

质子交换膜燃料电池阴阳极恒压差控制策略研究

齐鲲鹏, 陈超帆, Ali Hassan

(大连交通大学 机车车辆工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘要: 阴阳极压力控制对提高燃料电池系统性能至关重要。本文阳极侧使用自适应神经模糊推理系统(ANFIS)作为其控制策略, 实现对阴极压力的跟随; 阴极侧使用 RBF-PID 控制器作为其过氧比控制策略。仿真结果表明, ANFIS 可迅速将阴阳极压力差稳定在需求值并显著降低流量波动。

关键词: 质子交换膜燃料电池; 自适应控制; 神经模糊推理系统; 阳极恒压差控制策略

中图分类号: TM911.42

文献标志码: A

文章编号: 1006-3331(2023)04-0001-06

Study on Control Strategy of Cathode and Anode Stable Pressure Difference in Proton Exchange Membrane Fuel Cell

QI Kunpeng, CHEN Chaofan, Ali Hassan

(College of Locomotive and Rolling Stock Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: Cathode and anode pressure control are critical to improving fuel cell system performance. This paper uses the adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS) at the anode side as its control strategy to follow the cathode pressure and uses the RBF-PID controller at the cathode side as its peroxide ratio control strategy. The simulation results show that ANFIS can rapidly stabilize the cathode and anode pressure difference to the demand value and markedly reduce the flow fluctuation.

Key words: proton exchange membrane fuel cell; adaptive control; neural fuzzy inference system; anode constant differential pressure control strategy

近年来, 质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 因其突出的性能优势, 成为可替代传统发动机的最优选择之一^[1]。研究表明, PEMFC 阳极侧氢气压力适当高于其阴极侧氧气压力并保持恒定的压力差, 可提高其输出功率^[2]。氢气供应系统作为燃料电池系统的核心, 其设计是否合理对燃料电池的输出功率、使用寿命、能源效率等均有很大影响^[3]。

许多学者针对阳极侧控制策略进行了优化设计^[4-9], 在阴阳极压差控制策略研究方面, 在 PID 控制的基础上增加前馈控制策略实现恒定压差控制^[10-11], 但上述研究均为简化模型控制策略设计, 且由于燃料电池系统的负载频繁变化, 若使用传统 PI/PID 控制器对压差进行修正, 会存在超调量大、参数整定困难等问题。

本文采用自适应神经模糊推理系统 (ANFIS) 控制阳极侧压力跟随阴极侧压力, 可解决燃料电池供气系统所存在的动态问题, 以减少压力调整过程中产生的流量波动, 进而提升电堆寿命。

1 燃料电池阴阳极模型构建

1.1 燃料电池系统组成

PEMFC 系统依据其组成结构可划分为 3 个子系统: 阳极氢气供应子系统、阴极氧气供应子系统、电堆子系统。PEMFC 系统组成如图 1 所示。

为提升燃料电池系统动态模型控制效果, 本文对模型提出如下假设: ①高压储氢瓶提供压力稳定且纯净的氢气; ②系统内所有气体均为理想气体; ③气体在系统内流动时无热量损耗。

收稿日期: 2023-03-22。

第一作者: 齐鲲鹏 (1976—), 男, 博士; 副教授; 主要从事先进控制技术研究工作。E-mail: qikunpeng@djtu.edu.cn。

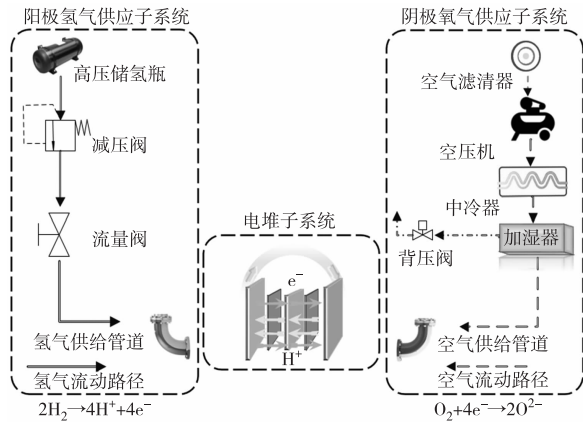
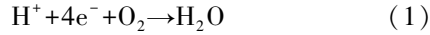


