

Simulation and Calculation of Fuel Cell-High Pressure Compressor-Turbine System

Long Li, Qianchao Liang*

College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan Hubei
Email: *59738886@qq.com

Received: Mar. 13th, 2019; accepted: Mar. 24th, 2019; published: Apr. 8th, 2019

Abstract

The fuel cell is a highly efficient, green, non-polluting device that converts chemical energy into electrical energy. In order to study the influence of temperature and oxygen excess ratio on fuel cell output performance, this paper designed a high-pressure specific compressor-turbine device for providing air to the cathode of the fuel cell and recovering exhaust gas. The model was built and simulated by Simulink software. According to the simulation results, it can be shown that increasing the temperature and oxygen excess ratio can improve the output performance of the fuel cell. This has certain guiding significance for the system design of the fuel cell.

Keywords

Fuel Cell System, Temperature, Oxygen Excess Ratio, Simulink Modeling Simulation, Residual Pressure Recovery

燃料电池 - 高压压气机 - 涡轮系统仿真计算

李 龙, 梁前超*

海军工程大学动力工程学院, 湖北 武汉
Email: *59738886@qq.com

收稿日期: 2019年3月13日; 录用日期: 2019年3月24日; 发布日期: 2019年4月8日

摘 要

燃料电池是一种将化学能转化为电能的高效、绿色无污染装置。为研究温度及氧气过量系数对燃料电池
*通讯作者。

输出性能的影响以及阴极尾气余压的回收对系统效率的影响, 本文设计了一种燃料电池 - 高压比压气机 - 涡轮系统对电池的阴极进行供气及对尾气进行回收, 并采用Simulink软件对系统建立模型后进行仿真计算。根据仿真结果表明: 提高温度以及增大氧气过量系数会使得PEMFC的输出性能得到提升; 阴极尾气的回收有助于提高电池的输出效率。这对燃料电池的系统设计具有一定的指导意义。

关键词

燃料电池系统, 温度, 氧气过量系数, Simulink建模仿真, 余压回收

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

随着全球经济的发展, 人类对化石能源的过度开采导致了能源危机的显现, 并且伴随着化石能源被消耗后带来的环境污染的问题也愈加严重。因此, 能源危机和环境污染已经成为人类面临的两大主要问题[1]。在这样的情况下人类对于清洁能源的需求就变得十分迫切, 如今人类已经将风能、潮汐能和地热能等清洁能源都应用到了某些领域。在 21 世纪这个氢时代, 燃料电池作为一种用氢气作燃料, 空气作氧化剂的绿色装置受到了各国的关注。

质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)具有启动快、工作温度低、噪音小等特点。PEMFC 现应用在汽车上面居多, 专家学者对 PEMFC 系统的设计与控制研究也开始渐渐深入。J. T. Pukrushpan 等[2] [3]对 PEMFC 的空气供应系统进行建模, 并针对过氧保护提出了一种前馈 - 反馈相结合的最优控制方法。张立炎等[4]对质子交换膜燃料电池的系统建模和控制做出了详细的描述。李奇[5]建立了 PEMFC 系统模型进行计算仿真并且提出了一种将降阶 H_{∞} 次优输出反馈控制器与前馈补偿器相结合的自由度控制器, 解决了质子交换膜燃料电池系统过氧保护问题。张玉瑾[6]在 PEMFC 系统中建立离心式空压机模型, 利用模糊 PID 自适应控制方法控制空气流量。本文通过设计一种 PEM 燃料电池 - 高压压气机 - 涡轮系统研究温度及氧气过量系数对电池输出性能以及尾气回收对电池的输出性能影响。

2. PEMFC 系统

2.1. 系统模型的设计

PEMFC 系统主要包括供气系统、电池系统、冷却系统、尾气回收系统。本文设计的 PEMFC 系统模型可见图 1。

根据图 1 所示, 空压机采用离心式压气机进行压缩空气为 PEMFC 供给反应所需的氧化剂。空气经压缩之后进入到冷却器中将温度冷却到 PEMFC 反应能够承受的温度范围内。经冷却的空气通入到增湿器中进行增湿, 这是起到对 PEMFC 内部的质子膜进行湿润的作用, 保证 PEMFC 反应的高效性。得到增湿的空气进入到 PEMFC 阴极与进入电池阳极的氢气进行反应, 进行发电。

