基于滑模变结构的燃料电池离心空压机流量控制

赵冬冬[1], 华志广[1], 张璐[2], 皇甫宜耿[1]

(1.西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072; 2.西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要:质子交换膜燃料电池是利用氢气与氧气的电化学反应产生电能的装置,其中空气压缩机是关键部件,负责向燃料电池的阴极供给空气(含约 21%氧气),与氢质子、电子产生电化学反应。供给空气的流量与压力之间影响到燃料电池的输出性能,即 *V-I* 特性曲线,同时对燃料电池系统的安全性产生影响。不足的空气供给会使燃料电池产生“氧气饥饿”现象,会降低燃料电池的寿命,严重情况下会破坏质子交换膜。采用滑模变结构方法控制离心压缩机的输出流量,使其在动态负载情况下满足燃料电池对空气供给的要求,采用基于 super-twisting 的二阶滑模控制压缩机的驱动转矩,实现对输出流量的动态调节,仿真结果证明了该方法的有效性。

关 键 词:控制器;流量;质子交换膜燃料电池

中图分类号:TH452 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-2758(2017)03-0374-06

车用质子交换膜燃料电池(PEMFC,proton exchange membrane fuel cell)系统是利用氢气与氧气的电化学反应产生电功率、驱动车行驶的技术。其过程的副产品为水,具有零排放、效率高、噪音低等优点。在能源与环境危机日趋严重的情况下,燃料电池汽车得到了国内外学者和工业界的关注和研究。荷兰、英法等欧洲 6 国已经达成共同开发推广氢能源汽车协议,将一同建设一个欧洲氢气设施网络,并协调能源传输。2014~2015 年北京市在公交等公共服务领域对燃料电池汽车进行推广,包括建立 1~2 座燃料电池车辆加氢站。除政府政策支持外,汽车公司正在致力于燃料电池汽车的商业化,其中已发布的实验和概念燃料电池汽车有 Audi Q5-FCEV、BMW 750hl、Hyundai Tucson-ix35 、Toyota Fine-X。2014 年 Toyota 公司宣布其研发的商业燃料电池汽车将在 2015 年发布,每款产品计划年销量为 1 000 辆。梅赛德斯-奔驰汽车公司计划在 2017 年推出一款全新氢燃料电池车。然而燃料电池汽车要得到市场的认可,仍面临着几大难题:成本、氢源的制备和寿命(耐久性),随着使用其性能也有所下降[1]。

空气供应子系统(air supply subsystem)通过空气压缩机向 PEMFC 的阴极提供电化学反应所需的氧气(空气中含大约 21 %氧气),是燃料电池内部最大的能量消耗子系统。在 PEMFC 空气供应子系统研究方面,国内主要集中在对空气压力、流量等参数的控制理论研究方面[2-4],对燃料电池专用空气压缩机/系统(包括结构设计、压缩机类型、相应控制算法)的研究较少。欧美国家正致力于研究专门用于燃料电池的压缩机/系统,美国能源部(DOE)从 1998 年开始资助燃料电池空气供应子系统的研发。针对一个 80kW 车用 PEMFC 系统,DOE 给出的 2017 年空气压缩机指标为:重量从 22 kg 降到 15 kg,寿命为 5 000 h,车载运行工况下效率为 75 %。对于车用 PEMFC,供应的空气压力波动不能大于 2×10^4 Pa[5]。

美国 Air Squared 公司于 1999 年研发了第一款用于燃料电池的涡旋压缩机,最大压力为 1.38 bar,最大流量为 28 g/s,采用 2.5 kW 无刷直流电机驱动。2008 年,Dr.Blunier 等将一个 2.2 kW 的涡旋压缩机应用于燃料电池汽车,采用异步电机驱动模式,理想压力保持在 2×10^5 Pa[6]。文献[7]研究基于异步电机驱动的三叶轮式压缩机在燃料电池上的应用,最大压力 2×10^5 Pa,最大流量为 20 g/s。法国

