

三种运行参数对 PEMFC 动态响应的数值分析

刘鑫桐¹, 刘永峰², 裴普成³, 张璐¹, 姚圣卓¹, 毕贵军⁴

(1. 北京建筑大学 机电与车辆工程学院, 北京 100044; 2. 北京建筑大学 北京市建筑安全监测工程技术研究中心, 北京 100044;

3. 清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084; 4. 新加坡科学技术研究局, 新加坡 637662)

摘要: 为了探究在电流阶跃变化中工作温度、相对湿度和背压等运行参数对质子交换膜燃料电池(PEMFC)性能的影响,运用相对湿度和工作温度之间的耦合变化推导出了动态计算(DT)模型。该模型通过工作温度和相对湿度来阐述膜电极参数和 PEMFC 性能之间的特性关系,并分析在电流阶跃变化中这两种运行参数对质子交换膜(PEM)内水传递特性、输出电压和功率密度随时间变化的瞬态响应的差异。采用理论计算结合试验的方式,首先通过自定义函数(UDF)将 DT 模型导入到 Fluent 软件中进行计算并应用有限体积法进行求解;其次开展 PEMFC 动态负载性能测试,测量工作温度为 50℃、60℃、70℃,背压为 0、10 kPa,相对湿度为 50%、75%、100%,同时改变电流负载(阶跃幅度为 5 A)来实现 PEMFC 对电流阶跃动态响应的测试;最后通过极化曲线和 I - P 曲线对 DT 模型和试验数据进行比较分析。结果表明:实验数据与 DT 模型的仿真结果之间有很好的相关性;不对称加湿是影响功率密度的一个主导参数;阳极相对湿度决定了功率密度在发生阶跃电流后稳定运行的能力;PEM 水含量与功率密度下冲幅度和响应时间有关。因此,工作温度为 60℃、背压为 10 kPa、阳极相对湿度为 75%、阴极相对湿度为 100% 时,PEMFC 的动态性能最佳。

关键词: 质子交换膜燃料电池;动态响应;运行参数;非对称加湿;电流阶跃

中图分类号: U473.4

文献标志码: A

Numerical Analysis of Three Operating Parameters on Dynamic Cell Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cell

LIU Xintong¹, LIU Yongfeng², PEI Pucheng³, ZHANG Lu¹, YAO Shengzhuo¹, BI Guijun⁴

(1. School of Mechanical-Electronic and Automobile Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Monitoring for Construction Safety, School of Mechanical-Electronic and Automobile Engineering, Beijing University of Civil Engineering and

Architecture, Beijing 100044, China; 3. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Singapore Institute of Manufacturing Technology (SIMTech), 637662 Singapore)

Abstract: In order to characterize the effects of operating temperature, relative humidity, and back pressure on the proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) performance at the applied step current, a dynamic transfer (DT) model that accounts for the coupled variation between relative humidity and operating temperature is established, which illustrates the characteristic relationship between membrane electrode parameters and PEMFC performance parameters in terms of operating temperature and relative humidity, and analyses the differences between two operating parameters on the transient response of water transport inside PEM, output voltage, and power density distribution with time at the applied step current. A combination of theoretical calculations and experiments is proposed. First, the DT model including geometry and meshes is embedded into Fluent and the data in the solver of Fluent is called to simulate the electrochemical reactions. Secondly, experiments are conducted regarding the effect of temperature (50 °C, 60 °C and 70 °C), back pressure (0 and 10 kPa), and relative humidity (50%, 75% and 100%) on the transient response like voltage and power density. Finally, the transient response for voltage output, water transport inside the PEM, and power density distribution with time via polarization curves, contours, and I - P curves with time are compared and analyzed. The results indicate that the DT model is in good agreement with the experimental data observed, which elucidates that the anode relative humidity determines the capability of power density to operate steadily after the applied step current and the power density response time

收稿日期: 2021-11-10

基金项目: 北京市建筑安全监测工程技术研究中心研究基金(BJC2020K005); 汽车安全与节能国家重点实验室开放基金(KFY2218)

第一作者: 刘鑫桐(1994—),女,天津市,研究生,主要研究方向为质子交换膜燃料电池。E-mail: lxtxx2019@163.com

通信作者: 刘永峰(1973—),男,教授,博士生导师,研究方向: 车用质子交换膜燃料电池。E-mail: liuyongfeng@bucea.edu.cn

and the amplitude of undershoot are related to membrane. When the back pressure is 10 kPa, the anode relative humidity is 75%, and the cathode relative humidity is 100% at an operating temperature of 60 °C, PEMFC has the best dynamic performance.

