

PEMFC 空气传输系统控制方法研究

潘俊刚¹, 刘志祥^{2,4}, 丁 一¹, 陈维荣¹, 卜庆元^{3,4}

(1. 西南交通大学电气工程学院, 成都 611756; 2. 佛山科学技术学院, 佛山 528000;
3. 广东国鸿氢能科技有限公司, 云浮 527326; 4. 佛山(云浮)氢能产业与新材料发展研究院, 云浮 527326)

摘 要: 针对质子交换膜燃料电池空气传输系统的强耦合性、非线性和时变性特点, 该文将多模态PID和传统PID控制方法用于140 kW燃料电池空气传输系统中, 通过跟踪空压机出口空气质量流量进行实时控制, 实现空气传输系统动态响应快, 超调量小, 稳态波动小的控制效果; 能够满足车载质子交换膜燃料电池的实时动态工况要求; 并从系统响应特性和能耗等方面比较2种控制方法的控制特性。

关键词: 氢能; 质子交换膜燃料电池; 空压机; 多模态PID控制; PID控制

中图分类号: TK91

文献标志码: A

0 引 言

燃料电池具有高效、清洁的特点, 是近20年蓬勃发展的新能源技术。质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)技术工作温度低、能量密度高, 是作为汽车动力源的理想选择, 成为新能源汽车的重点发展方向。PEMFC系统中燃料通过车载储氢系统来供应, 阴极氧化剂通过空气传输系统提供空, 由电动机驱动空气压缩机进行空气增压来实现^[1]。

燃料电池的响应速度很大程度上取决于空气传输系统的响应速度^[2-3]。顾偲雯等^[4]对燃料电池阴极系统进行建模仿真; 引入燃料电池电极有效面积等参数; 张建灿等^[5]针对单螺杆式空压机暂态控制策略进行研究并取得良好的效果; 刘志祥等^[6]基于离心式空压机系统模型提出质子交换膜燃料电池空气供给系统的电流跟随分段PID控制方法; Rodatz等^[7]建立并分析了质子交换膜燃料电池空气传输系统的动态模; 刘志祥等^[8]建立并研究了大功率质子交换膜燃料电池的空气传输系统。然而车载大功率燃料电池的空气传输控制参数随着行车工况变化而不断变化, 单一的控制参数或者严重滞后的和控制策略在车载燃料电池空气传输系统中很难满足列车工况变化的要求。因此根据列车

工况变化实时控制燃料电池空气系统具有实际的意义。本文旨在研究能够满足列车工况变化而进行实时控制的控制方法。多模态PID(multi-modal PID, M-PID)控制方法与PID控制方法普遍应用于很难建立精确的数学模型和控制参数的控制系统, 并取得良好的控制效果^[9-10]。结合质子交换膜燃料电池的特性, 本文采用PID和M-PID控制方法对车载质子交换膜燃料电池空气传输系统进行控制, 并分析2种控制方法的控制效果。

1 PEMFC空压机系统

本文研究的大功率车载PEMFC空气传输系统原理如图1所示。空气管道分为入口管道和出口管道; 入口管道通过功率器与大气连通, 出口管道连接燃料电池阴极加湿器; 冷却油管道一方面对空压机泵头进行润滑, 一方面对空压机泵头进行冷却; 冷却水管道对驱动电机、电机控制器和冷却油进行冷却。补水箱在运行的过程中向冷却水管道中进行补水排风, 一方面避免冷却水管道中出现气泡导致管道压力骤变而影响电动机及电动机的运行性能, 另一方面可避免由于管道中气泡的存在导致散热效率低而导致电动机、电动机控制器和空压机泵头温度过高而影响运行效果。

收稿日期: 2017-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(51677157)

