

2011-11-28

## Dynamic Modeling and Characteristic Analysis of Proton Exchange Membrane Fuel Cell

Qiu-Hong JIA

Ming HAN

Bin DENG

Cai-Zhi ZHANG

---

### Recommended Citation

Qiu-Hong JIA, Ming HAN, Bin DENG, Cai-Zhi ZHANG. Dynamic Modeling and Characteristic Analysis of Proton Exchange Membrane Fuel Cell[J]. *Journal of Electrochemistry*, 2011 , 17(4): Article 15.

DOI: 10.61558/2993-074X.2868

Available at: <https://jelectrochem.xmu.edu.cn/journal/vol17/iss4/15>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electrochemistry. It has been accepted for inclusion in Journal of Electrochemistry by an authorized editor of Journal of Electrochemistry.

# 质子交换膜燃料电池动态建模及特性分析

贾秋红<sup>1,2</sup>, 韩明<sup>3\*</sup>, 邓斌<sup>1</sup>, 张财志<sup>3</sup>

(1. 西南交通大学新型驱动技术中心, 四川 成都 60031; 2. 重庆理工大学重庆汽车学院, 重庆 400050;

3. 淡马锡理工学院工程学院, 新加坡 529757)

**摘要:** 根据分析质子交换膜燃料电池电压的影响因素, 利用理想气体状态方程的微分形式求得氢气和氧气分压, 并且结合热力学电动势及燃料电池的各种损耗, 建立 PEMFC 的动态模型. 合理设定相关参数, 得到 PEMFC 的稳态模型, 其仿真程度与实验结果有较好的吻合, 表明该模型的正确性、可操作性和有效性. 利用建立的动态模型分析在载荷突变的情况下, 输出电压和氢气分压的动态响应特性, 从而达到准确模拟实际燃料电池系统的工作性能, 评价预测燃料电池的承载能力和指导燃料电池堆操作的目的.

**关键词:** 质子交换膜燃料电池; 动态模型; 氢气分压; 载荷突变; 动态响应特性

**中图分类号:** TM911

**文献标识码:** A

燃料电池是新世纪最有前途的清洁能源之一, 有可能取代热机成为主要的能量转换方式. 其中质子交换膜燃料电池 (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) 具有功率密度高、能量转换效率高、可低温快速启动和环境友好等优点, 成为了目前世界上发展最为迅速的燃料电池<sup>[1-2]</sup>. 到目前为止, 国内外已就 PEMFC 特性作了大量的研究探索, 并取得了重要的研究进展, 其中大多是依据稳态数学模型. 相比之下, 有关动态模型的研究尚存在不足<sup>[3-4]</sup>. 而 PEMFC 动态特性研究对于了解其运行机理、优化电池结构以及系统控制非常重要. 因此, 近年来, 燃料电池动态特性的研究已成为该领域的一个热点课题. Khan<sup>[4]</sup> 等发展了一个同时考虑电池电化学反应瞬态过程、传热传质和反应气体流动过程的 PEMFC 非稳态模型; Hernandez<sup>[5]</sup> 等应用非线性状态空间模拟方法研究了流道内的液态水对 PEMFC 动态特性的影响; Buchholz<sup>[6]</sup> 等用非线性系统识别方法对 PEM 电池堆的动态特性进行了研究; Francol<sup>[7]</sup> 等发展了 PEMFC 瞬态分析的多尺度动态机理模型; 莫志军<sup>[8]</sup> 等利用“黑箱”模型就质子交换膜燃料电池进行了建模与动态仿真研究; 胡桂林<sup>[9]</sup> 等发展了一个依据计算流体动力学的非稳态、非等温的三维两相流数

学模型. 以上动态模型的建立主要是采用分布参数模型, 仿真精确度高、能够模拟电池内部状态的空间分布, 但仿真占用时间多, 收敛速度慢. 本文在 PEMFC 经验模型的基础上, 通过理想气体状态方程推导求得氢气和氧气分压的计算公式, 建立了一种 PEMFC 动态特性建模和仿真的简单实用方法, 利用 Matlab/Simulink 工具对电池堆在载荷突变情形下电池电压、反应气体压力的动态响应特性模拟实际燃料电池系统的工作性能. 研究结果表明, 该方法可以应用于燃料电池的动态特性仿真分析、优化设计和燃料电池系统的自动控制.