上述模型的设计提高了进气压力以及对尾气的压能进行了回收从而达到提升 PEMFC 的输出性能的目的, 这对 PEMFC 系统的设计具有一定的指导意义。本文主要的创新主要在于在常规的燃料电池系统中加入尾气回收系统(涡轮), 将阴极尾气的压力能进行回收从而达到提高系统效率, 减少压气机寄生功率的目的。

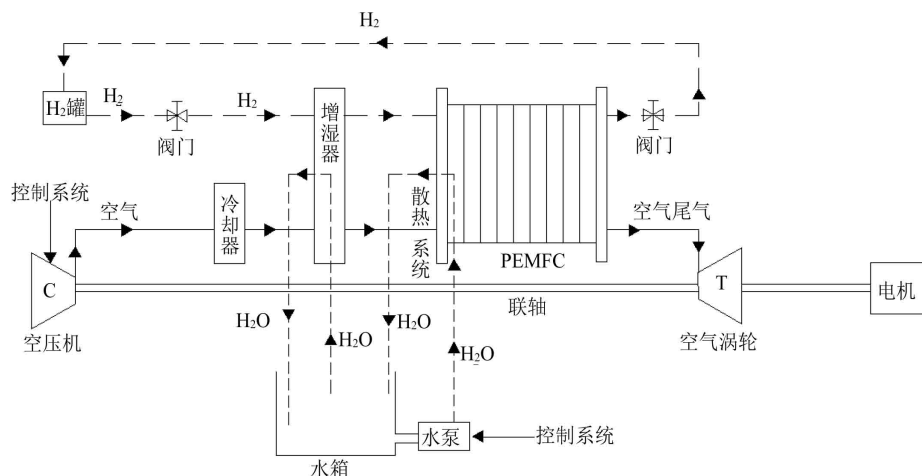


Figure 1. The model of PEMFC system
图 1. PEMFC 系统模型

2.2. PEMFC 系统的 Simulink 建模仿真

根据图 1 设计的模型, 我们对上述系统进行基于 Simulink 的系统建模。主要包括压气机模块、PEMFC 模块、冷却器模块及增湿器模块等子模块。

2.2.1. PEMFC 模块

PEMFC 的输出性能的好坏主要由伏安曲线来体现, 因此本文通过 Simulink 软件建立 PEMFC 的电化学模块, 通过观察伏安曲线判断 PEMFC 的输出性能的优劣。

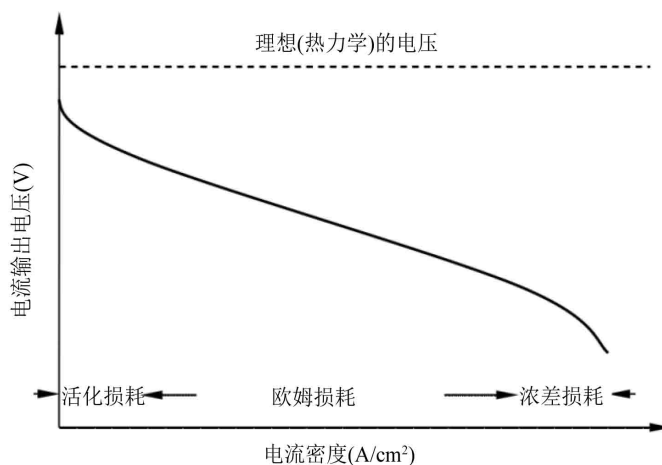


Figure 2. The polarization curve of PEMFC
图 2. PEMFC 极化曲线图

从图 2 可以看出影响 PEMFC 输出性能的因素主要有活化极化、欧姆极化以及浓差极化。活化极化是电极表面刚要激活电化学反应时需要克服的化学能, 表现为出的反应迟钝的现象; 欧姆极化主要包括两种阻抗造成的损失, 一是质子交换膜等效膜阻抗, 二是质子交换膜阻碍电子传输的阻抗; 浓差极化处于反应的全过程, 在低电流密度的情况下浓差极化对 PEMFC 输出性能的影响较小。在电流密度较大的情况下浓差极化对 PEMFC 输出性能的影响较大。根据上图可推算出 PEMFC 单电池的输出电压公式:

$$V_{cell} = E_{Nerst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{con} \quad (2-1)$$

式中, E_{Nerst} 为热力学电动势; V_{act} 为活化过电势; V_{ohm} 为欧姆过电势; V_{con} 为浓差过电势。

1) 热力学电动势

热力学过电势又叫做能斯特电压, 可以根据电化学反应中的吉布斯自由能、焓熵值的变化得到能斯特电压的求解公式:

$$E_{Nerst} = \Delta G/2F - \Delta S(T - T_{ref})/2F + RT(\ln P_{H_2} + 0.5 \ln P_{O_2})/2F \quad (2-2)$$