图 1 PEMFC 系统组成

1.2 阴极流道模型构建

在电化学反应过程中,氧气供给系统为满足燃料电池工况需求,需不断向阴极流道内输送混合气体(包括氧气、氮气及水蒸气),其中氧气经双极板流道层进入膜电极,与由阳极侧跨膜传递的氢离子及外电路传送的电子,在催化剂层发生还原反应,如式(1)所示:



本文假设流体内部各组分在流场内部均匀分布,阴极流道模型展现了阴极内物质的流动特性以及电化学反应过程。阴极内主要气体成分为氧气、氮气及水蒸气,其质量守恒方程如下:

$$\frac{dm_{\text{O}_2}}{dt} = W_{\text{O}_2, \text{in}} - W_{\text{O}_2, \text{out}} - W_{\text{O}_2, \text{rec}} \quad (2)$$

$$\frac{dm_{\text{N}_2}}{dt} = W_{\text{N}_2, \text{in}} - W_{\text{N}_2, \text{out}} \quad (3)$$

$$\frac{dm_{\text{va}}}{dt} = W_{\text{va}, \text{in}} + W_{\text{va}, \text{mem}} + W_{\text{va}, \text{gen}} - W_{\text{va}, \text{out}} \quad (4)$$

式中: $W_{\text{O}_2, \text{in}}$ 、 $W_{\text{O}_2, \text{out}}$ 分别为进入阴极入口和出口处氧气质量流量; $W_{\text{va}, \text{in}}$ 为进堆水蒸气质量流量; $W_{\text{O}_2, \text{rec}}$ 为燃料电池反应消耗氧气流量; $W_{\text{N}_2, \text{in}}$ 、 $W_{\text{N}_2, \text{out}}$ 分别为进入阴极入口和出口处氮气质量流量; $W_{\text{va}, \text{gen}}$ 为阴极流场内部电化学反应生成的水蒸气质量流量; $W_{\text{va}, \text{mem}}$ 为阳极侧水蒸气通过质子交换膜传递至阴极侧水蒸气质量流量。

阴极侧电堆进气流量是由空压机根据当前工况提供,经中冷器、加湿器进行降温、增湿后输送至阴极电堆进气口。入口处氧气质量流量 $W_{\text{O}_2, \text{in}}$ 可表示为

$$W_{\text{O}_2, \text{in}} = \frac{x_{\text{O}_2} M_{\text{O}_2}}{x_{\text{O}_2} M_{\text{O}_2} + (1 - x_{\text{O}_2}) M_{\text{N}_2}} \frac{W_{\text{ca}, \text{in}}}{1 + \omega_{\text{ca}, \text{in}}} \quad (5)$$

式中: x_{O_2} 为干空气中氧气体积分数,取值为 0.21; M_{O_2} 为氧气摩尔质量,取值为 32 g/mol; M_{N_2} 为氮气摩尔质量,取值为 28 g/mol; $\omega_{\text{ca}, \text{in}}$ 为进堆气体湿度比,可由各组分气体分压进行计算。

根据电化学反应原理,其氧气消耗量 $W_{\text{O}_2, \text{rec}}$ 为

$$W_{\text{O}_2, \text{rec}} = n I_{\text{st}} M_{\text{O}_2} / (4F) \quad (6)$$

式中: n 为燃料电池电堆单电池数目,取值为 400; F 为法拉第常数,取值为 96 485 C/mol; I_{st} 为电堆电流。

1.3 阳极流道模型构建

阳极侧入口处气体由阳极氢气供应子系统提供,氢气经双极板流道层输入后进入膜电极,在催化剂层发生电化学反应,生成氢离子及电子,其中氢离子经膜电极移向阴极,电子则流向外电路,如式(7)所示:



针对阳极流场内部组分变化及压力生成机理进行行为分析并构建数学模型。阳极模型依据质量守恒定律及流体力学中相关概念进行模型构建,因氢气为高压储氢瓶输出的纯净氢气,故阳极中气体成分主要为氢气和水蒸气。依据质量守恒定律,氢气质量守恒方程如下:

$$\frac{dm_{\text{H}_2}}{dt} = W_{\text{H}_2, \text{in}} - W_{\text{H}_2, \text{out}} - W_{\text{H}_2, \text{rec}} \quad (8)$$