## 1 PEMFC 工作原理及电化学模型

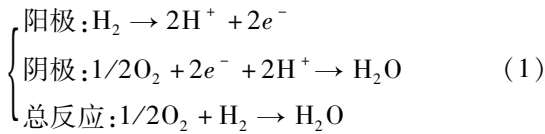
### 1.1 PEMFC 的工作原理

一个典型的 PEMFC 由集流板、流场板、气体扩散层、催化层和质子交换膜等组成. PEMFC 以全氟磺酸型的固体聚合物为电解质, 铂/碳或铂-铈/碳为电催化剂, 氢或净化重整气为燃料, 空气或纯氧为氧化剂, 带有气体流动通道的石墨板或表面改性的金属板为双极板. 电池电极是一种多孔气体扩散电极, 一般由扩散层和催化层组成, 扩散层一般由碳纸或碳布制作, 其作用是支撑催化层、收集电流, 并为电化学反应提供电子通道、气体通道和排水通道. 催化层则是发生电化学反应的场所,

是电极的核心部分。

当分别向阳极和阴极供给氢气与氧气时,反应气体经扩散层扩散,进入多孔阳极的氢原子被催化剂吸附并分离为氢离子和电子,氢离子经由质子交换膜转移到阴极(正极),电子在电极内传递至负极(阳极)集流板经外电路负载流向阴极,阴极催化层氢离子和氧原子结合成水分子,生成的水通过电极随反应尾气排出。

电极反应如下:



## 1.2 电池的电化学模型

PEM 燃料电池单电池在反应生成液态水的情况下其理论标准电势为 1.229 V,但由于不可逆损失,实际电池电势随平衡电势的降低而下降。燃料电池的不可逆损失常被称为极化过电势或者过电压。极化的产生主要有 3 种原因:①活化极化;②欧姆极化;③浓差极化,从而导致燃料电池实际电压小于理论电势。

质子交换膜燃料电池单电池的输出电压  $V_{\text{cell}}$  [10] 可用式(2)表示:

$$V_{\text{cell}} = E_{\text{Nernst}} - \eta_{\text{act}} - \eta_{\text{ohm}} - \eta_{\text{con}} \quad (2)$$

式中,  $E_{\text{Nernst}}$  是热力学电动势;  $\eta_{\text{act}}$  是活化过电压;  $\eta_{\text{ohm}}$  是欧姆过电压;  $\eta_{\text{con}}$  是浓差过电压。

由  $N$  个燃料电池单体串联在一起的燃料电池堆,其电压  $V_{\text{st}}$  可用式(3)表示:

$$V_{\text{st}} = NV_{\text{cell}} \quad (3)$$

### 1) 热力学电动势

根据 Nernst 方程由氢气、氧气组成的燃料电池,热力学电动势为 [3]:

$$E_{\text{Nernst}} = \frac{\Delta G}{2F} + \frac{\Delta S}{2F}(T - T_{\text{ref}}) + \frac{RT}{2F}[\ln(P_{\text{H}_2}) + \frac{1}{2}\ln(P_{\text{O}_2})] \quad (4)$$

式中,  $\Delta G$  表示电池反应 Gibbs 自由能的变化 (J/mol);  $F$  是法拉第常数 (96487C);  $\Delta S$  是电池反应的熵变化 (J/mol);  $R$  是气体常数 (8.314 J/K·mol);  $P_{\text{H}_2}$  是氢气在阳极催化剂/气体界面的分压 (atm);  $P_{\text{O}_2}$  是氧气在阴极催化剂/气体界面的分压 (atm);  $T$  是电池温度 (K);  $T_{\text{ref}}$  表示参考温度 (K); 如以标准大气压和常温下的  $\Delta G$ 、 $\Delta S$  和  $T_{\text{ref}}$  代入上式,得到简化的表达式为:

$$E_{\text{Nernst}} = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4} \times (T - 298.15) + 4.308 \times 10^{-5} \times T \times (\ln(P_{\text{H}_2}) + \frac{1}{2}\ln(P_{\text{O}_2})) \quad (5)$$

