

固体氧化物燃料电池输出电压前馈—反馈控制

康英伟, 曹广益, 屠恒勇, 李俊

(上海交通大学 燃料电池研究所, 上海 200240)

摘 要: 基于固体氧化物燃料电池(SOFC)运行参数静态值间的关系, 对 SOFC 的定输出电压运行进行了分析, 指出要实现定输出电压运行在保持输出电压恒定的同时还要使燃料利用率满足一定的约束。进一步采用前馈—反馈控制策略设计了输出电压控制器, 其中前馈控制器基于运行参数静态值间的关系进行设计, 其核心是利用卡当公式求解三次方程; 反馈控制器为 PI 控制器, 通过将对象模型线性化后采用频率响应法进行设计。仿真结果表明, 所给的前馈—反馈控制比单一的反馈控制具有更优的动态性能, 在通常的负荷变化范围内足以满足定输出电压运行的要求。

关 键 词: 固体氧化物燃料电池(SOFC); 自动控制技术; 输出电压控制; 前馈—反馈控制策略

中图分类号: TM911.4 文献标识码: A

引 言

固体氧化物燃料电池(SOFC)是高温燃料电池的一种, 工作温度 600~1 000 °C, 在所有类型的燃料电池中最高。它以固体氧化物作为电解质, 利用固体氧化物高温下传导氧离子的特性进行工作。与其它类型的燃料电池(如质子交换膜燃料电池 PEM-FC、熔融碳酸盐燃料电池 MCFC 等)相比, SOFC 具有原理简单、燃料适应性强、无需贵金属催化剂等优点, 并因可与小型燃气轮机构成效率极高的联合循环装置而备受关注, 是目前燃料电池领域的研究热点之一^[1]。

目前, 随着材料、制作工艺等方面一些关键技术的突破, 对 SOFC 及其系统动态特性与运行控制的研究逐渐活跃起来。对 SOFC 系统的有效控制, 能够提高运行效率, 延长电堆寿命, 改善电能质量, 是推动 SOFC 走向实用化、商业化的重要环节。同时由于 SOFC 本身高温、密封以及分布参数的特点, 对其运行控制提出了许多挑战性的问题。

1 SOFC 系统运行控制概况

SOFC 系统的控制主要包括燃料量控制和温度

控制等方面。温度控制本文不做讨论, 以下假设 SOFC 电堆的温度已通过另外的控制环保持在设定值。所谓燃料量控制就是给 SOFC 提供合适的燃料量以满足其在不同负荷下的燃料需求。而供给燃料量的合适程度一般用被称为燃料利用率的集总参数来衡量, 其定义式为:

$$u = N_{H_2}^r / N_{H_2}^{in} \quad (1)$$

式中: $N_{H_2}^{in}$ 、 $N_{H_2}^r$ —供给的和反应消耗的氢气量。作为 SOFC 重要的运行参数, u 的取值对电池的性能有重要影响。在 SOFC 运行中, 通常要求满足 $0.7 \leq u \leq 0.9$ 的约束。 u 太大或太小, 分别表示送入的燃料不足(overused)或过量(undensed), 都可能造成电池性能下降甚至永久性的损害^[2]。

SOFC 通常采用定燃料利用率的运行方式^[4~6], 即在运行过程中保持燃料利用率 u 的恒定, 在不同负荷下由一固定的 u 计算所应供给的燃料量, 再通过 PWM 逆变器的调节克服直流输出电压的波动, 为负荷提供恒定电压的交流电。该策略实际上是一种简单的比值控制^[10], 但在某些情况下如逆变器无电压调节能力或者 SOFC 的负荷为直流负荷时, 需要 SOFC 直接提供恒定的直流输出电压^[4], 此即定输出电压运行方式。与定燃料利用率运行相比, 定输出电压运行在保持输出直流电压恒定的同时还要保证燃料量的合适供应(即 u 要满足一定的约束), 因而需要更深入的研究和更精巧的控制设计。