收稿日期:2016-09-27 **基金项目**:国家自然科学基金(51507143)与航空科学基金(2014ZB53018)资助

作者简介:赵冬冬(1985—),西北工业大学副教授,主要从事燃料电池建模及控制研究。

Fclab 实验室研究的由无刷直流电机驱动的 860 W 回转叶片式压缩机应用在 5 kW 燃料电池系统上,最大压力为 1.5×10^5 Pa,最大流量为 15 g/s[8]。Talj 等提出用双螺杆压缩机给燃料电池供应空气[9]。以上研究均为应用于燃料电池的容积式缩机,具有易于控制、工作范围宽的优点,其缺点是体积大重量重,效率低。

对比于容积式压缩机,离心式压缩具有轻便、流量输出连续、噪音小、效率高等优点,更加适用于电动汽车。近些年,离心式压缩机在燃料电池上的应用也得到了研究者的重视。2010 年美国国家能源部与 Honeywell 公司合作开发了基于离心式压缩机的供气管理系统,应用在一个 80 kW PEMFC,该压缩机最高为 1.1×10^5 r/min[10]。Zhao 等将额定转速 2.5×10^5 r/min 的超高速离心压缩机将其应用于一个 10 kW PEMFC 系统[11-12],采用无速度传感器永磁同步电机驱动,最高压力与流量为 1.6×10^5 Pa 和 20 g/s, 重量只有 0.6 kg。基于压缩机神经网络模型采用滑模控制进行压力和流量的调节。

为满足燃料电池动态负载需求,压缩机流量需要根据燃料电池电流大小动态调节,过多的空气供给消耗额外的能量,减小了燃料电池效率,不足的空气供给会导致“氧气饥饿”现象,严重影响燃料电池的性能与寿命,本文通过研究离心式空气压缩机物理模型,采用基于 super-twisting 的二阶滑模控制方法对空气流量进行控制,并进行了仿真验证。

1　燃料电池模型

燃料电池的工作原理是利用氢气和氧气的电化学反应产生电能,高压空气通过燃料电池阴极管道,氢气通过阳极管道,其过程在阳极的反应如下

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^- \tag{1}$$

式中,H^+穿过质子交换膜到达阴极,e^-通过外部回来到达阴极,产生电流,在阴极的反应如下

$$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O \tag{2}$$

燃料电池的开环输出电压 V_{oc} 受温度、氧气分压和氢气分压的影响

$$V_{oc} = 1.229 - 0.85\times10^{-3}(T_{fc} - 298.15) + 4.308\,5\times10^{-5}\times T_{fc}\times[\ln(p_{H_2}) + 0.5\ln(p_{o_2})] \tag{3}$$

式中,T_{fc} 为燃料电池温度,p_{H_2}、p_{o_2} 分别为氢气和氧气在阴极管道内的分压。然而在燃料电池运行过程中,会产生活化损耗 v_{act}、欧姆损耗 v_{ohm} 和浓差损耗 v_{con},其中活化损耗在启动运行时造成电压的极速下降,欧姆损耗电流近似成线性关系,浓差损耗导致在电流密度较大时电压的极速下降,其经验计算公式如下

$$\begin{cases} v_{act} = v_0 + v_a(1 - e^{-c_1 i}) \\ v_{ohm} = i \times r_{mem} \\ v_{con} = i \times \left(\dfrac{c_2 i}{i_{max}}\right)^{c_3} c_1 \end{cases} \tag{4}$$

式中,v_0 为电流密度为 0 时的电压降,r_{mem} 为质子交换膜电阻,i_{max} 为引起电压突降的电流密度值,c_1、c_2、c_3 为经验参数,i 为电流。燃料电池最终输出电压为

$$V_{fc} = n\times(v_{oc} - v_{act} - v_{ohm} - v_{con}) \tag{5}$$

式中,n 为电池单体串联个数。

表 1　燃料电池参数

参数	数值
单电池个数/个	120
温度/K	350
膜水含量	14
阳极氢气压力/Pa	1.4×10^5
阴极氧气压力/Pa	0.28×10^5
环境空气压力/Pa	1×10^5
气体常数/J/(mol · K)	8.314
空气摩尔质量/(kg · mol^{-1})	29×10^{-3}
氧气摩尔质量/(kg · mol^{-1})	32×10^{-3}

