

文章编号:1009-3087(2014)05-0148-08

固体氧化物燃料电池气体供应系统的自适应滑模控制

佃松宜,吴璋,蒲明

(四川大学 电气信息学院,四川 成都 610065)

摘要:针对固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cells, SOFCs)中的气体供应系统进行自适应滑模控制研究,实现氢气与氧气的分压恒定且相等来保护电解质不受损伤,从而达到延长电池寿命、保护电堆、稳定输出电压的目的。建立了考虑系统内部参数摄动与外部不确定干扰等因素的SOFCs气体分压动态模型,并针对该模型中干扰上界未知的情况设计了自适应滑模控制器。将遗忘因子和修正算法引入对干扰上界的估计中,解决了传统自适应滑模控制器中参数估计值恒增的问题。通过引入边界层,在控制律中用饱和函数替代符号函数以减小抖振。仿真结果表明,设计的自适应律在干扰上界存在较精确的先验信息时能够达到较好的控制效果,对干扰的抑制作用明显,加入边界层后系统抖振得到削弱。

关键词:固体氧化物燃料电池;气体分压;自适应滑模控制;遗忘因子;边界层

中图分类号:TP273

文献标志码:A

Adaptive Sliding Mode Control for Gas Feeding System of Solid Oxide Fuel Cells

DIAN Songyi, WU Zhang, PU Ming

(School of Electrical Eng. and Info., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: An adaptive sliding mode control strategy for gas feeding system of solid oxide fuel cells (SOFCs) was presented. By stabilizing the pressure of reaction gas to make the pressures of hydrogen and oxygen equal to prevent the electrolytes from damage, the life span of SOFCs is able to be prolonged. A dynamic model for the gas partial pressures of the SOFCs was built with the consideration of internal parameter perturbation and external uncertain interference of the system. An adaptive law, with forgetting factor and modified algorithm, was designed to estimate the upper bound of disturbance while it was unknown. In order to reduce the chattering of sliding mode controller, the sign function was substituted by saturation function in a defined bound near the sliding mode surface. The simulation results showed that the proposed controller has good performance in inhibiting unknown disturbance and eliminating chattering, ensuring that the pressure difference between hydrogen and oxygen could keep in zero while load current has changed.

Key words: solid oxide fuel cells; partial pressures; adaptive sliding mode control; forgetting factor; bound

固体氧化物燃料电池(SOFC)是一种直接将气体或气体燃料的化学能转换成电能和热能的全固态能量转换装置,是目前能量转换效率最高的新一代燃料电池系统^[1-3]。其工作温度为600~1 000℃,可用氢气、一氧化碳及各种碳氢化合物为燃料,燃料来源广泛,并以空气(或氧气)为氧化剂。由于工作温度高,不需要铂金等贵金属催化剂,关键材料成

本相对较低,可与其他装置组成各种热电联供系统,效率可高达85%甚至更高,因而在中等规模分布式发电、电力市场、交通运输和军事等领域有着广阔的应用前景^[3]。气体供应系统是SOFCs的关键子系统之一,该子系统以改变气体流量来控制阴阳两极的气压。气压在SOFCs中是一个非常重要的参数,系统输出的电能质量、化学反应速率、温度等多项指

收稿日期:2013-09-13

基金项目:中央高校基本科研业务费资助项目(2012SCU11054)

作者简介:佃松宜(1972—),男,副教授,博士。研究方向:工业复杂系统的建模、分析与控制;电力电子与燃料电池系统的控制;特种机器人的研究与开发。E-mail:scudiansy@scu.edu.cn

网络出版时间:2014-9-10 9:36:20

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1596.T.20140910.1017.004.html>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

标都与气压有着密切联系,在负载变化时如何保持气压恒定是保证输出电能质量及化学反应速率的重要手段。另外,在电池工作时保证适当的反应气压,且使氢气与氧气的压差在一定小的范围内可以减轻容器壁及电解质所受损伤,从而延长电池寿命^[4-6]。

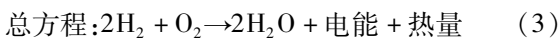
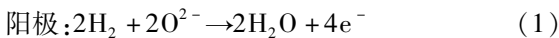
作为新一代燃料电池,SOFCs 目前仍处于研究、开发及试运行阶段,其系统建模与控制的研究相对较少,针对燃料电池气体供应系统的控制方法大多限于质子交换膜等类型燃料电池上^[4,7-8]。文献^[9]对 SOFCs 建模与控制策略的研究现状进行了较完整的文献综述。现有的控制策略中^[9-12],尝试采用 PID 控制,或在非线性动态模型线性化基础上设计 H_∞ 控制器,控制策略大多为线性控制方法。考虑 SOFCs 系统的内部参数摄动、不确定性等特征,采用自适应滑模控制等非线性控制方法的研究未见报道。因此,作者以 SOFCs 气体供应系统为控制对象,考虑系统的内部参数摄动及外部不确定干扰,利用自适应滑模控制^[13] (adaptive sliding mode control, ASMC) 在滑动模态上对参数和扰动变化不敏感从而表现出鲁棒性好、适合处理非线性被控对象的优点设计控制器,使氢气与氧气分压在反应过程中维持恒定,保护电堆的同时保证输出电压稳定。借鉴文献^[14]在伺服系统控制中所提出的遗忘机制和修正算法以解决 ASMC 参数估计中估计值恒增的问题,并引入边界层方法来减小基于常规自适应律的 ASMC 中存在的抖振问题。

