

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.12.004

车载 PEMFC 空气供给系统 OER 控制研究

王宇宁¹, 张纯瑞^{1,2}, 宋福豪^{1,2}

(1. 武汉理工大学汽车工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 先进能源科学与技术广东省实验室佛山分中心(佛山仙湖实验室), 广东 佛山 528200)

摘要: 过氧比(oxygen excess ratio, OER)是质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)输出性能及安全性的影响参数,控制 OER 达到最优值可有效提高系统输出的净功率。针对 PEMFC 空气供给系统 OER 控制问题,文章利用 MATLAB/Simulink 平台建立 PEMFC 空气供给系统四阶模型,并进行系统动力学特性分析,验证模型有效性;设计 3 种控制器对 OER 进行控制,包括前馈比例-积分-微分(feedforward proportion integration differentiation, FF+PID)控制器、前馈自适应模糊 PID(feedforward self-adaptive fuzzy PID, FF+SFPID)控制器及滑模控制器(sliding mode controller, SMC)。在输入扰动情况下,对比分析了定 OER 及最优 OER 下不同控制器的控制效果。仿真结果表明,SMC 对于 OER 的控制具有更短的调节时间且未出现超调现象,抗干扰能力更强,在动态特性和稳态特性上均优于其他 2 种控制器。

关键词: 质子交换膜燃料电池(PEMFC);过氧比(OER);前馈 PID;前馈自适应模糊 PID;滑模控制

中图分类号: TM911.4; TP13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2024)12-1608-09

Research on oxygen excess ratio control of vehicle PEMFC air supply system

WANG Yuning¹, ZHANG Chunrui^{1,2}, SONG Fuhao^{1,2}

(1. School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Foshan Xianhu Laboratory of the Advanced Energy Science and Technology Guangdong Laboratory, Foshan 528200, China)

Abstract: Oxygen excess ratio(OER) is an important parameter that affects the output performance and safety of proton exchange membrane fuel cell(PEMFC). Controlling the OER to reach the optimal value can effectively improve the net power output of the system. To address the issue of OER control of PEMFC air supply system, a four-order model of PEMFC air supply system is established using MATLAB/Simulink platform, and the system dynamics characteristics are analyzed to verify the effectiveness of the model. Three controllers are designed to control OER, including feedforward proportion integration differentiation(FF+PID) controller, feedforward self-adaptive fuzzy PID(FF+SFPID) controller and sliding mode controller(SMC). In the case of input disturbance, the control effects of different controllers under fixed OER and optimal OER are compared and analyzed. The simulation results show that the SMC has shorter adjustment time and no overshoot for the control of OER, and has stronger anti-interference ability. SMC is superior to the other two controllers in dynamic and steady-state characteristics.

Key words: proton exchange membrane fuel cell(PEMFC); oxygen excess ratio(OER); feedforward proportion integration differentiation(FF+PID); feedforward self-adaptive fuzzy PID (FF+SFPID); sliding mode control

收稿日期:2023-02-15;修回日期:2023-06-07

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2023YFB2504300);广西重点研发计划资助项目(桂科 AB22362)和柳州市科技攻关与新产品试制资助项目(2022ABA0103)

作者简介:王宇宁(1976—),女,湖北随州人,博士,武汉理工大学副教授,硕士生导师。

0 引言

目前,由于全球气候变化以及能源危机、环境污染等问题,高效的清洁能源开发及利用迫在眉睫。质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)具有燃料能量转化率高、响应速度快、噪音低及零排放等优点,可广泛应用于汽车、飞机、列车等交通工具及固定电站等方面,因此,PEMFC 被广泛认为是最可靠、最有前景的能源装置^[1-2]。

燃料电池系统一般包括空气供给子系统、氢气供给子系统、加湿子系统以及冷却子系统。其中,空气供给子系统消耗的电能最多,空气压缩机的寄生功率可达整个 PEMFC 系统的输出功率的 25%^[3]。此外,由于空压机和供气歧管的动态特性,在空气供应期间存在时滞性,当负载电流产生突变时,可能会导致阴极中的氧气供应不足,电池输出电压下降,甚至会缩短燃料电池的寿命;若氧气供应量过大,系统的寄生功率就会增加,降低电池的净输出功率,甚至会导致电堆内部气体压力过高造成安全事故^[4]。对于 PEMFC 系统,阴极空气供给系统的控制问题因其对系统性能和安全性的重要性而备受关注^[5]。国内外普遍采用阴极供给氧气质量流量与电化学反应消耗氧气质量流量之比,即过氧比(oxygen excess ratio, OER)来衡量 PEMFC 系统在工作状态下的性能表现。

合理控制 PEMFC 空气供给系统的 OER 是提高 PEMFC 系统输出净功率的有效方法。为此,国内外学者对 PEMFC 空气供给系统的建模与控制问题做了大量的研究。文献[6]通过选取氧气流量、氢气流量、氮气流量、空压机转速、供应管道压力和回流管道压力等 9 个变量,将电堆阴极和阳极的流体动态特性加入模型中,建立 PEMFC 空气供给系统九阶状态空间模型。此模型很好地反映了空气供给系统内部机理,但由于变量过多,计算过程比较复杂;文献[7]提出一种前馈模糊比例-积分-微分(proportion integration differentiation, PID)控制器对 OER 进行控制,相比于传统 PID 控制具有响应速度快、超调量更小的优点;文献[8]建立基于空气供给系统的 PEMFC 六阶动态模型,提出一种改进的模糊-滑模控制策略,对 OER 的调节具有良好的鲁棒性和快速响应性;文献[9]建立空气供给系统模型,提出一种自整定神经网络 PID 控制器对 OER 进行控制,所提出的控制策略在跟踪精度以及抗干扰能