式中, ΔG 为吉布斯自由能的变化值, 单位是 J/mol; F 是法拉第常数, 取值为 96485C; ΔS 是熵的变化值, 单位是 J/mol; T 是电池电堆的温度, T_{ref} 是参考温度单位是 K; R 是普适气体常数, 取值为 8.314 J/K; P_{H_2} 、 P_{O_2} 为阳极氢气与阴极氧气的分压(以一个标准大气压为准)。将一个标准大气压及常温下的吉布斯自由能及熵的变化值带入式(2-2), 可以得到简化后的式子:

$$E_{Nerst} = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4} \times (T - 298.15) + 4.308 \times 10^{-5} T \times (\ln P_{H_2} + 0.5 \ln P_{O_2}) \quad (2-3)$$

2) 活化过电势

活化过电势的计算较为复杂, 一般是通过实验数据对其中的一些参数进行拟合得到近似较为准确的表达式。

$$V_{act} = \delta_1 + \sigma T + \delta_3 T \ln C_{O_2} + \delta_4 T \ln I \quad (2-4)$$

$$\begin{cases} V_{act} = \delta_1 + \sigma T + \delta_3 T \ln C_{O_2} + \delta_4 T \ln I \\ \sigma = \delta_2 + 2 \times 10^{-4} \ln A + 4.3 \times 10^{-5} \ln C_{H_2} \\ C_{O_2} = 1.97 \times 10^{-7} \times P_{O_2} \times \exp(498/T) \\ C_{H_2} = 9.17 \times 10^{-7} \times P_{H_2} \times \exp(-77/T) \end{cases} \quad (2-5)$$

3) 欧姆过电势

根据拟合公式得到欧姆极化损失的表达式:

$$V_{ohm} = IR_{int} = I(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 T + \varepsilon_3 I) \quad (2-6)$$

式中 ε_1 取值为 2.53×10^{-4} ; ε_2 取值为 7.17×10^{-7} ; ε_3 取值为 -1.97×10^{-7} 。

4) 浓差过电势

PEMFC 燃料电池在反应过程中需要燃料与氧化剂, 并且在会生成一定量的水。这就会导致催化层内的生成物与反应物的浓度会发生变化, 这就会产生浓差损失影响电池的输出性能。

$$V_{con} = -m \exp(ni) \quad (2-7)$$

式中 m 、 n 均为 PEMFC 内部反应的质量传递系数, 其主要与电极材料的电导率和催化层的孔扩散率有关。 i 为 PEMFC 的电流密度。

综上所述可以得到 PEMFC 单电池的 Simulink 模型, 如图 3 所示。

2.2.2. 其余子模块

1) 高压压气机

压气机模块的建模主要是根据 n' 、 G' 、 π 、 η 表示的特性线图在 Simulink 中利用 Look-up table 模块进行插值建立数学模型。确定其中任意的两个参数就可以求得另外两个参数。

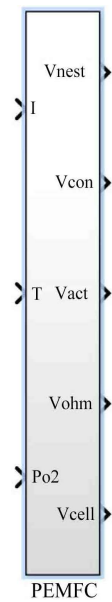


Figure 3. The mathematical model of a battery cell
图 3. 单电池数学模型

$$\pi = f_1 \left(G_{in} \frac{P_0 \sqrt{T_{in}}}{P_{in} \sqrt{T_0}}, n_c \frac{\sqrt{T_0}}{\sqrt{T_{in}}} \right) \quad (2-8)$$

$$\eta_c = f_2 \left(G_{in} \frac{P_0 \sqrt{T_{in}}}{P_{in} \sqrt{T_0}}, n_c \frac{\sqrt{T_0}}{\sqrt{T_{in}}} \right) \quad (2-9)$$

式子中, T_{in} 为压气机进口温度; $T_0 = 288.15 \text{ K}$; P_{in} 为压气机入口压力; $P_0 = 0.103215 \text{ MPa}$; n_c 为实际转速。

本文借鉴 J. M. Cunningha 等在文献[7]中所提供的离心压气机部分工况点的稳态特性曲线通过拟合, 求解非稳态时压气机的各状态量。在模型中我们要考虑到压气机工作时会有喘振现象的出现, 因此我们要留有一定的喘振裕度。压气机特性曲线如图 4、图 5 所示。