式中: $W_{\text{H}_2, \text{in}}$ 、 $W_{\text{H}_2, \text{out}}$ 分别为进入阳极入口和出口处的氢气质量流量; $W_{\text{H}_2, \text{rec}}$ 为燃料电池反应消耗氢气流量。

阳极消耗氢气流量同电堆电流呈正相关:

$$W_{\text{H}_2, \text{rec}} = n I_{\text{st}} M_{\text{H}_2} / (2F) \quad (9)$$

式中: M_{H_2} 为氢气摩尔质量,取值为 2 g/mol; n 为燃料电池电堆单电池数目,取值为 400; F 为法拉第常数,取值为 96 485 C/mol; I_{st} 为电堆电流。

2 阴阳极恒压差控制策略

2.1 阴极侧流量控制建模

燃料电池在运行过程中,空压机需快速、稳定地向燃料电池系统提供空气,但由于控制系统的时滞性,为应对负载突变等使用工况,阴极供气系统需向电堆提供过量氧气以防止因氧气缺乏(氧饥饿)而无法当前系统变载需求。

为衡量输入氧气过量程度,将阴极流道入口处氧

气流量与当前工况下所需氧气之比作为衡量指标, 简称为过氧比, 如式(10):

$$\lambda_{O_2} = W_{O_2, \text{in}} / W_{O_2, \text{rec}} \quad (10)$$

本文选择使用 RBF 神经网络对 PID 参数进行实时优化。以目标流量值与实际进堆氧气流量差值为控制器输入量, 输出值为空压机控制信号, 控制方程如下:

$$e_{ca} = \lambda_{O_2} \times W_{O_2, \text{rec}} - W_{O_2, \text{in}} \quad (11)$$

$$u(t) = k_p \times e_{ca}(t) + k_i \int_0^t e_{ca}(t) dt + k_d \times \frac{de_{ca}(t)}{dt} \quad (12)$$

式中: λ_{O_2} 为电堆目标过氧比, 取值为 2; k_p 、 k_i 、 k_d 分别为 RBF-PID 控制器中的比例增益、积分增益、微分增益, 并由 RBF 神经网络进行实时优化。控制结构如图 2 所示。

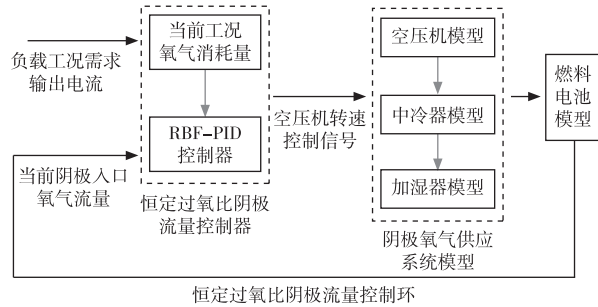


图2 阴极过氧比控制结构

2.2 自适应神经模糊推理系统

ANFIS 作为一种多层前馈控制策略, 适用于解决复杂非线性控制系统出现的问题^[12]。根据神经网络提供学习算法以及网络结构, 模糊逻辑推理提供模糊规则和隶属度函数, 使之同时兼有神经网络的学习能力与模糊规则的推理能力, 并且模糊规则可有效消除人工神经网络得到权值但无法解释这一缺点^[13]。本文所使用的 ANFIS 的结构简化图如图 3 所示。

该网络结构可划分为 5 层, 其中 1 至 3 层为前件规则, 其余均为后件规则, 其中第一层和第五层参数为学习参数。

1) 第一层为模糊化层。输入值经隶属度函数计算后, 即可得到各个输入量所对应的隶属度值:

$$O_i^1 = \mu A_i(x), O_i^1 = \mu B_{i-3}(x) \quad (13)$$

式中: O_i^1 代表隶属度, 计算出输入量满足 A 或 B 的程

度, 本文使用高斯基函数对其进行计算:

$$\mu A_i(x) = \exp[-(x_i - c_i^n)^2 / (2\sigma_i^{2n})] \quad (14)$$

式中: c_i^n 、 σ_i^n 分别代表隶属度函数的均值和方差。

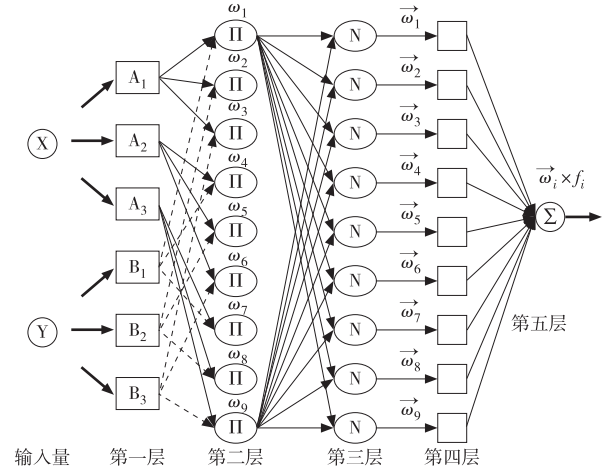


图3 ANFIS 组成结构

2) 第二层为模糊规则层。将模糊化层输入至该节点的不同隶属度值进行相乘, 所得到的就是该条规则的适用程度。

3) 第三层为标准化层。通过计算得到某节点输入的适应度值占总节点输入适应度的比重。

$$O_i^3 = \bar{\omega}_i = \omega_i / \sum_i \omega_i \quad (15)$$

4) 第四层为去模糊化层。根据规则的差异, 利用多项式对输入至该层适应度比重值进行计算, 得到输出值:

$$O_i^4 = \bar{\omega}_i f_i = \bar{\omega}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (16)$$

5) 第五层为求和层。通过对去模糊化层各个节点的输出值进行累加求和, 即可得到 ANFIS 控制器的输出值:

$$O_i^5 = \sum_i \bar{\omega}_i \cdot f_i = \sum_i \omega_i f_i / \sum_i \omega_i \quad (17)$$

2.3 基于 ANFIS 的氢气流量控制器建模

为改善氢气压力跟随速度和超调量, 本文建立两输入一输出的 ANFIS 控制模型, 将通过传统 PID 控制的阴阳极压力偏差 e_{an} 、输入电流 I_{st} 及 PID 控制器输出流量信号作为输入数据, 通过其神经网络的学习能力和模糊控制推理能力对压力偏差进行辨识; 阳极进气流量 $W_{H_2, \text{in}}$ 作为输出数据, 控制器结构如图 4 所示。其中阴阳极恒压差 PID 控制策略控制方程如下:

$$e_{an} = P_{an} - P_{ca} \quad (18)$$

$$u(t) = k_p \times e_{an}(t) + k_i \int_0^t e_{an}(t) dt + k_d \times \frac{de_{an}(t)}{dt} \quad (19)$$

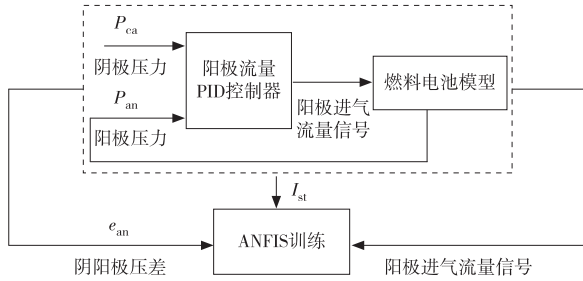


图4 氢气流量控制器结构图

在 ANFIS 训练过程中, 首先将输入、输出数据同时作为 Sugeno 型模糊逻辑控制器参数, 将 I_{st} 及 e_{an} 根据工况不同划分为 6 部分, 将非模糊量输入值映射至由高斯隶属度函数, 通过模糊语言中的“*If-then*”规则表征输入特性, 结合压力偏差 e_{an} 修正模糊输出, 达到控制目的, 生成模糊文件。具体控制流程如图 5 所示。

