

质子交换膜燃料电池动态建模及其双模控制

李 奇¹, 陈维荣¹, 刘述奎¹, 贾俊波², 韩 明³

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 南洋理工大学 电力电子工程学院, 新加坡 639798;

3. 淡马锡理工学院 工程学院, 新加坡 529757)

摘要: 由于已提出的质子交换膜燃料电池(PEMFC)模型难于控制, 提出利用MATLAB/SIMULINK仿真工具进行PEMFC系统动态建模, 同时为实现对PEMFC系统输出电压的控制, 采用了基于模糊规则切换的模糊逻辑控制器(FLC)和比例积分微分控制器(PID)相结合的双模控制方式. 仿真结果证明该动态模型易于控制, 能够反映出PEMFC系统的动态输出特性, 而且验证了基于模糊规则切换的双模控制能够有效抑制扰动, 改善PEMFC系统的动态输出特性, 保证系统的稳定运行, 有助于对PEMFC系统的输出性能分析以及实时控制系统的设计.

关键词: 质子交换膜燃料电池; 动态模型; 双模控制; 模糊切换规则

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Dynamic modeling of proton-exchange-membrane fuel cell for double model control

LI Qi¹, CHEN Wei-rong¹, LIU Shu-kui¹, JIA Jun-bo², HAN Ming³

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798;

3. School of Engineering, Temasek Polytechnic, Singapore 529755)

Abstract: Because the existing models of proton-exchange-membrane fuel cell(PEMFC) are not applicable to control, a dynamic model of PEMFC system is developed by using MATLAB/SIMULINK; and a two-model control scheme is proposed to control the output voltage of the PEMFC system. This control scheme combines a proportion-integral-differential(PID) controller and a fuzzy logic controller(FLC) based on fuzzy switching rules. The simulation results demonstrate that the model reflects well the dynamic characteristic of the PEMFC system and is easy to be controlled. The scheme of two-model control based on fuzzy switching rule restrains the disturbance, improves the output performance, and ensures the stability of the PEMFC system. It facilitates the analysis of the output performance of a PEMFC and the design of a real-time control system.

Key words: proton exchange membrane fuel cell; dynamic model; double model control; fuzzy switching rules

1 引言(Introduction)

质子交换膜燃料电池(PEMFC)具有低运行温度、高功率密度、快速响应以及当使用纯氢气时不会造成环境污染等特点, 适用于可移动动力源、电动车以及分散电站. 由于PEMFC动态特性研究对于电池的设计开发和实际应用有极其重要的作用, 同时涉及到流体力学、热力学、电化学以及计算机等众多学科分支, 因此对PEMFC动态特性的研究具有重要的科学研究和工程应用意义^[1]. 同时, 为了提高PEMFC系统的运行可靠性和稳定性, 必须采用可行的控制方法.

目前已提出的PEMFC模型难以实现控制系统的设计^[2,3]. 本文建立了一种简单有效的PEMFC系统动态模型, 并利用基于模糊规则切换的模糊控制和比例积分微分(PID)控制相结合的双模控制对PEMFC入口气体压力进行控制, 从而使系统输出电压达到预定值, 实现对PEMFC系统输出电压的控制, 克服了由于模糊控制器忽略积分影响而产生的稳态误差, 而且使用模糊规则切换可以实现不同控制器之间的无扰切换、加快系统调节时间, 确保系统的稳定运行. 研究结果将有助于对PEMFC的动态特性分析、模型结构优化以及PEMFC实时控制系统

设计.

2 PEMFC动态建模(Dynamic modeling of PEMFC)

在PEMFC内部,氢气的压力受到流入氢气流量、流出氢气和反应消耗氢气流量影响,根据物质守恒定律和理想气体状态方程,可表示为

$$\frac{V_a}{RT} \frac{dP_{H_2}}{dt} = m_{H_2,i} - K_a(P_{H_2} - P_{H_2,B}) - \frac{0.5Ni}{F}, \quad (1)$$

