

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201807059

PEMFC 输出特性建模与多因素仿真分析

孙术发,杨 洁,唐华林,葛安华,邢 涛,马 超

(东北林业大学 工程技术学院,哈尔滨 150040)

摘 要: 质子交换膜燃料电池(PEMFC)是一个涉及多个学科领域的复杂系统,其输出特性受到多种因素的影响.为研究工作温度、压力、膜含水量、加载幅度、加载速度对其输出特性的影响,根据质子交换膜燃料电池(PEMFC)的数学模型,建立了考虑双电层电容作用的电压动态模型,并在 Matlab/Simulink 平台上进行仿真.利用实验室自制风冷自增湿 DXFC-200 质子交换膜燃料电池和燃料电池测试系统,将现场测得实际输出伏安特性曲线与所建模型输出曲线进行拟合,证明了模型的准确性和稳定性.在此基础上进行单因素纵向分析,并进一步运用正交实验进行多因素横向比较,分析了在低电流区域和高电流区域工作温度、压力、膜含水量对电池输出特性的影响程度.分析结果表明:在一定范围内提高温度、增大压力、增大膜含水量、减小加载幅度和加载速度可以有效改善电池性能;在低电流区域,工作温度对电池输出特性影响更显著,在高电流区域,膜含水量对其性能影响更显著.所建模型可以真实反映质子交换膜燃料电池的工作特性,对于改善电池性能,延缓电池衰减,制定燃料电池控制策略能够提供基础理论支持.

关键词: 质子交换膜燃料电池;输出特性;拟合;建模仿真;多因素

中图分类号: TM911.42 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)10-0144-08

PEMFC output characteristics modeling and multi-factor simulation analysis

SUN Shufa, YANG Jie, TANG Hualin, GE Anhua, XING Tao, MA Chao

(College of Engineering and Technology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) is a complex system which involves multiple disciplines, and its output characteristics are affected by many factors. This paper aims to analyze the influences of working temperature, pressure, membrane water content, loading amplitude, and loading speed on its output characteristics. Based on the mathematical model of PEMFC, a voltage dynamic model that considers the electric double layer capacitance effect was established, and simulation was carried out on the Matlab/Simulink platform. Using the self-made air-cooled self-humidified DXFC-200 PEMFC and the fuel cell test system, the actual output volt-ampere curve was fitted to the model output curve, which proved the accuracy and stability of the model. On this basis, a longitudinal single-factor analysis was conducted. Besides, this study also conducted a multi-factor horizontal comparison by using an orthogonal experiment, and analyzed the impact of the operating temperature, pressure, and membrane water content on the output characteristics of the battery in low current region and high current region. Results show that the increase of the temperature, the pressure, and the water content of the membrane, and meanwhile decrease of the loading amplitude and the loading speed in a certain range could effectively improve the battery performance. In low current region, the operating temperature had a more important effect on the output characteristics of the battery. In high current region, the membrane moisture content had a more vital effect on the output characteristics of the battery. The research shows that the model can truly reflect the working characteristics of PEMFC. The study will provide theoretical support for improving battery performance, delaying battery attenuation and formulating fuel cell control strategy.

Keywords: proton exchange membrane fuel cell; output characteristic; fitting; modeling and simulation; multifactor

进入 21 世纪以来,高效率、低污染、低噪音、维修性好的燃料电池受到各国青睐.其中,质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell,

PEMFC)工作温度低、发电效率高(LHV)(40%~60%)、启停速度快(<1 min)、功率密度高、内部结构紧凑、污染零排放,被认为是代替传统能源的最佳能源^[1-3].

PEMFC 是一个非线性、强耦合、受环境影响比较大的一个复杂系统,其性能涉及电化学、流体力学、热力学等领域,若想研究 PEMFC 输出特性并对

收稿日期:2018-07-06

基金项目:中央高校基金科研业务费专项资金(2572016CB12)

作者简介:孙术发(1980—),男,副教授

通信作者:杨 洁,2263749057@qq.com

其进行优化,必须了解其内部反应机理和外部行为表达,建模是一种简明且直观的手段。PEMFC 输出特性模型有很多种,其中最主要的有两种——机理模型和经验模型^[4]。机理模型首先进行科学合理的假设,然后结合 PEMFC 构造和内部物理以及化学反应,分析相应参数对其输出特性的影响^[5]。Bernardi 等^[6]以及 Springer 等^[7]最早建立了适用于小型单电池的一维等温数学模型,Fuller 等^[8]、Nguyen 等^[9]、Wang 等^[10]建立了考虑沿气流道流向变化的二维模型,Dutta 等^[11]、Costamagna^[12]建立了对电池内部机理更为全面和详尽描述的三维模型。经验模型不需要考虑内部结构,而是依据燃料电池外部表达和统计学知识探究其输出特性规律^[13]。经验模型包括 Srinivasan 模型、Kim 模型、Lee 模型、Squadrito 模型、Mann 模型、Kulikovsky 模型等^[14-15]。机理模型能够精确地反映出燃料电池内部反应机理,但是其推导过程比较复杂,参数多且大多数不太容易获得,经验模型简单易用,但是其不能准确表达出电池内部反应信息,不利于电池结构参数的优化。近年来,结合机理模型和经验模型的半经验模型受到研究者的青睐,最常用的电压模型就是综合考虑了活化极化损失、欧姆极化损失、浓差极化损失的一种半经验模型。贺建军等^[16]在考虑不可逆电动势和双层电荷层的基础上,建立数学模型并在 Matlab/Simulink 仿真平台上进行仿真,证明了模型的稳定性。皇甫耿宜等^[17]建立了电压模型和电堆温度模型,研究了温度、压力以及活化面积对电池输出性能的影响。张洁等^[18]通过建立稳态模型,对输出端电压、各部分不可逆电压、功率和效率进行了分析,得出不同条件下电池最佳稳态输出特性。陈会翠^[19]建立了 PEMFC 等效电路模型和三维两相流模型,对燃料电池变载过程中的电压动态响应进行了仿真和实验研究,分析了电池寿命衰减的原因并提出了相应的措施。