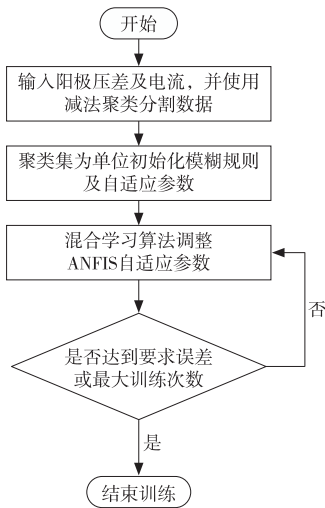


图5 阳极氢气流量 ANFIS 训练流程

经训练后得到基于 ANFIS 的阴阳极恒压差控制器, 结构如图 6 所示。

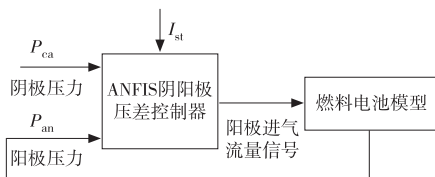
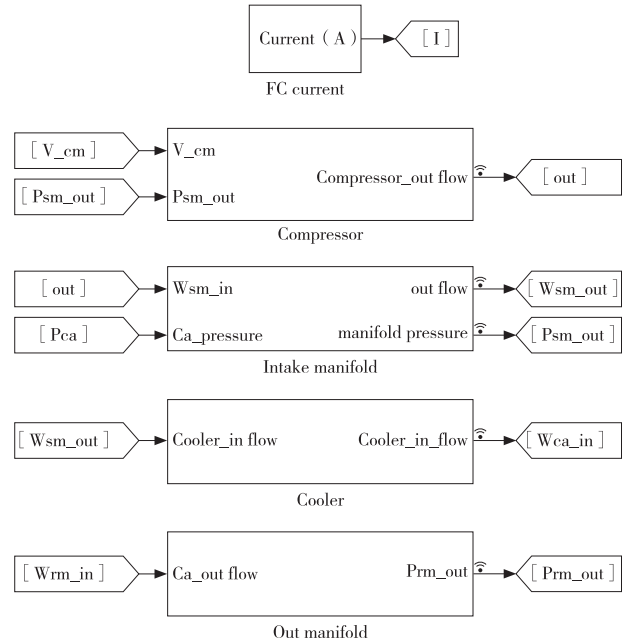


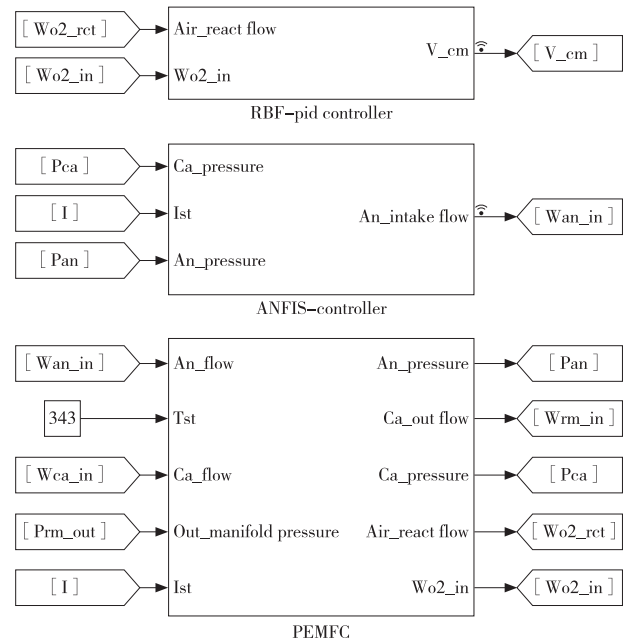
图6 基于 ANFIS 的氢气流量控制器结构图

3 仿真结果及分析

本文通过 MATLAB/Simulink 建立燃料电池系统动态仿真模型, 与传统 PID、模糊自适应 PID、RBF-PID 控制策略进行对比, 证实 ANFIS 控制策略的有效性; 阴极控制策略方面, 采用 RBF-PID 控制空压机输入电压, 具体模型如图 7 所示。



(a) 基于 Simulink 搭建的阴极供应系统模型



(b) 基于 Simulink 搭建的阴阳极压力差控制器及电堆模型

图7 基于 Simulink 搭建的燃料电池系统模型

3.1 测试工况设定

模型构建所输入的负载电流在传统阶跃负载电流的基础上,增加了斜坡上升以及下降工况,在 75 ~ 100 s 时,由 175 A 递增至 200 A;在 175~200 s 时,由 250 A 递减至 200 A;200~225 s 保持稳定工况输出,如图 8 所示。

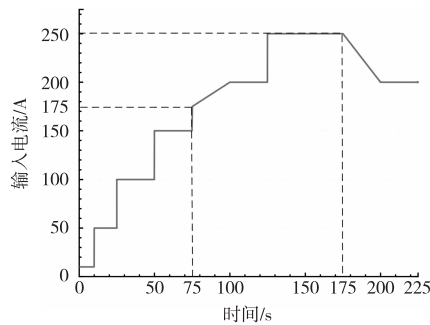


图 8 PEMFC 负载电流

3.2 阴极侧动态响应结果分析

阴极方面采用 RBF-PID 对空压机电压进行控制,进而达到减小过氧比误差和保持阴极压力稳定的目的,过氧比变化如图 9 所示。在变载时过氧比波动最大为 0.63,符合运行要求。