Y.H. Li 等人给出了一个实现 SOFC 定输出电压运行的控制方案^[4]。该方案是基于包含等效负荷的广义对象所设计的反馈控制。其中广义对象传递函数的得到需要经过复杂的推导和技巧性的简化。本文则直接将 SOFC 的输出电流作为可测扰动, 通过前馈—反馈控制策略实现 SOFC 的定输出电压运行。

2 SOFC 系统及其动态模型

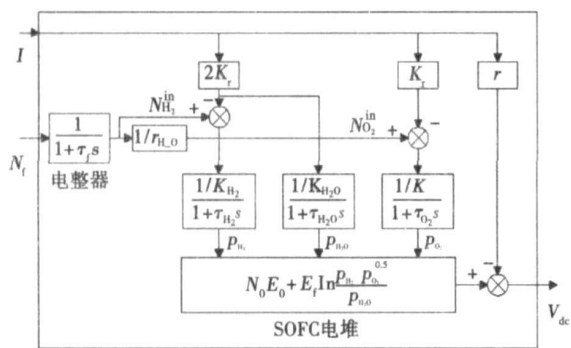
本文采用文献[2~3]给出的 SOFC 系统的动态

模型,如图 1 所示,该模型已在燃料电池领域得到较广泛的认可与采用^[4,7]。

该 SOFC 系统由重整器和 SOFC 电堆组成,以天然气为燃料, N_f 表示输入重整器的天然气流量。天然气经重整转化为富氢气体后被送入 SOFC 的阳极。重整器的动态用时间常数为 τ_f 的一阶惯性环节表示。 r_{H_2O} 表示送入 SOFC 的氢气与氧气的摩尔流量之比,通常取 $1 < r_{H_2O} < 1.25$ 。Nemst 方程建立了各组分分压与开路电动势 (EMF) 间的联系,据此方程,包含 N_0 个单池的 SOFC 的开路电动势为:

$$E = N_0 E_0 + E_f \ln(p_{H_2} p_{O_2}^{0.5} / p_{H_2O}) \quad (2)$$

式中: E_0 —标准状况下单池的电动势, $E_f = N_0 RT / 2F$ 。



r —SOFC 的欧姆电阻; 输出电压 V_{dc} —开路电动势 E 与电流 I 下的欧姆损失之差

图 1 SOFC 系统的动态模型

3 运行参数的静态关系及定电压运行分析

SOFC 定输出电压运行就是要在不同的负荷电流 I 下通过控制燃料量 N_f 保持输出电压 V_{dc} 的恒定,同时还要使燃料利用率 u 满足约束,不至于发生燃料供给的过量和不足。因此首先需要研究 u 、 V_{dc} 、 I 等运行参数之间的依赖关系。Y. H. Li 导出了 u 、 V_{dc} 、 I 三者静态值间的关系^[4],并用于指导 SOFC 的运行。这里以略微不同的形式给出此关系,并用于对 SOFC 定输出电压运行方式进行分析。在 4.1 中将进一步利用此关系设计前馈控制器。

根据图 1 给出的模型,可以得到稳态时 SOFC 内各组分气体的分压:

$$\begin{aligned} p_{H_2,0} &= (N_{H_2}^{in} - 2K_r I) / K_{H_2} \\ p_{O_2,0} &= (N_{O_2}^{in} / r_{H_2O} - K_r I) / K_{O_2} \\ p_{H_2O,0} &= 2K_r I / K_{H_2O} \end{aligned} \quad (3)$$

将式(3)代入Nemst方程式(2),并考虑 u 的定义式

(1),可得到下式:

$$E = N_0 E_0 + E_f \left\{ \ln \left[(K_{H_2O} / K_{H_2}) (K_r / (r_{H_2O} K_{O_2}))^{1/2} \right] + 0.5 \ln \left[I / (u - 1)^2 (2 / u - r_{H_2O}) \right] \right\} \quad (4)$$