Key words: proton exchange membrane fuel cell (PEMFC); dynamic response; operating parameter; asymmetric humidification; step current

质子交换膜燃料电池(PEMFC)是一种将氢能转换成电能的能量转换装置,它可以作为新能源汽车的动力源^[1]。车用燃料电池最显著的特征是它经常在可变负载下重复运行,而频繁的负载变化会缩短 PEMFC 的使用寿命,这是因为在负载快速变化时 PEMFC 内的水管理系统和反应气体供应系统不会及时做出相应的改变,从而导致燃料电池性能下降^[2-3]。尤其是使用寿命的缩短会严重制约车用质子交换膜燃料电池产业化发展^[4]。因此,研究在可变负载条件下 PEMFC 的动态响应特性对于延缓车用燃料电池使用寿命的衰减具有重要的意义^[2,5]。

早期的研究方向主要包括分析可变负载对输出电压的瞬态响应性能的影响^[6-7]。苟君^[6]和王等人^[7]揭示了可变负载条件与输出瞬态行为之间的现象和规律。然而,如何能更好地理解在可变负载的瞬态响应和机制是目前的研究热点,我们需要进一步对车用燃料电池在负载变化过程中的瞬态行为进行更为深入的研究^[8-10]。在 2001 年,Hamelin 等人^[11]研究了运行参数在可变负载下的 PEMFC 的瞬态行为。因此,许多研究人员把研究方向逐渐转向在可变负载条件下不同的运行参数对输出动态响应特性的仿真和试验研究^[12-18]。Soltani^[12]和 Daud^[13]等人考虑了温度、空载电压和等效内阻等参数对 PEMFC 性能的影响,并由此建立了相应的数学模型来研究其稳态和瞬态下的性能,得出了温度是影响 PEMFC 动态响应特性的关键因素。但这项研究并没有阐述这三种特性会随着阶跃电流的增加而产生电压下冲现象的原因。赵等人^[14]为了更好地理解 PEMFC 动态响应机制,首先建立一个带有死端模式的风冷质子交换膜燃料电池堆的测试系统并对 10 片电堆进行了温度的试验测试,其次为了探究不同阶跃电流下电堆的动态性能的差异,从而引入了两个分析参数分别是电压波动率和温度波动率对其动态性能进行了评价,最后揭示了电压下冲的机理和其振荡规律。Tang 等人^[15]观察到在负载变化时电压上冲或

下冲的现象与 PEMFC 内水和气体的质量传输密切相关,而 PEMFC 的动态响应特性是根据 PEM 含水量的变化而变化的。此外,一些研究已经证明 PEMFC 的动态性能主要受到质子交换膜(PEM)含水量的影响;燃料电池内的质量传输也会受到水管理的影响;而研究表明膜的水合作用主要受到电堆的工作温度和进气系统的相对湿度的影响从而导致动态性能的差异^[16-18]。

虽然关于在可变负载条件下的温度和相对湿度度的研究已经相当多了,但很少会有研究涉及到非对称加湿的动态响应特性的影响及其规律。大部分关于非对称加湿的研究主要集中在稳态性能方面。因此,本文将工作温度和两种加湿方法作为运行参数来对 PEMFC 车辆在实际运行条件下的瞬态响应进行分析,从而推导出 DT 的数值模型。本文的创新点在于将运行条件参数和运行工况参数两种影响因素耦合在一起研究对 PEMFC 动态响应性能。

1 仿真计算

1.1 动态计算(DT)模型

建立了一个三维多相、动态、等温、层状的数值模型,并调用 Fluent 软件求解器中数据来模拟电化学反应。该模型假设反应气体是理想的、不可压缩的,用以下公式表示,其中质量守恒公式,能量守恒公式,物质守恒公式和电荷守恒公式与 Fluent 软件中一致在此就不单独列写。

在 PEMFC 的等效电路模型下的 PEMFC 输出电压为:

$$V = E - \Delta V_{\text{ohm}} - I^2 R_{a,c} (1 - e^{\frac{-t}{R_{a,c}C}}) \quad (1)$$