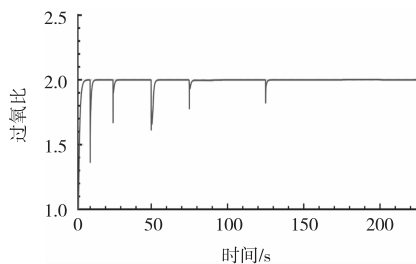


图 9 阴极过氧比变化曲线

3.3 阳极侧动态响应结果分析

阳极侧压力选择跟随阴极侧压力变化而改变,图 10~12 分别为 PID 控制策略、Fuzzy-PID 控制策略、RBF-PID 控制策略与 ANFIS 控制的氢气进气流量 $W_{H_2, in}$ 对比。结果表明,在 50 s、75 s 时出现较大超调,使用 ANFIS 控制的进气流量与 PID、Fuzzy-PID、RBF-PID 控制的进气流量相比,超调量分别下降了 33%、27.45%、14.98%;在 75 s 时,超调量下降均为 35%左右。

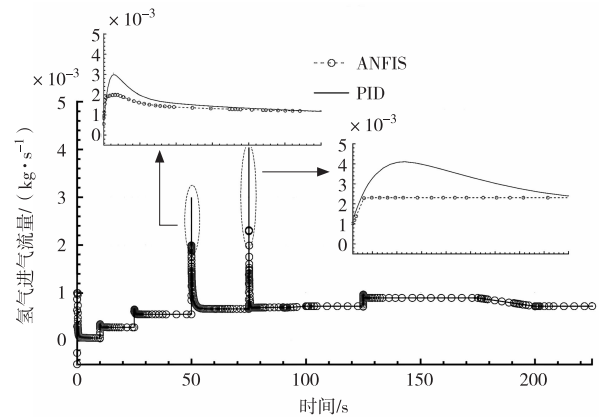


图 10 ANFIS 与 PID 流量控制对比

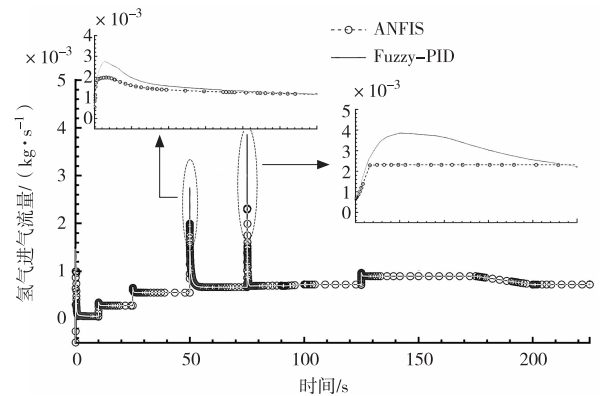


图 11 ANFIS 与 Fuzzy-PID 流量控制对比

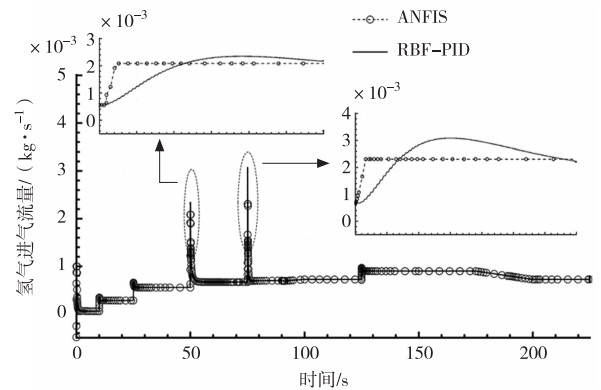


图 12 ANFIS 与 RBF-PID 流量控制对比

阴阳极压力输出曲线如图 13 所示,通过阴阳极压力曲线分析可得,使用 PID、Fuzzy-PID、RBF-PID 控制存在压力调节滞后现象,ANFIS 控制策略可以有效加快阳极氢气调节速度,实现阴阳极压力快速平稳控制。