通信作者: 刘志祥(1976—), 男, 博士、教授, 主要从事氢能与燃料电池技术方面的研究。304245782@qq.com

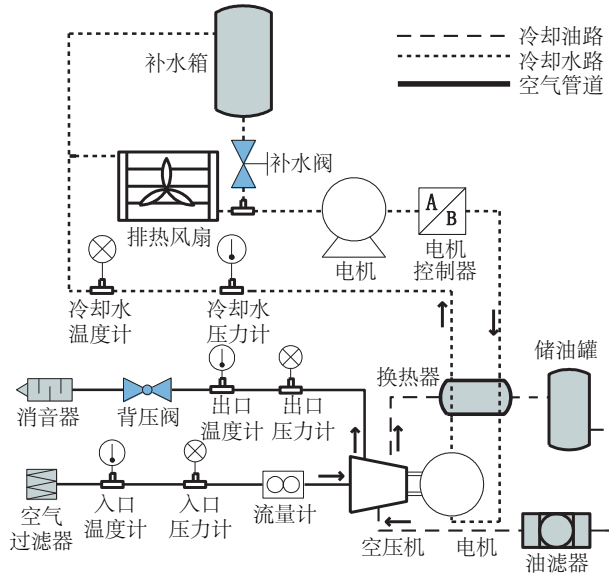


图1 PEMFC空气传输系统原理图

Fig. 1 PEMFC air supply system frame

2 空气传输系统控制方法

空气传输系统本身具有较大的耦合性和非线性,不同工作环境的特性参数不同,空气系统本身因传输管道体积的不同具有不同的控制参数,因此,诸如粒子群算法等智能算法不适用在大功率燃料电池空气传输系统中。PID与M-PID广泛应用于工业控制领域,在非线性时变系统中取得了良好的效果。本文着重分析研究PID和M-PID在车载燃料电池空气传输系统中的控制效果。本文中电机控制器控制电机的方式有转矩控制模式和转速控制模式,转速模式控制变量范围较大,空压机出口控制质量流量对转速变化反应较为迟钝,因此文中选择转矩控制模式。PID控制方法在空气传输系统中的函数模型如式(1)所示:

$$U_k = K_p \cdot e_k + K_i T \cdot e_k + \frac{K_d}{T} (e_k - e_{k-1}) \quad (1)$$

式中, e_k ——空气传输系统的空气质量流量偏差信号; U_k ——电机控制转矩, Nm; T ——采样周期, $T = 500 \text{ ms}$; K_p 、 K_i 、 K_d ——对系统偏差信号及其积分量与微分量的加权。PID控制原理如图2所示。

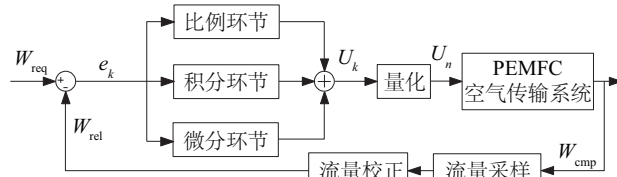


图2 PID控制框图

Fig. 2 PID control frame

请求空气质量流量 W_{req} (req-request) 与校正后的质量流量 W_{rel} (rel-real) 作差产生偏差信号 e_k , 根据偏差信号计算出电机转矩值 U_k , 采用下文式(7)对转矩进行量化得到电机能够识别的阶梯式转矩 U_k 对电机进行控制, 电机驱动空压机进行增压。对空气压缩机出口空气质量流量 W_{cmp} 进行校正后得到实际空气质量流量 W_{rel} 。

M-PID 控制器实质上是一种多模态的智能控制器, 基本功能仍由比例(P)、积分(I)、微分(D)这3个基础环节实现; 与传统PID的区别在于M-PID在PID控制器的基础上引入“决策结构(decision element, DE)”和“虚拟采样开关(visual sampling switch, VSS)”。M-PID控制器工作原理如图3所示。

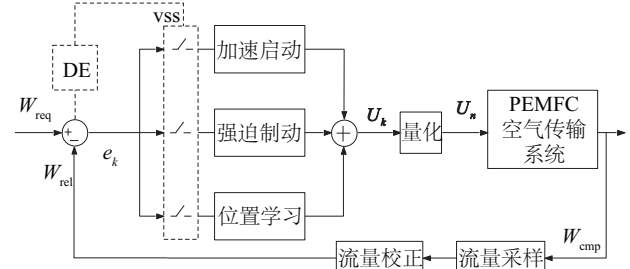


图3 空气传输系统控制原理图

Fig. 3 Air supply system control schematic

“决策机构(DE)”通过偏差信号绝对值1阶、2阶导数的符号进行判断来控制“虚拟采样开关(VSS)”的开断选择不同的控制要素, 这些要素包括加速启动控制(ASC)、强迫制动控制(FBC)和位置学习控制(PLC)。选择这3种要素的判断依据为:

$$1) \begin{cases} \text{if } \frac{d|e|}{dt} \geq 0, \text{ then } u_n = K_p e + u_{n-1}, \text{ 即当偏差信号} \\ \text{and } u_n = K_i \int e_n dt \end{cases}$$