式中: V 为单片输出电压, V ; E 为热力学判定的燃料电池电压, V ; ΔV_{ohm} 为欧姆极化所造成的电压损失, V ; $R_{a,c}$ 为活化极化和浓差极化的损失在等效电路中被等效的电阻, Ω ; C 为在阶跃电流发生变化时在等效电路中被等效的电容, F ; t 为时间, s ; I 为电流密度, A/cm^2 。当阶跃电流从 0 阶跃变化至 I , 在电容 C 的作用下, $R_{a,c}$ 的电压是无法快速变化的。

热力学判定的燃料电池电压为:

$$E = -E_r \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{P_{\text{out}(\text{H}_2)} P_{\text{out}(\text{O}_2)}^{\frac{1}{2}}}{P_{\text{sat}}} \right) \quad (2)$$

式中: E_r 为标准可逆电压, V ; T 为工作温度, K ; R 为理想气体常数, $J/(K \cdot \text{mol})$; P_{sat} 为进气温度下标准压强, Pa ; $P_{\text{out}(\text{H}_2)}$ 为氢气的部分压强, Pa ; $P_{\text{out}(\text{O}_2)}$ 为氧

气的部分压强, Pa; n 为电化学反应中每 1 mol 氢气生成的电子摩尔数; F 是法拉第常数, 96487 C/mol。

欧姆极化所造成的电压损失为:

$$\Delta V_{\text{ohm}} = I_g S_e = I_g \frac{i_m^2}{\kappa_m} \quad (3)$$

式中: S_e 是 PEM 内唯一的热源, 来自于欧姆电阻, Ω ; i_m 为离子电流的密度, $\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$; κ_m 为催化层离聚物状态的有效离子传导率, $\text{A} \cdot \text{cm}$ 。

$$\kappa_m = (0.519\lambda - 0.326) \exp \left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4)$$

式中 λ 为水分子数量, 可表达为:

$$\lambda = \lambda_e + \lambda_{\text{RH}} \quad (5)$$

式中 λ_{RH} 为进气相对湿度所携带水量, $\text{mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, 可用焓湿图软件计算出来; λ_e 为:

$$\lambda_e = \frac{I \kappa_m}{F} \quad (6)$$

PEM 内水的质量 $m_{\text{H}_2\text{O}}$ 为:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = m_{\text{H}_2\text{O}, \text{in}} - m_{\text{H}_2\text{O}, \text{out}} = \lambda A t \quad (7)$$

对 PEMFC 来说, PEM 段水传输的电动力渗透率源项为:

$$S_m = -\frac{\mu}{K} \epsilon_m x_m + \frac{K_\phi}{K_p} c_i n_i F \nabla \varphi_m \quad (8)$$

式中: ϵ_m 为 PEM 内的水黏度; x_m 为催化层中离聚物的体积分数; K_ϕ 为电动力渗透率; K_p 为 PEM 的水力渗透率; c_i 为固定电荷的浓度; n_i 为离子的电荷数; φ_m 为离聚物段的电势。

不同时刻的氢气消耗量为:

$$N_{\text{H}_2, \text{in}} = \frac{N_{\text{H}_2, \text{out}} (1 - e^{\frac{\ln(0.05)t}{T}})}{0.95} \quad (9)$$

不同时刻的电流为:

$$I = \frac{1 - e^{\frac{\ln(0.05)t}{T}}}{0.95} I_i \quad (10)$$

$$\Delta I = I_i - I_0 \quad (11)$$

式中: ΔI 为电流阶跃幅值; I_0 为时刻为 0 时的电流。

1.2 数值分析流程

采用理论计算结合实验的方式, 将理论计算推导融合到仿真计算中, 计算流程图如图 1 所示。流程分为 3 个部分: 首先使用 Gambit 软件进行几何建模并对网格进行处理; 其次使用 Fluent 软件中的预定义宏, 使理论模型可以调用 Fluent 软件求解器中的数据; 最后先将几何模型导入到 Fluent 软件中再将 DT 模型导入并设置到相应的模块中。

流场内的交换传热可以不计并设定其为绝热非稳态流, 不用单独列出能量公式并取消焦耳热和反

应热这两个模块, 在设置好流体区域、材料和边界条件等参数后进行计算, 当两次迭代的收敛度精确至 10^{-6} 时, 计算结果收敛, 可以结束计算并进行结果的后处理, 得到极化曲线图和云图。后处理得到的云图可以展现燃料电池内部组分的分布, 以便于对试验现象进行分析, 并与试验结果进行比较分析, 从而实现理论与试验参数之间的良性互动。

