与消耗速率相匹配,从而导致浓差极化现象加重, R_d 迅速增大。随着工作温度升高,有助于堆内反应物分子扩散与液态水蒸发,削弱浓差极化现象,减小 R_d ;随着工作湿度增加,大量液态水在气体扩散层积聚,阻碍了反应物传输,会进一步加剧浓差极化, R_d 升高。所以当燃料电池堆以高电流密度输出时,进行合理的水热管理能够有效降低浓差内阻对输出性能的影响。

基于前期等效直流内阻仿真并结合式(7)进行计算,重点分析输出电压、工作温度及湿度等关键运行条件对燃料利用率的影响,得到燃料利用率 η_{fuel} 的变化规律如图5所示。

图5a显示,在保持相对工作湿度为70%条件下,工作温度对燃料利用率的影响趋势。随着输出电压的升高,燃料利用率整体呈下降趋势,尤其在电压高于14 V时下降更加明显。这主要是由于电化学反应不充分导致的活化极化现象增强。提高工作温度能够减弱这一极化现象,增强反应活性,同时欧姆内阻 R_m 减小,从而提升燃料利用率,这里与文献[12]中的分析一致。但在温



(a)不同工作温度、不同电压下 η_{fuel} 变化规律



(b)不同工作湿度、不同电压下 η_{fuel} 变化规律

图5 η_{fuel} 随温湿度变化的规律

Fig.5 Variation law of the η_{fuel} changing with temperature and humidity

度相对较高的情况下(如345 K)提升效果趋于饱和,甚至因膜水分流失而产生性能瓶颈。

图5b显示在恒定工作温度(325 K)条件下,不同湿度水平对燃料利用率的影响。可见中等湿度(如70%)可在较宽电压区间内维持较高燃料利用率,这是由于水合条件良好、质子传导性增强。继续增湿虽有一定提升作用,但湿度过高将导致阴极积水、水反扩散等问题,增加反应气体传输阻力,甚至引发水淹现象,反而降低燃料利用效率。

由此可见,在恒定电压输出条件下,通过协同优化控制质子交换膜燃料电池堆的工作温度和工作湿度,可以实现电堆输出性能的优化,从而提高燃料利用率。

η_{fuel} 随总内阻 R_{stack} 变化规律如图6所示。

结合表2、式(7)和图6可知,随着输出电压

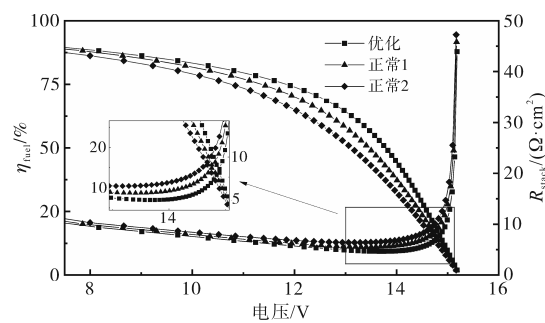


图6 η_{fuel} 随总内阻 R_{stack} 变化规律

Fig.6 Variation law of the η_{fuel} changing with total internal resistance R_{stack}

的增加,燃料电池堆的等效总内阻 R_{stack} 先下降后上升。当电堆输出电流密度降低时,在恒定供氢速率下,实际消耗的氢气量减少,导致燃料利用率下降。具体而言,当输出电压低于13 V时,电化学反应速率较高,实际氢气消耗量大,燃料利用率可达到约90%,随着输出电压的升高,电化学反应速率下降,且 R_{stack} 受到浓差内阻 R_d 的影响而逐渐下降。在输出电压处于13 V至15 V范围时, R_{stack} 主要受到欧姆极化和活化极化现象的影响,随着电压的进一步升高, R_{stack} 呈上升趋势,并导致燃料利用率的降低速率加快。当输出电压超过15 V后,由于活化内阻 R_m 较大, R_{stack} 急剧增大至 $46.32 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 以上,此时燃料利用率也降至很低。