力方面均有良好的表现;文献[10]比较 PID 控制和模型预测控制(model predictive control, MPC)下的瞬态控制性能,提出 MPC 和 PID 串联并联耦合的控制算法对五阶模型 OER 进行控制,取得了较好的跟随效果;文献[11]提出一种基于自适应滑模观测器的最佳 OER 跟踪控制方法,设计一种基于近最优控制器的非线性系统模型,根据实时负载需求,设计动态 OER 优化策略以获得最佳 OER;文献[4]通过建立空气供给系统简化三阶非线性模型,提出一种新型的基于观测器的 PEMFC 供气系统非线性三步控制器来调节 OER,在不同负载变化下对于 OER 具有优异的跟踪性能。目前车载 PEMFC 空气供给系统的主要关注点在于如何控制 OER,进而提升 PEMFC 系统的输出功率以及整体效率。

1 PEMFC 空气供给系统模型

PEMFC 系统主要由空气供给子系统、氢气供给子系统、加湿子系统和冷却子系统组成^[12],系统结构如图 1 所示。空气供给子系统主要由空压机、供应管道、电堆阴极和回流管道 4 个部分组成。

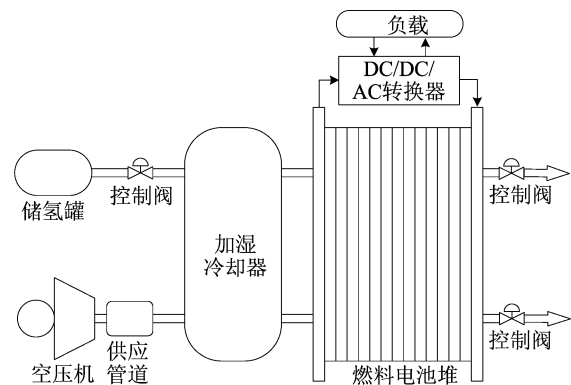


图 1 PEMFC 系统结构图

1.1 阴极流量模型

阴极流量模型主要描述电堆阴极内的气体流动特性,阴极气体的主要成分有氮气、氧气和水蒸气,假设所有气体为理想气体,并且遵循理想气体定律。由于电堆内电化学反应速率很快,假设电堆温度为恒定值。根据质量守恒定律,阴极内氧气、氮气和水蒸气的状态平衡方程如下:

$$\frac{dm_{O_2,ca}}{dt} = W_{O_2,ca,in} - W_{O_2,ca,out} - W_{O_2,reacted} \quad (1)$$

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

$$\frac{dm_{w,ca}}{dt} = W_{v,ca,in} - W_{v,ca,out} + W_{v,ca,gen} +$$

$$W_{v, membr} - W_{l, ca, out} \quad (3)$$

其中: m_{O_2} 、 m_{N_2} 、 $m_{w, ca}$ 分别为氧气、氮气及水蒸气的质量; $W_{O_2, ca, in}$ 、 $W_{O_2, ca, out}$ 、 $W_{O_2, reacted}$ 分别为流入阴极、流出阴极和电化学反应消耗的氧气质量流量; $W_{N_2, ca, in}$ 、 $W_{N_2, ca, out}$ 分别为流入阴极和流出阴极的氮气质量流量; $W_{v, ca, in}$ 、 $W_{v, ca, out}$ 、 $W_{v, ca, gen}$ 、 $W_{v, membr}$ 、 $W_{l, ca, out}$ 分别为流入阴极、流出阴极、电化学反应生成、穿过质子交换膜的水蒸气质量流量和流出阴极液态水的质量流量。

1.2 空压机模型

空压机模型主要是根据压缩机转动参数和压缩机空气流量建立的,空压机的转速动态模型可表示为:

$$J_{cp} \frac{d\omega_{cp}}{dt} = (\tau_{cm} - \tau_{cp}) \quad (4)$$

其中: J_{cp} 为空压机转动惯量; ω_{cp} 为空压机转速; τ_{cm} 为空压机电机驱动力矩; τ_{cp} 为空压机负载力矩。

空压机电机驱动力矩可由电机静态方程计算得到:

$$\tau_{cm} = \eta_{cm} \frac{k_t}{R_{cm}} (v_{cm} - k_v \omega_{cp}) \quad (5)$$

其中: k_t 、 R_{cm} 、 k_v 为电机常数; η_{cm} 为电机机械效率。

空压机负载力矩可由热力学方程求得:

$$\tau_{cp} = \frac{C_p}{\omega_{cp}} \frac{T_{atm}}{\eta_{cp}} \left[\left(\frac{p_{sm}}{p_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] W_{cp} \quad (6)$$

其中: τ_{cp} 为空压机负载力矩; C_p 为空气比热容常数; T_{atm} 为大气温度; γ 为空气比热容比; W_{cp} 为空压机流量; η_{cp} 为空压机机械效率; p_{sm} 为供应管道压力; p_{atm} 为标准大气压力。

1.3 供应管道及回流管道模型

阴极供应管道包括空气压缩机、加湿器以及冷却器等辅助器件的管道和接口。供应管道空气质量的微分方程为:

$$\frac{dm_{sm}}{dt} = W_{cp} - W_{sm, out} \quad (7)$$

其中: m_{sm} 为累计在供应管道空气的质量; $W_{sm, out}$ 为流出供应管道空气的质量流量。

根据空气热力学定律以及理想气体定律,供应管道空气压力的微分方程可表示为:

$$\frac{dp_{sm}}{dt} = \frac{\gamma R}{V_{sm}} (W_{cp} T_{cp, out} - W_{sm, out} T_{sm}) \quad (8)$$

其中: V_{sm} 为供应管道的体积; R 为气体常数; $T_{cp, out}$ 为空气离开空压机的温度; T_{sm} 为供应管道内气体温度。

进入供应管道和流出供应管道的空气压力差较小,供应管道流出空气流量可表示为:

$$W_{sm, out} = k_{sm, out} (p_{sm} - p_{ca}) \quad (9)$$

其中, $k_{sm, out}$ 为供应管道孔口常数。

回流管道内空气温度变化较小,可忽略不计,故回流管道压力的微分方程可表示为:

$$\frac{dp_{rm}}{dt} = \frac{RT_{rm}}{V_{rm}} (W_{ca, out} - W_{rm, out}) \quad (10)$$