### 2) 活化过电压

由电池阴极和阳极产生的活化过电压  $\eta_{\text{act}}$  [11] 表示如下:

$$\eta_{\text{act}} = -0.9514 + 0.0032 \times T - 1.87 \times 10^{-4} \times T \times \ln(i) + 7.4 \times 10^{-5} \times T \times \ln(C_{\text{O}_2}) \quad (6)$$

式中,  $C_{\text{O}_2}$  为气液界面溶解氧的浓度,由 Henry 定律可知:

$$C_{\text{O}_2} = P_{\text{O}_2} / [5.08 \times 10^6 \exp(-498/T)] \quad (7)$$

### 3) 浓差极化过电压

浓差过电压决定反应物传递到反应区以及产物的排出速率,有限的传递速率导致电化学反应区氧气和氢气浓度低于主流区的浓度。文献[12-13]将浓差过电压  $\eta_{\text{con}}$  表示为:

$$\eta_{\text{con}} = m e^{ni} \quad (8)$$

式中,  $m$  是与温度有关的质量传递系数,  $n$  是催化层中电化学反应产物的增长率。  $m$  和  $n$  在通常情况下约为  $3 \times 10^{-5}$  V 和  $8 \times 10^{-3}$  cm<sup>2</sup>·mA<sup>-1</sup> [14]。

### 4) 欧姆极化过电压

欧姆电阻主要是由于质子交换膜的膜电阻  $R_m$  和阻碍电子通过膜的阻抗  $R_c$  引起的,可由式(9)表示:

$$\eta_{\text{ohm}} = iR_{\text{ohm}} = i(R_m + R_c) \quad (9)$$

由于离子电荷传输比电子电荷传输更难,其在欧姆电阻中占主要作用 [14],因此不妨忽略电子通过膜的阻抗作用。

根据文献[15],质子交换膜的阻抗  $R_m$  可用式(10)表示:

$$R_m = \frac{r_M \sigma}{A} \quad (10)$$

式中,  $\sigma$  是质子交换膜的厚度 ( $\mu\text{m}$ );  $A$  是膜的有效面积 (cm<sup>2</sup>)。就 Nafion 系列,其质子交换膜的电阻率  $r_M$  可用以下的经验式(11)表示 [16]:

$$r_M = \frac{181.6 [1 + 0.03(\frac{i}{A}) + 0.062(\frac{T}{303})^2(\frac{i}{A})^{2.5}]}{[\lambda - 0.634 - 3(\frac{i}{A})] \exp(4.18[\frac{T-303}{T}])} \quad (11)$$

式中,  $\lambda$  表示质子交换膜的含水量,是一个可调整的参数,乃为气体相对湿度和化学计量数的函数,由电池实际工作状态决定,其值一般在 14 ~

23 之间<sup>[17]</sup>, 本文取 20.

## 2 PEMFC 的动态模型建立

燃料电池是一种在稳态下能够提供可靠功率的能源, 但它不能为快速的瞬态电流载荷作出及时响应. 其中主要的原因即在燃料电池内部的电化学反应和热动力学与机械附件系统未能达到同步匹配. 为了能够准确评估和预测燃料电池在不同瞬态条件下(燃料电池终端的电气故障、燃料电池车的启动, 加速和制动等)的状况, 建立燃料电池动态模型的仿真是非常必要的<sup>[18]</sup>.

### 2.1 假设条件

根据实际的实验操作条件, 本模型作如下假设:

- 1) 燃料电池各气体均为理想气体;
- 2) 电池气体流道内气体压力处处相等;
- 3) 电池内的温度处处相等, 水为液态水;
- 4) 各单电池的性能参数相同, 电池堆性能参数是各单电池性能参数的累加.

### 2.2 气体摩尔流量

- 1) 气体反应的摩尔流量

根据法拉第定律和式(1)、(2)和(3), 在给定电流  $I$  的条件下, 由  $N$  个单电池组成的电池堆参加电化学反应消耗掉的氢和氧摩尔流量( $q_{H_2,r}$ ,  $q_{O_2,r}$ )可分别用下式表示:

$$\begin{cases} q_{H_2,r} = \frac{I}{2F}N \\ q_{O_2,r} = \frac{I}{4F}N \end{cases} \quad (12)$$

- 2) 输入气体的摩尔流量

$$q_{H_2,in} = q_{H_2,r}/U_f \quad (13)$$

式中,  $U_f$  是氢的利用率, 一般情况下, 氢的利用率为 80% ~ 90%<sup>[19]</sup>, 本文取 85%.