本文在上述相关研究的基础上,建立了考虑双电层电容作用的 PEMFC 电压动态模型,在 Matlab/Simulink 仿真平台上进行了仿真。利用实验室自制风冷自增湿 DXFC-200 质子交换膜燃料电池和燃料电池测试系统,将现场测得实际输出伏安特性曲线与所建模型输出曲线进行拟合,证明了模型的准确性和稳定性。通过单因素纵向分析和多因素横向分析比较,研究了各个因素对电池输出特性的影响,并分析了不同加载幅度和不同加载速度下电池输出特性规律,对于改善电池性能,延缓电池衰减,制定燃料电池控制策略提供了基础理论支持。

1 PEMFC 输出特性建模与多因素仿真分析方案

为研究不同因素对 PEMFC 输出特性的影响,从而制定相应的控制策略,拟采用数学建模与计算机仿真相结合的方法,技术路线如图 1 所示。

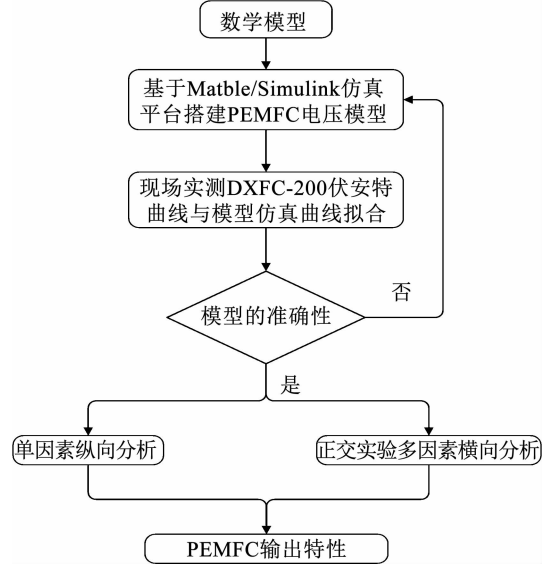


图 1 技术路线

Fig. 1 Technical route

2 PEMFC 建模

2.1 数学模型

理想情况下,质子交换膜燃料电池输出应为热力学电动势 E_{Nernst} ,但是在实际情况中,在电池工作中存在不可逆损耗,也就是所谓的极化电压——活化极化过电压 V_{act} 、欧姆极化过电压 V_{ohm} 、浓差极化过电压 V_{con} ^[20]。其电压输出公式如下^[21-22]:

$$V_{\text{cell}} = E_{\text{Nernst}} - V_{\text{act}} - V_{\text{ohm}} - V_{\text{con}}. \quad (1)$$

另外,电池内部还存在“双电荷层”现象,这种现象也是质子交换膜燃料电池动态运行的重要特征。通过并联一个电容可以模拟这种动态特性^[23],等效电路图如图 2 所示。其中, R_a 为 PEMFC 活化极化过电压和浓差极化过电压对应的活化等效电阻和浓差等效电阻的总和,电阻两端的电压记为 V_a ,电阻 R_{ohm} 为欧姆极化过电压对应的欧姆等效电阻。由于等效电容的存在平滑了电压下降或上升幅度,当电流突变时,电压平缓的达到稳定值^[24]。

热力学电动势是指没有损耗的理想电压,即能斯特电动势,可表示为^[25]

$$E_{\text{Nernst}} = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4} \times (T - 2.9815) + 4.308 \times 10^{-5} \times T \times [\ln(P_{\text{H}_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{\text{O}_2})]. \quad (2)$$

式中: P_{H_2} 、 P_{O_2} 分别为氢气分压和氧气分压; T 为电池温度。

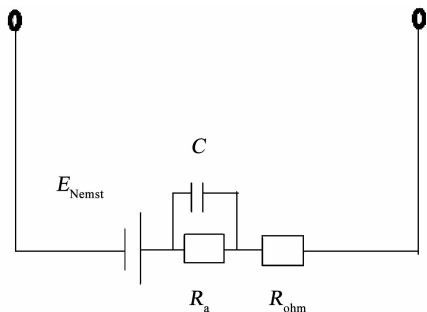


图 2 PEMFC 等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit of PEMFC

活化极化过电压可表示为

$$V_{act} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 T + \varepsilon_3 \ln(C_{O_2}) + \varepsilon_4 T \ln I, \quad (3)$$