1 SOFCs 原理及气压动态模型

1.1 SOFCs 的基本原理

单片 SOFC 的反应原理如图 1 所示,当以氢气为燃料,空气为氧化剂时,阴极空气中的氧气发生电还原反应,即氧分子得到电子被还原为 O^{2-} ; O^{2-} 在电解质隔膜两侧电位差与浓度差的驱动力作用下,通过电解质隔膜中的氧空位,定向跃迁到阳极侧;阳极氢气发生电氧化反应,生成水与电子;电子经外电路流向阴极,形成直流电。

化学反应如下:



一般单片电池能够产生 0.7 V 左右的电压,将多片电池堆叠串联成电池组能够获得理想的输出电压值。单片电池输出电压表达式^[1]如下:

$$V_{\text{out}} = V_{\text{cell}} - V_{\text{act}} - V_{\text{ohm}} - V_{\text{conc}} \quad (4)$$

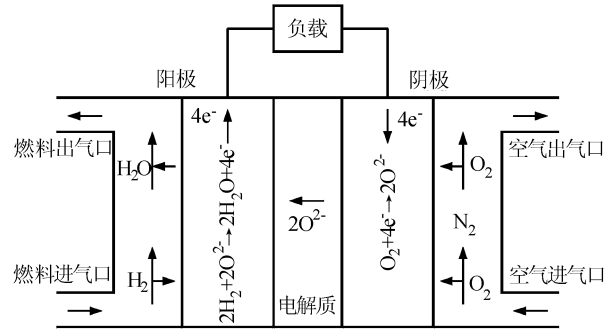


图 1 单片 SOFC 反应原理

Fig.1 Reaction principle of SOFC

其中: V_{cell} 为可逆开路电压或 Nernst 电压; V_{act} 为活化损失,主要为电极表面化学反应过慢导致所产生的部分电能损耗; V_{ohm} 为欧姆损失,主要为电解质中负离子流的欧姆电阻电压降; V_{conc} 为浓差损失,主要为气体浓度减小或氧气和氢气质量传输导致的电压损失。采用文献^[1]对上述变量的拟合方法,具体公式如下:

$$V_{\text{cell}} = V_{0,\text{cell}} + \frac{RT}{4F} \ln \left[\frac{(P_{\text{H}_2})^2 \cdot P_{\text{O}_2}}{(P_{\text{H}_2\text{O}})^2} \right] \quad (5)$$

$$V_{0,\text{cell}} = V_{0,\text{cell}}^0 - k_E (T - 298) \quad (6)$$

$$V_{\text{act}} = \frac{RT}{2\beta F} \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (7)$$

$$V_{\text{ohm}} = i \cdot R_{\text{ohm,cell}} \quad (8)$$

$$V_{\text{conc}} = -\frac{RT}{4F} \ln \left(1 - \frac{i}{i_0} \right) \quad (9)$$

式中, $V_{0,\text{cell}}$ 为参考电压, P_{H_2} 、 P_{O_2} 、 $P_{\text{H}_2\text{O}}$ 分别为氢气、氧气及水蒸气分压, i 为负载电流, $R_{\text{ohm,cell}}$ 为电池等效内阻,其他参数的定义及取值见表 1^[1]。

表 1 输出电压计算参数

Tab.1 Calculation parameters of output voltage

| 符号 | 参数 | 取值 |
|---------------------|---|-------------------------|
| $V_{0,\text{cell}}$ | 标准参考电压 /V | 1.18 |
| k_E | 经验系数 | 3.7818×10^{-4} |
| R | 通用气体常数 / (J · (mol · K) ⁻¹) | 8.314 |
| F | 法拉第常量 / (C · mol ⁻¹) | 96485 |
| β | 电荷转移系数 | 0.5 |
| i_0 | 最大电流 /A | 160 |
| T | 电堆温度 /K | 1073 |

最后, 电池输出总电压等于单片电池输出电压与堆叠数 n 的乘积。

由式(5) ~ (9) 可以看出: 开路电压仅与 P_{H_2} 、 P_{O_2} 和 $P_{\text{H}_2\text{O}}$ 有关, 与电流无关; 各项电压损失仅与电流有关。在负载突变并维持恒定之后, 为使输出电压 V_{out} 保持稳定, 需控制氢气、氧气及水蒸气的分压保持恒定。

1.2 SOFCs的气压动态模型

为简化分析,先作如下假设:

1) 由于温度变化过程较慢,所以假定电堆温度能够保持恒定(1 073 K)。

2) 入口气体先经过热交换器进行预热,且入口气体温度等于电堆温度。

3) 阳极入口气体为纯净氢气(99.99%)与水蒸气的混合气体,氢气与水蒸气比例为9:1,阴极入口气体为空气,且空气中氧气与氮气的比例为21:79,不考虑稀有气体及水蒸气等。

4) 由于电堆温度一直保持在1 073 K,所以假定水一直以蒸汽形式存在,未达饱和。

5) 不考虑电堆内的气体扩散。

6) 所有气体遵循理想气体定律。

将氢气、水蒸气(阳极侧)、氧气、氮气的分压定义为系统状态变量,根据理想气体定律 $PV = mRT$,每个气体分压与电池内气体量成正比,而单位时间的气体量可由气体入口流率、气体消耗(生成)速率和气体出口流率计算得出。因此,得到气体分压方程如下:

阳极侧:

$$\frac{dP_{H_2}}{dt} = \frac{RT}{V_a}(G_{H_2} - E_{H_2} - O_{H_2}) \quad (10)$$

$$\frac{dP_{H_2O}}{dt} = \frac{RT}{V_a}(G_{H_2O} + X_{H_2O} - O_{H_2O}) \quad (11)$$

阴极侧:

$$\frac{dP_{O_2}}{dt} = \frac{RT}{V_c}(G_{O_2} - E_{O_2} - O_{O_2}) \quad (12)$$

$$\frac{dP_{N_2}}{dt} = \frac{RT}{V_c}(G_{N_2} - O_{N_2}) \quad (13)$$

式中: G 为气体入口流率, O 为气体出口流率, E 为气体反应消耗速率, X 为气体反应生成速率,上述变量的单位为 mol/s; V_a 为阳极侧体积, V_c 为阴极侧体积。气体入口流率计算公式如下:

$$\begin{cases} G_{H_2} = Y_{H_2} \cdot G_a, \\ G_{H_2O} = Y_{H_2O} \cdot G_a, \\ G_{O_2} = Y_{O_2} \cdot G_c, \\ G_{N_2} = Y_{N_2} \cdot G_c \end{cases} \quad (14)$$

式中: Y_{H_2} 、 Y_{H_2O} 为氢气、水蒸气所占阳极入口气体的百分比; Y_{O_2} 、 Y_{N_2} 为氧气、氮气所占阴极入口气体的百分比; G_a 为阳极气体入口流率; G_c 为阴极气体入口流率,且

$$\begin{cases} G_a = u_a k_a, \\ G_c = u_c k_c \end{cases} \quad (15)$$

式中: u_a 、 u_c 为控制器输出,分别表示阳极、阴极的气体入口流率,单位为 L/min; k_a 、 k_c 为转化系数。

气体反应速率计算公式如下:

$$E_{H_2} = 2E_{O_2} = X_{H_2O} = n \frac{i}{2F} \quad (16)$$

气体出口流率可由入口流率得出公式如下:

$$\begin{cases} O_{H_2} = (G_a - E_{H_2} + X_{H_2O}) \cdot F_{H_2}, \\ O_{H_2O} = (G_a + X_{H_2O} - E_{H_2}) \cdot F_{H_2O}, \\ O_{O_2} = (G_c - E_{O_2}) \cdot F_{O_2}, \\ O_{N_2} = (G_c - E_{O_2}) \cdot F_{N_2} \end{cases} \quad (17)$$

其中:

$$F_{H_2} = \frac{P_{H_2}}{P_{H_2} + P_{H_2O}}, F_{H_2O} = \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} + P_{H_2O}},$$

$$F_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{P_{O_2} + P_{N_2}}, F_{N_2} = \frac{P_{N_2}}{P_{O_2} + P_{N_2}}.$$

式(17)中,气体出口流率的计算采用了“总气体流率×该气体所占比重”的方法。以阳极为例,总气体流率=气体入口流率 G_a - 氢气消耗速率 E_{H_2} + 水蒸气生成速率 X_{H_2O} 。

由以上分析,根据式(10)~(17)可以得到SOFCs气体分压的状态空间动态模型:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{u} + \mathbf{B}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{i}, \\ \mathbf{y} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_3 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (18)$$

式中:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} P_{H_2} \\ P_{H_2O} \\ P_{O_2} \\ P_{N_2} \end{bmatrix}, \mathbf{A}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ A_{21} & 0 \\ 0 & A_{32} \\ 0 & A_{42} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix}, \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_a \\ u_c \end{bmatrix}.$$

其中:

$$\begin{cases} A_{11} = \frac{RT}{V_a} k_a \lambda_{H_2} (Y_{H_2} - F_{H_2}), \\ A_{21} = \frac{RT}{V_a} k_a \lambda_{H_2} (Y_{H_2O} - F_{H_2O}), \\ A_{32} = \frac{RT}{V_c} k_c \lambda_{air} (Y_{O_2} - F_{O_2}), \\ A_{42} = \frac{RT}{V_c} k_c \lambda_{air} (Y_{N_2} - F_{N_2}). \end{cases}$$

$$\begin{cases} B_1 = -\frac{RT}{V_a} \frac{n}{2F}, \\ B_2 = \frac{RT}{V_a} \frac{n}{2F}, \\ B_3 = -F_{N_2} \frac{RT}{V_c} \frac{n}{4F}, \\ B_4 = F_{N_2} \frac{RT}{V_c} \frac{n}{4F}. \end{cases}$$