又有:

$$V_{dc} = E - rI \quad (5)$$

将式(5)带入式(4)消去 E 并略加整理,即可得关系式:

$$\left(\frac{1}{u} - 1 \right)^2 \left[\frac{2}{u} - r_{H_2O} \right] = \frac{\exp[2(V_{dc} + rI) / E_f - \alpha]}{I} \quad (6)$$

其中: $\alpha = 2N_0 E_0 / E_f + 2 \ln \left[(K_{H_2O} / K_{H_2}) (K_r / (r_{H_2O} K_{O_2}))^{1/2} \right]$

式(6)建立了运行参数 u 、 V_{dc} 、 I 三者静态值间的依赖关系,由此式可知,在一定的输出电流 I 下, u 与 V_{dc} 间存在一一对应关系。基于式(6),图 2 给出了几个不同的 V_{dc} 下, u 随 I 的变化曲线(采用文献[2~3]的数据,并见表 1),也即定输出电压运行线。可以看到,随着 I 的减小,在某一低负荷下(对应的输出电流为 I_m), u 有极大值存在。可以证明 $I_m = E_f / 2r$,此值与 u 和 V_{dc} 无关^[4]。

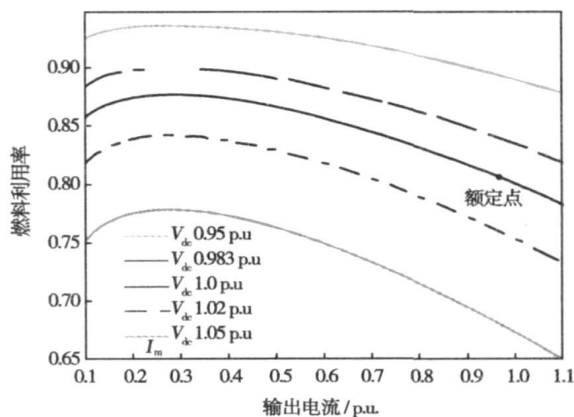


图 2 不同输出电压下, u 随 I 的变化曲线

可以利用式(6)并结合图 2 对 SOFC 定输出电压运行进行分析。首先, u 极值的存在说明在定输出电压运行时,最易发生燃料供应不足的情况是输出电流等于 I_m 时;其次,可以用于判断定输出电压运行的可行性。从图 2 上可以看到,当 V_{dc} 为 1.0 p.u 和 1.02 p.u 时,在不同的输出电流 I 下, u 始终都在 0.7~0.9 的约束范围内,说明这两种定电压运行在整个负荷范围内是可行的,不会发生燃料供应不足或过量的情况;当 V_{dc} 为 0.95 p.u 和 1.05 p.u 时,在一定的 I 的区域内, u 会违反 0.7~0.9 的约束,说明这两种定输出电压运行并不是在整个负荷范围内

可行; 当 V_{dc} 为 $0.983p.u$ 时, 虽然 u 满足 $0.7 \sim 0.9$ 约束, 但当 I 等于 I_m 时, u 也达到了 0.9 的上限。负荷的略微升高就会造成 u 的动态值超限, 因此此运行方式也不可行。

4 SOFC 的输出电压控制

将 SOFC 的输出电流 I 作为可测扰动, 利用前馈-反馈控制策略实现定输出电压运行。控制结构如图 3 所示, SOFC 系统包括重整器和 SOFC 电堆。控制量为送入重整器的天然气流量 N_f 。前馈控制器根据电压设定值 V_{sp} (先要用第 3 节的方法判断运行的可行性) 和输出电流扰动 I 计算出前馈控制量 N_{ff} , 并与反馈控制量 N_{fb} 叠加后作为总的控制量 N_f 。