式中,由文献[25]可知,经验系数分别为:

$$\varepsilon_1 = -0.9514,$$

$$\varepsilon_2 = 0.00286 + 0.0002 \ln A + 4.3 \times 10^{-5} \ln(C_{H_2}),$$

$$\varepsilon_3 = 7.4 \times 10^{-5},$$

$$\varepsilon_4 = -1.87 \times 10^{-4}.$$

根据亨利定律,即:

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08 \times 10^6 \times e^{\frac{-498}{T}}}, \quad (4)$$

$$C_{H_2} = \frac{P_{H_2}}{1.09 \times 10^6 \times e^{\frac{77}{T}}}. \quad (5)$$

式中: A 为有效活化面积; I 为电流; T 为电池温度; C_{O_2} 为氧气浓度质量分数; C_{H_2} 为氢气浓度质量分数。

欧姆极化过电压是指电子通过外电路流向阴极的过程中以及质子克服膜的阻碍作用而产生的损耗电压^[26]。其中,电子需要克服的阻抗记作常数 R_c , 质子需要克服的阻抗记作 ρ_m ^[27]。

$$V_{ohm} = IR_{int} = I \left(\frac{\rho_m \times l}{A} + R_c \right), \quad (6)$$

$$\rho_m = \frac{181.6 \times \left[1 + 0.03 \times \frac{I}{A} + 0.062 \times \left(\frac{T}{303} \right)^2 \times \left(\frac{I}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left(\lambda - 0.634 - 3 \times \frac{I}{A} \right) \exp(4.18 \times \frac{T-303}{T})}. \quad (7)$$

式中: T 为电池温度; I 为电流; λ 为质子交换膜的含水量; l 为质子交换膜的厚度; A 为质子交换膜的有效面积。

浓差极化过电压可表示为

$$V_{con} = 0.016 \times \ln \left(1 - \frac{J}{J_{max}} \right). \quad (8)$$

式中: J 为电流密度, J_{max} 为最大电流密度。

等效电容两端电压随电流的变化而动态变化,根据电路相关知识,其微分方程为:

$$\frac{dV_a}{dt} = \frac{I}{C} + \frac{V_a}{\tau}, \quad (9)$$

$$\tau = R_a C, \quad (10)$$

方程的解为

$$V_a = IR_a - Ce^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (11)$$

式中: τ 为时间常数, C 为等效电容。

2.2 Matlab/Simulink 建模

基于 Matlab/Simulink 软件,根据式(9)~(11)建立如图3所示的子系统,将其进行封装,并根据式(1)~(11)建立考虑双电层电容作用的 PEMFC 动态模型,如图4所示。模型输入量有电池工作温度、阴极和阳极气体压力、膜含水量、负载电流,输出量为电压。

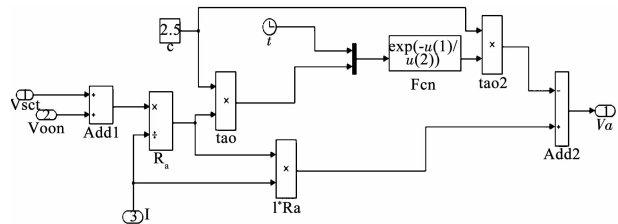


图 3 动态模型子系统

Fig. 3 Subsystem of dynamic model

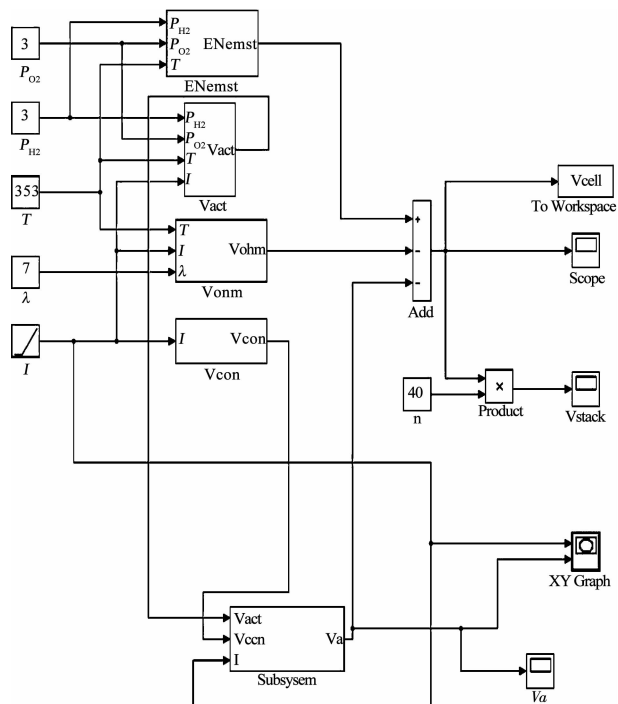


图 4 PEMFC 双电层电容动态模型

Fig. 4 Double layer capacitance dynamic model of PEMFC

3 实验与仿真分析

3.1 模型验证

利用实验室自制风冷自增湿 DXFC-200 质子交换膜燃料电池和燃料电池测试系统,将现场测得实际输出伏安特性曲线与所建模型输出曲线进行拟

合,验证模型的准确性和稳定性. 实验室自制风冷自增湿 DXFC-200 质子交换膜燃料电池参数见表 1,原理如图 5 所示. 图 6 为燃料电池测试系统正面及背面

面图,包括两支独立的管路系统——氧气供应系统和氢气供应系统,可用于氢氧燃料电池和氢空燃料电池的测试.