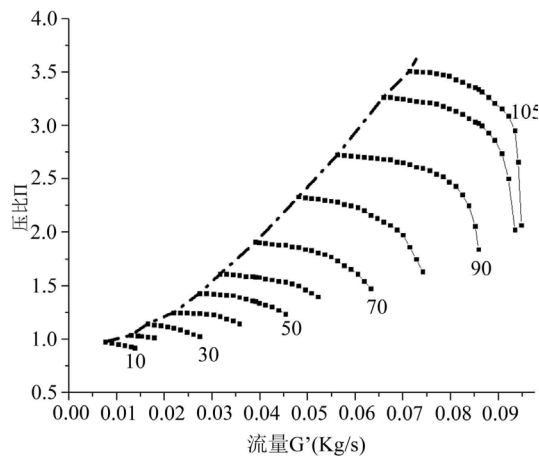


Figure 4. The characteristic curve of $\pi - G'$
图 4. $\pi - G'$ 特性曲线

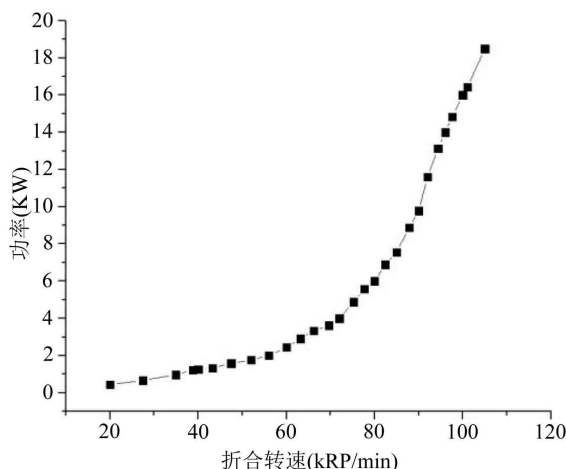


Figure 5. The characteristic curve of $P-n'$

图 5. $P-n'$ 特性曲线

压气机耗功表示为:

$$N_{ec} = c_{pa} T_1 (\pi^{m_a} - 1) / \eta \quad (2-10)$$

$$m_a = (\lambda_a - 1) / \lambda_a \quad (2-11)$$

式子中, c_{pa} 为空气定压比热容, λ_a 为空气的绝热指数, π 为压气机的压比, η 为压气机效率。

压气机的出口温度为:

$$T_2 = T_1 \left[1 + (\pi^{m_a} - 1) / \eta \right] \quad (2-12)$$

式子中, T_2 为压气机出口温度。

2) 管道模型

供给管道是压气机对电池阴极供气的所有管道, 根据质量守恒定律对供气管道进行建模, 根据文献 [2]:

$$\frac{dm_{sm}}{dt} = F_{cp} - F_{sm,out} \quad (2-13)$$

其中 F_{cp} 为压气机的出口质量流量, $F_{sm,out}$ 为供气管道的出口流量, m_{sm} 为供给管道内的质量。

$$\frac{dP_{sm}}{dt} = \frac{\gamma R_a}{V_{sm}} (F_{cp} T_{cp,out} - F_{sm,out} T_{sm}) \quad (2-14)$$

式子中 P_{sm} 为供给管道压力, V_{sm} 为供给管道体积, γ 为常压下比热容比, R_a 为空气气体常数, $T_{cp,out}$ 为压气机出口温度, T_{sm} 为供给管道内温度, 可以根据理想气体定律算出。

$$F_{sm,out} = k_{sm,out} (P_{sm} - P_{ca}) \quad (2-15)$$

式子中 $k_{sm,out}$ 为供应管道孔口常数, P_{ca} 为电池阴极压力。

回流管道代表的是气体经电堆后进行排放的管道, 参考文献 [2] 可建立如下模型:

$$\frac{dp_{rm}}{dt} = \frac{R_a T_{rm}}{V_{rm}} (F_{ca,out} - F_{rm}) \quad (2-16)$$

式子中 p_{rm} 为回流管道压力; T_{rm} 为回流管道内气体温度; V_{rm} 为回流管道体积; F_{rm} 为回流管道出口气体

质量流量, 是回流管道压力与大气压的函数。回流管道的压力与大气压间的压力差还是较大的, 因此本文根据文献[2]采用非线性喷嘴方程得到 F_{rm} 为:

$$F_{rm} = \frac{C_{D,rm} A_{T,rm} P_{rm}}{\sqrt{RT_{rm}}} \left(\frac{P_{atm}}{P_{rm}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{P_{atm}}{P_{rm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}, \frac{P_{atm}}{P_{rm}} > \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

$$F_{rm} = \frac{C_{D,rm} A_{T,rm} P_{rm}}{\sqrt{RT_{rm}}} \gamma^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}, \frac{P_{atm}}{P_{rm}} \leq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2-17)$$