绝对值1阶导数非负时, 控制器处于加速启动控制(ASC)状态;

$$2) \begin{cases} \text{if } \frac{d|e|}{dt} < 0, \text{ and } \frac{d^2|e|}{dt^2} \geq 0, \text{ 即当偏差信号绝对值} \\ \text{then } u_n = K_d \frac{de}{dt} + u_n \end{cases}$$

1阶导数为负而绝对值2阶导数非负时, 控制器处于位置学习控制(PLC)状态;

$$3) \begin{cases} \text{if } \frac{d|e|}{dt} < 0, \text{ and } \frac{d^2|e|}{dt^2} < 0, \text{ 即当偏差信号绝对值} \\ \text{then } u_n = u_{n-1} + u_n \end{cases}$$

1阶导数与绝对值2阶导数为负时, 控制器处于位置学习控制(FBC)状态。很多控制系统中偏差信号绝对值

为离散型数值,因此求 1 阶、2 阶导数的决策方式难以实现。由续函数绝对值 1 阶、2 阶导数的几何意义可推导出离散型系统的要素判断依据为:

1) 当偏差信号在增大时,选择比例与积分控制作用,控制器处于加速启动状态。

$$\begin{cases} \text{if } |e(k)| - |e(k-1)| \geq 0, \text{ then} \\ u_n = K_p \cdot e(k) \text{ and } u_n = K_i \cdot T \sum_{j=0}^k e(j) \end{cases} \quad (2)$$

2) 当偏差信号在减小且减小的幅度在增大时,选择积分控制作用,控制器处于强迫制动状态。

$$\begin{cases} \text{if } |e(k)| - |e(k-1)| < 0 \\ \text{and } |e(k)| - |e(k-1)| < 0 \\ \text{then } u_n = u_{n-1} + u_n \end{cases} \quad (3)$$

3) 当偏差信号在减小且减小的幅度在减小时,选择积分微分控制作用,控制器处于位置学习状态。

$$\begin{cases} \text{if } |e(k)| - |e(k-1)| < 0 \\ \text{and } |e(k)| - |e(k-1)| \geq 0 \\ \text{then } u_n = u_n + K_d \frac{e(k-1) - e(k-2)}{T} \end{cases} \quad (4)$$

本文根据偏差信号的变化情况分别采用式(2)~式(4)来选择多模态 PID 的控制要素,偏差信号由期望空气质量流量值与空气压缩机空出空气质量流量值作差产生。通过对比当前时刻偏差信号符号和偏差信号的变化趋势来选择同的控制要素。

3 控制方法验证

3.1 验证平台

文中采用 Rotrex 公司 EC15-60 离心式空气压缩机和 TM4 公司三相磁通电机及其配套电机控制器,基于图 4 所示的实物平台上对控制方法进行验证,实验数据

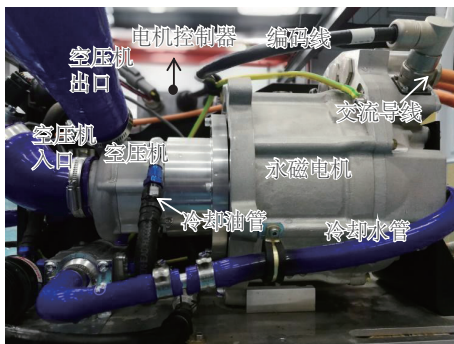


图 4 空气传输系统实物图

Fig. 4 Air supply system physical structure

能够真是反应环境条件。平台中其他附属管道轨均按照空压机电动机参数要求进行设计。

在研究中将空气视为理想气体,严格遵循式(5):

$$pV = \frac{m}{M}RT \quad (5)$$

式中, p ——理想气体的压强, Pa; V ——理想气体的体积, m^3 ; m ——理想气体的质量, g; M ——理想气体的摩尔质量, mol; T ——理想气体的热力学温度, K; R ——理想气体常, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

实际空气质量流量校正方法如式(6)所示:

$$W_{\text{rel}} = \left(\frac{T_{\text{cmp}}}{T_{\text{atm}}} \right) \left(\frac{p_{\text{cmp}}}{p_{\text{atm}}} \right) W_{\text{cmp}} \quad (6)$$

式中, W_{rel} ——实际空气质量流量, kg/s ; W_{cmp} ——空压机出口空气质量流量, kg/s ; T_{cmp} ——空压机出口管道温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{atm} ——环境温度, $^{\circ}\text{C}$; p_{cmp} ——空压机出口管道压强, kPa ; p_{atm} ——环境压强, kPa 。