### 2.3 气体分压

依照假设条件, 各气体均应满足理想气体状态方程, 对氢气, 有方程:

$$P_{H_2} V_{H_2} = n_{H_2} RT \quad (14)$$

式中  $P_{H_2}$  为氢气的气体分压 (atm);  $V_{H_2}$  和  $n_{H_2}$  分别表示氢气在电池堆中所占的体积及其摩尔数;  $R$  为通用气体常数 (8.314 J/mol · K).

以式(14)对时间求导数得:

$$\frac{d}{dt} P_{H_2} = \frac{RT}{V_{H_2}} \times \frac{d}{dt} n_{H_2}$$

$$\text{因 } \frac{d}{dt} n_{H_2} = q_{H_2,in} - q_{H_2,out} - q_{H_2,r}$$

$$\text{即 } \frac{d}{dt} P_{H_2} = \frac{RT}{V_{H_2}} \times (q_{H_2,in} - q_{H_2,out} - q_{H_2,r}) \quad (15)$$

此处,  $q_{H_2,in}$  和  $q_{H_2,out}$  分别表示入口处和出口处氢的摩尔流量.

$$\text{按文献[20], 出口处氢的摩尔流量可表示为 } q_{H_2,out} = K_{H_2} \times P_{H_2} \quad (16)$$

式中,  $K_{H_2}$  为氢气的阀摩尔值常数 [kmol/(s · atm)]. 所以  $\frac{d}{dt} P_{H_2} = \frac{RT}{V_{H_2}} \times (q_{H_2,in} - K_{H_2} \times P_{H_2} - q_{H_2,r})$ . 将上式两边作拉普拉斯变换并结合式(12)和(13)得:

$$P_{H_2} = \frac{RT}{RTK_{H_2} + V_{H_2} \times s} \times (q_{H_2,in} - q_{H_2,r}) = \frac{1/K_{H_2}}{1 + \frac{V_{H_2}}{RTK_{H_2}} \times s} \times \left( \frac{1}{U_f} - \frac{1}{1 + \tau_e s} \right) \times \frac{1}{2F} N \quad (17)$$

同理可得:

$$P_{O_2} = \frac{1/K_{O_2}}{1 + \frac{V_{O_2}}{RTK_{O_2}} \times s} \times \left( 2 \times \frac{1}{\gamma} \times \frac{1}{U_f} - \frac{1}{1 + \tau_e s} \right) \times \frac{1}{4F} N \quad (18)$$

### 2.4 PEMFC 的动态模型

综合式(2)、(5) ~ (11)和(17) ~ (18)可得到 PEMFC 的动态模型. 本文使用 Matlab/Simulink 进行模型的搭建及子系统封装, 其建立的 PEMFC 仿真模块框图如图 1 所示.

## 3 PEMFC 模型实验验证

### 3.1 仿真参数的设定

为了能够实现仿真模型的运行, 一些必要的物理参数须有确定的值, 本模型参数取值均取自实际的实验条件. 表(1)列出 1.2 kW PEMFC 的动态模型仿真参数.

### 3.2 稳态电压电流特性分析及实验验证

假设  $\tau_e$ 、 $\tau_{H_2}$ 、 $\tau_{O_2}$  等为零系统达到稳态, 然后在 Matlab/Simulink 环境下计算稳态模型  $V \sim I$  特性曲线, 并与实验结果相比较, 验证模型的准确性. 对 1.2 kW PEMFC, 实验测试的参数设定为: 温度为 323.15 K, 阳极和阴极气体的进口压力分别为 2 atm (203 kPa) 和 3.5 atm (355 kPa), 相对湿度