λ 为气体的化学计量比。

文献[1-2,6,15]指出,电堆内气压过低不利于化学反应的发生;增大反应气体压力,能够加快反应速率、提高发电效率;但气压过大会使 SOFCs 外壁和电解质等发生形变,对设备的气密性有更高的要求,同时会增大气体压缩机做功,降低整体发电效率,且会使电堆温度升高,降低 SOFCs 的使用寿命。因此,将以维持阴阳两极氢气与氧气分压恒定为目的设计控制器,以此保证反应速率、保护电堆,同时保证输出电压稳定。

对于形如式(18)所示的燃料电池非线性被控对象,文献[4,7,16]采用了反馈线性化控制(feedback linearization control, FLC)。该控制方法在系统前端引入非线性前馈,用以补偿电流变化对系统输出的影响,将非线性系统变换为基本等价的线性系统,再针对线性系统设计外部控制器。该方法将式(18)的负载电流 i 作为前馈补偿量,得到了系统输出跟随负载电流变化的响应特性。

在实际 SOFCs 气压子系统内部存在不同程度的参数摄动,同时系统也会受到来自外部环境的不确定干扰。因此在式(18)描述的气体分压动态模型中加入未知项,得到考虑了参数摄动、外部不确定干扰的气体分压非线性动态模型:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{u} + \mathbf{B}(\mathbf{x}) \cdot i + \mathbf{\Delta}, \\ \mathbf{y} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_3 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (19)$$

式中, $\mathbf{\Delta}$ 表示由温度、体积等参数的微小变化及外部干扰带来的不确定项,且 $\mathbf{\Delta}$ 有界。

2 控制器设计

2.1 自适应滑模控制器设计

考虑如下单输入单输出(SISO)非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) \cdot u + g(x) + d(t), \\ y = x \end{cases} \quad (20)$$

式中, $f(x)$ 、 $g(x)$ 已知, $d(t)$ 为未知项,且有界,即 $\exists D > 0$ 使 $|d(t)| \leq D$,上界 D 未知。定义跟踪误差

为 $e = y - y_d$,其中, y_d 为设定值。选取积分滑模面 $s = e + c \int_0^t edt, c > 0$ 为积分系数,则

$$\dot{s} = \dot{e} + ce = f(x) \cdot u + g(x) + d(t) - \dot{y}_d + ce \quad (21)$$

定义 Lyapunov 函数为:

$$V = \frac{1}{2}s^2 + \frac{1}{2}\gamma D^2 \quad (22)$$

式中, $\gamma > 0, D = D - \hat{D}, \hat{D}$ 为 D 的估计值。

若 \hat{D} 采用自适应律1,即 $\dot{\hat{D}} = \frac{1}{\gamma}|s|^{[17]}$,则:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} + \gamma D \dot{D} = \\ &= s[f(x) \cdot u + g(x) + d(t) - \dot{y}_d + ce] - \gamma D \dot{\hat{D}} = \\ &= s[f(x) \cdot u + g(x) + d(t) - \dot{y}_d + ce] - D|s| \end{aligned} \quad (23)$$

采用指数趋近律,构造:

$$u = \frac{1}{f(x)}[-\hat{D}\text{sgn}(s) - ks - g(x) + \dot{y}_d - ce] \quad (24)$$

其中, $f(x) \neq 0, k > 0$ 。将式(24)代入式(23),得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s(-ks) + d(t)s - \hat{D}|s| - D|s| = \\ &= -ks^2 + d(t)s - D|s| \leq -ks^2 < 0 \end{aligned} \quad (25)$$

其中, $s \neq 0$ 。

当 $s = 0$ 时, $e + c \int_0^t edt = 0$,理论上保证了系统的稳定性,且这种自适应律具有简单易实现的优点。但从表达式可以看出,该自适应律无法使参数估计到真值,且 $|s|$ 的存在会使得参数估计值在趋近阶段越来越大,从而抑制干扰需要很大的控制量,很有可能会出现饱和。同时,参数估计值也是控制器中的开关项系数,估计值过大会使系统的抖振越来越严重,最终可能导致系统失稳。为解决此问题,考虑在自适应律中加入适当的遗忘机制^[14]和修正算法,使得上界估计不会持续增大。

若 \hat{D} 采用自适应律2,即

$$\dot{\hat{D}} = \text{Proj}_{\hat{D}} \left\{ \frac{1}{\gamma} [|s| - \omega(\hat{D} - \hat{D}')] \right\} \quad (26)$$

式中, $\text{Proj}_{\hat{D}}(\cdot) = \begin{cases} 0, \hat{D} = D_{\max}, \text{且} \cdot > 0; \\ 0, \hat{D} = D_{\min}, \text{且} \cdot < 0; \\ \cdot, \text{其他。} \end{cases}$