3.2 控制方法验证

PEMFC 空气传输系统属于离散系统,电机能接收和识别的转矩信号数据类型为无符号整型。电机转矩最小分辨率(resolution) $r = 1/8$ 。使用 PID 及 M-PID 控制方法所得到的转矩信号为实数型,因此,需要将控制器得到的转矩进行量化处理。量化方法为:

1) 定义 0 到 1 之间为 r 整数倍的数为规范数。控制转矩的整数部分不变,小数部分取最接近的规范数重新组合成控制转矩指令。

2) 定义规范前转矩值为 T_{be} ;规范后转矩值为 T_{af} ; 则有 $T_{\text{af}} = [T_{\text{be}}] + \{T_{\text{be}}\}_{\text{ref}}$; 其中 $[T_{\text{be}}]$ 为 T_{be} 整数部分。量化方法如式(7)所示:

$$\begin{cases} \{T_{\text{be}}\}_{\text{ref}} = i/8, i=0, \dots, 8 \\ \text{if } \min(i/8 - \{T_{\text{be}}\}) \end{cases} \quad (7)$$

在实验过程中发现动态跳变工况至稳定运行的时间远小于 1 min,为保证系统能够在稳定运行后进行工况跳变增加实验可靠性和降低系统氢气消耗、能源消耗,实验中工况运行时间选择 1 min,并以数据为分析依据。加载工况空气质量流量由 0.04 kg/s 跳变至 0.05 kg/s ,降载工况空气质量流量由 0.06 kg/s 跳变至 0.04 kg/s 在最佳控制参数下 PEMFC 空气传输系统输出响应如图 5 所示。

对比图 5a、图 5b 这 2 条曲线,在动态响应下 M-PID 控制方法相应速度快,到达稳定运行所需时间短。响应参数如表 1 所示。

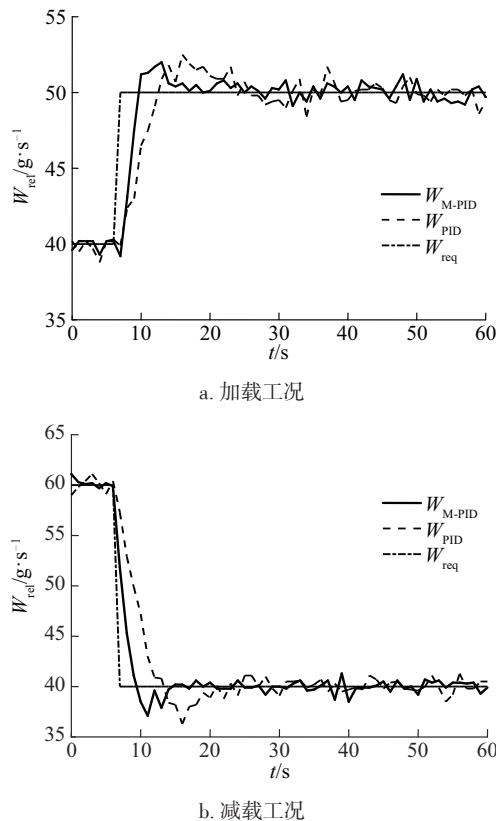


图5 空气传输系统空气质量流量对比

Fig. 5 Comparison of air supply air quality flow comparison

表1 PEMFC 空气传输系统响应参数

Table 1 PEMFC air supply system response parameter

参数	PID(加/减载)	M-PID(加/减载)
上升时间 T_r/s	6/6	4/6
稳定时间 T_{ss}/s	16/15	7/8
超调量 $\sigma/\%$	6/9.25	4.6/7.25

在稳态响应下多模态 PID 较 PID 的超调量小,动态响应时间短。空气传输系统响应超调量小有效避免空压机向燃料电池输送的空气波动过大导致燃料电池出现氧过饱和或者氧饥饿现象。动态响应时间短保证燃料电池的响应速度,提高列车的运行效率。在电机控制系统中响应时间短和超调量小是以牺牲电动机的稳定性为前提的,电机在较短的时间内达到较快的跳变速度需要较大跳变驱动加速度,这往往表现在电机需要在较短的时间内实现更大的转矩跳变幅度。为了证明这一结论,本文对电动机的实时转矩进行了分析。电动机实时转矩如图 6 所示。