其中: V_{rm} 为回流管道的体积; T_{rm} 为回流管道内气体温度; $W_{ca, out}$ 为进入回流管道气体流量; $W_{rm, out}$ 为回流管道出口处气体流量。

1.4 PEMFC 空气供给系统四阶模型

结合文献[6, 12], PEMFC 空气供给系统状态空间模型可表示为:

$$\dot{x} = f(x) + g_u u + g_d d \quad (11)$$

其中: 状态变量 x 包含 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 , x_1 为阴极氧气分压 p_{O_2} , x_2 为阴极氮气分压 p_{N_2} , x_3 为空压机转速 ω_{cp} , x_4 为供应管道压力 p_{sm} ; $u = v_{cm}$, 为空压机电压, 作为系统控制输入; $d = I_{st}$, 为电堆电流, 作为可测量扰动输入。PEMFC 空气供给系统四阶状态空间模型可表示为:

$$\dot{x}_1 = c_1(-x_1 - x_2 + x_4 - c_2) -$$

$$\frac{c_3 x_1 W(x_1, x_2)}{c_4 x_1 + c_5 x_2 + c_6} - c_7 d \quad (12)$$

$$\dot{x}_2 = c_8(-x_1 - x_2 + x_4 - c_2) - \frac{c_3 x_2 W(x_1, x_2)}{c_4 x_1 + c_5 x_2 + c_6} \quad (13)$$

$$\dot{x}_3 = -c_9 x_3 - \frac{c_{10}}{x_3} \left[\left(\frac{x_4}{c_{11}} \right)^{c_{12}} - 1 \right] y_3(x_3, x_4) + c_{13} u \quad (14)$$

$$\dot{x}_4 = c_{14} \left\{ 1 + c_{15} \left[\left(\frac{x_4}{c_{11}} \right)^{c_{12}} - 1 \right] \right\} \times$$

$$[y_3(x_3, x_4) - c_{16}(-x_1 - x_2 + x_4 - c_2)] \quad (15)$$

其中

$$W(x_1, x_2) =$$

$$\begin{cases} c_{17}(x_1 + x_2 + c_2) \left(\frac{c_{11}}{x_1 + x_2 + c_2} \right)^{c_{18}} \times \\ \sqrt{1 - \left(\frac{c_{11}}{x_1 + x_2 + c_2} \right)^{c_{12}}}, \frac{c_{11}}{x_1 + x_2 + c_2} > c_{19}; \\ c_{20}(x_1 + x_2 + c_2), c_{11}/(x_1 + x_2 + c_2) \leq c_{19} \end{cases} \quad (16)$$

系统可测量输出矩阵为:

$$y = [y_1 \quad y_2 \quad y_3]^T =$$

$$[y_1(x_1, x_2) \quad x_4 \quad y_3(x_3, x_4)]^T \quad (17)$$

其中: y_1 为电堆电压 V_{st} ; y_2 为供应管道压力 p_{sm} ;

y_3 为空压机流量 W_{cp} 。 y_3 可近似表示为:

$$y_3 = \frac{y_3^{\max} x_3}{x_3^{\max}} \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-r_c \left(s_c + \frac{x_3^2}{q_c} - x_4 \right)}{s_c + \frac{x_3^2}{q_c} - x_4^{\min}} \right] \right\} \quad (18)$$

其中: $y_3^{\max} = 0.0975 \text{ kg/s}$; $x_3^{\max} = 11500 \text{ rad/s}$; $x_4^{\min} = 5 \times 10^4 \text{ Pa}$; $q_c = 462.25 \text{ rad}^2 / (\text{s}^2 \cdot \text{Pa})$; $r_c = 15$; $s_c = 10^5 \text{ Pa}$ 。

OER 反映了燃料电池空气供给系统的氧气供给状况,对整个系统性能的好坏有着重要影响。OER 定义为阴极供给氧气质量流量与电化学反应消耗氧气质量流量之比,即

$$\lambda_{O_2} = \frac{W_{O_2, \text{in}}}{W_{O_2, \text{react}}} = \frac{c_{23}}{c_{24}d} (x_4 - x_1 - x_2 - c_2) \quad (19)$$

PEMFC 性能指标表示如下:

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 d - c_{21} u (u - c_{22} x_3) \\ \frac{c_{23}}{c_{24}d} (x_4 - x_1 - x_2 - c_2) \end{bmatrix} \quad (20)$$

其中: z_1 为系统净功率; z_2 为过氧比; $c_i (i=1, 2, \dots, 24)$ 为常数,具体模型参数见文献[12]。

2 系统动力学特性分析

动力学特性分析是指对系统动力学模型中的关键参数、变量、因素等进行分析,以便于判断模型的有效性、全面了解系统的行为和性质。本文通过构建 2 种不同的工况来研究系统的动力学特性,针对不同工况下系统模型中各个输出量的变化进行分析,深入探讨系统的行为和特性,从而更好地验证模型的准确性以及更好地了解系统的内部运行方式。