表 1 电堆参数

Tab. 1 Parameters of stack

工作温度/℃	氧气侧压力/atm	氢气侧压力/atm	膜含水量 λ	质子交换膜的有效面积/cm ²	膜厚/cm	电子通过流道克服的阻抗 R_C	最大电流密度/(A·cm ⁻²)	等效电容/F	片数 n
80	3	3	7	250	50×10^{-4}	0.000 1	1.5	2.5	40

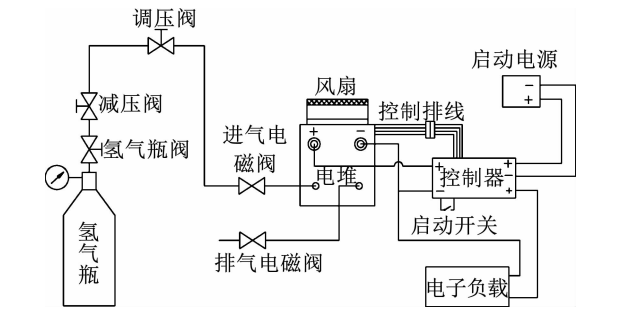


图 5 DXFC-200 原理图

Fig. 5 Principle of DXFC-200

氢气侧压力为 3 atm,膜含水量为 7 的条件下,单片电池输出电压、各部分损耗电压随负载电流变化的曲线. 从图 8 中可以看出,随着电流增大,电压呈下降趋势,这是由于受到不可逆电动势的影响. 活化过电压随负载电流的增大而增大,但是增长趋势越来越缓慢,说明活化极化在电流较低时起主要作用. 欧姆过电压和电流基本成线性关系. 浓差过电压随负载电流增大而增大,且增长趋势越来越陡,说明浓差极化在电流较高时起主要作用.

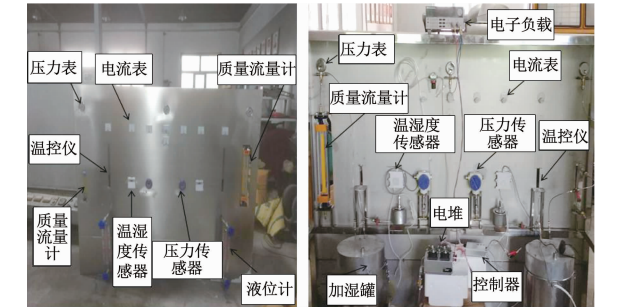


图 6 燃料电池测试系统正面及背面图

Fig. 6 Front and rear view of fuel cell test system

图 7 为 DXFC-200 现场实测输出电压与模型输出电压拟合曲线,从图中可以看出模型输出电压与实际输出电压基本吻合,模型具有良好的准确性.

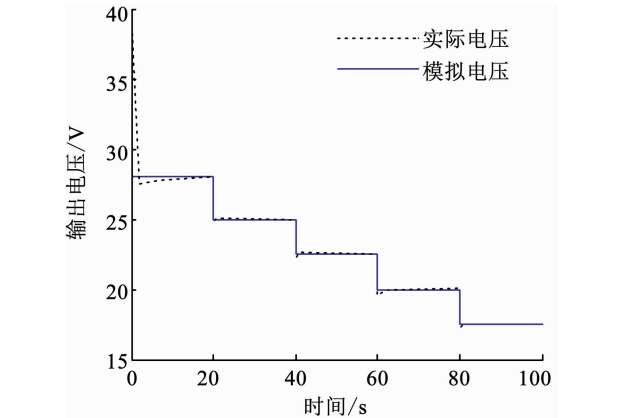


图 7 实际输出电压与模型输出电压拟合曲线

Fig. 7 Curve fitting of actual output voltage and model output voltage

3.2 仿真分析

图 8 为在电池温度 80 ℃,氧气侧压力为 3 atm,

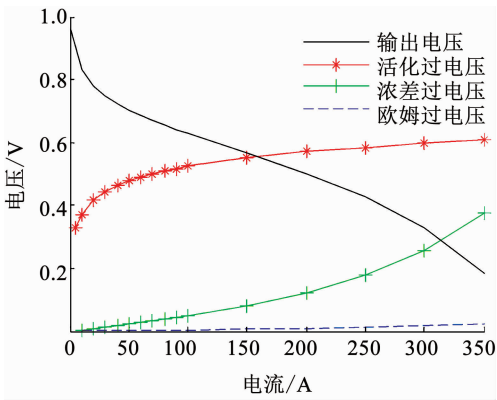


图 8 PEMFC 各部分电压随负载电流变化曲线

Fig. 8 Variation curves of each part of PEMFC's voltage with load current

3.2.1 单因素纵向分析 PEMFC 输出特性

针对燃料电池工作温度、氢气侧压力、氧气侧压力、膜含水量对 PEMFC 输出特性的影响,进行单因素纵向分析. 图 9 为不同工况下 PEMFC 输出电压变化曲线图.