式中: V_a 为阳极流场总体积, R 为气体常数, T 为电池工作温度, P_{H_2} 为氢气分压, $m_{H_2,i}$ 为流入氢气流量, K_a 阳极流量系数, $P_{H_2,B}$ 为氢气排除压力, N 为单电池数量, F 为法拉第常数, i 为PEMFC的负载电流. 同理,在PEMFC内氧气压力受到流入氧气流量、流出氧气和反应消耗氧气流量影响,可以得到氧气压力特性方程为

$$\frac{V_c}{RT} \frac{dP_{O_2}}{dt} = m_{O_2,i} - K_c(P_{O_2} - P_{O_2,B}) - \frac{0.2Ni}{F}, \quad (2)$$

式中: V_c 阳极流场总体积, P_{O_2} 为氢气分压, $m_{O_2,i}$ 为流入氢气流量, K_c 阳极流量系数, $P_{O_2,B}$ 为氢气排除压力.

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.00085(T - 298.15) + 0.00043T(\ln P_{H_2} + \frac{1}{2} \ln P_{O_2}), \quad (3)$$

式中: E_{Nernst} 是热力学电动势, T 为电池工作温度, P_{H_2} 是氢气分压, P_{O_2} 是氧气分压.

$$V_{ohmic} = -i(R_M + R_c), \quad (4)$$

式中: V_{ohmic} 为欧姆过电压, i 为PEMFC的负载电流, R_M 为质子膜的等效膜阻抗, R_c 为碍质子通过质子膜的阻抗.

在PEMFC中存在双层电荷层现象^[1,2],可通过在极化电阻两端并联一个等效电容 C ,能够使PEMFC具有优良的动态特性. 令总极化过电压为 v_d ,则单电池动态特性微分方程为

$$\frac{dv_d}{dt} = \frac{i}{C} - \frac{v_d}{q}, \quad (5)$$

式中: C 是等效电容, 时间常数 q 随负载改变控制电压的动态变化.

综合考虑热力特性、质量传递和动力特性, PEMFC输出电压可表示为

$$V_{cell} = E_{Nernst} - V_{ohmic} - v_d. \quad (6)$$

3 PEMFC双模控制(Double model control of PEMFC)

3.1 PEMFC的FLC设计(Designing FLC of PEMFC)

阴极和阳极反应气体的流速是影响PEMFC输出电压的主要因素. 将PEMFC的输出电压与参考值之间的偏差 e 和其偏差变化率 ec 作为FLC的两个输入变量, 输出变量 u 为PEMFC摩尔流量, 并设定 e 和 ec 的论域均为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$, u 的论域为 $\{0, 1.5, 3, 4.5\}$. 根据专家经验采用三角形、Z形和S形相结合的隶属度函数^[4,5].

表1是FLC的模糊控制规则表. 模糊推理形式为: “If 输出电压偏差为 A_i And 输出电压偏差的变化率为 B_i , Then输出流量为 C_i ”. 所有控制规则是根据文献[4]和在PEMFC输出电压测试实验过程中的调试经验基础上总结得出, 并使用加权平均法进行模糊判决^[5].

表1 模糊控制规则

Table 1 Fuzzy control rules

ec	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	PS	PB
NM	ZO	ZO	ZO	ZO	PS	PM	PM
NS	ZO	ZO	ZO	ZO	PM	PM	PM
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	PM	PM	PB
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	PM	PB	PB
PM	ZO	ZO	ZO	ZO	PB	PB	PB
PB	ZO	ZO	ZO	ZO	PB	PB	PB

3.2 基于模糊规则切换的双模控制(Double model control based on fuzzy rules switching)

FLC鲁棒性较强, 但存在稳态误差. PID控制由于存在积分环节, 使稳态误差易于控制. 因此为了克服稳态误差, 改善FLC的稳态性能, 本文采用模糊控制和PID控制相结合的双模控制, 同时为实现无扰动切换、减少系统调节时间, 使用模糊规则切换来实现不同控制器之间的切换.

双模控制器按照如下模糊规则进行切换:

If e is Z_1 and ec is Z_2 then U is U_{PID} ,

Else U is U_{FUZZY} .