工况 1 为负载电流 150 A,空压机电压阶跃变化。该工况下系统动力学特性曲线如图 2 所示。

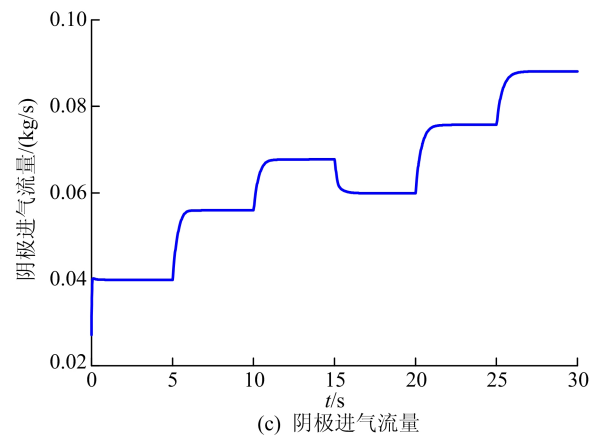
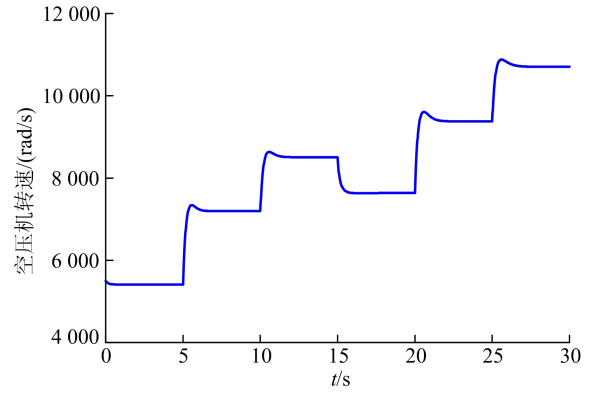
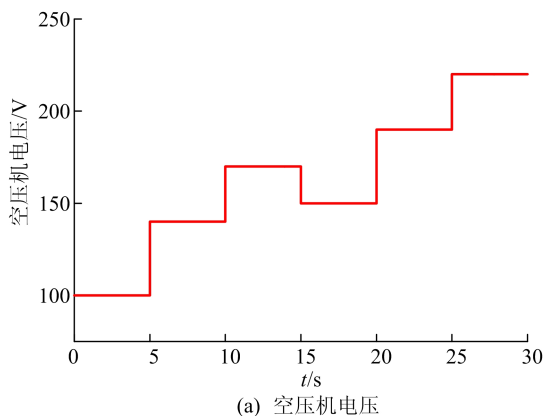


图 2 工况 1 系统动力学特性

从图 2b、图 2c 可以看出,空压机转速和阴极进气流量与空压机电压具有相同的变化趋势。这是由于随着空压机电压的增大,通过式(4)和式(5)中空压机电压与电机驱动力矩和转速之间的关系可知,驱动力矩和转速均会相应增大,这会使得供应管道和阴极内部的进气流量增加。反之,若空压机电压减小,空压机转速和阴极进气流量则会减小。

工况 2 为空压机电压恒定为 150 A,负载电流阶跃变化。该工况下系统动力学特性曲线如图 3 所示。

从图 3b 可以看出,氧气分压与电堆负载电流的变化趋势相反,这是由于负载电流增加引起电堆内部电化学反应加速,使得氧气消耗量增加,因此阴极内氧气分压下降,而当负载电流减少时,氧气消耗量减少,氧气分压则会随之增加。

从图 3c 可以看出,而阴极进气流量与电堆负载电流具有相同的变化趋势,原因在于随着负载电流的增加,氧气分压下降使得阴极压力逐渐降低,这会导致空气进入阴极的流动阻力下降,从而使进入阴极的空气流量逐渐增加。反之,当负载电流减小时,阴极压力会相应增大,这会导致空气

进入阴极的流动阻力增加,从而使进入阴极的空气流量逐渐减小。

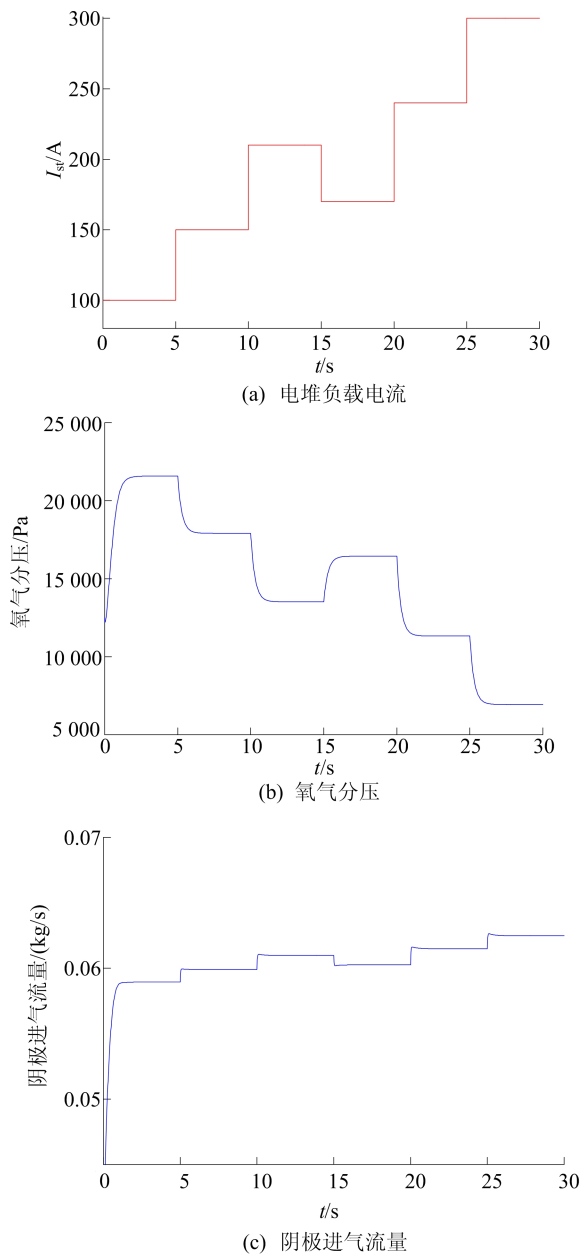


图 3 工况 2 系统动力学特性

通过以上 2 组不同工况下系统动力学特性的分析,可以看出在不同的工况下,系统中各个状态量之间的变化趋势不同,本文所建立的 PEMFC 空气供给系统模型能够准确地反映出这些动态变化。

3 控制器设计

3.1 前馈 PID 控制器

前馈 PID(feedforward PID, FF+PID)控制器是一种开环控制,当系统有外部扰动输入时,控

制器根据扰动量的大小,按补偿原理使被控量避免出现偏差。前馈控制可用于补偿电压,以减弱电流扰动对系统动态性能的影响^[13]。PID 控制是一种基于目标值与测量值之间的偏差信号的控制策略,在 PID 控制器的作用下,偏差信号经过比例、积分和微分调节后控制被控对象。传统 PID 控制器结构简单,对线性与非线性系统都具有良好的鲁棒性,被广泛应用于工业过程的控制中。前馈 PID 控制结构如图 4 所示。