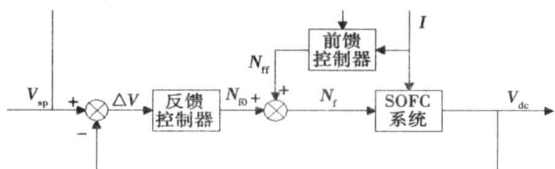


图 3 前馈-反馈控制系统结构

之所以采用前馈-反馈控制策略与 SOFC 本身的特点有关。燃料电池往往存在频繁和无法预测的负荷扰动, 因此特别适合引入前馈控制。因为前馈控制直接、快速, 扰动一旦产生, 控制作用就立即产生。但不可避免模型误差、未知扰动以及对象参数变化使得单一前馈控制的准确性不高。因此前馈控制需要与反馈控制结合起来, 构成前馈-反馈结构。这样既发挥了前馈控制快速、有力的优点, 又保持了反馈控制准确性高的长处。前馈-反馈控制结构在其它类型燃料电池的控制中也有应用^[8-9]。下面详细给出前馈与反馈控制器的设计过程。

4.1 前馈控制器设计

该前馈控制器的设计是基于式(6)给出的 u 、 V_{dc} 、 I 三个运行参数静态值间的关系。根据式(6), 对于一定的输出电流 I 和电压设定值 V_{sp} , 便对应一定的燃料利用率 u , 也即对应一定的输入氢气量 $N_{H_2}^{in}$ (根据式(1))。换言之, 只要过程模型足够准确, 在电流负荷 I 下, 如果输出氢气量是 $N_{H_2}^{in}$ 的话, 则 SOFC 的输出电压必为设定值 V_{sp} 。从本质上来说, 这是一种“静态逆”的思想。可将该前馈控制器写为静态映射: $N_{ff} = f(I, V_{dc})$ 。实现该静态前馈控制器的关键是求解式(6)的三次方程。

令 $x = 1/u$, $\beta = \exp[2(V_{dc} + rI)/E_f - \alpha]/I$, 可将式(6)展为如下三次方程:

$$x^3 - [(r_{H_2O} + 4)/2]x^2 + (1 + r_{H_2O})x - (r_{H_2O} + \beta)/2 = 0 \quad (7)$$

再记: $a_0 = -(r_{H_2O} + \beta)/2$, $a_1 = 1 + r_{H_2O}$, $a_2 = -[(r_{H_2O} + 4)/2]$, 即可直接利用卡当(Cardano's)公式求解此方程^[11]。静态前馈控制算法具体描述如下:

- Step 1: 输入 V_{sp} 和 I ;
- Step 2: 计算 β 及 $a_0 \sim a_2$;
- Step 3: 利用卡当(Cardano's)公式计算 x 和 u ;
- Step 4: 根据式(1)计算前馈控制量 N_{ff} 。

4.2 反馈控制器设计

为了便于设计反馈控制器, 将图 3 的控制系统线性化, 如图 4 所示。其中静态前馈控制器线性化为: $\Delta N_{ff} = K_{ff1} \Delta V + K_{ff2} \Delta V_{sp}$, K_{ff1} 、 K_{ff2} 是随 I 和 V_{sp} 变化的前馈增益。反馈控制器为 $G_c(s)$, 此线性控制系统的输出为:

$$\Delta V_{dc} = \frac{G_d + K_1 G_p}{1 + G_c G_p} \Delta V + \frac{G_c G_p + K_2 G_p}{1 + G_c G_p} \Delta V_{sp} \quad (8)$$

则该控制系统的稳定性完全由闭环特征方程 $1 + G_c G_p$ 决定^[10], 因此 $G_c(s)$ 只需根据 $G_p(s)$ 进行设计, 而无需考虑前馈控制器和扰动通道 $G_d(s)$ 的影响。

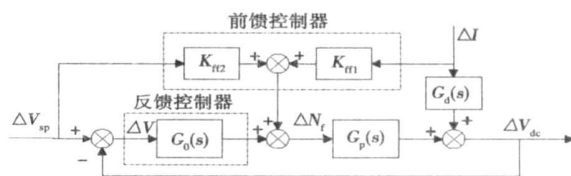


图 4 线性化后的前馈-反馈控制结构

4.2.1 对 $G_p(s)$ 动态性能的分析

将 SOFC 的系统模型在某一工作点处线性化后可得到 $G_p(s)$ 的具体形式:

$$G_p(s) = K \cdot \frac{\tau s + 1}{(\tau_f s + 1)(\tau_{H_2} s + 1)(\tau_{O_2} s + 1)} \quad (9)$$