整个仿真过程中,阴阳极压力差曲线如图 14 所示,在工况阶跃变化时,使用 ANFIS 控制的阴阳极压力误差稳定在 20 kPa 左右,压力偏差值均小于 1%。

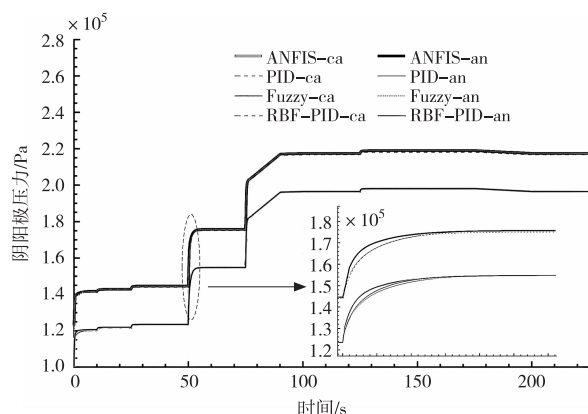


图13 阴阳极压力输出曲线

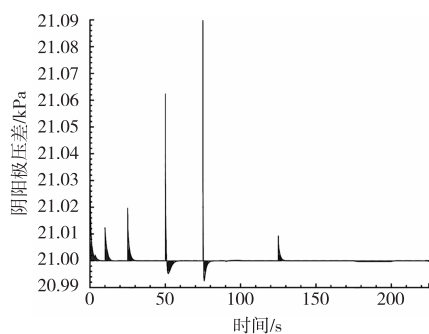


图14 ANFIS 阴阳极动态压力差曲线

4 结束语

本文研究了 PEMFC 阳极供气系统动态控制问题。在负载电流突变的动态工况下,仿真分析结论如下:

1) ANFIS 控制策略可以显著降低工况突变时流量超调量,使压力偏差下降并减少膜两侧应力大小,进而提升燃料电池使用寿命。

2) ANFIS 控制策略加快了阳极压力调节速度及跟随性能,实现了对阳极压力保持高于阴极压力并能迅速跟随阴极压力变化的控制目标。

参考文献:

[1] 弗朗诺·巴尔伯. PEM 燃料电池:理论与实践[M]. 北京:

机械工业出版社,2016:3-9.

- [2] DING Quan,ZHU Kaiqi,CHEN Yang, et al. Performance investigation of proton exchange membrane fuel cells with curved membrane electrode assemblies caused by pressure differences between cathode and anode[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(75):37393-37405.
- [3] 洪凌. 车用燃料电池发电系统氢气回路控制[D]. 杭州:浙江大学,2017.
- [4] WANG Ruiming,ZHANG Yingying,CAO Guangyi. Hybrid intelligent PID control design for PEMFC anode system[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2008, 9(4):6.
- [5] 丁天威,黄兴,王宇鹏,等. 车用燃料电池系统氢气控制方法[C]//中国汽车工程学会. 2019 中国汽车工程学会年会论文集(2). 北京:机械工业出版社,2019:366-371.
- [6] 张家明,马天才,丛铭,等. 大功率燃料电池氢气系统建模与控制[J]. 汽车技术, 2021(2):23-27.
- [7] YE Xichen,ZHANG Tong, Chen Huicui, et al. Fuzzy control of hydrogen pressure in fuel cell system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(16):8460-8466.
- [8] YUAN Hao, DAI Haifeng, WU Wei, et al. A fuzzy logic PI control with feedforward compensation for hydrogen pressure in vehicular fuel cell system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(7):5714-5728.
- [9] 隋建明. 燃料电池空气进给系统建模与控制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [10] 常九健,王晓林,方建平,等. 质子交换膜燃料电池阴阳极压力控制策略研究[J]. 汽车工程, 2021, 43(10):1466-1471.
- [11] 周炳杰. 燃料电池动力系统阴阳极压力平衡控制策略研究[D]. 成都:电子科技大学,2022.
- [12] 李勇,韩非非,张昕喆. 基于自适应神经模糊推理算法的无人机推进燃料电池供气系统性能优化[J]. 推进技术, 2021, 42(6):1395-1409.
- [13] KARABOGA D, KAYA E. Adaptive network based fuzzy inference system (ANFIS) training approaches: a comprehensive survey[J]. Artificial Intelligence Review, 2019, 52(4):2263-2293.