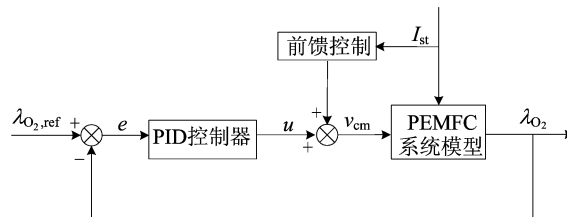


图 4 FF+PID 控制器结构

3.2 前馈自适应模糊 PID 控制器

传统 PID 控制和模糊逻辑控制对于非线性系统具有鲁棒性好、结构简单等优点,但是对于本文研究的多变量非线性耦合系统,其内部参数总是随着工作状态而改变,传统的 PID 控制不能让系统保持在相对稳定的状态。因此,本文提出一种前馈自适应模糊 PID(FF self-adaptive fuzzy PID, FF+SFPID)控制器来实时求解非线性系统,与传统的 PID 控制器相比具有自适应的特性,即 PID 控制器的参数可以通过在线模糊逻辑进行相应的调整。

前馈自适应模糊控制器结构如图 5 所示。

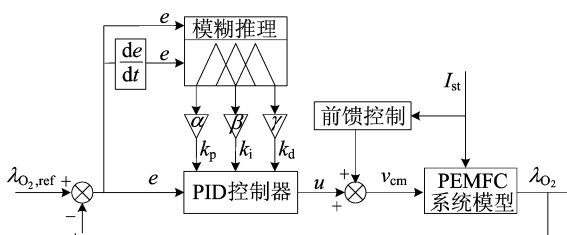


图 5 FF+SFPID 控制器结构

在模糊控制器的设计中,输入为偏差 $e = \Delta\lambda_{O_2}$ 和偏差变化率 $\dot{e} = d\Delta\lambda_{O_2}/dt$,输出为 k_p, k_i 和 k_d 。偏差 e 的基本论域为 $[-0.5, 0.5]$,偏差变化率 \dot{e} 的基本论域为 $[-80, 80]$,输出 k_p, k_i 和 k_d 的范围分别为 $[0, 400], [0, 1\ 000]$ 和 $[0, 2]$,将其缩放到模糊区间 $[0, 1]$,比例因子 α, β, γ 分别为 400、1 000、2。模糊规则见表 1 所列,共包含 9 条规则。

表 1 FF+SFPID 模糊规则表

k_p, k_i, k_d	$\Delta\lambda_{O_2}$		
	S	M	L
$\frac{d\Delta\lambda_{O_2}}{dt}$	S	SMS	SLS
	M	MLM	MMS
	L	LLL	LSS

3.3 滑模控制器

所搭建的 PEMFC 空气供给系统具有很强的非线性,传统的控制方法难以满足需求。滑模控制器(sliding mode controller, SMC)是一种特殊的变结构控制,通过控制系统的状态,可以使其收敛至所设计的切换面,从而实现滑模量的控制,对于非线性系统的控制具有良好的鲁棒性,因而受到广泛关注。

本文设计的滑模控制器目的是对 OER 进行控制,使其跟踪 OER 期望值。选取 PEMFC 空气供给系统实际输出流量与期望流量的差作为跟踪误差:

$$e = W_{cp} - W_{cp,ref} \quad (21)$$

定义跟踪误差函数 s 为:

$$s = ce + \dot{e} \quad (22)$$

其中, $c > 0$ 。

$W_{cp,ref}$ 与 OER 期望值 $\lambda_{O_2,ref}$ 之间的关系为:

$$W_{cp,ref} = (1 + \omega_{atm})W_{air} = \left(1 + \frac{M_v}{M_{a,atm}} \frac{\phi_{atm} p_{sat}}{p_{atm} - \phi_{atm} p_{sat}}\right) \frac{1}{\omega_{O_2}} \lambda_{O_2,ref} M_{O_2} \frac{nI_{st}}{4F} \quad (23)$$

其中: M_v 为水蒸气摩尔质量; $M_{a,atm}$ 为干空气摩尔质量; ϕ_{atm} 为环境空气相对湿度; ω_{O_2} 为空气中氧气的质量分数; M_{O_2} 为氧气摩尔质量; n 为电池数量; F 为法拉第常数。

选择趋近律为指数趋近律^[14],即

$$\dot{s} = -\epsilon \operatorname{sgn}(s) - ks \quad (24)$$

其中: ϵ 和 k 为控制增益, $\epsilon > 0, k > 0$; $\operatorname{sgn}(s)$ 为符号函数。该趋近律能使控制变量快速收敛,更适合解决有较大阶跃响应的控制问题,但存在抖振现象,为了降低抖振,本文采用饱和函数代替符号函数。饱和函数为:

$$\operatorname{sat}(s) = \begin{cases} 1, & s > \Delta; \\ ks, & |s| \leq \Delta; \\ -1, & s < -\Delta \end{cases} \quad (25)$$

其中, $k = 1/\Delta$, Δ 称为“边界层”。饱和函数 $\operatorname{sat}(s)$ 如图 6 所示,饱和函数的本质是在边界层外采用切换控制,在边界层之内采用线性化反馈控制。调节边界层厚度可以有效降低抖振。

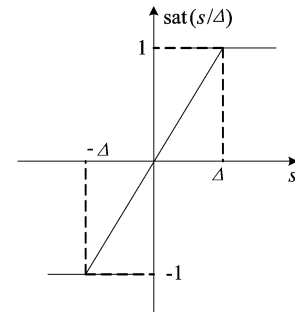


图 6 饱和函数

根据式(21)、式(22)及式(24)有:

$$\begin{cases} \dot{e} = \dot{W}_{cp} - \dot{W}_{cp,ref}, \\ \ddot{e} = \ddot{W}_{cp} - \ddot{W}_{cp,ref}, \\ \dot{s} = c\dot{e} + \ddot{e} = g_1(x) + g_2(x)u = \\ \quad -\epsilon \operatorname{sat}(s) - ks \end{cases} \quad (26)$$