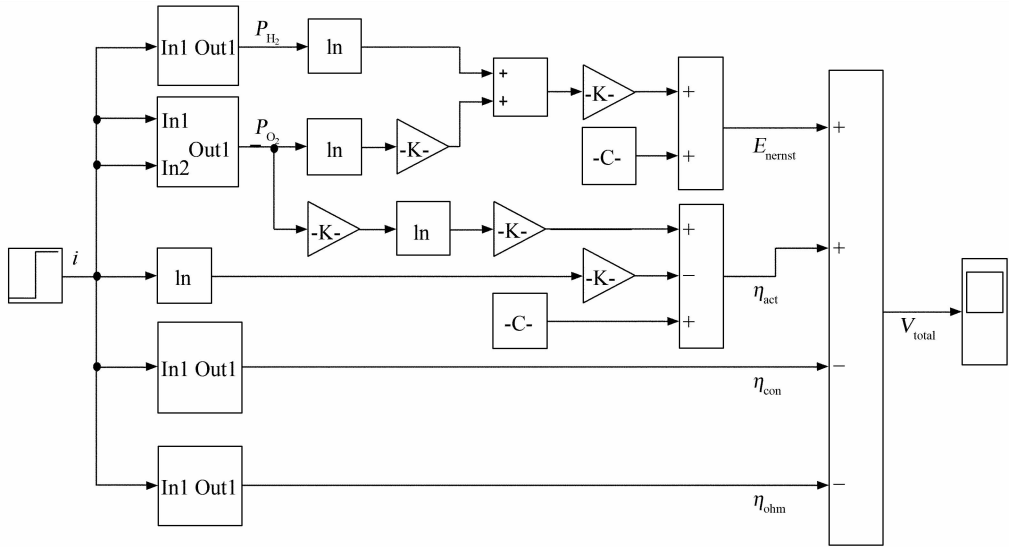


图 1 PEMFC 的 Simulink 仿真模块框图

Fig. 1 Simulation module diagram of Simulink for the PEMFC

表 1 1.2 kW PEMFC 动态模型仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of dynamic model for the 1.2 kW PEMFC

Parameter	Value	Parameter	Value
$T$	323.15K	$\gamma_{H_2O}$	1.145
$N$	40	$A$	97.75
$F$	96485C/mol	$\tau_{H_2}$	26.1s
$K_{O_2}$	2.52mol/(s · atm)	$\tau_{O_2}$	2.91s
$K_{H_2}$	0.843mol/(s · atm)	$\tau_e$	0.8s

阳极为 100%，阴极为 90%。由 G200 型燃料电池测试设备 (Greenlight Innovation 公司) 测试。图 2 给出 PEMFC 稳态仿真与实验结果比较。

可以看出,在电流密度较低的情况下,实验结果与仿真结果有一定的偏差,主要是由于模型建立时简化一些公式引起的,但其偏差程度多在误差范围内。其它情况,实验结果与仿真计算结果吻合较好,证明了该模型建立的准确性,继续进一步的完善研究,当可指导燃料电池的操作。

## 4 动态特性分析

### 4.1 动态模型的考虑

本文建立的动态模型主要考虑了氢气、氧气的动态响应时间项以及电化学反应时间的动态响应常数项在载荷突变时对燃料电池动态特性的

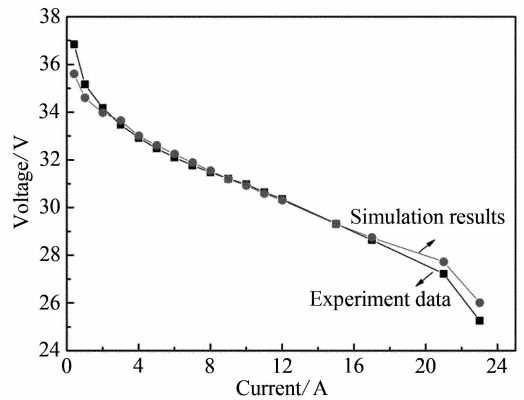


图 2 PEMFC 稳态仿真与实验的  $V \sim I$  特性曲线

Fig. 2 A comparison in the  $V \sim I$  characteristic curves of the PEMFC between simulation data and experiment data

影响。

### 4.2 载荷突变条件下的动态特性分析

在电池堆的动态特性分析中考虑了两种不同电流载荷突变时电池堆电压与阳极燃料气体分压的动态响应特性。

从图 3 可以得出,当载荷从 2 A 到 10 A 突变 (a) 时,由于瞬间氢气需求量的增加,气体在流道内的沿程损失,以及水分布和其它因素的影响导致阳极氢气的供应出现瞬时的波动,引起电池堆电压下降,当氢气的供应逐渐达到新的平衡值时电压又恢复到新的平衡,但电池堆电压有一定幅