式中: $K = A + B$; $\tau = (A\tau_{O_2} + B\tau_{H_2}) / (A + B)$; $A = E_f / (K_{H_2} p_{H_2,0})$; $B = E_f / (2r_{H_2O} K_{O_2} p_{O_2,0})$ 。 $p_{H_2,0}$ 、 $p_{O_2,0}$ 为展开工作点处的 H_2 与 O_2 分压。要根据 $G_p(s)$ 设计控制器, 首先要对其动态性能进行分析。

K 与 τ 分别表示 $G_p(s)$ 的增益和零点的时间常数, 因此其取值将影响闭环控制系统的动态性能。 K 与 τ 的取值与 SOFC 的负荷有关。由图 5 可以看到 K 随 I 的减小而增大, 这说明在负荷变化时, SOFC 系统具有一定的非线性特性。 τ 受输出电流

的影响较小,且有一极小值存在。可以证明 τ 取极小值时所对应的输出电流恰为 I_m 。图 6 进一步给出

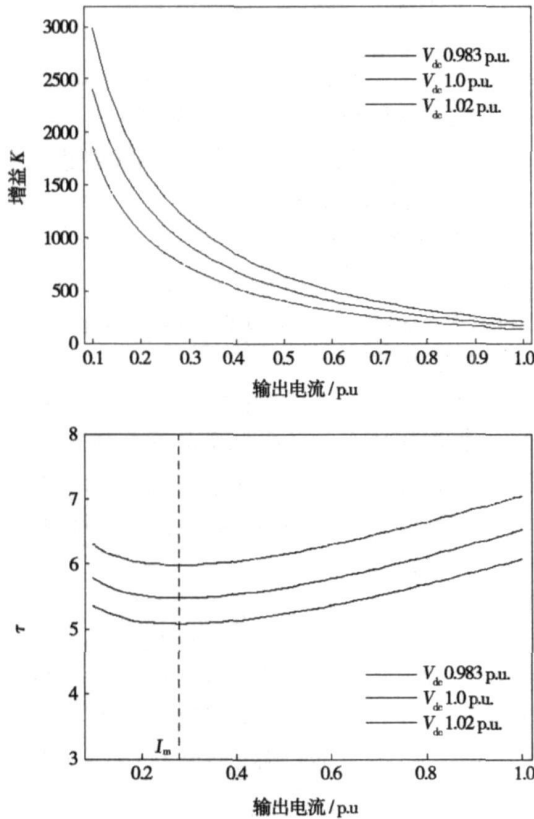


图 5 K 与 τ 随输出电流 I 的变化曲线

大使得 $G_p(s)$ 的相角裕度从 14.5° 减小到 3.88° , 这说明负荷越低,系统的稳定性越差。

4.2.2 反馈控制器 $G_c(s)$ 的设计

考虑到 PI 控制器简单、实用的特点,这里采用 PI 控制器作为反馈控制器。由于在低负荷时 SOFC 系统的稳定性最差,因此 PI 控制器基于低负荷下的 $G_p(s)$ 进行设计,以保证校正后的系统在各种负荷下都有足够的稳定性裕度。

取 $G_c(s) = k_p + k_i/s$, ω, ω' 分别为校正前后的开环交接频率。设 $G_p(\omega') = M_p e^{j\theta_p}$, 并取开环传函 $G_c G_p(\omega')$ 的相角裕度为 φ , 则有:

$$(k_p - jk_i/\omega'_c) M_p e^{j\theta_p} = e^{j(-180^\circ + \varphi)}$$

令此方程两端的实部与虚部都相等:

$$-k_p \omega'_c M_p \sin \theta_p + k_i M_p \cos \theta_p = \omega'_c \sin \varphi$$

$$k_p \omega'_c M_p \cos \theta_p + k_i M_p \sin \theta_p = -\omega'_c \cos \varphi$$