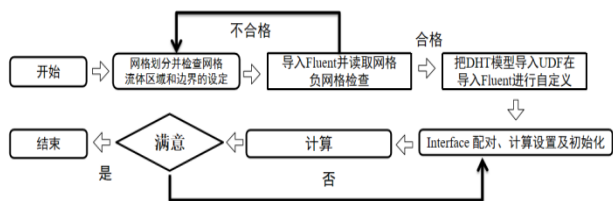


图1 PEMFC 动态响应数值分析流程

Fig.1 Flowchart of numerical analysis of PEMFC dynamic response

1.3 网格划分

为了能与试验测试结果进行对比, 并使 DT 模型所算出的能量效率更具说服力, 本文选取的模型参数与试验用电池一样, 如表 1 所示。

表1 PEMFC 模型参数

参数	参数值
模型片数	1
活性面积/ cm^2	168
阴阳级每条流道宽度/mm	0.12、0.12
阴阳级流道深度/mm	0.8、0.6
阴阳级背脊宽度/mm	0.8、0.8
阴阳级集流板厚度/mm	0.15、0.15
催化剂层/cm	0.0015
气体扩散层/cm	0.03~0.06
流道单个弯道的长度/cm	5
质子交换膜的厚度/cm	0.0015
阴阳级流道数	17
质子交换膜类型	Nafion

要进行多个工况的仿真计算, 必须做好燃料电池几何模型的构建及网格划分, 且网格划分是重点 (见图 2)。划分网格前根据由小到大的原则检查几何模型的点、线、面、体及其组合的高低拓扑关系, 以免发生网格报错情况。将燃料电池分成以下 3 个区域来划分网格: ①阳极集流板与流道; ②阴极集流板和流道; ③阴阳两极的催化层和扩散层和质子交换膜。其对应的网格类型分别是 Hybrid/TGrid、Hybrid/TGrid 以及 Hex。最后进行网格检查和流体区域和边界的设定, 在 Fluent 软件里检查网格有无负体积, 如果没有的话即可以进行后续仿真计算。

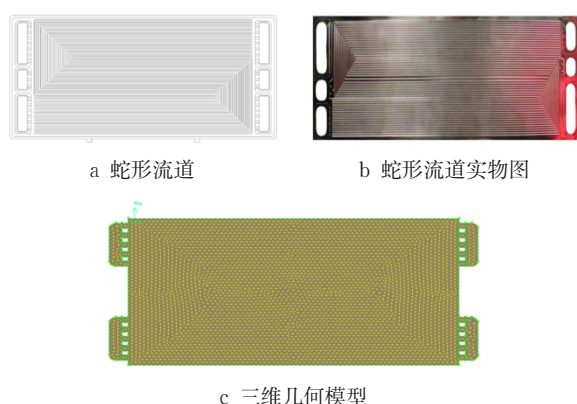


图2 PEMFC 几何模型

Fig.2 Geometric model of PEMFC

2 负载测试

2.1 测试系统

图3所示为正在进行测试的燃料电池测试系统。该系统包括实时单体多通道测量模块、气体流量测量控制模块、数据处理模块、在线诊断模块及数据存储模块,并通过特性循环伏安法进行交叉测试。试验系统可以在线调整相关运行参数,如温度调整、压力调整、流量调整和负载调整等。电池两端接有负载,单体电压监测信号线依次接入相对应单体电压采样模块通道,试验结果会记录在计算机终端。此外,该系统还有安全保护装置,在系统工作过程出现问题时自动停止通入氢气、氧气,打开氮气所在阀门进行吹扫处理,保证可燃气体吹扫干净。