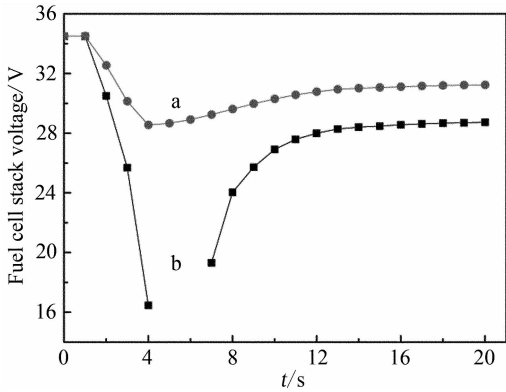


图3 电流增量分别为 8 A(a)和 15 A(b)时电池堆电压动态响应曲线

Fig.3 Voltage dynamic response curves of fuel cell stack for current increments of 8 A(a) and 15 A(b)

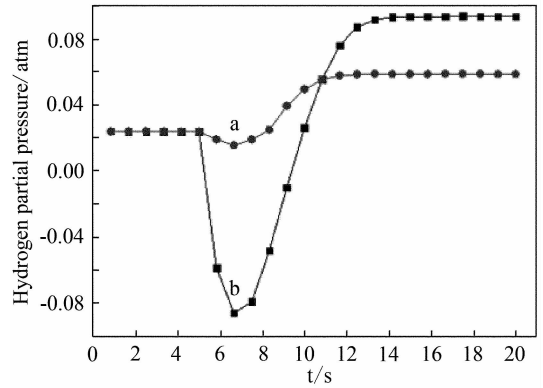


图4 电流增量分别为 8 A(a)和 15 A(b)时 PEMFC 电池堆氢气分压动态响应曲线

Fig.4 Hydrogen partial pressure dynamic response curves of the PEMFC stack for current increments of 8 A (a) and 15 A (b)

度的下降;当载荷从 2 A 到 17 A 突变(b)时,由于突变幅度较大,各单电池需要的氢气量急剧增加,从而引起电池堆氢气共用通道内氢气的流动状态发生瞬时变化,阳极出口发生燃料饥饿现象,瞬时出现电池堆电压急剧下降,电压输出失败的现象.

从图 4 可以得出,当载荷从 2 A 到 10 A 突变(a)时,由于瞬间氢气需求量的增加,气体在流道内的沿程损失,以及水分布和其它因素的影响,导致阳极氢气的供应出现瞬时波动,氢气分压先下降然后逐渐恢复到新的平衡;当载荷从 2 A 到 17 A 突变(b)时,由于载荷突变幅度较大,各单电池需要氢气量急剧增加,在电池堆氢气共用通道内氢气的流动状态发生瞬时变化,阳极出口发生燃料饥饿现象.根据达西定律,接近氢气入口处各单电池的氢气需求量先得到满足,导致远离氢气入口的出口侧无法得到及时补充,出现负压,这与实验中出现的氢气出口一侧有水倒吸的现象一致.以上对于预测电池的承载能力、评估电池的性能和对 PEM 燃料电池堆操作具有一定指导作用.

### 5 结 论

- 1) 模拟质子交换膜燃料电池,可假设气体为理想气体,并应用理想气体状态微分方程描述氢气和氧气的状态(分压).
- 2) 在电池载荷突变量较大的情况下,会出现气体分压为负值,电压输出失败的现象.
- 3) 选取适当的参数值,即能较合理地模拟实际燃料电池的动态响应.