求解以上方程组,即可得到 PI 控制器的参数:

$$k_p = -\frac{\omega'_c \cos(\varphi - \theta_p)}{M_p}, k_i = \frac{\omega'_c \sin(\varphi - \theta_p)}{M_p} \quad (10)$$

5 仿真示例

示例采用了文献[2~3]提供的 100 kW SOFC 的试验数据,如表 1 所示。仿真基于图 1 的 SOFC 非线性模型进行,控制目标是使 SOFC 系统沿额定电压线(图 2 中的 1.0 p.u 线)运行。首先由图 2 可以判断此运行方式显然是可行的。

表 1 100 kW SOFC 系统模型参数^[2~3]

	数值
额定功率 P_{rate}/kW	100
额定电压 $V_{dc,rate}/V$	342.3
额定电流 I_{rate}/A	300
额定燃料利用率 u_{rate}	0.8
运行温度 T/K	1273
理想标准电势 E_0/V	1.18
单池数 N_0	384
模型常数 $K_f/mol \cdot (s \cdot A)^{-1}$	0.000995
氢气阀摩尔常数 $K_{H_2}/mol \cdot (s \cdot Pa)^{-1}$	8.35×10^{-6}
氧气阀摩尔常数 $K_{O_2}/mol \cdot (s \cdot Pa)^{-1}$	2.50×10^{-5}
水蒸气阀摩尔常数 $K_{H_2O}/mol \cdot (s \cdot Pa)^{-1}$	2.78×10^{-6}
氢气流时间常数 τ_{H_2}/s	26.1
氧气流时间常数 τ_{O_2}/s	2.91
水蒸气流时间常数 τ_{H_2O}/s	78.3
重整器时间常数 τ_f/s	5
欧姆损失 r/Ω	0.126
氢氧比 r_{H_2O}	1.145

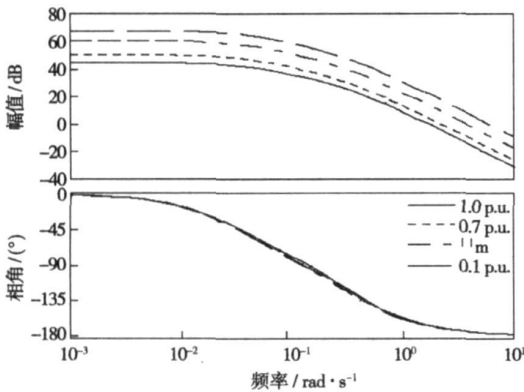


图 6 V_{dc} 为 1.0 p.u. 时,

不同输出电流下 $G_p(s)$ 的 Bode 图

了 V_{dc} 为 1.0 p.u., I 分别为 1.0 p.u., 0.7 p.u., I_m 和 0.1 p.u 时 $G_p(s)$ 的 Bode 图。从 Bode 图上可以看到,在输出电流从 1.0 p.u 减小到 0.1 p.u 的过程中, $G_p(s)$ 的相频曲线几乎不变。同时增益 K 的增

为验证控制方案在各种负荷下的有效性, 所采用的输出电流扰动信号覆盖了较宽的运行区域(最低负荷 0.3 p.u.), 如图 7(a) 所示。图 7(b) 和 (c) 分别给出了采用前馈-反馈控制与单一反馈控制的对比仿真结果。可以看到前馈-反馈策略将输出电压 V_{dc} 较好地控制在设定点, 燃料利用率 u 除了在低负荷的动态过程中有短时的尖峰超限外, 都在 0.7 ~ 0.9 的约束范围内。