由图 6a、图 6b 这 2 曲线可知,在加载工况和稳态工况下,M-PID 由于上升时间短和达到稳定的时间短,

导致电机转矩波动较大,需向电源抽取瞬时较大的电流来满足较大加速度的需求,因此在加载工况下 M-PID 的能耗较多。在减载工况下,由于 M-PID 转矩急剧下降导致能耗也急剧下降,因此 M-PID 能耗较少;对加载工况和减载工况下 2 种控制方法功耗进行积分,得到 M-PID 为 243.73 和 103.64 kW; PID 为 240.93 和 180.51 kW。M-PID 在总能耗上较 PID 低。

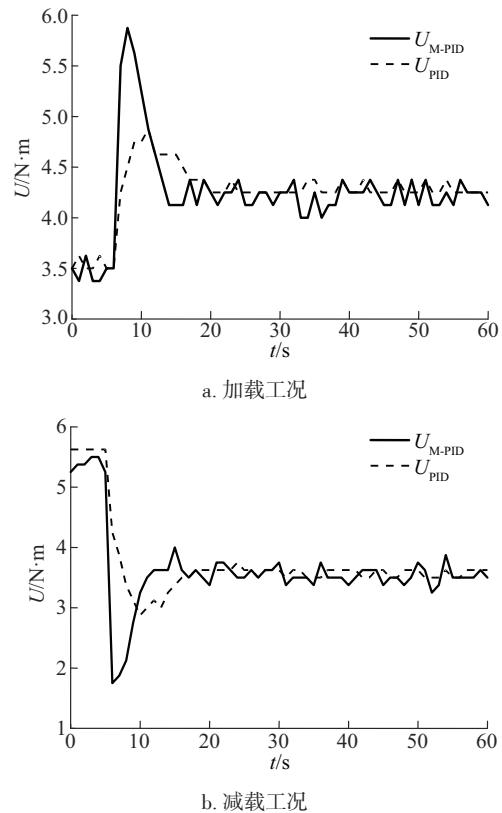
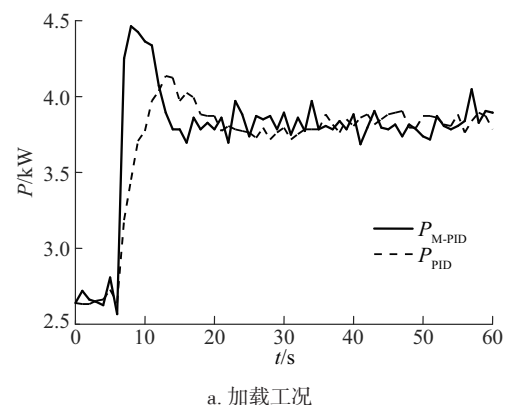
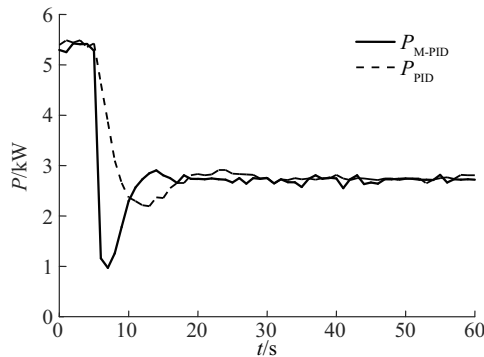


图6 电机转矩对比

Fig. 6 Comparison of motor torque

图 6a、图 6b 这 2 条曲线表明 M-PID 控制方法的电机转矩跳变频率和跳变幅度较大。2 种控制方法电机功率消耗曲线如图 7 所示。





b. 减载工况

图7 电机功耗对比

Fig. 7 Comparison of motor power consumption

4 结 论

本文研究多模态 PID(M-PID)和 PID 控制方法在大功率车载质子交换膜燃料电池空气传输系统的控制效果。得出 PID 和 M-PID 控制方法在大功率车载质子交换膜燃料电池空气传输系统中能够满足列车不同运行工况下实时控制要求的结论;且 M-PID 超调量较小,有效避免空气系统出现较大的空气质量跳变,从而有效避免燃料电池出现氧饥饿或者氧过饱和的情况;此外, M-PID 响应时间和稳定时间较短,保证燃料电池能够及时响应列车的控制要求,有效保证了列车的跟随性和安全性。通过分析在稳态和动态工况下空气系统的能耗,得出能耗较低的控制方法,有效降低燃料电池辅机能耗,提高燃料电池的发电效率。