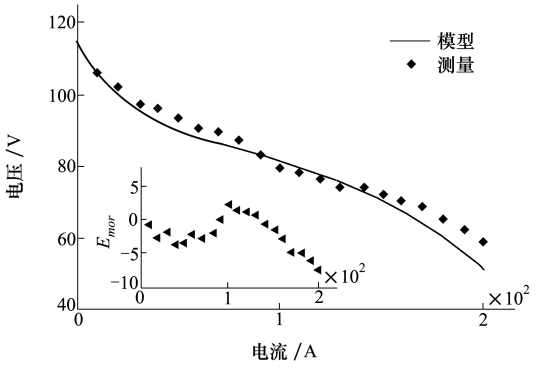


图 1　燃料电池极化曲线

2 空气压缩机模型

Gravdaval 等基于 Fink 模型,将压缩机力矩和出口压力引入到模型中,从能量传递和压缩机效率角度分析,建立了具有高精度的离心压缩机模型。该模型也是本文重点研究的模型,它的状态空间模型如下所示

$$\begin{cases} \dot{p} = \dfrac{a_{01}^2}{V_p}(m - m_t(p)) \\ \dot{m} = \dfrac{A_1}{L_c}(\psi_c(\omega, m)p_0 - p) \\ \dot{\omega} = \dfrac{1}{J}(\tau_d - \tau_c) \end{cases} \tag{6}$$

式中,p 为气体压力,V_p 代表容腔的体积,m 代表压缩机输出气体质量流量,$m_t(p)$ 代表节流阀出口处的气体质量流量,A_1 代表流通面积,L_c 是管道长度,p_0 代表入口压力。ω 代表转轴的旋转速度,J 代表压缩机惯性指数,τ_d 代表驱动转矩,τ_c 为压缩机负载转矩。

1) 上面等式中 $m_t(p)$,它代表节流阀出口气体的质量流量,可表示如下式

$$m_t(p) = k_t\sqrt{p - p_0} = K_t\sqrt{p_0}\sqrt{\frac{p}{p_0} - 1} \tag{7}$$

2) 压缩机产生的转矩 τ_c 与 ω、m 有关,其表达式为

$$\tau_c(\omega, m) = \mu r_2^2\,\omega m \tag{8}$$

3) 上面等式中 $\psi_c(\omega, m)$ 代表的物理意义是压缩机输出压力特性,其表达式为

$$\psi_c(\omega, m) = \left(1 + \frac{\mu r_2^2\,\omega^2 - \dfrac{r_1^2(\omega - \alpha m)^2}{2} - k_f m^2}{c_p T_{01}}\right)^{\frac{K}{K-1}} \tag{9}$$

式中

$$\mu = \sigma\left(1 - \frac{\cot\beta_{2b}}{\rho_1 A_1 r_1}\frac{\omega}{m}\right) \tag{10}$$

$$\alpha = \frac{\cot\beta_{1b}}{\rho_1 A_1 r_1} \tag{11}$$

式中,r_1 代表平均引导半径,r_2 代表叶片半径,K_f 代表流体摩擦因子,T_{01} 代表入口停滞温度,c_p 代表恒压下的特定温度,c_v 代表恒体积下的特定温度,K 是两者之比,即 $K = c_p/c_v$,β_{1b} 代表叶片入口角度,β_{2b} 代表转子叶片角度,ρ_1 代表入口流体密度,σ 是滑移因子,略微的小于 1。基于以上模型建立了压缩机模型,建立的压缩机模型如图 2 所示。

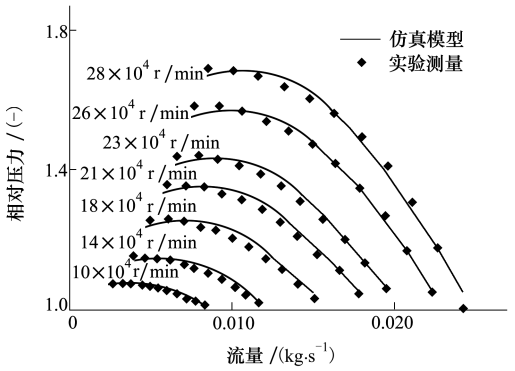


图 2 压缩机模型

与瑞士 Celeroton 公司合作,研究用于燃料电池的 1 kW 超高速离心式压缩机,基于以上物理模型,建立了其工作特性(compressor map)模型,如图 2 所示。当转速为 1×10^5 r/min,其最大输出压力比为 1.1,最大输出流量为 0.008 g/s。随着转速的提升,流量范围和压力范围均在提高,在 2.8×10^5 r/min 时,输出压力比可达 1.7,最大输出流量接近 0.025 g/s。图 2 显示所建模型与测试数据有较好的吻合度,测量区域的左边,即小流量高压力区域为喘振区,是一种不稳定工作状态,正常工作范围限定在图 1 测量范围内。