1) 温度对 PEMFC 输出性能的影响. 图 9(a) 是在氢气侧压力 3 atm,氧气侧压力 3 atm,膜含水量为 7 的条件下,工作温度分别为 60℃、70℃、80℃ 时 PEMFC 输出电压变化曲线. 从图中可以看出,在同一电流条件下,随着温度增大,电池输出性能显著提高,这是因为当工作温度提高时,催化剂活性显著提高,同时温度提高使得膜内的水扩散系数与气体扩散系数增大,从而导致膜内传质增加、膜电阻减小,输出性能提高.

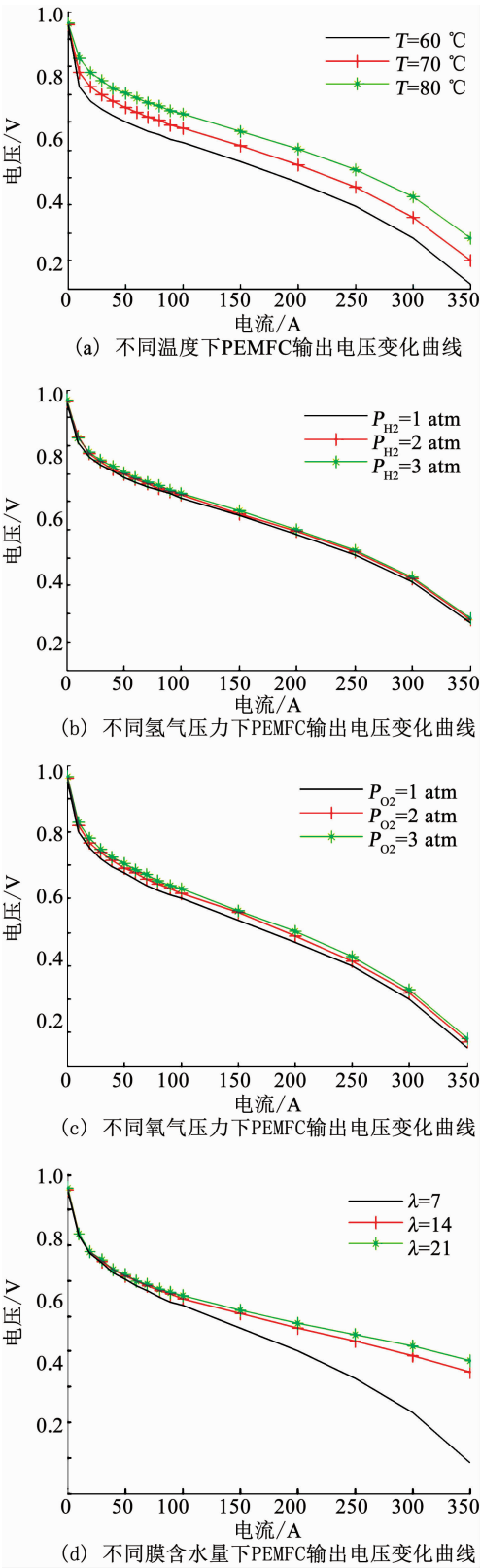


图 9 不同工况下 PEMFC 输出电压变化曲线

Fig. 9 Variation curve of PEMFC output voltage under different working conditions

2) 氢气侧压力和氧气侧压力对 PEMFC 输出性能的影响. 图 9(b)、(c)是在温度 80 ℃,膜含水量为 7 的条件下,氢气侧压力和氧气侧压力分别为 1、2、3 atm 时 PEMFC 输出电压变化曲线. 从图中可以看

出,在同一电流条件下,随着阴极和阳极压力增大,电池输出性能得到提高,这是因为增大阴极或者阳极侧气体压力,提高了反应气体浓度,加快了反应的进行.

3) 膜含水量对 PEMFC 输出性能的影响. 图 9(d)是在温度 80 ℃,氢气侧压力 3 atm,氧气侧压力 3 atm,膜含水量分别为 7、14、21 的条件下,PEMFC 输出电压变化曲线. 从图中可以看出,在同一电流条件下,随着膜含水量增大,电池输出性能显著提高,这是因为当含水量增大时,质子的传导速度会随之增加,电导率增大,膜电阻变小,从而使得电池输出性能提高.

对比图 9(a)、(b)、(c)、(d)所得仿真结果以及文献[13,28-29],得出在一定范围内提高温度,质子交换膜燃料电池输出电压显著提高,在一定范围内增大氢气侧和氧气侧压力,输出电压少量提高,在一定范围内增大膜含水量,低电流区域输出电压少量提高,高电流区域输出电压显著提高. 在质子交换膜燃料电池输出性能的影响因素中,温度的影响可能最大,而氢气侧压力、氧气侧压力、膜含水量的影响较小,采用正交实验可以进行多因素的横向比较并验证这一结论.

3.2.2 PEMFC 的动态响应特性仿真分析

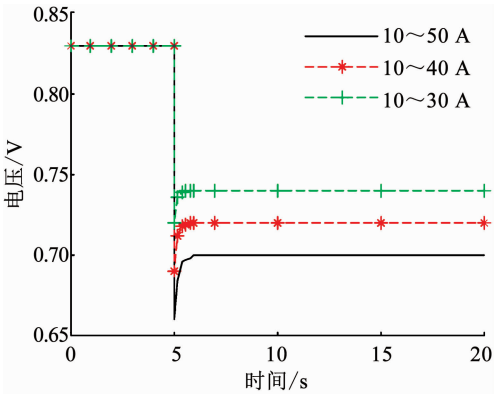
PEMFC 的动态响应特性直接影响着电池的寿命和性能,因为随着工况的变化,燃料电池性能会受到不同程度的影响. 在实际应用中,对于燃料电池动态响应特性的研究显得更有价值. 影响燃料电池动态响应性的因素有很多,包括加载幅度、加载速度、过量系数、温度、湿度和压力等,如图 10 所示为 PEMFC 动态响应曲线图.