本文通过研究 PID 和 M-PID 控制方法在大功率车载质子交换膜燃料电池空气系统中的应用,满足列车在不同工况下对燃料电池空气传输系统的实时按需控制要求,具有重要的实际意义。

[参考文献]

- [1] 郝德利, 韩立明, 薛金生, 等. 质子交换膜燃料电池技术进展[J]. 电源技术, 2001, 25(6): 436-440.
HAO D L, HAN L M, XUE J S, et al. Development of proton exchange membrane fuel cell[J]. Chinese journal of power source, 2001, 25(6): 436-440.
- [2] 李奇, 湛耀添, 区永江, 等. 质子交换膜燃料电池的电响应研究[J]. 电池, 2006, 36(5): 359-361.

- LI Q, ZHAN Y T, OU Y J, et al. Investigation of electrical response of PEMFC[J]. Battery bimonthly, 2006, 36(5): 359-361.
- [3] 李奇. 质子交换膜燃料电池系统建模及其控制方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
LI Q. Research on modeling and control of proton exchange member fuel cell system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [4] 顾恩雯, 赵志刚. PEM 燃料电池阴极气体建模仿真研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(1): 143-146.
GU S W, ZHAO Z G. Research on modeling of cathode flow in PEMFC[J]. Computer simulation, 2015, 32(1): 143-146.
- [5] 张建灿, 陶国良, 周文祎. 燃料电池用空压机性能测试系统研究[J]. 液压气动与密封, 2005, 3(1): 33-35.
ZHANG J C, TAO G L, ZHOU W Y. Research on air compressor performance testing system for fuel cell[J]. Hydraulics pneumatics & seals, 2005, 3(1): 33-35.
- [6] 刘志祥, 李伦, 韩喆, 等. 大功率 PEMFC 空气系统电流跟随分段 PID 控制方法研究[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(3): 437-445.
LIU Z X, LI L, HAN Z, et al. Current following segmented PID control of air supply system in heavy-duty PEMFC system[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(3): 437-445.
- [7] RODATZ P, ONDER C, GUZZELLA L. Airsupply system of a PEMFC stack dynamic modle[J]. Fuel cell, 2005, 5(1): 126-132.
- [8] LIU Z X, LI L, DING Y, et al. Modeling and control of an air supply system for a heavy-duty PEMFC engine [J]. International journal of hydrogen energy, 2016, 41(36): 16230-16239.
- [9] 柏建国, 吕炳朝. 多模态 PID 控制器[J]. 仪器仪表学报, 1993, 14(1): 26-32.
BAI J G, LYU B C. Multi-mode PID controller[J]. Chinese journal of scientific instrument, 1993, 14(1): 26-32.
- [10] 王尘康, 李松, 田珂, 等. 多模态 PID 研究与实现[J]. 科技创新与应用, 2014, 28(2): 143.
WANG C K, LI S, TIAN K, et al. Research and implementation of multi-modal PID[J]. Technology innovation and application, 2014, 28(2): 143.

STUDY ON CONTROL METHOD OF PEMFC AIR TRASMISSION SYSTEM

Pan Jungang¹, Liu Zhixiang^{2,4}, Ding Yi¹, Chen Weirong¹, Bu Qingyuan^{3,4}

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. Foshan University, Foshan 528000, China; 3. Guangdong Guohong Hydrogen Technology Co., Ltd., Yunfu 527326, China;

4. Foshan (Yunfu) Research Institute of Hydrogen Energy Industry & New Material Development, Yunfu 527326, China)

Abstract: As an efficient and clean new energy vehicle technology, the development of fuel cell car is widely valued. The air transmission system is the most important factor affecting the dynamic characteristics of the engine. According to the strong coupling, nonlinear and time-varying characteristics of air transmission system of the proton exchange membrane fuel cell, multi-modal PID and traditional PID control method is used in 140 kW fuel cell air transmission system. It achieves the effect of the dynamic response quick, small amount of overshoot and small steady-state fluctuation of air transmission system through tracing the air mass flow rate at air compressor outlet and real-time control. The results indicate that it can meet the real-time dynamic condition of the vehicle proton exchange membrane fuel cell. The control characteristics of the two methods are compared from the system response performance and energy consumption. It has important practical significance.

Keywords: hydrongen energy; proton exchange membrane fuel cell (PEMFC); air compressor; multi-modal PID control; PID control