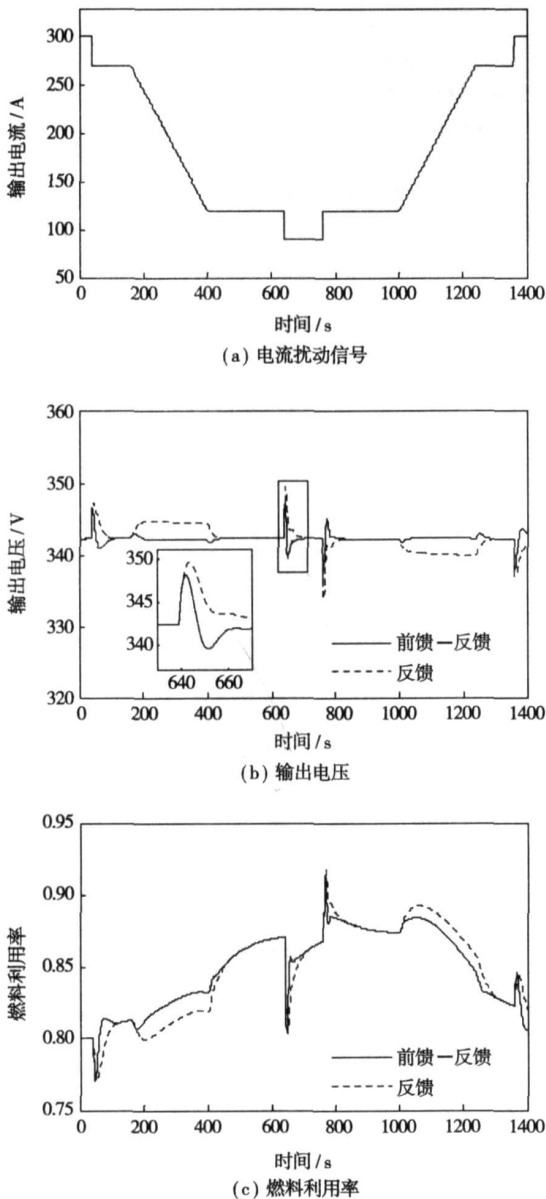


图 7 输出电流扰动下的控制系统仿真图

从仿真结果可以得出如下结论:

(1) 在电流阶跃扰动信号下, 前馈-反馈控制比单一的反馈控制具有更优的动态性能(更小的超调量和更短的调节时间);

(2) 在电流斜坡扰动信号下, 单纯的反馈控制存在静差。这是因为加入 PI 控制器后的控制系统为 I 型系统。前馈控制器的加入有助于减小静差;

(3) 尽管在负荷变化时 SOFC 系统具有一定的非线性特性, 但所给的控制方案在通常的负荷变化范围内能够满足控制系统设计的要求。

6 结 语

基于 SOFC 系统运行参数静态值间的关系, 对 SOFC 系统的定输出电压运行进行了分析, 并设计了一个前馈-反馈控制方案用以实现定输出电压运行。文中详细给出了前馈与反馈控制器的设计过程并对控制系统进行了仿真。仿真结果表明, 该控制方案比单纯的反馈控制具有更优的动静态性能。总之, 所给控制策略显示了较强的扰动抑制能力, 满足了实现 SOFC 定输出电压运行的需要。

参考文献:

- [1] 黄镇江. 燃料电池及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [2] PADULES J, AULT G W, MCDONALD J R. An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation[J]. Journal of Power Sources, 2003, 86: 495-500.
- [3] 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: 1-11.
- [4] LI Y H, CHOI S S, RAJAKARUNA S. An analysis of the control and operation of a solid oxide fuel cell power plant in an isolated system[J]. IEEE Trans Energy Conversion, 2005, 20(2): 381-387.
- [5] KANDEPU RAMBABU, IMSLAND LARS, FOSS BJARNE A, et al. Modeling and control of a SOFC-GT based autonomous power system[J]. Energy, 2006, 32(4): 406-417.
- [6] MUELLER FABIAN, BROUWER JACOB, JABBARI FARYAR et al. Dynamic simulation of an integrated solid oxide fuel cell system including current-based fuel flow control[J]. Journal of Fuel Cell Science and Technology, 2006, 3: 144-154.
- [7] JURADO FRANCISCO. Power supply quality improvement with a SOFC plant by neural-network based control[J]. Journal of Power Sources, 2003, 117: 75-83.
- [8] PUKRUSHPAN J T, STEFANOPOULOU A, PENG HUEL. Control of fuel cell breathing[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2004, 24: 30-46.
- [9] PUKRUSHPAN J T, STEFANOPOULOU A, PENG HUEL. Modeling and control for PEM fuel cell stack system // Proc Amer Control Conf [C]. Anchorage, American Automatic Control Council, 2002, 31: 17-3122.
- [10] SEBORG DALE E, EDGAR THOMAS F, MELICHAMP DUNCAN A. Process dynamics and control[M]. Second edition. John Wiley & Sons, Inc, 2004.
- [11] 《数学手册》编写组. 数学手册[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.