图 10(a)为不同加载幅度下 PEMFC 动态响应曲线,电池运行条件为工作温度 80 ℃,氢气侧压力 3 atm,氧气侧压力 3 atm,膜含水量 7,电流初始值为 10 A,在第 5 s 输入一个脉冲电流. 从图中可以看出,电流从 10 A 分别跃阶到 30、40、50 A 时均出现电压下冲现象,且跃阶幅度越大下冲量越大,响应时间也越长.

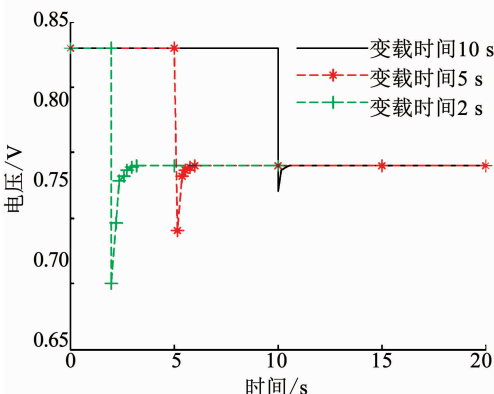
图 10(b)为不同加载速度下 PEMFC 动态响应曲线,电池运行条件为工作温度 80 ℃,氢气侧压力 3 atm,氧气侧压力 3 atm,膜含水量 7,电流初始值为 10 A,分别在第 2、5、10 s 输入一个大小为 30 A 的脉冲电流. 从图中可以看出,电流从 10 A 分别在 2、5、10 s 跃阶到 30 A 时均出现电压下冲现象,除此之外,电流加载速度越快电压下冲量就越大,响应时间也越长.

产生上述现象的原因是因为在加载过程中燃料

电池需要更多的反应气体,但是流道中气体的响应速度比电流变化的速度慢很多,所以过快的加载速度、过大的加载幅度都会造成燃料电池动态响应能力不足,这也是燃料电池性能衰减的重要潜在影响因素.



(a) 不同加载幅度下PEMFC动态响应曲线



(b) 不同加载速度下PEMFC动态响应曲线

图 10 PEMFC 动态响应曲线

Fig. 10 PEMFC dynamic response curves

4 多因素横向分析 PEMFC 输出特性

通过电压动态建模及仿真结果的分析,PEMFC 输出电压由于不可逆电压的影响随电流增大而逐渐减小,且在低电流区域活化极化起主要作用,在高电流区域浓差极化起主要作用,工作温度、阴极和阳极侧气体压力、膜含水量等多种因素都对输出电压有影响. 在单因素纵向分析的基础上,以输出电压为指标,选取 4 因素 3 水平 $L_9(3^4)$ 正交实验^[30],进行多因素横向分析比较^[31],分别分析在低电流区域和高电流区域不同因素对电池输出性能的影响程度. 表 2 为正交实验因素水平表.

1) 低电流区域实验方案设计与结果直观分析. 在低电流区域,指定电流值为 30 A,输出电压为指标,通过正交实验进行验证,表 3 为低电流区域实验方案设计与结果直观分析表. 表 3 中 K1、K2、K3 分别表示每个因素所进行 3 次实验所得的输出电压平

均值, R 为平均数的极差, R 越大表明该因素的水平变化对输出电压的影响越大. 由表 3 可以看出,各因素对输出电压的影响程度排序为:工作温度 (A) > 氧气侧压力 (B) > 氢气侧压力 (C) > 膜含水量 (D), 在低电流区域,条件为工作温度 80 ℃、氧气侧压力 3 atm、氢气侧压力 3 atm、膜含水量 21 时,输出电压性能最好.

表 2 $L_9(3^4)$ 因素—水平表

Tab. 2 $L_9(3^4)$ factor-level table

水平	A 工作温度 /℃	B 氧气侧 压力/atm	C 氢气侧 压力/atm	D 膜含水量
1	60	1	1	7
2	70	2	2	14
3	80	3	3	21

表 3 低电流区域正交实验结果及分析

Tab. 3 Orthogonal experiment results and analysis of low current area

试验号	因素水平				输出电压
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	0.603 6
2	1	2	2	2	0.637 3
3	1	3	3	3	0.655 1
4	2	1	2	3	0.671 1
5	2	2	3	1	0.686 9
6	2	3	1	2	0.686 9
7	3	1	3	2	0.724 4
8	3	2	1	3	0.727 6
9	3	3	2	1	0.741 6
K1	0.632	0.666	0.673	0.677	影响程度
K2	0.682	0.684	0.683	0.683	A > B > C > D
K3	0.731	0.695	0.689	0.685	
R	0.099	0.029	0.016	0.008	
最佳水平	A3	B3	C3	D3	

2) 高电流区域实验方案设计与结果直观分析. 在高电流区域,指定电流值为 300 A,输出电压为指标,通过正交实验进行验证,表 4 为高电流区域实验方案设计与结果直观分析表. 由表 4 可以看出,各因素对输出电压的影响程度排序为:膜含水量 (D) > 工作温度 (A) > 氧气侧压力 (B) > 氢气侧压力 (C), 在低电流区域,条件为工作温度 80 ℃、氧气侧压力 3 atm、氢气侧压力 2 atm、膜含水量 21 时,输出电压

性能最好.