式中 $C_{D,rm}$ 为回流管道卸流系数, 为 0.0124; $A_{T,rm}$ 为回压阀开度, 为 0.002 m²。

3) 涡轮模型

涡轮模型的搭建也应当要根据涡轮的工作特性线利用 Look-up table 模块进行建模。本文对于涡轮模型的建立进行了简化, 参照文献[8]建立了如下模型:

$$W_{tur} = f_{air} \cdot C_{pt} \cdot T_{out} \cdot \eta_t \cdot (\mu(\gamma_2 - 1)/\gamma_2 - 1) \quad (2-18)$$

式中 W_{tur} 为涡轮对废气回收的功; f_{air} 为废气流量; C_{pt} 为废气的定压比热容, 为 1.24 J/(g·K); T_{out} 为废气的温度; η_t 为涡轮的效率, 为 0.7; μ 为涡轮的膨胀比(假设从电池电堆出来的尾气压力经涡轮膨胀后为大气压); γ_2 为废气的比热比, 为 1.36。

4) 阴极空气动态压力模型

氧气分压对 PEMFC 的输出性能具有较大影响, 因此建立阴极的空气压力动态模型是十分必要的, 根据质量守恒定律我们可以建立如下模型:

$$\frac{dm_{O_2}}{dt} = F_{O_2,in} - F_{O_2,out} - F_{O_2,rec} \quad (2-19)$$

$$\frac{dm_{N_2}}{dt} = F_{N_2,in} - F_{N_2,out} \quad (2-20)$$

式中 m_{O_2} 、 m_{N_2} 分别为氧气、氮气的质量; $F_{O_2,in}$ 、 $F_{N_2,in}$ 分别为氧气流入流量、氮气流入流量; $F_{O_2,out}$ 、 $F_{N_2,out}$ 分别表示为氧气流出流量、氮气流出流量; $F_{O_2,rec}$ 为反应消耗掉的氧气流量。

$$F_{O_2,in} = \frac{0.21M_{O_2}}{M_{air}} \cdot \frac{F_{sm,out}}{1 + \Omega_{atm}} \quad (2-21)$$

$$F_{N_2,in} = \frac{0.79M_{N_2}}{M_{air}} \cdot \frac{F_{sm,out}}{1 + \Omega_{atm}} \quad (2-22)$$

式中 M_{O_2} 、 M_{N_2} 、 M_{air} 分别为氧气、氮气、空气的摩尔质量; Ω_{atm} 为压气机入口空气湿度比率。

根据理想气体定律, 我们可以得到氧气与氮气的压力模型:

$$P_{O_2} = \frac{n_{O_2} R_{O_2} T}{V_{ca}} \quad (2-23)$$

$$P_{N_2} = \frac{n_{N_2} R_{N_2} T}{V_{ca}} \quad (2-24)$$

$$P_{ca} = P_{O_2} + P_{N_2} \quad (2-25)$$

式中 n_{O_2} 、 n_{N_2} 分别为氧气、氮气的摩尔质量; R_{O_2} 、 R_{N_2} 分别为氧气、氮气的气体常数; V_{ca} 为阴极通

道体积。

$$F_{O_2,out} = \frac{m_{O_2}}{m_{ca}} F_{ca,out} \quad (2-26)$$

$$F_{N_2,out} = \frac{m_{N_2}}{m_{ca}} F_{ca,out} \quad (2-27)$$

$$m_{ca} = m_{O_2} + m_{N_2} \quad (2-28)$$

$$F_{O_2,rec} = \frac{M_{O_2} n I}{4F} \quad (2-29)$$

式中 n 为单电池的片数。

5) 废气利用率

本文将废气利用率定义为涡轮回收的功与压气机的耗功的比值：

$$\varphi = \frac{W_{tur}}{N_{ec}} \quad (2-30)$$

综上，可以在 Simulink 软件中搭建出整个系统的模型，系统模型见下图 6：

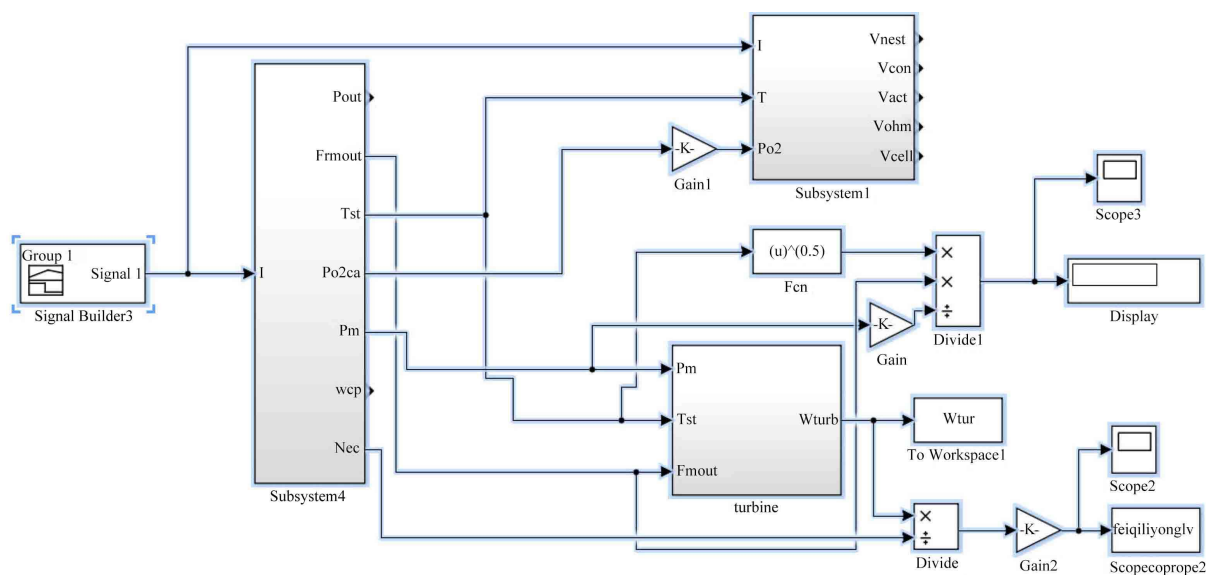


Figure 6. The model of PEMFC system

图 6. PEMFC 系统模型

3. 仿真结果分析

3.1. 仿真分析

在 PEMFC 的工作温度为 60°C ，阳极氢气进气压力为 0.8 bar 的情况下，我们在 Simulink 软件中利用阶跃信号模拟负载电流的突变进行仿真计算。

从图 8 可以看出负载在突然变化的情况下，电池输出电压的变化存在着一个过渡的过程并且输出电压会随着电流的增大而减小；从图 9 可以看出随着负载的突然加载，电堆所需要的空气流量会有一定的增大从而导致氧气的分压增大，从而保证电池的输出性能。从图 10 可以看到电池负载加载的情况下，废