(编辑 柴舒)

than 500 °C, while the burner outer wall temperature will be around 150 °C and the heat loss from side walls of the burner, approximately 6%, thus significantly enhancing the flame stability of the burner. **Key words:** miniature burner, micro flame, heat loss, porous medium

黑液水煤浆燃烧试验研究= **Experimental Study of Black-liquor Coal Slurry Combustion**[刊, 汉]/LAN Ze-quan (College of Safety Engineering, North China Institute of Science and Technology, Yanjiao, Post Code: 065201), CAO Xinyu, LIU Jian-zhong, CHENG Jun (National Key Laboratory on Clean Utilization of Energy Source, Zhejiang University, Hangzhou, Post Code: 310027)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2008, 23(1). —92~96

To investigate the feasibility and potential problems of the industrial application of the black-liquor coal slurry, a contrast study was conducted of the ignition, combustion, pollutant emissions and ash deposition characteristics of black-liquor slurry, raw coal for slurry preparation and normal slurry through the combustion tests on three different scales, i. e. thermobalance mechanism tests, 0.25 MW test furnace and 4 t/h industrial furnace. The results of the study show that when compared with raw coal, the black-liquor slurry has the following specific features due to the catalytic and combustion-promoting function of sodium: easy ignition, stable combustion, short combustion duration, a high burnout rate and low emissions of such pollutants as SO₂, NO_x and dust etc. As a result, the slurry in question is considered as a new type of clean fuel. On this basis, the authors have concluded that it is absolutely feasible to use the coal water slurry technology to dispose of and harness the papermaking black liquor. The industrial application of the black liquor slurry is associated with such potential problems as a relatively strong tendency for ash deposition and slag formation in furnaces. **Key words:** black liquid coal slurry, thermogravimetric analysis, combustion characteristics, industrial test

固体氧化物燃料电池输出电压前馈—反馈控制= **A Feedforward-feedback Control Over the Output Voltage of a Solid Oxide Fuel Cell**[刊, 汉]/KANG Ying-wei, CAO Guang-yi, TU Heng-yong, et al (Fuel Cell Research Institute, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, Post Code: 200240)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2008, 23(1). —97~101

Based on the relationship among the static values of SOFC (solid oxide fuel cell) operational parameters, the operation of a SOFC at a constant output voltage was analyzed. The authors have noted that SOFC operation at a constant output voltage requires the fuel utilization rate to meet a definite restraint apart from keeping the output voltage constant. Furthermore, an output voltage controller was designed by adopting the feedforward-feedback control tactics, among which the feedforward controller was designed based on the relationship among the static values of SOFC operational parameters. In this process the key issue was the solution of a cubic equation by making use of Cardano's Formula. As a PI controller, the feedback controller was designed by adopting a frequency-response method after the linearization of the SOFC model. The simulation results show that the feedforward-feedback control presented by the authors boasts a better dynamic performance than the single feedback control, and can fully meet the requirement for an operation at a constant output voltage when the load changes are within its normal range. **Key words:** solid oxide fuel cell (SOFC), automatic control technology, output voltage control, feedforward-feedback control tactics