该自适应律以参数估计偏离先验值 \hat{D}' 的程度来降低参数变化率。其中, $\omega > 0$ 为遗忘因子,表示

对参数估计值的修正强度。在趋近过程中,若 ω 越大,则当参数估计值超过先验值后变化率越小,避免了产生很大的控制量。加入修正算法 $Proj_{\hat{D}}(\cdot)$ 后保证了参数估计值有界,一般情况下, D_{\max} 可取控制器最大输出, $D_{\min} = 0$ 。最后,在控制器设计中引入边界层,采用饱和函数代替式(24)中的符号函数,在边界层以外使用滑模控制,边界层以内使用反馈控制,在保证较好的控制效果前提下,可减小一般滑模控制带来的抖振。控制器设计为:

$$u = \frac{1}{f(x)} [-\hat{D}\text{sat}(s) - ks - g(x) + \dot{y}_d - ce] \quad (27)$$

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} \text{sgn}(s), & |s| > \varphi; \\ \sin\left(\frac{\pi}{2\varphi}s\right), & |s| \leq \varphi. \end{cases}$$

定理 考虑模型假设2)、3)、5)、6),对于式(19)所示的 SOFCs 气体供应系统,若采用式(27)所示的控制律,及式(26)所示的自适应律,则系统全局一致最终有界。

证明:根据式(22)定义的 Lyapunov 函数,将控制律及自适应律带入式(23),得:

情况1:当 $|s| > \varphi$ 时,

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s[-\hat{D}\text{sgn}(s) - ks + d(t)] - D[|s| - \omega(\hat{D} - \hat{D}')] = \\ &- ks^2 + d(t)s - D|s| + \omega D(\hat{D} - \hat{D}') \leq \\ &- ks^2 + \omega D(\hat{D} - \hat{D}') = \\ &- ks^2 - \omega D^2 + \omega D(D - \hat{D}') \leq \\ &- ks^2 - \omega D^2 + \omega |D| |D - \hat{D}'| \leq \\ &- ks^2 - \omega D^2 + \omega \left[D^2 + \frac{1}{4} (D - \hat{D}')^2 \right] \leq \\ &- ks^2 + \frac{\omega}{4} (D - \hat{D}')^2 \end{aligned} \quad (28)$$

s 最终有界,收敛区间为 $[-\theta_1 \quad \theta_1]$, 其中,

$$\theta_1 = \sqrt{\frac{\omega (D - \hat{D}')^2}{4k}}.$$

情况2:当 $|s| \leq \varphi$ 时, $s \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2\varphi}s\right) \geq s \cdot \frac{s}{\varphi}$ 恒成立。因此,

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -ks^2 - s\hat{D}\sin\left(\frac{\pi}{2\varphi}s\right) + \hat{D}|s| + \omega D(\hat{D} - \hat{D}') \leq \\ &- ks^2 - \frac{\hat{D}}{\varphi}s^2 + \hat{D}|s| + \omega D(\hat{D} - \hat{D}') = \\ &- ks^2 - \frac{1}{\hat{D}\varphi}(\hat{D}|s| - \frac{\hat{D}\varphi}{2})^2 + \frac{\hat{D}\varphi}{4} + \omega D(\hat{D} - \hat{D}') \leq \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &- ks^2 + \frac{\hat{D}\varphi}{4} + \omega D(\hat{D} - \hat{D}') \leq \\ &- ks^2 + \frac{\hat{D}\varphi}{4} + \frac{\omega}{4} (D - \hat{D}')^2 \end{aligned} \quad (29)$$

s 最终有界,收敛区间为 $[-\theta_2 \quad \theta_2]$, 其中,

$$\theta_2 = \sqrt{\frac{\hat{D}\varphi + \omega (D - \hat{D}')^2}{4k}}.$$

同时考虑情况1、2的界定条件,完整的收敛边界可表示为 $|s| \leq \Omega$, 其中:

$$\Omega = \begin{cases} \sqrt{\frac{\omega (D - \hat{D}')^2}{4k}}, \sqrt{\frac{\omega (D - \hat{D}')^2}{4k}} > \varphi; \\ \min\left\{ \sqrt{\frac{\hat{D}\varphi + \omega (D - \hat{D}')^2}{4k}}, \varphi \right\}, \sqrt{\frac{\omega (D - \hat{D}')^2}{4k}} \leq \varphi. \end{cases}$$

Ω 可通过 ω 、 φ 等参数进行调节,由于 s 最终收敛于 Ω 内,且 $s = e + c \int_0^t edt$, 因此,误差 e 最终将收敛于以0为圆心、 R 为半径的圆内, R 与 Ω 成正比。

证毕。

基于第2种自适应律设计的 ASMC 控制效果依赖于 \hat{D} 、 ω 、 φ 等参数的取值,同时估计值 \hat{D} 最终只能逼近先验值,而无法逼近真值。因此,作者设计的控制律对先验值的准确性要求较高,先验值越准确,保守性越小。即使存在估计误差,对于任意小的给定误差上界 $\delta > 0$,总是存在一组足够大的控制器参数 $k > 0$,使得被控误差的绝对值小于 δ 。同时,有效避免了上界估计值恒增的问题,是第1种自适应律的一个改进方案,下文将基于这种自适应律设计 SOFCs 气体供应系统的自适应滑模控制器。