3 滑模控制

由离心空气压缩机模型有高度非线性的特性(转速、压力、流量),传统 PI 控制器不能实现理想的流量控制,本文采用基于 super-twisting 的二阶滑模控制方法,通过调节驱动转矩实现对压缩机输出流量的控制。构造滑模面 s 如下

$$s = m - m_{\text{ref}} \tag{12}$$

式中,m_{ref} 为燃料电池需要的空气流量,其值直接与燃料电池电流相关。燃料电池电流 I_{st} 单位时间内可消耗的氧气质量 m_{O_2} 为

$$m_{O_2,\text{con}} = M_{O_2}\frac{n_{\text{cell}} I_{st}}{4F} \tag{13}$$

式中,M_{O_2} 为氧气的摩尔质量,n_{cell} 为燃料电池单体个数,F 为法拉第常数。定义过氧比 λ_{O_2} 为进入燃料电池的氧气与消耗的氧气的比值

$$\lambda_{O_2} = \frac{m_{O_2,\text{in}}}{m_{O_2,\text{con}}} \tag{14}$$

式中,λ_{O_2} 的值大于等于 1,研究表明当 λ_{O_2} 在 2 ~ 3 时燃料电池输出功率最高。考虑到空气中氧气的摩尔比为 χ_{O_2},相对湿度为 φ_{atm},实际需要向燃料电池供给的空气流量 m_{ref} 为

$$m_{\text{ref}} = (1 + \varphi_{\text{atm}}) M_{O_2} \frac{\lambda_{O_2} n_{\text{cell}} I_{st}}{4\chi_{O_2} F} \tag{15}$$

依据(6)式,驱动转矩 τ_d 可控制转速,实现对流量的控制,其控制率如下

$$\tau_d = u_1 + u_2 \tag{16}$$

式中

$$\dot{u}_1 = -k_1 \text{sign}(s) \tag{17}$$

$$u_2 = \begin{cases} -k_2 \mid s_0 \mid^{1/2} \text{sign}(s) & \mid s \mid > \mid s_0 \mid \\ -k_2 \mid s \mid^{1/2} \text{sign}(s) & \mid s \mid \leqslant \mid s_0 \mid \end{cases} \tag{18}$$

k_1、k_2 为大于 0 的控制参数,该滑模设计中,当 s 不为 0 时,u_2 起到快速调节的作用,u_1 为误差相的积分环节,可消除滑模控制器的震荡,同时消除误差。

4　仿真分析

为了保证燃料电池高效输出其电流一般工作在一定范围内,电流太小或太大都会降低输出效率,随着负载电流的变化,燃料电池输出电流需要在其工作范围内进行动态调节以匹配负载功率。燃料电池电流随负载变化,如图 3 所示。随着电流的变化,空气压缩机供给的流量需要随之变化,如(15)式所示,图 4 给出了流量变化过程,实线为计算得出流量给定,虚线为压缩机仿真输出流量。在该动态过程中,过氧比的变化如图 5 所示,其值保持在 2.5,保证燃料电池的安全和高效率。图 6 和图 7 分别给出了燃料电池的输出电压和功率,电压随着电流的增加(减小)而减小(增加)。压缩机的驱动转速和驱动转矩如图 7、图 8 所示,最高转速达到了 2.7×10^5 r/min,在该动态过程中驱动转矩脉动较小,使转速动态变化平滑、稳态平稳,其控制过程满足了燃料电池的需求。

