

Application of Cascade Control in Solid Oxide Fuel Cell Thermal Management System*

Yuxun Cai¹, Dezhi Zhu², Xiang Li³, Teng Ma¹, Zhonghua Deng¹, Xi Li¹

¹Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan

²Hebei Iron and Steel Group, Handan

³Guangdong Electric Power Design Institute, Guangzhou

Email: cyx861013@163.com

Received: Jul. 30th, 2011; revised Sep. 2nd, 2011; accepted Sep. 4th, 2011.

Abstract: Solid Oxide Fuel Cell is known as the most promising power generation technologies in the 21st century because of its high efficiency and zero pollution. For the multi-level thermal capacity lag and the strong interference of SOFC thermal management system, an effective control method (cascade control) is presented to solve it in this paper. The method is a good solution to the problems such as slow response and too long regulation time caused by the multi-level thermal capacity lag, and it also can effectively inhibit the interference caused by the load fluctuation. The simulation results illustrate the effectiveness of the control method.

Keywords: Solid Oxide Fuel Cell; Thermal Management System; Multi-Level Thermal Capacity; Cascade Control

SOFC 热管理系统中的串级控制应用*

蔡于勋¹, 祝得治², 李想³, 马腾¹, 邓忠华¹, 李曦¹

¹华中科技大学控制科学与工程系, 武汉

²河北钢铁集团邯钢连铸连轧厂, 邯郸

³广东省电力设计研究院, 广州

Email: cyx861013@163.com

收稿日期: 2011 年 7 月 30 日; 修回日期: 2011 年 9 月 2 日; 录用日期: 2011 年 9 月 4 日

摘要: 固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)因其高效率、零污染而被誉为 21 世纪最有潜力的发电技术之一。本文针对 SOFC 热管理系统的多级热容积大滞后和强干扰等特点, 运用一种有效的控制方法——串级控制来对 SOFC 进行闭环控制。该控制方法能很好的解决多级热容积这一滞后动态过程带来的响应慢、调节时间过长等控制难题, 并能有效抑制负载变化引起的干扰。最后通过仿真结果说明该控制方法的有效性。

关键词: 固体氧化物燃料电池; 热管理系统; 多级热容积; 串级控制

1. 引言

SOFC 具有高效率、零污染、无噪音等特点, 它可为民用、商业、军事和交通运输等提供高质量的的新能源。这一技术的成功应用对于缓解能源危机、保护生态环境和国家安全都具有重大的意义^[1-4]。

SOFC 热管理系统是为电堆发电反应的氢气和氧气加热, 并维持电堆工作温度稳定。该系统主要由燃烧室、重整器、热交换器、热平衡器和传输管道等多个热容积组成, 其有效管理是实现 SOFC 系统安全、稳定、高效运行和快速负载跟踪的根本保障。在对于 SOFC 热管理的研究中, 张兄文等人基于模型控制策略, 通过调节电流密度、燃料和空气的摩尔流量来控

*基金项目: 国家“863”项目(2006AA05Z148)。

制 SOFC 的输出功率、燃料利用率和电堆温度。该项研究仅以 SOFC 电堆为研究对象，并且对电堆温度的控制是在假设电堆入口气体温度恒定的条件下完成的^[5]。王礼进和张会生等人从系统、节能、提高发电效率的角度出发，在仿真模拟的环境下，利用电堆尾气的热量对电堆反应气体进行初步预热，并通过调节电堆入口空气流量带走电堆电化学反应产生的热量，从而控制电堆温度^[6,7]。以上热管理思路是通过调节温度较低的空气流量带走电堆热量，以达到电堆工作温度的有效控制,但并没指出在电堆负载跟踪时需要控制电堆入口氢气和空气的温差。事实上当其温差过大时，相应的热应力也很大，会导致电池片变形，损坏电堆密封性。而美国国家燃料电池研究中心 F.muller 等人通过在空气供气系统中引入一路流量可调的冷空气管道，用于调节空气电堆入口温度，进而控制电堆出入口温差，并集成了相应的外围供气系统验证了其可行性^[8]。但通过调节旁路冷空气流量，只能满足预热后进入电堆的空气温度高于需求温度的情况，如果预热

后空气温度低于需求温度，则无法调节。另外，在以上供气系统中，对于氢气一路没有进行预热处理，而是直接从重整器输入电堆，这将导致电池片阴、阳极两侧温差不可控，存在电池片破裂的危险。

在深入分析国内外 SOFC 热管理系统利弊的基础上，本文以有效控制电堆工作温度为目标，考虑电管理过程对电堆工作温度的影响，在控制系统工艺和控制策略上进行改进。

2. SOFC 热管理系统

SOFC 热管理系统工艺结构如图 1 所示，其中燃料重整器和热交换器同置于燃烧室中。由图 1 知，该系统是一个典型的多输入、多输出、非线性、强耦合、多容积大滞后复杂系统，故需要功能强大的硬件平台和先进的控制策略来对其进行控制，使 SOFC 系统输出电能实时动态跟踪负载，并给电堆提供一个安全、可靠的工作环境，特别是有效控制电堆工作温度稳定^[9]。