### 参考文献(References):

- [1] Larminie J, Dicks A. Fuel cell system explainer. 2nd Edition [M]. England: John Wiley & Sons, Inc, 2003; 22-24.
- [2] Han M, Chan S H, Jiang S P. Investigation of self-humidifying anode in polymer electrolyte fuel cells [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32 (3): 385-391.
- [3] 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): 173-180.
- [4] Khan M J, Iqbal M T. Modeling and analysis of electrochemical, thermal, and reactant flow dynamics for a PEM fuel cell system [J]. Fuel Cells, 2005, 5(4): 463-475.
- [5] Hernandez A, Hisel D, Outbib R. Non-linear state space modeling of PEMFC [J]. Fuel Cells, 2006, 6(1): 38-46.
- [6] Buchholz M, Krebs V. Dynamic modeling of a polymer electrolyte membrane fuel cell stack by nonlinear system identification [J]. Fuel Cells, 2007, 7(5): 392-401.
- [7] Francol A A, Schottl P, Jallut C, et al. A multiscale dynamic mechanistic model for the transient analysis of PEMFCs [J]. Fuel Cells, 2007, 7(2): 99-117.
- [8] Mo Z J (莫志军), Zhu X J (朱新坚). Modeling and dynamic simulation of a proton exchange membrane fuel cell [J]. Computer Simulation (计算机仿真), 2006, 23(2): 192-196.
- [9] Hu G L (胡桂林), Fan J R (樊建人), Cen K F (岑可法). Numerical simulation of dynamic behavior of proton

- exchange membrane fuel cell [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (化工学报), 2006, 57(11): 2693-2698.
- [10] Yi B L (衣宝廉). Fuel cell-Theory · Technology · Application(燃料电池:原理 · 技术 · 应用) [M]. Beijing: Chemical industry press (化学工业出版社), 2003:160-330.
- [11] Amphlett J C, Mann R F, Peppley B A, et al. A model prediction transient responses of proton exchange membrane fuel cells [J]. Journal of Power Sources, 1996, 61(1/2):183-188.
- [12] Laurencelle F, Chahine R, Hamelin J, et al. Characterization of a Ballard Mk5\_E proton exchange membrane fuel cell stack [J]. Fuel Cells, 2001, 1(1):66-71.
- [13] Cirrincione M, Pucci M, Cirrincione G, et al. A neural non-linear predictive control for PEM-FC [J]. Journal of Electrical Systems, 2005, 1(2):1-18.
- [14] Kim J, Lee S M, Srinivasan S, et al. Modeling of proton exchange membrane fuel cell performance with an empirical equation [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1995, 142(8):2670-2674.
- [15] Mench M M. Fuel Cell Engines [M]. USA, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2008:157-163.
- [16] Correa J M, Farret F A, Canha L N, et al. An electrochemical-based fuel cell model suitable for electrical engineering automation approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Inc., 2004, 51(5):1103-1112.
- [17] Yerramalla S, Davari A, Feliachi A, et al. Modeling and simulation of the dynamic behavior of a polymer electrolyte membrane fuel cell [J]. Journal of Power Sources, 2003, 124(1):104-113.
- [18] Nerir M H, Wang C. Fuel cell modeling and control: distributed generation applications [M]. USA: IEEE Press and John Wiley & Sons, Ltd., 2009:57-59.
- [19] Zhao T S, Kreuer K -D, Nguyen T V. Advances in Fuel Cells (Volume 1) [M]. Elsevier Science. 2007:39-44.
- [20] Padulles J, Ault G W, McDonald J R. An integrated SOFC plant dynamic model for power system simulation [J]. Journal of Power Sources, 2000, 86(1/2):495-500.

## Dynamic Modeling and Characteristic Analysis of Proton Exchange Membrane Fuel Cell

JIA Qiu-hong<sup>1,2</sup>, HAN Ming<sup>3\*</sup>, DENG Bin<sup>1</sup>, ZHANG Cai-zhi<sup>3</sup>

(1. New Drive Technology Center, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Chongqing Automobile college, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

3. School of Engineering, Temasek Polytechnic, Singapore 529757, Singapore)

**Abstract:** In this paper, a dynamic model of PEMFC is developed to estimate the dynamic performance of PEMFC by analyzing in detail the influence factors of voltage of PEMFC including various losses. The partial pressures of hydrogen and oxygen are obtained using the differential form of the ideal-gas equation in this model. The steady-state model is obtained by setting reasonable parameter values. The simulation results and experimental results have good consistency, which shows that the simulation model is correct, reasonable and effective. It analyzed the dynamic response characteristics of the output voltage and the partial pressure of hydrogen in condition of load mutations using the simulation mode in this paper. The dynamic model of PEMFC proposed in this paper can accurately simulate the performance of practical fuel cell system, evaluate the load capacity of fuel cell and have guiding significance for the fuel cell operation.

**Key words:** PEMFC; dynamic model; partial pressure of gas; load mutation; dynamic response characteristics