在相同的燃料利用率下,优化工况下的总内阻 R_{stack} 会明显小于常规工况,减少了燃料电池堆内部的能量消耗并提高了输出性能。由图6可见,采用温度与湿度的优化控制后,当输出电压为12.4 V时,优化工况下燃料利用率提升最大,较常规工况提高11.13%,电堆总内阻降低了约 $1.5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

由此可见,选择合适的工作温度和工作湿度条件,可以有效减少质子交换膜燃料电池堆的总内阻 R_{stack} ,从而有效提高燃料电池堆的输出性能和燃料利用率。

表2 不同操作条件下燃料利用率与内阻值计算结果

Tab.2 Calculation results of fuel utilization and internal resistance values under different operating conditions

参数	优化				正常1		正常2		
$\eta_{fuel}/\%$	69~90	42~85	1~43	50~84	40~79	5~39	61~85	40~78	1~40
U/V	7.5~9.5	9.5~13.5	13.5~15.6	7.5~9.5	9.5~13.5	13.5~15.6	7.5~9.5	9.5~13.5	13.5~15.6
T/K	334~343	329~334	306~329	338~345	326~338	309~326	331~343	327~331	308~327
$RH/\%$	70~81	52~73	40~51	55~70	45~54	40~45	74~86	62~76	40~50
$R_f/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	1.79~4.23	3.57~34.9	40.37~78.64	1.56~3.84	3.2~27.8	38.64~91.5	1.68~4.16	3.85~45.3	39.53~92.6
$R_m/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	1.62~4.78	4.33~5.7	3.48~5.91	7.32~9.2	7.43~10.5	4.12~12.86	6.85~8.1	7.43~11.65	4.46~13.4
$R_d/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	1.25~5.96	0.04~1.28	0.03~0.06	1.28~6.1	0.04~1.3	0.03~0.29	2.46~7.9	0.04~1.8	0.03~0.31
$R_{stack}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	7.67~10.34	7.2~40.34	43.61~83.52	8.94~13.61	9.02~41.2	39.61~101.4	7.87~15.6	9.1~43.61	42.3~98.6

3 实验与分析

开展质子交换膜燃料电池水热管理实验,分析交流阻抗图谱和 UI 输出特性在不同操作条件下的实验和仿真结果,对模型进行检验。实验系统采用 1.5 kW 水冷型质子交换膜燃料电池堆、Perma Pure 公司 FC200-780-7 MP(空气)/240-5 MP(氢气)膜管增湿器、双极板三点深埋热电阻、日本菊水 KFM2150 燃料电池阻抗测试仪、利用艾德克斯 IT8800 直流电子负载等装置。为保护电堆,控制输出电压不低于 5.5 V^[17]。实验系统如图 7 所示。

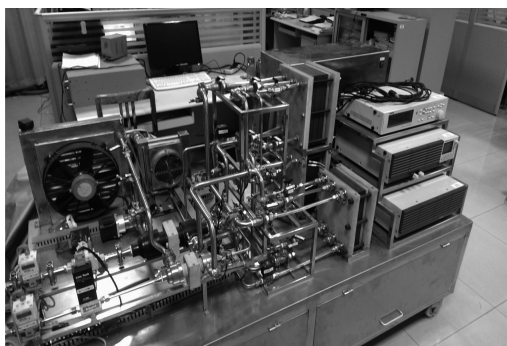


图7 燃料电池堆实验系统

Fig.7 Fuel cell stack experiment system

3.1 交流阻抗特性实验

采用直流电子负载定电压输出模式,控制电堆定电压输出,并在电堆达到预设操作条件稳定运行后,使用 KFM2150 燃料电池阻抗测试仪向系统发射 0.1 Hz~20 kHz 的交流信号,获得不同操作条件下的 14 点/十倍频程交流阻抗图谱,如图 8 所示(虚线为仿真结果)。

实验获得高频响应点为 R_m , 低频响应点为 R_{stack} 的电化学阻抗谱图,其整体上表现为圆心 $R_m + (R_t + R_d)/2$ 的半圆弧,包含高频弧和低频弧两个部分,具体形状和位置受到内阻特性的影响,高频弧主要受 R_t 影响, R_t 增大会导致高频弧半径增大;低频弧主要受 R_d 影响, R_d 增大会导致低频弧半径增大; R_m 增大会导致阻抗图谱终点右移, R_{stack} 增大会导致阻抗图谱起点右移。