气利用率有所降低, 约下降 2%。原因在于随着负载的增加, 压气机为了提供更大的进气量导致其寄生功率上升, 从而导致废气利用率降低。

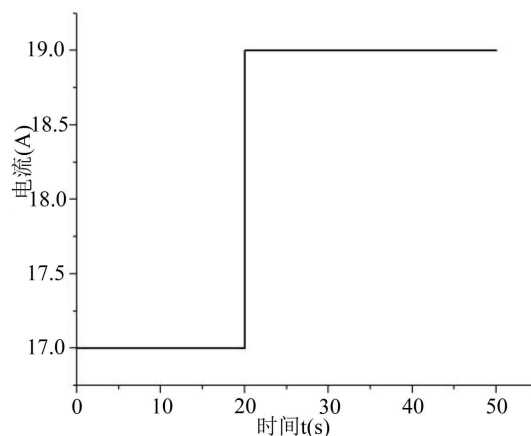


Figure 7. The change of current

图 7. 电流的变化情况

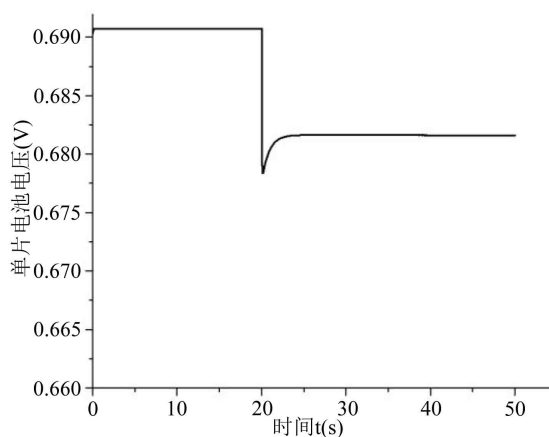


Figure 8. The change of a battery cell's voltage

图 8. 单电池的电压输出情况

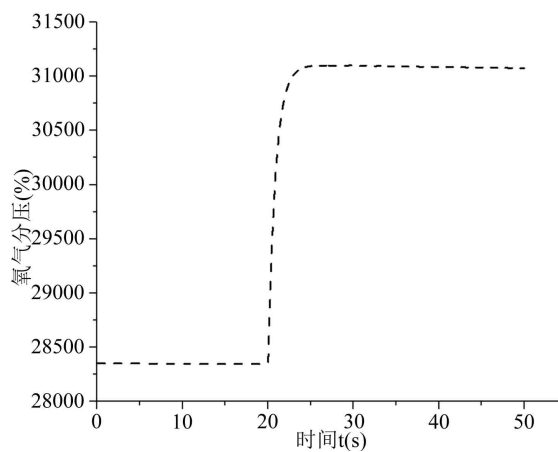


Figure 9. The change of oxygen pressure

图 9. 氧气压力变化情况

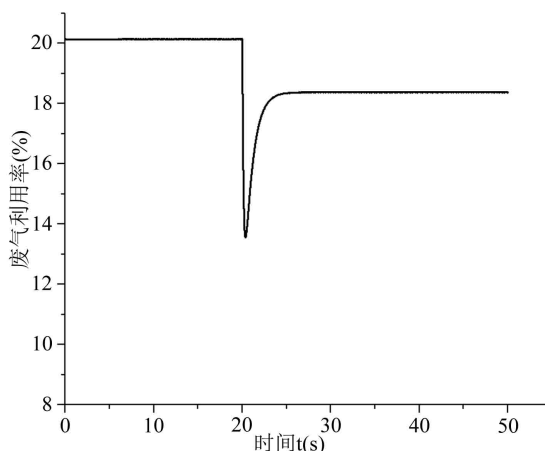


Figure 10. The utilization rate of exhaust gas
图 10. 废气利用率

3.2. 探究影响 PEMFC 输出性能的因素

1) 温度对 PEMFC 输出性能的影响

从第二章的模型中可以看到, 温度这个参数对 PEMFC 的输出性能有着较大的影响, 因此我们将在阳极氢气进口压力为 0.8 bar、负载变化如图 7 的情况下讨论电堆在不同工作温度情况下的输出情况。

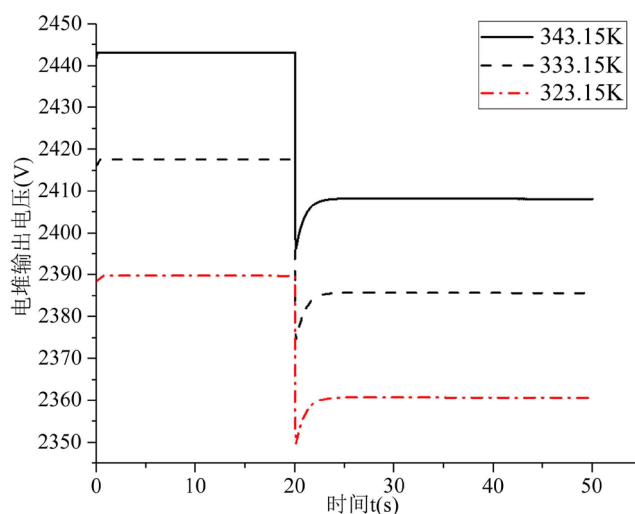


Figure 11. The output voltage of stack at different temperature
图 11. 不同温度下的电堆输出电压图

从图 11 可以看出随着温度的升高, 电堆的输出性能会得到提升。原因在于当温度上升的时候, 电堆内部的化学反应速率会得到一定的提升, 这会降低活化过电势损耗; 并且反应温度的上升, 这也会减少电堆内部的阻抗使得欧姆过电势的损耗减少。因此根据式(2-1)可以得到电池的单元电压将会提高, PEMFC 的性能将会得到提升。

2) 氧气过量系数对 PEMFC 输出性能的影响

在本文设计的系统中, 我们可以通过调节氧气过量系数 λ 的大小调节压气机的入口流量, 在此基础上匹配相应的压气机驱动电机的电压值从而达到调节电池阴极进气压力的作用。在电堆工作温度为 60°C、

阳极进气压力为 0.8 bar、负载变化如图 7 的情况下, 不同阴极进气过量系数下氧气分压及电堆的输出性能变化图如下:

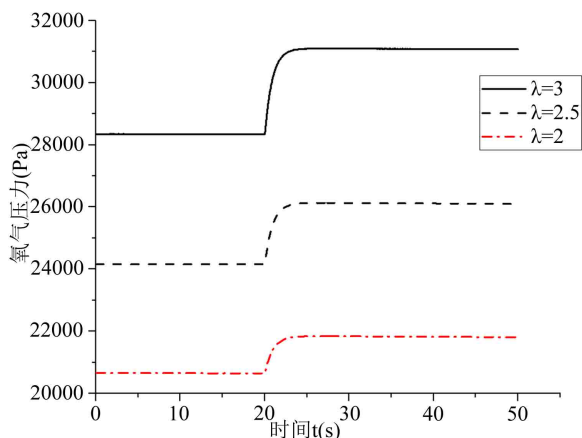


Figure 12. The oxygen pressure at different oxygen excess ratio

图 12. 不同过量系数下的氧气分压图

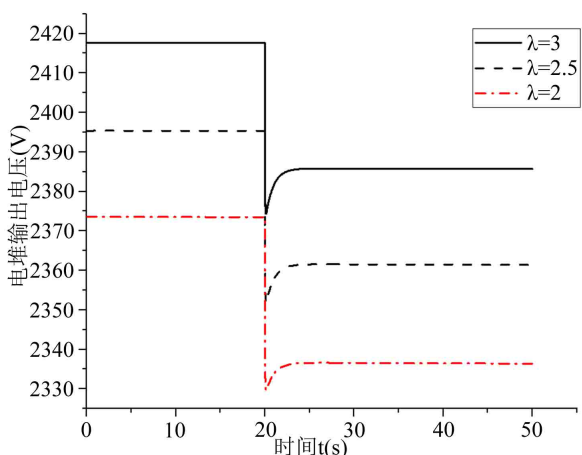


Figure 13. The output voltage of stack at different oxygen excess ratio

图 13. 不同过量系数下的电堆输出电压图

从图 12、图 13 可以看出随着过量系数的增大, 氧气分压值也在相应的增大。当氧气的分压增大, 电堆内部的化学反应速率会进一步加快, 减少了活化过电势的损耗从而使得电堆的输出性能得到一定的提升。

4. 结论

本文设计了一种燃料电池 - 高压压气机 - 涡轮系统, 在 Simulink 软件中搭建系统模型并进行了仿真计算。通过仿真计算得到了负载变化与电堆输出电压、氧气分压以及涡轮回收效率间的变化关系。通过仿真结果表明: 当负载加载时, 电池的输出电压会有一些下降且下降中存在一个缓慢过渡过程; 而氧气分压是随负载加载而增大的; 涡轮的回收效率则是有一部分下降, 但回收效率还是在 10% 以上。

在此基础上本文还探究了温度及氧气过量系数这两个因素对 PEMFC 输出性能的影响, 仿真结果表明温度及流量过量系数在一定范围内增大能够提升 PEMFC 的输出性能。

参考文献

- [1] 衣宝廉. 燃料电池——原理技术应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [2] Pukrushpan, J.T., Stefanopoulou, A.G. and Peng, H. (2004) Control of Fuel Cell Breathing. *IEEE Transactions on Control Systems*, **24**, 30-46. <https://doi.org/10.1109/MCS.2004.1275430>
- [3] Pukrushpan, J.T., Peng, H. and Stefanopoulou, A.G. (2004) Control-Oriented Modeling and Analysis for Automotive Fuel Cell Systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, **126**, 14-25. <https://doi.org/10.1115/1.1648308>
- [4] 张立炎, 潘牧, 全书海. 质子交换膜燃料电池系统建模和控制的综述[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(4): 1-6.
- [5] 李奇. 质子交换膜燃料电池系统建模及其控制方法研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [6] 张玉瑾. 大功率 PEMFC 空气系统控制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [7] Cunningham, J.M., Friedman, D.J., Hoffman, M.A., *et al.* (1999) Requirements for a Flexible and Realistic Air Supply Model for Incorporation into a Fuel Cell Vehicle (FCV) System Simulation. SAE Technical Paper 1999-01-2912. <https://doi.org/10.4271/1999-01-2912>
- [8] 仲志丹, 杨晴霞, 王冰雪, 等. 涡轮增压器对 5kW PEMFC 电堆的影响[J]. 太阳能学报, 2013, 34(7): 1295-1299.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2325-677X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: dsc@hanspub.org