表 4 高电流区域正交实验结果及分析
Tab. 4 Orthogonal experiment results and analysis of high current area

试验号	因素水平				输出电压
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	0.141 0
2	1	2	2	2	0.413 5
3	1	3	3	3	0.417 8
4	2	1	2	3	0.433 9
5	2	2	3	1	0.248 1
6	2	3	1	2	0.422 0
7	3	1	3	2	0.461 6
8	3	2	1	3	0.489 8
9	3	3	2	1	0.322 3
K1	0.324	0.345	0.351	0.237	影响程度 D>A>B>C
K2	0.368	0.384	0.390	0.432	
K3	0.425	0.387	0.376	0.447	
R	0.101	0.042	0.039	0.210	
最佳水平	A3	B3	C2	D3	

5 结 论

1)建立了 PEMFC 半经验模型,所建模型具有良好的稳定性,能反映质子交换膜燃料电池的真实工作特性,能有效进行燃料电池输出特性研究. 在 Simulink 环境中进行仿真,得出由于受不可逆电压的影响,燃料电池输出电压小于理想电动势,且在低电流区域活化极化起主要作用,在高电流区域浓差极化起主要作用.

2)进一步进行单因素纵向比较,分析工作温度、阴极和阳极侧气体压力、膜含水量对 PEMFC 输出性能的影响,得出在一定范围内,提高工作温度、增大阴极和阳极侧气体压力、增大膜含水量可以改善燃料电池输出性能. 考虑双电层电容作用,分析 PEMFC 的动态响应特性,得出在一定条件下,过快的加载速度、过大的加载幅度都会造成燃料电池动态响应能力不足,造成燃料电池性能衰减.

3)在单因素纵向分析的基础上,通过正交实验进行多因素横向分析比较,得出一定条件下,在低电流区域,工作温度对燃料电池输出性能影响较大,在高电流区域,膜含水量对燃料电池输出性能影响较大.

4)与现有研究工作相比,本文在单因素纵向分析的基础上进行了多因素横向分析比较,对 PEMFC 输出特性的研究工作具有一定的指导意义.

参考文献

[1] WILLIAMSON S S, EMADI A. Comparative assessment of hybrid electric and fuel cell vehicles based on comprehensive well-to-wheels efficiency analysis[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(3): 856. DOI:10.1109/tvt.2005.847444

[2] O' HAYRE R, CHA S, COLELLA W, et al. Fuel cell fundamentals [M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2009: 22

[3] 王昕灿, 吕立亚, 吴松松, 等. 一种新型动力电池状态监测系统 设计[J]. 森林工程, 2015, 31(2): 135

WANG Xincan, LV Liya, WU Songsong, et al. Design of a new type of monitoring system for the state of power battery [J]. Forest Engineering, 2015, 31(2): 135. DOI: 10.16270/j.cnki.slge.2015.02.030

[4] 李鸿鹏. 质子交换膜燃料电池系统建模及控制方法的研究与实现[D]. 天津: 天津理工大学, 2017

LI Hongpeng. Research and realization of PEMFC system modeling and control method[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2017

[5] 潘瑞, 杨朵, 陈宗海. 质子交换膜燃料电池建模方法研究综述 [J]. 系统仿真技术及其应用, 2017, 18: 101

PAN Rui, YANG Duo, CHEN Zonghai. Review of modeling method study for proton exchange membrane fuel cell[J]. System Simulation Technology and Application, 2017, 18: 101

[6] BERNARDI D M, VERBRUGGE M W. Mathematical model of a gas diffusion electrode bonded to a polymer electrolyte [J]. AIChE, 1991, 37(8): 1151. DOI:10.1002/aic.690370805

[7] SPRINGER T E, WILSON M S, GOTTESFELD S. Modeling and experimental diagnostics in polymer electrolyte fuel cells[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1993, 140(12): 3513. DOI:10.1149/1.2221120

[8] FULLER T F, NWE MAN J. Water and thermal management in solid-polymer-electrolyte fuels cells [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1993, 140(5): 1218

[9] NGUYEN T V, WHITE R E. Water and heat management model for proton-exchange-membrane fuel cells [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1993, 140(8): 2178

[10] WANG Z H, WANG C Y, CHAN K S. Two-phase flow and transport in the air cathode of proton exchange membrane fuel cells [J]. Journal of Power Sources, 2001, 94(1): 40. DOI:10.1016/s0378-7753(00)00662-5

[11] DUTTA S, SHIMPALEE S, van ZEE J W. Three-dimensional numerical simulation of straight channel PEM fuel cells[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2000, 30(2): 135. DOI:10.1023/a:1003964201327

[12] CODTAMAGNA P. Transport phenomena in polymeric membrane fuel cells[J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56(2): 323. DOI:10.1016/S0009-2509(00)00232-3