其中: $u = v_{cm}$, 为四阶状态空间方程中的输入控制量; $g_1(x)$ 、 $g_2(x)$ 为状态变量的函数。

滑模控制率可表示为:

$$u = \frac{1}{g_2(x)} [-\epsilon \operatorname{sat}(s) - ks - g_1(x)] \quad (27)$$

取李雅普诺夫函数:

$$V = \frac{1}{2}s^2 \quad (28)$$

对式(28)求导有:

$$\dot{V} = s\dot{s} = s[-\epsilon \operatorname{sat}(s) - ks] = -\epsilon \operatorname{sat}(s) - ks^2 \leq 0 \quad (29)$$

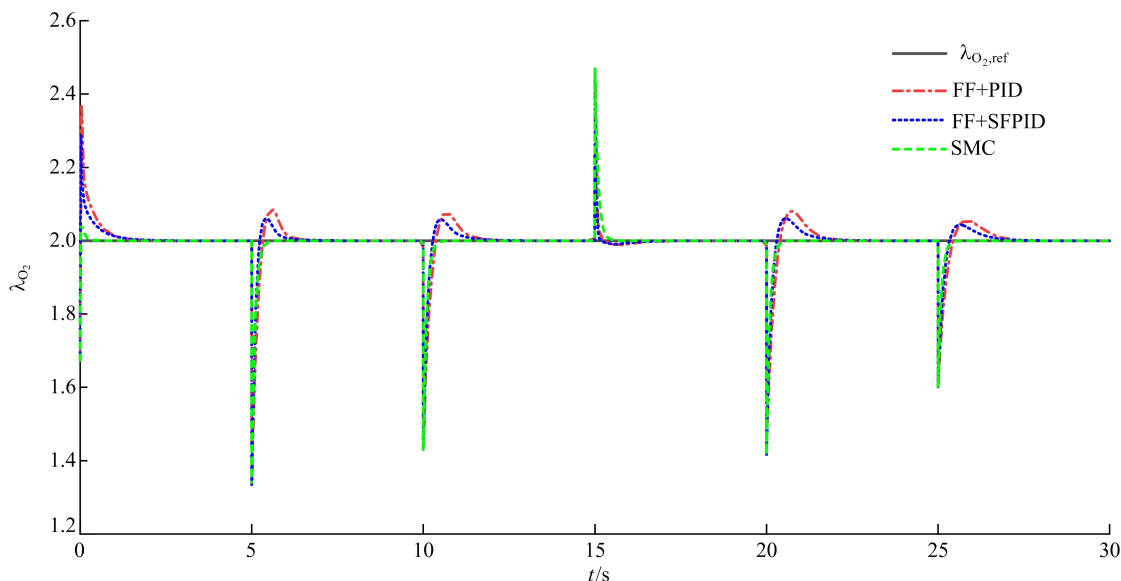
故系统是渐进稳定的。

4 仿真结果与分析

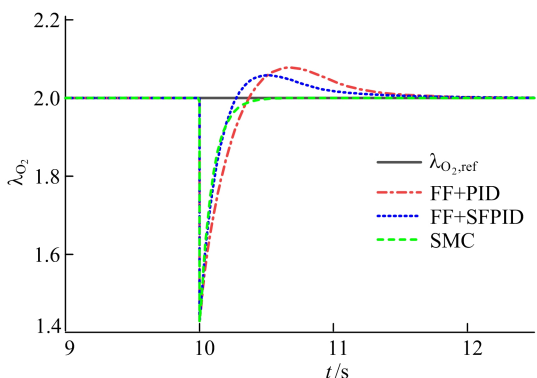
4.1 定 OER 下控制效果

研究表明,当 OER 为 2 时,系统即使在负载扰动(即电堆电流变化)下也能表现出良好的稳定性,防止出现“氧饥饿”的状况,故选取 OER 为 2 来研究不同控制策略的控制效果。PEMFC 电堆负载电流变化如图 3a 所示,电流的变化范围为 100~300 A。定 OER 条件下不同控制策略仿真效果如图 7 所示。

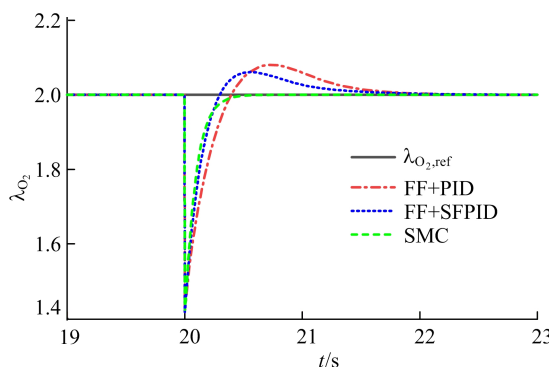
OER 跟踪误差如图 8 所示。由图 7、图 8 可知,随着负载电流阶跃变化,FF+PID、FF+SFPID 与 SMC 这 3 种控制器均能将 OER 调节至参考值,相比于 FF+PID 和 FF+SFPID 控制器,SMC 控制器调节更为平稳,除了在刚开始出现较小的超调量外,整个过程都表现出良好的控制性能,如在 10~15 s 电流扰动下,FF+PID 控制的超调量为 3.85%,FF+SFPID 控制下的超调量为 2.90%,而 SMC 控制器则未出现超调,具有良好的稳定性。