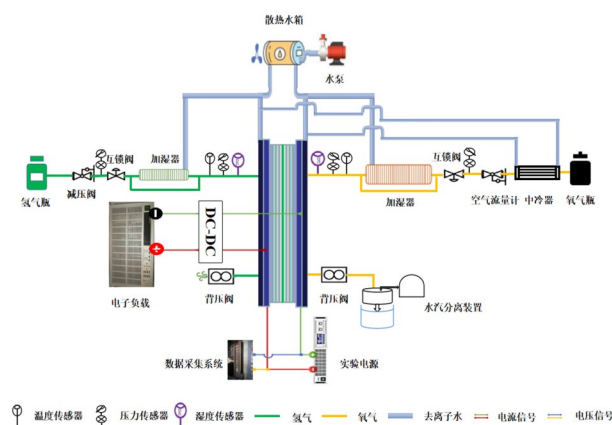


图3 燃料电池测试系统示意

Fig.3 Schematic diagram of fuel cell test system

2.2 测试条件

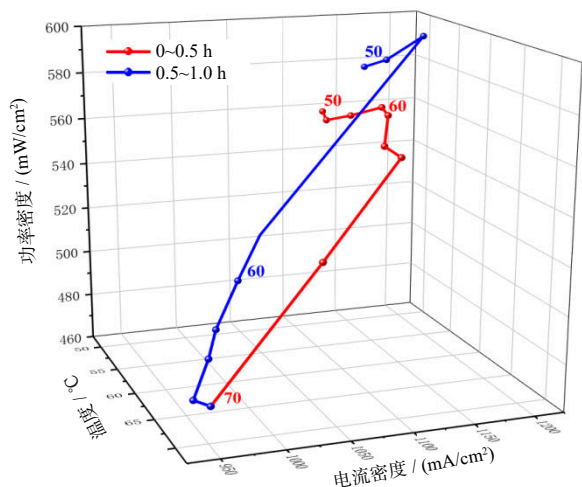
选用蛇形流道的单片燃料电池进行测试。每个参数均是独立控制,其中工作温度设置为50~70℃,背压设置为0和10 kPa,氢气和氧气的过量系数分别

设置为1.2和2.0;此外反应气体均采取外部加湿中喷淋和鼓泡两种方法进行充分加湿,相对湿度设置为50%~100%。需要设定PEMFC不同的 T_{dew} 、 P_{H_2} 和 λ_{H_2} 来确定具体参数,其中 T_{dew} 是露点温度在试验中用来调控相对湿度的取值。阳极使用氢气进行吹扫,阴极使用氧气进行吹扫。

3 结果与讨论

图4为在恒定电压模式下3种工作温度的 I - P 曲线,即当工作电压为0.5 V、相对湿度为40%时,在1 h内的3种工作温度(50℃、60℃、70℃) I - P 曲线。由图4可以看出:在0.5 h内,功率密度会随着温度的增高呈缓慢上升的趋势,然而当温度超过60℃后,功率密度会大幅降低;这种情况持续到超过0.5 h后,随着工作温度的降低,功率密度大幅提高,直到55℃时,功率密度开始降低。由图4还看出,功率密度和电流密度的变化趋势相近,则电流密度也呈相应的变化趋势。图4中电流密度和功率密度的最低点取值均在工作温度为70℃时,和通常情况下质子交换膜燃料电池在80℃时才会出现性能大幅度下滑的情况有所不同,其原因可能是本次试验中相对湿度较低时(40%)且进行测试的时间跨度不长,但燃料电池的内部反应进行的很快,PEM会需要更多的水来维持平衡状态。当温度达到70℃时,PEMFC产生的热量过高,仅依靠阴极生成的水不足以支撑燃料电池内部的水平衡,而相对湿度一直处于较低水平,这会导致出现性能大幅下降。所以,相对湿度也是一个重要的运行参数。通过1 h内的对比发现,在相同温度下相对湿度对PEM内含水量也有决定性作用。

为了验证在变载工况下电流密度和功率密度与工作温度之间的关系,在3种不同工作温度下进行了测试,并绘制了相应的 I - V 和 I - P 曲线。图5所示的曲线采用对称加湿方法,当相对湿度为100%时,输出电流在0~120 A时,其电流的阶跃加载幅度为5 A。由图5可以看出,在相同负载模式下,随着工作温度升高,其极化曲线和功率密度曲线呈上升趋势。随着阶跃电流的增加, I - V 和 I - P 曲线图呈现了两种变化趋势:①在极化曲线中,3组曲线的电压下降趋势是相同的,但工作温度为50℃时极化曲线会急速下降;②当工作温度为50℃时,不仅极化曲线出现明显的下降趋势,功率密度曲线也呈现相应的下降趋势,这表明工作温度在50℃时PEMFC的性