[13] 杨朵, 潘瑞, 汪玉洁, 等. 质子交换膜燃料电池动态建模与仿真[J]. 系统仿真技术及其应用, 2017(19): 78

YANG Duo, PAN Rui, WANG Yujie, et al. Dynamic modeling and simulation of proton exchange membrane fuel cell[J]. System Simulation Technology and Application, 2017(19): 78

[14] ARGYROPOULOS P, SCOTT K, SHUKLA A K, et al. A semi-empirical model of the direct methanol fuel cell performance: Part I. Model development and verification [J]. Journal of Power Sources, 2003, 123(2): 190. DOI:10.1016/s0378-7753(03)

00558-5

[15] CHEDDIE D, MUNROE N. Review and comparison of approaches to proton exchange membrane fuel cell modeling [J]. Journal of Power Sources, 2005, 147(1/2): 72. DOI:10.1016/j.jpowsour.2005.01.003

[16] 贺建军, 孙超. 质子交换膜燃料电池的建模与仿真分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(2): 566
HE Jianjun, SUN Chao. Modeling and simulation analysis of proton exchange membrane fuel cell [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(2): 566

[17] 皇甫宜耿, 石麒, 李玉忍. 质子交换膜燃料电池系统建模仿真与控制[J]. 西北工业大学学报, 2015, 33(4): 682
HUANGFU Yigeng, SHI Qi, LI Yuren. Modelling and simulation system of proton exchange membrane fuel cell [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2015, 33(4): 682. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2758.2015.04.027

[18] 张洁, 刘立群. 不同因素对质子交换膜燃料电池的影响[J]. 太原科技大学学报, 2018, 39(1): 12
ZHANG Jie, LIU Liqun. Effect of different factors on the proton exchange membrane fuel cell [J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2018, 39(1): 12. DOI: 10.3969/j.issn.1673-2057.2018.01.003

[19] 陈会翠. 影响燃料电池寿命的动态响应分析及经济性评价[D]. 北京: 清华大学, 2015
CHEN Huicui. Analysis of the dynamic response affecting the fuel cell lifetime and economic evaluation of the fuel cell [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015

[20] 徐腊梅. PEM 燃料电池动态特性的建模与仿真研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007
XU Lamei. Modeling and simulation for dynamic behavior of PEM fuel cell [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007

[21] BIZON N, OPROESCU M H, RACEANU M, et al. Efficient energy control strategies for a standalone renewable/fuel cell hybrid power source[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 90: 93. DOI:10.1016/j.enconman.2014.11.002

[22] ZHAN Yuedong, GUO Youguang, ZHU Jianguo, et al. Power and energy management of grid/PEMFC/battery/supercapacitor hybrid power sources for UPS applications[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2015, 67: 598. DOI:10.1016/j.ijepes.2014.12.044

[23] KHAN M J, IQBAL M T. Dynamic modeling and simulation of a small wind-fuel cell hybrid energy system[J]. Renewable Energy, 2001, 30(3): 421. DOI:10.1016/j.renene.2004.05.013

[24] 王瑞敏. 基于神经网络辨识模型的质子交换膜燃料电池系统建模与控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008
WANG Ruimin. Modeling and control based on proton exchange membrane fuel cell system neural network identification model [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008

[25] MANN R F, AMPHLETT J C, HOOPER M A I, et al. Development and application of a generalized steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell [J]. Journal of Power Sources, 2000, 86(1/2): 173. DOI:10.1016/S0378-7753(99)00484-X

[26] 贾秋红, 韩明, 邓斌, 等. 质子交换膜燃料电池动态建模及特性分析[J]. 电化学, 2011, 17(4): 438
JIA QiuHong, HAN Ming, DENG Bin, et al. Dynamic modeling and characteristic analysis of proton exchange membrane fuel cell [J]. Electrochemistry, 2011, 17(4): 438. DOI: 10.13208/j.electrochem.2011.04.009

[27] MENCH M M. Fuel cell engines [M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. DOI:10.1002/9780470209769

[28] 祝令昆. 质子交换膜燃料电池系统运行性能仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016
ZHU Lingkun. Simulation of performance of proton exchange membrane fuel cell system [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016

[29] 韩闯. 质子交换膜燃料电池控制与建模研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2016
HAN Chuang. Research on modeling and control of proton exchange membrane fuel cell [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016

[30] 曾金煌, 胡锦轩, 刘全涛. 基于正交实验评价多因素对组合车辙试件的影响[J]. 交通科技, 2018, 286(1): 118
ZENG Jinhuang, HU Jinxuan, LIU Quantao. The influence of multi-factors on composite rutting structure based on orthogonal experiment [J]. Transportation Science & Technology, 2018, 286(1): 118. DOI:10.3963/j.issn.1671-7570.2018.01.034

[31] 李瑞歌, 张梦娇, 吴璐璐, 等. 基于 SPSS 软件多因素方差分析在化学实验中的应用[J]. 农业网络信息, 2017(4): 22
LI Ruige, ZHANG Mengjiao, WU Lulu, et al. Application of multi-factor variance analysis in chemical experiment based on SPSS software [J]. Agriculture Network Information, 2017(4): 22. DOI:10.3969/j.issn.1672-6251.2017.04.006

(编辑 张 红)