(a) 30 s内仿真效果对比



(b) 第10秒仿真效果



(c) 第20秒仿真效果

图 7 定 OER 条件下不同控制策略仿真效果

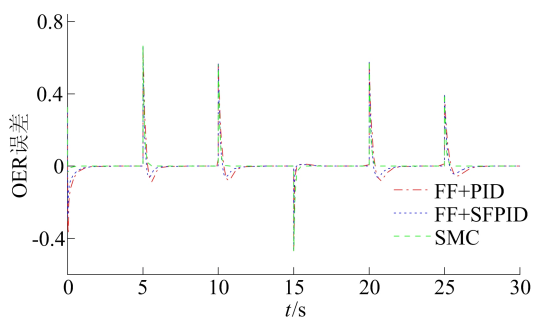


图 8 定 OER 条件下跟踪误差

4 种不同的误差积分准则,包括绝对误差积分(integral of absolute error, IAE),平方误差积分(integral of squared error, ISE),时间乘绝对误差积分(integral of time multiplied absolute error, ITAE),时间乘平方误差积分(integral of time multiplied squared error, ITSE)。计算公式分别为:

$$E_{IAE} = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (30)$$

$$E_{ISE} = \int_0^{\infty} [e(t)]^2 dt \quad (31)$$

$$E_{ITAE} = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (32)$$

$$E_{ITSE} = \int_0^{\infty} t[e(t)]^2 dt \quad (33)$$

定 OER 跟踪误差积分结果见表 2 所列。从表 2 可以看出,SMC 控制器各误差积分值均低于另外 2 种控制器。

表 2 定 OER 跟踪误差积分结果

误差积分类型	FF+PID	FF+SFPID	SMC
IAE	0.635 7	0.448 8	0.273 2
ISE	0.132 1	0.086 5	0.076 9
ITAE	8.473 2	6.056 0	3.764 0
ITSE	1.648 0	1.124 0	1.009 0

4.2 最优 OER 下控制效果

电堆电流变化时,不同 OER 会对燃料电池系统输出净功率产生影响,为了降低寄生功率,提

高燃料电池系统性能,应考虑最优 OER。根据不同负载电流下的 OER 和系统净功率之间的关系,最优 OER 公式表示^[15]为:

$$\lambda_{O_2,ref} = \frac{5 \times 10^{-8} I_{st}^3 - 2.87 \times 10^{-5} I_{st}^2 + 2.23 \times 10^{-3} I_{st} + 2.5}{(34)}$$

在电流扰动下 FF+PID、FF+SFPID 以及 SMC 控制器在最优 OER 下的控制效果如图 9 所示。

最优 OER 条件下,OER 跟踪误差如图 10 所示。

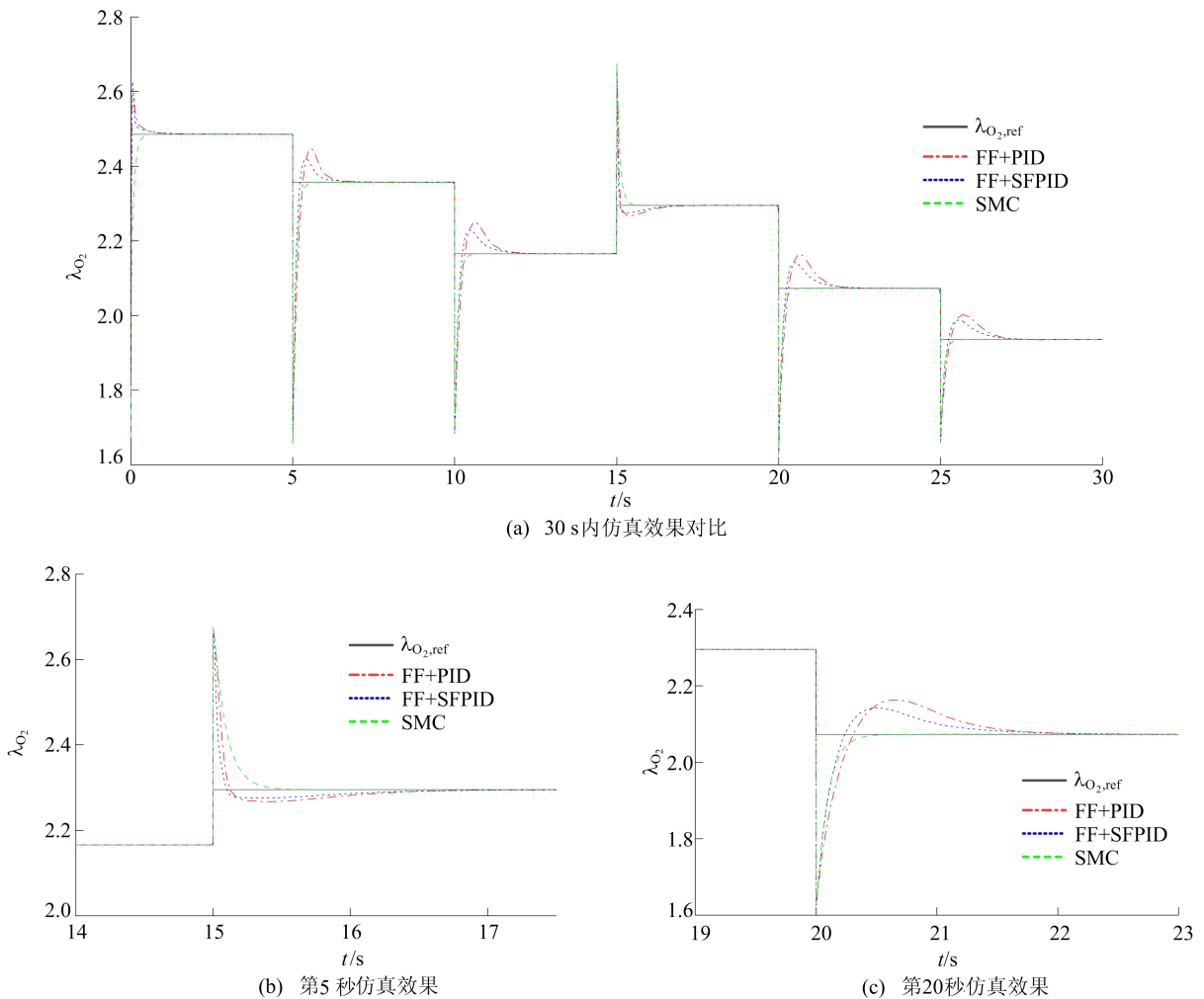


图 9 最优 OER 条件下不同控制策略仿真效果

由图 9、图 10 可知,随着负载电流阶跃上升,FF+PID 和 FF+SFPID 控制器调节 OER 达到稳态的时间和超调量明显大于 SMC 控制器,在 10~15 s 的电流扰动下,FF+PID 的超调量为 3.83%,FF+SFPID 控制的超调量为 2.91%,而 SMC 控制器即使在大电流扰动下,仍能够快速平稳地到达稳态值,并且没有出现超调的现象,整个过程都表现出了优异的控制性能。