定电压 7.6 V 输出时,电化学反应剧烈,阴极侧生成水量快速增加,对传质过程存在阻碍作用,阻抗主要由 R_m 和 R_d 构成。由图 8a 可知,在对操作条件进行优化后,能够使得阻抗图谱终点 R_m 左移,高频弧半径大大减小,阻抗图谱表现为很小高频弧和较大低频弧。定电压 13.5 V 输出时,

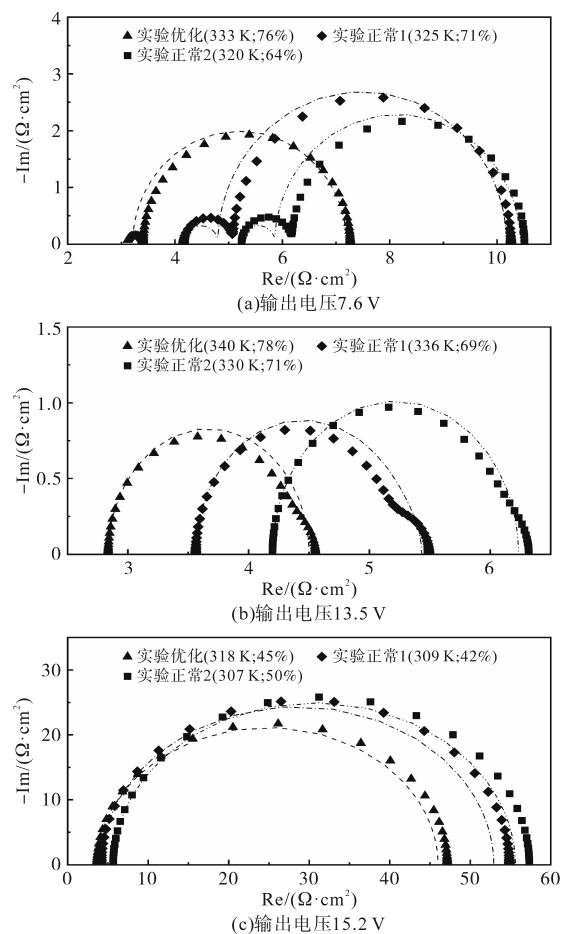


图8 不同输出电压下不同操作条件对应的电化学阻抗图谱
Fig.8 Electrochemical impedance spectra corresponding to different operating conditions under different output voltages

电化学反应较为充分稳定,结合内阻仿真结果分析可知,阻抗主要受到 R_t 和 R_m 的影响,图 8b 中的虚线部分接近于单弧,实验中阻抗谱图表现为较大高频弧和极小低频弧组合的双弧,操作条件优化状态下左移。定电压 15.2 V 输出时,反应需要克服的活化能垒较高,电化学反应极不活跃,对温湿度进行适宜的调节,能够有效降低 R_t 和 R_m 对于阻抗的影响,阻抗谱图如图 8c 所示,整体为单弧形式,优化状态下的阻抗图谱起点 R_{stack} 左移。

3.2 UI 输出特性实验

在开展交流阻抗特性实验的同时,检测电堆在定电压输出下的输出电流密度,进行不同水热管理状态下 UI 输出特性实验,并计算燃料利用率。实验结果如图 9 所示。

由图 9 分析可知:输出电压在 15~16 V 时,由于需要克服活化能垒,等效直流总内阻 R_{stack} 主要受到活化内阻 R_t 的影响增大,从而导致输出电压下降较快, UI 输出特性曲线的斜率绝对值较大;输出电压在 13~15 V 时,电化学反应逐渐增强,合