2.2 气压控制器设计

对式(19)描述的 SOFCs 气压动态模型,由于阴阳两极的输入输出相互不存在联系,因此可以等效为2个单输入单输出系统,即可以分别设计控制器。气压设定值 y_d 为常量,因此 $\dot{y}_d = 0$ 。令 $\Delta = [d_1(t) \quad -d_1(t) \quad d_2(t) \quad -d_2(t)]^T$ 为未知扰动,且 $d_1(t)$ 、 $d_2(t)$ 有界,即 $|d_1(t)| < D_1$, $|d_2(t)| < D_2$ 。

选取滑模面为:

$$s = [s_1 \quad s_2]^T = \left[e_1 + c_1 \int_0^t e_1 dt \quad e_2 + c_2 \int_0^t e_2 dt \right]^T$$

系统输出的跟踪误差:

$$e = [e_1 \quad e_2]^T.$$

自适应滑模控制器设计为:

$$u = \begin{bmatrix} u_a \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}^{-1}(-\hat{D}_1 \text{sat}(s_1) - k_1 s_1 - B_1 \cdot i - c_1 e_1) \\ A_{32}^{-1}(-\hat{D}_2 \text{sat}(s_2) - k_2 s_2 - B_3 \cdot i - c_2 e_2) \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\text{式中, } \text{sat}(s) = \begin{cases} \text{sgn}(s), & |s| > \varphi; \\ \sin(\frac{\pi}{2\varphi}s), & |s| \leq \varphi. \end{cases}$$

自适应律为:

$$\dot{\hat{D}}_1 = \text{Proj}_{\hat{D}_1} \left\{ \frac{1}{\gamma_1} [|s_1| - \omega_1 (\hat{D}_1 - \hat{D}_1')] \right\},$$

$$\dot{\hat{D}}_2 = \text{Proj}_{\hat{D}_2} \left\{ \frac{1}{\gamma_2} [|s_2| - \omega_2 (\hat{D}_2 - \hat{D}_2')] \right\}.$$

3 仿真结果

在 Matlab/Simulink 环境下进行了数字仿真,仿真参数如表 2 所示。

表 2 仿真参数

Tab.2 Parameters for simulation

| 符号 | 参数 | 取值 |
|--------------|-----------------------------------|---------------------------|
| k_a | 阳极转换因子 / (mol · s ⁻¹) | 5.679×10^{-4} |
| k_c | 阴极转换因子 / (mol · s ⁻¹) | 5.679×10^{-4} |
| V_a | 阳极侧体积 / m ³ | 0.005 |
| V_c | 阴极侧体积 / m ³ | 0.01 |
| φ | 滑模边界层厚度 | 0.5 |
| k | 指数趋近项系数 | $k_1 = k_2 = 10$ |
| c | 积分系数 | $c_1 = c_2 = 3$ |
| ω | 遗忘因子 | $\omega_1 = \omega_2 = 1$ |
| \hat{D}_1' | D_1 先验中心估计 | 90 |
| \hat{D}_2' | D_2 先验中心估计 | 40 |
| D_{\max} | 参数估计值上界 | 500 |
| D_{\min} | 参数估计值下界 | 0 |

负载电流在 0 ~ 30 s 的时间内在 0 ~ 100 A 阶跃变化,如图 2 所示,选择电池堆叠数为 96。

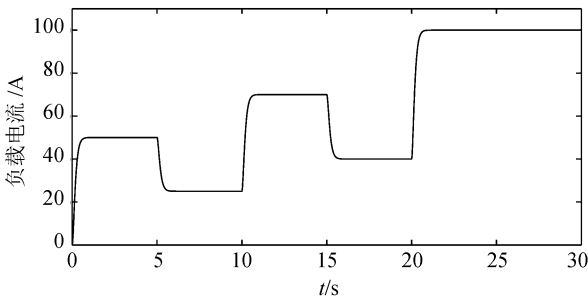


图 2 负载电流变化

Fig.2 Variations of load current

气压设定值选择 3×10^5 Pa, 并以 $\Delta = [100\sin(t) \quad -100\sin(t) \quad 50\sin(t) \quad -50\sin(t)]^T$ 来模拟系统中的未知干扰和参数摄动。对 FLC、ASMC1(采用第 1 种自适应律的 ASMC)、ASMC2(采用第 2 种自适应律的 ASMC)在同等增益下的控制

效果进行比较,结果如图 3 ~ 8 所示。

图 3 显示了 3 种控制器作用下的输出电压响应。从图 3 中可以看到,3 条响应曲线几乎重合,仅在 10^{-3} 数量级上有差别,因此 3 种控制方法控制输出电压的能力基本相同。