图4 3种工作温度下的 I - P 曲线Fig.4 I - P curves at 3 operating temperatures

能出现明显波动;当工作温度高于60℃时,性能会稳步提高,这是由于温度会直接影响PEM的电导率的增加;当工作温度处于60℃时,PEMFC的性能均优于其他的2个温度,因此有必要对60℃工作温度的瞬态响应进行重点研究。

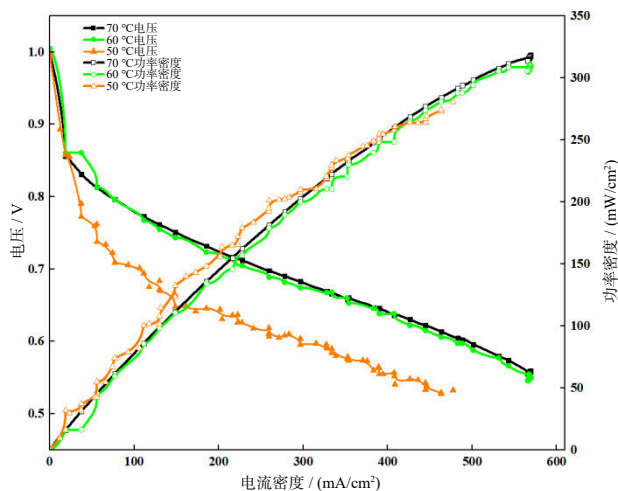


图5 相对湿度为100%时可变负载的瞬态响应

Fig.5 Transient response of variable load at a relative humidity of 100%

当温度为60℃、工作电压为0.5 V、相对湿度为100%、初始电流从70 A增加到75 A时,两种背压(0和10 kPa)的电流-功率密度如图6所示。由图6可以看出,背压为10 kPa的性能明显优于背压为0 kPa的性能,所以试验和仿真均选取背压为10 kPa。

Fu等人^[10]的研究表明,进气相对湿度在65%~75%区间内的动态响应优于其他湿度区间的动态响应。DT模型值与试验值的比较如图7所示,其可以

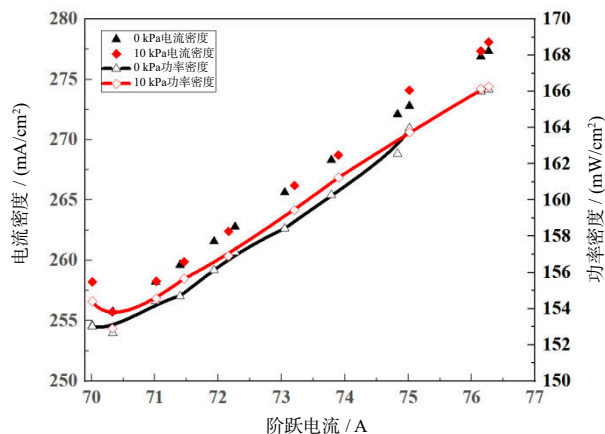


图6 不同背压下可变负载的瞬态响应

Fig.6 Transient response of variable load at different back pressures

用于验证DT模型对PEMFC分析的可靠性。由图7可以看出,DT模型值与试验值的曲线走势相同,在中低阶段电压随电流密度增大而直线下降,在高阶段电压的降幅趋势变缓,高阶段电压差异较大的原因可能是DT模型没有耦合结块模型来对浓差极化的损失进行分析。本模型是基于某时间段的阶跃电流变化而进行分析,选取多在欧姆极化损失阶段,所以本模型能在欧姆极化损失阶段预测各种操作参数对PEMFC性能的影响,相关参数的数值以及实验条件见表1。在阳极相对湿度为75%,阴极相对湿度为50%和100%的条件下进行比较,显示阴极相对湿度为100%的工作温度下,燃料电池的极化曲线和功率密度曲线要比阴极相对湿度为50%的曲线好。因此,选取阴极相对湿度为100%的非对称加湿的条件下,分别考察了50%、75%和100%这3种阳极相对湿度的PEMFC性能,并绘制出功率密度和电流密度与时间的关系。