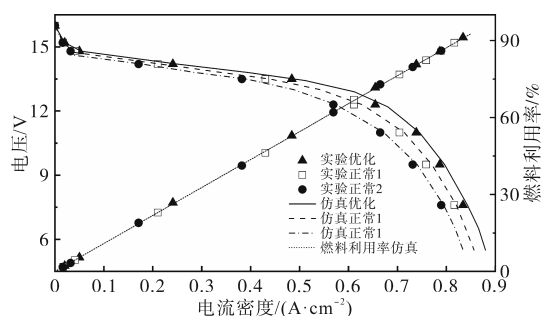


图9 UI输出特性曲线和燃料利用率计算结果

Fig.9 UI output characteristic curve and fuel utilization calculation results

适的工作湿度有利于提高质子迁移率,减小欧姆内阻 R_m ,UI输出特性曲线的斜率绝对值较小;输出电压在13 V以下时,电化学反应迅速加剧,反应物的传质过程由于生成水的大量产生而受到阻碍,致使浓差内阻 R_d 增大,表现为UI输出特性曲线的斜率绝对值较大。定电压输出下,优化操作条件,能够减小等效直流总内阻 R_{stack} ,对应较高的输出电流密度。图9中基于定电压输出下的实验数据计算得到的燃料利用率,整体上随着输出电流密度的增大呈线性变化,优化操作条件后对应的燃料利用率更高。实验结果与仿真结果整体吻合度较好,但由于采用的是从机理角度简化后的二阶RC等效电路模型,降低了仿真的复杂程度,忽略了电堆内部的结构参数和老化等影响因素,从而产生了一定的误差。

4 结论

本文通过建模、仿真与实验,针对基于内阻模型的质子交换膜燃料电池燃料利用率开展研究,获得如下结论:

1)提出了一种基于内阻模型的燃料利用率计算模型,通过对比交流阻抗特性、UI输出特性的仿真与实验结果所计算出的燃料利用率值,证明了基于内阻模型的燃料利用率计算模型的有效性和可靠性。

2)恒定供氢流量、定电压输出时,工作温度的变化对于燃料利用率的影响较工作湿度变化更为明显;中低电压输出时,高湿度不利于燃料的充分利用;协同优化电堆工作温度和湿度,能够使得电堆总内阻减小,燃料利用率提升,输出性能得到优化。

3)随着输出电压的升高,电堆总内阻 R_{stack} 先下降再升高,燃料利用率逐渐下降;在18.4 L/min的供氢流量下,定电压输出,优化控制电堆工作

温度和湿度,燃料利用率最大提升11.13%,电堆总内阻降低 $1.5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

参考文献

- [1] CHEN W, LIU Y, CHEN B. Numerical simulation on pressure dynamic response characteristics of hydrogen systems for fuel cell vehicles[J]. *Energies*, 2022, 15(7): 2413.
- [2] 刘娟, 胡晓磊, 滕易伊娜, 等. 氢燃料电池空压机变频器工业应用及发展趋势[J]. *电气传动*, 2023, 53(11): 3-8.
LIU Juan, HU Xiaolei, TENG Yiyina, et al. Industry application and development trend of inverter for hydrogen fuel cell air compressor[J]. *Electric Drive*, 2023, 53(11): 3-8.
- [3] SUN Yuning, MAO Lei, WANG Hang, et al. Simulation study on magnetic field distribution of PEMFC[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(78): 33439-33452.
- [4] 向志平, 马玉河, 高剑. 基于内阻特性的铝空气电池能量效率建模与优化[J]. *电气传动*, 2025, 55(4): 33-40.
XIANG Zhiping, MA Yuhe, GAO Jian. Energy efficiency modeling and optimization of aluminum air battery based on internal resistance characteristics[J]. *Electric Drive*, 2025, 55(4): 33-40.
- [5] HINAJE M, RAEL S, NOIYING P, et al. An equivalent electrical circuit model of proton exchange membrane fuel cells based on mathematical modelling[J]. *Energies*, 2012, 5(8): 2724-2744.
- [6] REZAEI Niya S M, PHILLIPS R K, HPPRFAR M. Process modeling of the impedance characteristics of proton exchange membrane fuel cells[J]. *Electrochimica Acta*, 2016, 191: 594-605.
- [7] XIA L, NI M, XU Q, et al. Optimization of catalyst layer thickness for achieving high performance and low cost of high temperature proton exchange membrane fuel cell[J]. *Applied Energy*, 2021, 294: 117012.
- [8] ZHANG L, LIU Y, PEI P, et al. Variation characteristic analysis of water content at the flow channel of proton exchange membrane fuel cell[J]. *Energies*, 2022, 15(9): 3280.
- [9] KHAN S S, SHAREEF H, KANDIDAYENI M, et al. Simple temperature modeling of proton exchange membrane fuel cell using load current and ambient temperature variations[J]. *International Journal of Green Energy*, 2021, 18(13): 1352-1368.
- [10] KOSKI P, VIITAKANGAS J, IHONEN J. Determination of fuel utilisation and recirculated gas composition in dead-ended PEMFC systems[J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2020, 45(43): 23201-23226.
- [11] HAN I-S, JEONG J, SHIN H K. PEM fuel-cell stack design for improved fuel utilization[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(27): 11996-12006.
- [12] KUO J-K, HSIEH C-Y. Numerical investigation into effects of ejector geometry and operating conditions on hydrogen recirculation ratio in 80 kW PEM fuel cell system[J]. *Energy*, 2021,