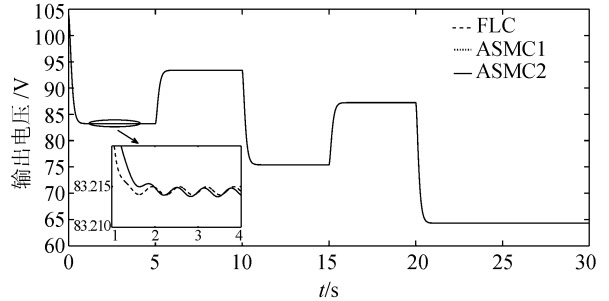


图 3 输出电压变化

Fig.3 Output voltage under load variations

图 4、5 显示了被控量氢气、氧气分压跟随负载电流变化的响应情况。在相同增益下,3 种控制器都能使系统输出有效跟随负载电流的变化,并很快达到稳定。但 FLC 抑制系统中未知扰动的能力明显弱于 2 种自适应滑模控制器,同时 ASMC2 中自适应律的改进减小了 ASMC1 控制中存在的抖振,由此也验证了 ASMC2 在 SOFCs 气体供应子系统中应用的优越性。

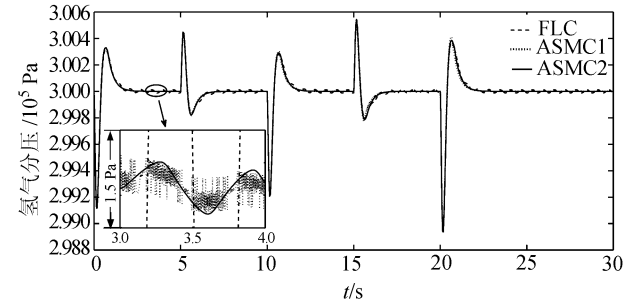


图 4 阳极侧氢气分压变化

Fig.4 Variations of hydrogen partial pressure

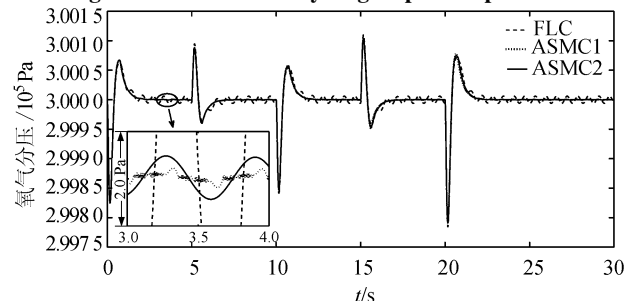


图 5 阴极侧氧气分压变化

Fig.5 Variations of oxygen partial pressure

由图 6 可以看出,气体分压差最大时达到 -852.4 Pa,远小于 SOFCs 系统设计中气体分压差控制在 $\pm 8\ 000$ Pa 内的要求。

阴阳两极气体入口流率变化如图 7、8 所示。由

图7,8可见:采用ASMC1,随着时间的增加抖振不断增大;引入边界层的ASMC2使抖振现象得到了有效抑制。

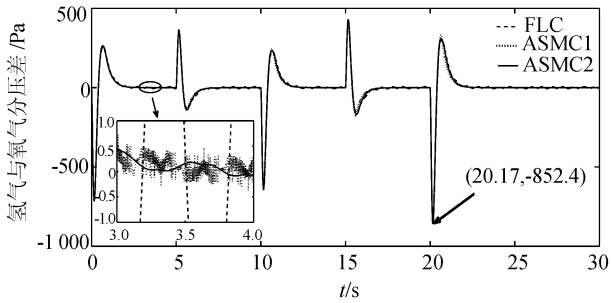


图6 氢气与氧气分压差变化

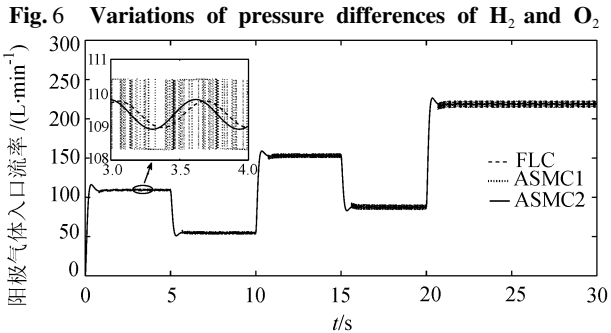


图7 阳极气体入口流率变化

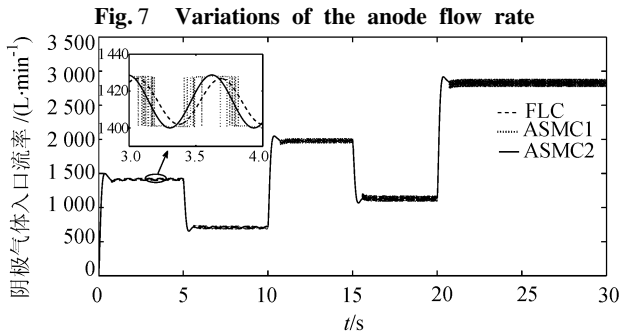


图8 阴极气体入口流率变化

Fig.8 Variations of the cathode flow rate

4 结论

考虑SOFCs系统的内部参数扰动及外部不确定干扰,建立了SOFCs的气体供应系统模型。选取积分滑模面和常规自适应律设计了自适应滑模控制器ASMC1,并从稳定性、参数估计和抖振等方面进行了分析。在此基础上,引入表征对参数估计值修正强度的遗忘因子 ω ,在趋近过程中,避免了产生很大的控制量。加入修正算法 $Proj_D(\cdot)$ 后保证了参数估计值的有界性。采用饱和函数代替符号函数的方法引入边界层,在边界层外使用滑模控制,边界层内使用反馈控制。针对建立的SOFCs气体供应系统模型,证明了采用改进的控制律和自适应律的系统

全局一致最终有界,并以此进行了气压控制器的设计。仿真结果表明:针对SOFCs气体供应系统的控制,所采用的自适应滑模控制方法较FLC方法具备更好的未知扰动抑制能力和更强的系统鲁棒性;ASMC2方法有效解决了ASMC1方法中干扰上界估计值恒增的问题,有效减小了ASMC1方法中的抖振,实现了SOFCs气体供应系统在负载变动时氢气与氧气分压保持恒定且相等,表明控制器设计的合理性。

参考文献:

- [1] Nehrir M H, Wang Caisheng. Modeling and control of fuel cells distributed generation applications [M]. New York: Wiley, 2009: 40-55; 85-114.
- [2] Larminie J, Dicks A. Fuel cell systems explained [M]. 2 ed. New York: Wiley, 2003: 19-41, 207-226.
- [3] Li Jian. Solid oxide fuel cells: Development status and key technologies [J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2007, 13(6): 683-690. [李箭. 固体氧化物燃料电池: 发展现状与关键技术 [J]. 功能材料与器件学报, 2007, 13(6): 683-690.]
- [4] Woon K N, Bei G. Feedback-Linearization-based nonlinear control for PEM fuel cells [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 179-190.
- [5] Purkrushpan J, Stefanopoulou A G, Peng Huei. Control of fuel cell breathing [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2004, 24(2): 30-46.
- [6] Zhu Y, Tomsovic K. Development of models for analyzing the load-following performance of microturbines and fuel cells [J]. Electric Power Systems Research, 2002, 62(1): 1-11.