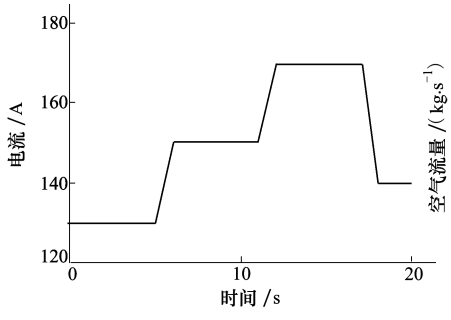


图 3　燃料电池电流

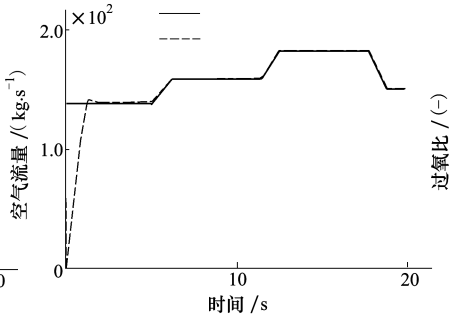


图 4　压缩机流量变化

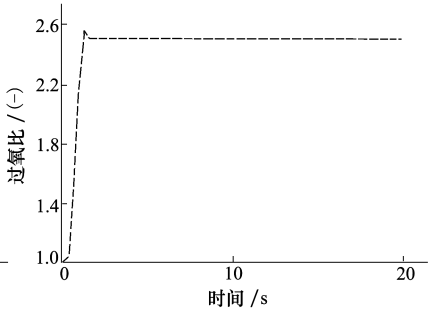


图 5　过氧比

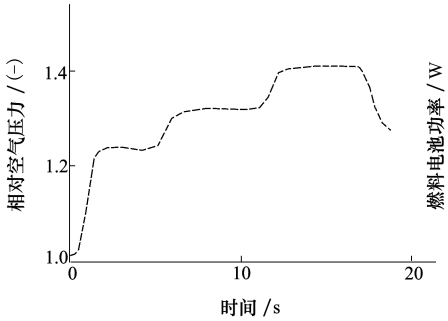


图 6　燃料电池输出电压

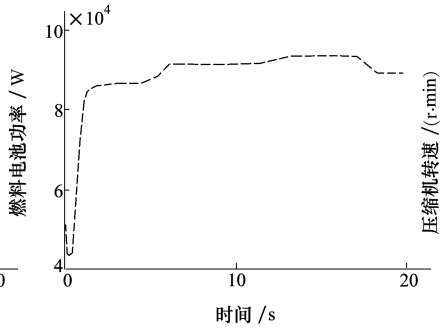


图 7　燃料电池输出功率

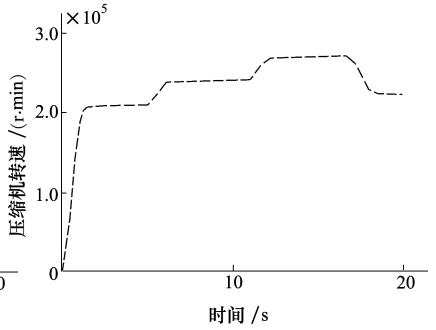


图 8　压缩机转速变化

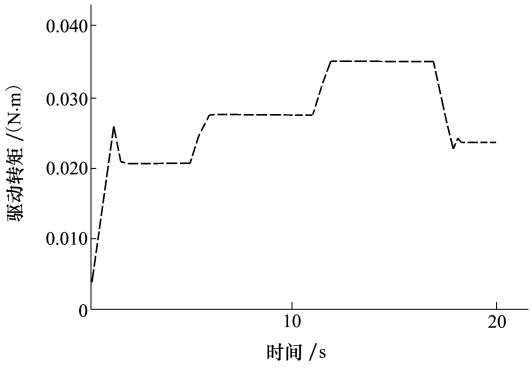


图 9 压缩机驱动转矩

5 结 论

本文研究基于离心压缩机的 10 kW 燃料电池阴极空气供给系统,构建了 1 kW 超高速离心压缩机模型,并对压力、流量和转速关系特性进行了实验验证。采用 super-twisting 二阶滑模方法控制阴极空气流量,满足在动态负载条件下燃料电池对空气流量的动态需求。基于 10 kW 燃料电池模型对控制方法进行验证,仿真结果表明,在电流动态变化情况下,压缩机供给的流量随电流动态变化,过氧比控制在 2.5,保证了燃料电池安全和效率,对燃料电池的输出电压和功率进行分析,验证了该方法的有效性。

参考文献:

[1] 张新丰, 沈勇, 杨瑞,等. 道路环境下质子交换膜燃料电池系统性能衰退统计研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 16-20
Zhang Xinfeng, Shen Yong, Yang Rui, et al. Statstical Study on PEM Fuel Cell System Performance Degradation under Road Condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 16-20 (in Chinese)

[2] 许思传, 程钦, 马天才. 燃料电池发动机空气参数的最优控制[J]. 车用发动机, 2006(2): 25-28
Xu Sichuan, Cheng Qin, Ma Tiancai. Optimization Control of Air Parameter for Fuel Cell Engine[J]. Vehicle Engine, 2006(2): 25-28 (in Chinese)

[3] 周苏, 张传升, 陈凤祥. 车用高压 PEMFC 系统的建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(7): 1469-1476
Zhou Su, Zhang Chuansheng, Chen Fengxiang. Modeling and Simulation of High-Pressure Automobile PEMFC Power System [J]. Journal of system Simulation, 2011, 23(7): 1469-1476 (in Chinese)

[4] 陈凤祥, 陈俊坚, 许思传, 等. 高压燃料电池系统空气供应解耦控制器设计[J]. 同济大学学报, 2014, 42(7): 1096-1100
chen Fengxiang, Chen Junjian, Xu Sichuan, et al. Decoupling Controller Design for Air Supply Subsystem of High Pressure PEMFC System[J]. Journal of Tongji University, 2014, 42(7): 1096-1100 (in Chinese)

[5] Blunier B, Miraoui A. Proton Exchange Membrane Fuel Cell Air Management in Automotive Applications[J]. Journal of Fuel Cell Science and Technology, 2010, 7(4): 0410071-04100711

[6] Blunier B, Pucci M, Cirrincione M, et al. A Scroll Compressor with a High-Performance Sensorless Induction Motor Drive for the Air Management of a PEMFC System for Automotive Applications[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2008, 57(6): 3413-3427

[7] M′boua J, Blunier B, Miraoui A, et al. Modeling and Control of a High Speed Three-Lobe Compressor for Fuel Cell System[C]//International Compressor Engineering Conference(ICEC), West Lafayette, USA, 2010

[8] Tekin M, Hissel D, Pera M. Energy Consumption Reduction of a PEM Fuel Cell Motor-Compressor Group Thanks to Efficient Control Laws[J]. Journal of Power Sources, 2006, 156(1): 57-63

[9] Talj R J, Hissel D, Ortega R. Experimental Validation of a PEM Fuel-Cell Reduced-Order Model and a Moto-Compressor Higher Order Sliding-Mode Control[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2010, 57(6): 1906-1913

[10] Ahluwalia R K, Wang X. Fuel Cell Systems for Transportation: Status and Trends[J]. Journal of Power Sources, 2008, 177(1): 167-176

[11] Zhao D, Krhenb? hl D, Blunier B, et al. Design and Control of an Ultra High Speed Turbo Compressor for the Air Management of Fuel Cell Systems[C]//IEEE Transportation Electrification Conference and Expo(ITEC), Dearborn, USA, 2012

[12] Zhao D, Blunier B, Gao F, et al. Control of an Ultra High Speed Centrifugal Compressor for the Air Management of Fuel Cell Systems[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2014, 50(3): 2225-2234

Flow Control of Fuel Cell Centrifugal Compressor Based on Sliding Mode Variable Structure

Zhao Dongdong[1], Hua Zhiguang[1], Zhang Lu[2], Huangfu Yigeng[1]

(1.School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710072, China)

Abstract: Air compressor is the key component in the proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) system which utilizes the electrochemical reaction of the hydrogen and oxygen to produce electricity. Compressed air (including 21 % oxygen) provided by the compressor has to be supplied to the cathode of PEMFC. The mass flow and pressure of the supplied air directly influence the output performance, i.e., the *V-I* characteristics, as well as the safety of the fuel cell. Insufficient air flow may lead to the "oxygen starvation" phenomenon which reduces the fuel cell lifespan and could damage the membrane in the sever case. In order to satisfy the fuel cell requirement, a sliding model controller is developed in this paper to control the mass flow. A super-twisting method is used to control the compressor driving torque and thereby the mass flow dynamics. The proposed method is validated by the simulation results.

Keywords: controller; flow rate; proton exchange membrane fuel cell(PEMFC)