其中: U_{FUZZY} 和 U_{PID} 分别是FLC和PID控制器的输出, U 是双模控制输出, Z_1 和 Z_2 分别是 e 和 ec 的隶属度函数. 设FLC和PID控制器的控制强度系数分别为 w_{PID} 与 w_{FUZZY} , 则

$$w_{PID} = \min\{Z_1(e), Z_2(ec)\}, \quad (7)$$

$$w_{\text{FUZZY}} = 1 - w_{\text{PID}}, \quad (8)$$

基于模糊规则切换的双模控制输出如下:

$$U = w_{\text{FUZZY}}U_{\text{FUZZY}} + w_{\text{PID}}U_{\text{PID}}, \quad (9)$$

由上可知, 当系统响应进入稳态时误差和误差变化率均很小, PID 控制器起主要作用; 在暂态过程阶段, FLC 控制器起主要作用. 故此双模控制器在暂态时保留了 FLC 控制器的快速性和稳定性的优点, 同时也在稳态时保留了传统 PID 的高精度特性.

4 结果分析(Result analysis)

本文采用 MATLAB/SIMULINK 仿真工具建立 PEMFC 系统动态控制模型. 在该系统的阴极和阳极分别设置双模控制器, 并采用电流阶跃输入作为负载变化电流.

图1是系统输出电压仿真曲线, 其中设定参考电压为35 V. 当负载电流产生上升突变和下降突变时, 在双模控制器作用下, 输出电压产生向上和向下的小幅振荡, 最终能够使系统输出电压稳定到设定值, 而且调节时间较短. 而采用模糊控制会使输出电压产生相对较大幅度的振荡, 虽然最终也能使系统输出电压稳定到设定值, 但调节时间过长. 图1验证了该系统控制模型适用于控制的可行性, 表明该双模控制器能够有效地抑制扰动, 保证系统稳定运行.

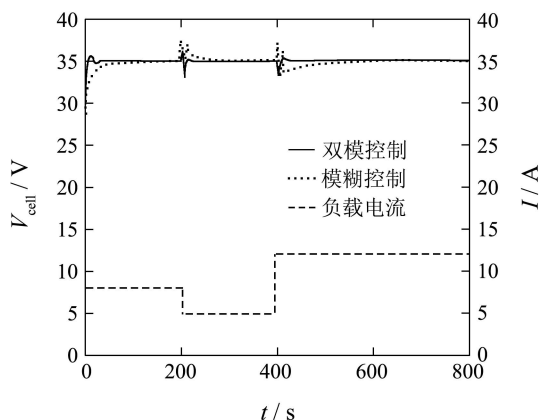


图1 PEMFC系统输出电压
Fig. 1 Output Voltage of PEMFC system

5 结论(Conclusion)

本文使用 MATLAB/SIMULINK 仿真工具对 PEMFC 系统进行动态建模, 并利用基于模糊规则切换的模糊控制和比例积分微分(PID)控制相结合的双模控制, 实现了对 PEMFC 系统输出电压的控制. 结果表明该动态模型易于控制, 而且所采用的双模控制方法能够有效改善 PEMFC 系统的动态输出特性, 确保系统的稳定运行, 将有助于对 PEMFC 输出特性分析、模型结构优化以及 PEMFC 实时控制系统的设计.

参考文献(References):

- [1] JAMES L, ANDREW D. *Fuel Cell Systems Explained*[M]. Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 2003.
- [2] SAMPATH Y, ASAD D, ALI F, et al. Modeling and simulation of the dynamic behavior of a polymer electrolyte membrane fuel cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2003, 124(1): 104 – 113.
- [3] PATHAPATI P R, XUE X, TANG J. A new dynamic model for predicting transient phenomena in PEM fuel cell system[J]. *Journal of Renewable Energy*, 2005, 30(1): 1 – 122.
- [4] HOMAIFAR A, MCCORMICK E. Simultaneous design of membership functions and rule sets for controllers using genetic algorithms[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1995, 3(2): 129 – 139.
- [5] WANG H O, TANAKA K, GRIFFIN M F. An approach to fuzzy control of nonlinear systems: stability and design issues[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1996, 4(1): 14 – 23.

作者简介:

李 奇 (1984—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为燃料系统建模与控制, E-mail: liqi0800@gmail.com;

陈维荣 (1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为智能信息处理与智能监测技术;

刘述奎 (1984—), 女, 硕士研究生, 目前研究方向为群体智能算法;

贾俊波 (1965—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为系统建模与智能控制;

韩 明 (1960—), 男, 博士, 研究员, 目前研究方向为燃料电池与电化学.