OER 跟踪误差积分结果见表 3 所列,SMC 控制器 IAE、ISE、ITAE、ITSE 分别为 0.271 1、0.071 0、2.984 0、0.655 0,除了 ISE 比 FF+SFPID 的略大以外,其余各项误差积分均小于另外 2 种控制器,因此所设计的 SMC 控制器具有良好

的动态特性和稳态特性。

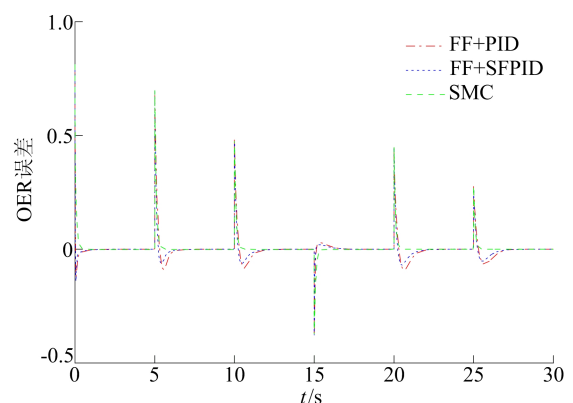


图 10 最优 OER 条件下跟踪误差

表 3 最优 OER 跟踪误差积分结果

误差积分类型	FF+PID	FF+SFPID	SMC
IAE	0.528 1	0.385 3	0.271 1
ISE	0.091 5	0.063 4	0.071 0
ITAE	7.411 0	5.406 0	2.984 0
ITSE	1.002 0	0.691 6	0.655 0

5 结 论

本文建立了 PEMFC 空气供给系统四阶模型,并通过构建不同工况对系统动力学特性进行分析,验证了模型的有效性和准确性。针对空气供给系统 OER 的控制,设计了 FF+PID 控制器、FF+SFPID 控制器和 SMC 控制器,使 OER 跟随期望值。比较了不同控制器在不同负载电流下对于定 OER 以及最优 OER 的控制效果,并且通过不同类型的误差积分(包括 IAE、ISE、ITAE 和 ITSE)进一步对控制性能进行量化。仿真结果表明,OER 可以通过所设计的控制器得到不同程度的控制效果,SMC 控制器在不同电流干扰下对 OER 的控制稳态特性和动态特性上均优于其他 2 种控制器,即使是在负载发生瞬态变化以及扰动较大时,SMC 控制器依然表现出优异的稳定性和抗干扰能力。

[参 考 文 献]

- [1] 邵志刚,衣宝廉.氢能与燃料电池发展现状及展望[J].中国科学院院刊,2019,34(4):469-477.
- [2] DERBELI M, BARAMBONES O, FARHAT M, et al. Robust high order sliding mode control for performance improvement of PEM fuel cell power systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(53):29222-29234.
- [3] TIRNOVAN R, GIURGEA S. Efficiency improvement of a PEMFC power source by optimization of the air management[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(9):7745-7756.
- [4] MA Y, ZHANG F, GAO J, et al. Oxygen excess ratio control of PEM fuel cells using observer-based nonlinear triple-step controller[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(54):29705-29717.
- [5] KURNIA J C, SASMITO A P, SHAMIM T. Advances in proton exchange membrane fuel cell with dead-end anode operation: a review[J]. Applied Energy, 2019, 252:113416.
- [6] PUKRUSHPAN J T. Modeling and control of fuel cell systems and fuel processors[D]. Michigan: The University of Michigan, 2003.
- [7] OU K, WANG Y X, LI Z Z, et al. Feedforward fuzzy-PID control for air flow regulation of PEM fuel cell system [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(35):11686-11695.
- [8] 夏磊,赵冬冬,李飞,等. PEMFC 阴极 OER 控制方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(5):987-993.
- [9] DAMOUR C, BENNE M, LEBRETON C, et al. Real-time implementation of a neural model-based self-tuning PID strategy for oxygen stoichiometry control in PEM fuel cell [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(24):12819-12825.
- [10] WANG Y, LI H, FENG H, et al. Simulation study on the PEMFC oxygen starvation based on the coupling algorithm of model predictive control and PID[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 249:114851.
- [11] ZHU Y, ZOU J, LI S, et al. An adaptive sliding mode observer based near-optimal OER tracking control approach for PEMFC under dynamic operation condition[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(2):1157-1171.
- [12] ABOUOMAR M S, SU Y X, ZHANG H J. Hybrid feedback-feedforward fuzzy control of PEM fuel cell air feed system with electromagnetic field optimization[J]. IETE Journal of Research, 2022, 68(1):575-591.
- [13] BEIRAMI H, SHABESTARI A Z, ZERAFAT M M. Optimal PID plus fuzzy controller design for a PEM fuel cell air feed system using the self-adaptive differential evolution algorithm [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(30):9422-9434.
- [14] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:清华大学出版社, 2019.
- [15] MATRAJI I, LAGHROUCHE S, JEMEI S, et al. Robust control of the PEM fuel cell air-feed system via sub-optimal second order sliding mode[J]. Applied Energy, 2013, 104:945-957.

(责任编辑 吴 亮)