- [7] Bei G, Woon K N, Bill D. Fuel cells modeling, control and applications [M]. London: Taylor & Francis Group, 2010: 55-80.
- [8] Matraji I, Laghrouche S, Wack M. Second order sliding mode control for PEM fuel cells [C] // Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control. Atlanta: IEEE, 2010: 2765-2770.
- [9] Huo Haibo, Zhu Xinjian, Chao Guangyi. Research status and development of modeling and controlling for SOFC

- [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2007, 31(10): 833 - 836. [霍海波, 朱新坚, 曹广益. SOFC 建模与控制策略的研究现状与发展[J]. 电源技术, 2007, 31(10): 833 - 836.]
- [10] Stiller C, Thorud B. Control strategy for a solid oxide fuel cell and gas turbine hybrid system[J]. Journal of Power Sources, 2006, 158(1): 303 - 315.
- [11] Wang Lijin, Zhang Huisheng, Weng Shilie. Control strategy research of direct internal reforming solid oxide fuel cell [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(20): 94 - 98. [王礼进, 张会生, 翁史烈. 内重整固体氧化物燃料电池控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(20): 94 - 98.]
- [12] Sedghisigarchi K, Feliachi A. H-infinity controller for solid oxide fuel cells [C]//Proceedings of the 35th Southeastern Symposium on System Theory. Morgantown, WV: IEEE, 2003: 464 - 467.
- [13] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2012: 71 - 103.
- [14] Wan Yubin, Hu Chanjuan, Zhao Jin. Adaptive sliding mode control of servo system based on double nested modification [J]. Micromotors, 2011, 44(2): 48 - 53. [万宇宾, 胡婵娟, 赵金. 基于双层嵌套修正的伺服系统自适应滑模控制研究[J]. 微电机, 2011, 44(2): 48 - 53.]
- [15] Xu Li, Wang Yuzhang, Weng Yiwu. Analysis of pressure characteristics of SOFC hybrid power generation system based on syngas [J]. East China Electric Power, 2010, 38(6): 903 - 906. [许丽, 王玉璋, 翁一武. 基于合成气的固体氧化物燃料电池混合发电系统的压力特性分析[J]. 华东电力, 2010, 38(6): 903 - 906.]
- [16] Shao Qinglong, Cao Guangyi, Zhu Xinjian. Nonlinear control of temperature of PEM fuel cell stack [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(11): 2584 - 2586. [邵庆龙, 曹广益, 朱新坚. 质子交换膜燃料电池电堆温度的非线性控制[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(11): 2584 - 2586.]
- [17] Lin F J, Shyu K K. Novel sliding mode controller for synchronous motor drive [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(2): 532 - 542.

(编辑 赵婧)