(下转第90页)

- [14] LI Zihao, WU Wenchuan, TAI Xue, et al. A reliability-constrained expansion planning model for mesh distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 948-960.
- [15] LI Zihao, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Analytical reliability assessment method for complex distribution networks considering post-fault network reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 1457-1467.
- [16] 蒋玮, 王铭华, 陈锦铭, 等. 基于Neo4j图数据库的配电网供电可靠性计算[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15): 104-111.
- JIANG Wei, WANG Minghua, CHEN Jinming, et al. Calculation of power supply reliability for distribution network based on Neo4j graph database[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 104-111.
- [17] LI Junhui, KONG Huichao, WANG Wenzhong, et al. A novel reliability assessment method for distribution networks based on linear programming considering distribution automation and distributed generation[J]. IET Renewable Power Generation, 2023, 18(3): 529-544.
- [18] GREGORIO M D, JAVIER C, JOSE M A. Reliability assessment for distribution optimization models: a non-simulation-based linear programming approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3048-3059.
- [19] GREGORIO M D, JAVIER C, JOSE M A. Distribution network expansion planning with an explicit formulation for reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 2583-2596.
- [20] 熊小平, 杨露, 李宁, 等. 基于仿射最小路法的含分布式电源配电网可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 43-50.
- XIONG Xiaoping, YANG Lu, LI Ning, et al. Reliability analysis of distribution network with distributed generation based on affine minimum path method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 43-50.

收稿日期:2025-05-15

修改稿日期:2025-07-17

(上接第80页)

233.

- [13] NISHIKAWA H, SASOU H, KURIHARA R, et al. High fuel utilization operation of pure hydrogen fuel cells[J]. Int J Hydrogen Energ, 2008, 33(21): 6262-6269.
- [14] 赵金国, 郭恒. 氢燃料电池氢气利用率提升策略研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(8): 510-516.
- ZHAO Jinguo, GUO Heng. Research on hydrogen utilization rate enhancement strategy of hydrogen fuel cell[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(8): 510-516.
- [15] 刘鑫桐, 刘永峰, 裴普成, 等. 进气相对湿度对PEMFC能量效率的影响特性分析[J]. 可再生能源, 2022, 40(7): 853-859.
- LIU Xintong, LIU Yongfeng, PEI Pucheng, et al. Analysis of the characteristics for the inlet relative humidity effects on energy efficiency of PEMFC[J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(7): 853-859.
- [16] 翟俊香, 何广利, 熊亚林. 燃料电池系统氢气利用率的试验研究[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(3): 684-687.
- ZHAI Junxiang, HE Guangli, XIONG Yalin. Experimental study on hydrogen utilization of proton exchange membrane fuel cell system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(3): 684-687.
- [17] 王茹, 沈永超, 卫东, 等. 基于直流内阻和交流阻抗特性的PEMFC水管理状态分析[J]. 化工学报, 2020, 71(7): 3247-3257.
- WANG Ru, SHEN Yongchao, WEI Dong, et al. Analysis of PEMFC water management status based on DC internal resistance and AC impedance characteristics[J]. CIESC Journal, 2020, 71(7): 3247-3257.

收稿日期:2025-05-12

修改稿日期:2025-07-10