图8显示了当温度、初始电流密度和负载振幅分别为60℃、387 mA/cm²和0.03 A/cm²时,3种阳极相对湿度(50%、75%和100%)对电流-功率密度随时间的分布。由图8可以看出,3种相对湿度的电流密度曲线趋势相近,但功率密度曲线却呈现出大幅度的波动,其性能最优的功率密度曲线对应的是阳极相对湿度为75%的曲线,其次是100%,最差的功率密度曲线是阳极相对湿度为50%。选取阳极相对湿度为75%的曲线进行分析,当初始电流从70 A增加到75 A时,初始功率密度值为337 mW/cm²,随即功率密度呈下冲趋势,其下冲幅度在10 mW/cm²左右;再出现第2次下冲前是呈现大幅度的上升趋势

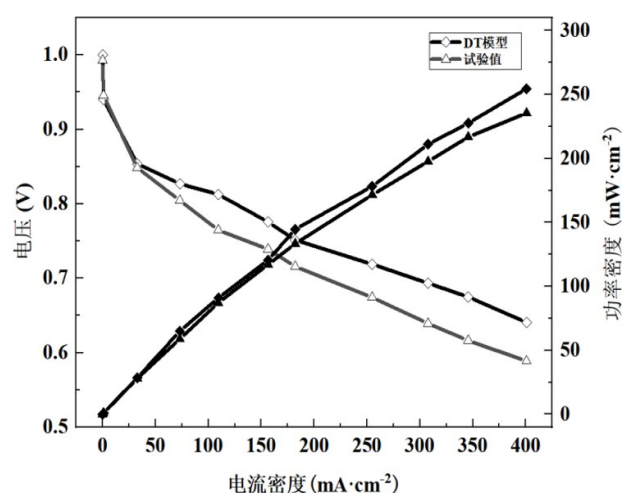


图7 阴极相对湿度为100%、阳极相对湿度为75%时的仿真结果与实验数据比较

Fig.7 Comparison of simulation results and experimental data at a cathode relative humidity of 100% and an anode relative humidity of 75%

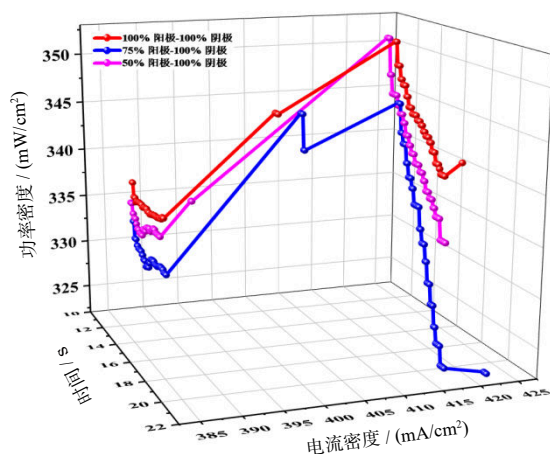


图8 阳极相对湿度50%~100%的电流密度和功率密度瞬态响应

Fig.8 Transient response of current density and power density at an anode relative humidity of 50% to 100%

势,而后又出现第2次下冲,最后功率密度逐渐增加到 352 mW/cm^2 。出现两次下冲的原因可能是因为通道中的气体在加载过程中以一定的速度消耗,而储存的反应气体不足以维持目标值,导致显示这种曲线。此外,最佳功率密度值未能稳定下来,持续下降至 352 mW/cm^2 。当阳极相对湿度分别为100%、75%和50%时,相应的反应时间分别为9 s、7 s和5 s。时间不同的原因是PEM的含水量在不同的相对湿度下可能会需要不同的时间来再次达到PEM含水量的稳态状态^[17]。

增加阳极相对湿度不仅可以使更多的水供应到PEM中,从而起到湿润膜的目的来降低电堆内的传输阻抗,进而提高PEMFC的性能;还可以有助于催化层内电化学反应来克服因气体浓度不足而产生的性能下降^[13,15]。没有选取阳极相对湿度为100%的原因是在100%的阳极相对湿度的功率密度下冲值比75%的阳极相对湿度的下冲值要大,它会需要更多的时间和功率密度来达到稳定的状态。在相对湿度为75%时,电池内部的水含量已经接近平衡状态,此时PEM在负载变化前已经接近完全加湿的状态。因此,当相对湿度为100%时,膜加湿效果相比于相对湿度为75%时显得并不明显。与Ijaodola^[5]的解释类似,即当相对湿度从70%增加到100%时,其电堆的性能会急剧下降的同时阴阳极电荷阻抗也会相应的增加。

4 结论

(1) 不对称加湿比工作温度对动态响应的影响更大。在相同温度下,阳极的相对湿度对实现PEMFC的水管理起到关键的作用。因此,最优的动态响应性能出现在工作温度为 60°C ,阳极相对湿度为75%,阴极相对湿度为100%。

(2) DT模型阐明了功率密度的响应时间和下冲值与PEM水含量有关,而阳极相对湿度决定了功率密度在发生阶跃电流后稳定运行的能力。

参考文献:

- [1] 王洪建,程健,张瑞云,等.质子交换膜燃料电池应用现状及分析[J].热力发电,2016,45(3):1.
WANG Hongjian, CHENG Jian, ZHANG Ruiyun, *et al.* Development analysis of proton exchange membrane fuel cell applications[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(3): 1.
- [2] 李一鸣,戴海峰,袁浩.进气条件对PEMFC动态响应的影响[J].电池,2021,51(2):122.
LI Yiming, DAI Haifeng, YUAN Hao. Influence of intake condition on dynamic response of PEMFC [J]. Battery Bimonthly, 2021, 51(2): 122.
- [3] MA R, LIU C, ZHENG Z X, *et al.* CPU-FPGA based real-time simulation of fuel cell electric vehicle [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 174(10): 983.
- [4] 刘永峰,王娜,裴普成,等.电池堆中电压衰减最快电池的仿真和试验研究[J].同济大学学报(自然科学版),2017,45(S1):121.
LIU Yongfeng, WANG Na, PEI Pucheng, *et al.* Simulation and experiment investigation for fastest voltage attenuation

- single cell in vehicle fuel cell stack [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(S1): 121.
- [5] IJAODOLA O S, EL-HASSAN Z, OGUNGBEMI E, *et al.* Energy efficiency improvements by investigating the water flooding management on proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)[J]. Energy, 2019, 179(7): 246.
- [6] GOU I, PEI P, YING W. The dynamic behavior of pressure during purge process in the anode of a PEM fuel cell [J]. Journal of Power Sources, 2006, 162(2): 1104.
- [7] WANG Y, WANG C Y. Dynamics of polymer electrolyte fuel cells undergoing load changes [J]. Electrochim Acta, 2006, 51: 3924.
- [8] ZHANG G, JIAO K. Three-dimensional multi-phase simulation of PEMFC at high current density utilizing Eulerian-Eulerian model and two-fluid model[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 176(11): 409.
- [9] HUANG Z, SHEN J, CHAN S H, *et al.* Transient response of performance in a proton exchange membrane fuel cell under dynamic loading [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 226:113492.
- [10] FU H, SHEN J, SUN L, *et al.* Fuel cell humidity modeling and control using cathode internal water content [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 46 (15) : 3429.
- [11] HAMELIN J, AGBOSSOU K, LAPERRIERE A, *et al.* Dynamic behavior of a PEM fuel cell stack for stationary applications[J]. Int J Hydrogen Energy, 2001, 26: 625.
- [12] SOLSONA M, KUNUSCH C, OCAMPO-MARTINEZ C. Control-oriented model of a membrane humidifier for fuel cell applications [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 137(4): 121.
- [13] DAUD W R W, ROSLI R E, MAJLAN E H, *et al.* PEM fuel cell system control: A review [J]. Renewable Energy, 2017, 113(12): 620.
- [14] JING Z, JIAN Q, LUO L, *et al.* Dynamic behavior study on voltage and temperature of proton exchange membrane fuel cells [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 145: 343.
- [15] TANG Y, YUAN W, PAN M, *et al.* Experimental investigation of dynamic performance and transient responses of a kW-class PEM fuel cell stack under various load changes[J]. Appl Energy, 2010, 87: 1410.
- [16] HUANG Z, SHEN J, CHAN S H, *et al.* Transient response of performance in a proton exchange membrane fuel cell under dynamic loading [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 226:113492.
- [17] KIM B, CHA D, KIM Y. The effects of air stoichiometry and air excess ratio on the transient response of a PEMFC under load change conditions[J]. Appl Energy, 2015, 138: 143.
- [18] LOO K H, WONG K H, TAN S C, *et al.* Characterization of the dynamic response of proton exchange membrane fuel cells - a numerical study [J]. Int J Hydrogen Energy, 2010, 35: 11861.