如果采用单回路闭环控制结构进行温度控制，其控制结构如图 2 所示。

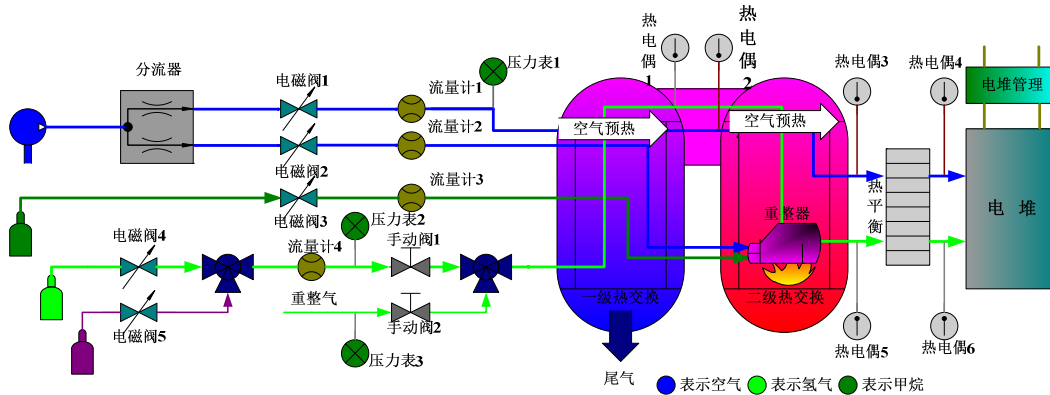


Figure 1. SOFC thermal management system components
图 1. SOFC 热管理系统组成

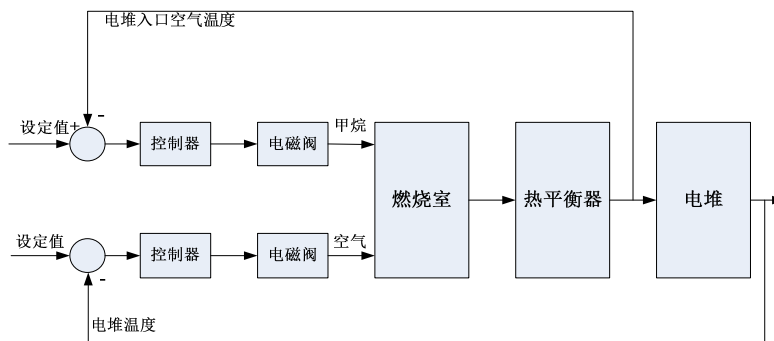


Figure 2. Single-loop control
图 2. 单回路控制

考虑到负载跟踪对于重整器的干扰作用。由于重整器的重整反应是吸热反应,会导致燃烧室温度下降,这要相继通过热交换器、传输管道、热平衡器等多个热容积后才使电堆入口温度下降,接着电池阀才开始加大甲烷流量使燃烧室温度升高。从干扰开始到电池阀动作的这一段时间里,重整器温度下降已使电堆入口温度出现一定偏差。同样,从加大电池阀开度、燃烧室温度升高到电堆入口温度升高,也要经过一段较长的时间,因此有可能导致入口气体温度超调。故单回路控制很难使得系统取得好的控制品质。假如采用串级控制的思想,将燃烧室温度测出并直接反馈给控制器,则能提早对干扰行为采取相应的动作,缩短时滞过程,提高控制品质。由此,将燃烧室温度检测反馈作为副回路,而将电堆入口温度和电堆温度作为外环构成主回路,形成双环串级控制结构。此时,只要有重整器干扰,即可检测到燃烧室温度变化,并及时反馈给控制器,从而提高了系统响应速度,减少调节时间。故串级控制从原理上可解决系统多容积滞后问题。

因此,本文采用串级控制而非单回路控制来控制 SOFC 热管理系统。

3. SOFC 热管理系统串级控制模型的建立

串级控制系统是两只调节器串联起来工作,其中一个调节器的输出作为另外一个调节器给定值的系统。前一个调节器称为主调节器,具有“细调”的作用,它所检测和控制的变量称主变量(主被控参数),即工艺控制指标。后一个调节器称为副调节器,具有“粗调”的作用,它所检测和控制的变量称副变量(副被控参数),是为了稳定主变量而引入的辅助变量。因此,整个系统包括两个回路,主回路和副回路。主回路是定值控制,其设计与单回路控制系统的设计类似,设计过程可以按照简单控制系统设计原则进行。副回路是随动系统,对包含在其中的二次扰动具有很强的抑制能力和自适应能力。串级控制系统方框图如图 3 所示^[10]。

其等效方框图如图 4 所示。

对于图 3 所示的串级控制系统,在给定信号 $X_1(s)$ 作用下的传递函数^[10]为:

$$\frac{Y_1(s)}{X_1(s)} = \frac{W_1(s)W_2(s)W_{02} \cdot W_{01}(s)}{1 + W_1(s)W_2(s)W_{02} \cdot W_{01}(s)W_{m1}(s)} \quad (3-1)$$

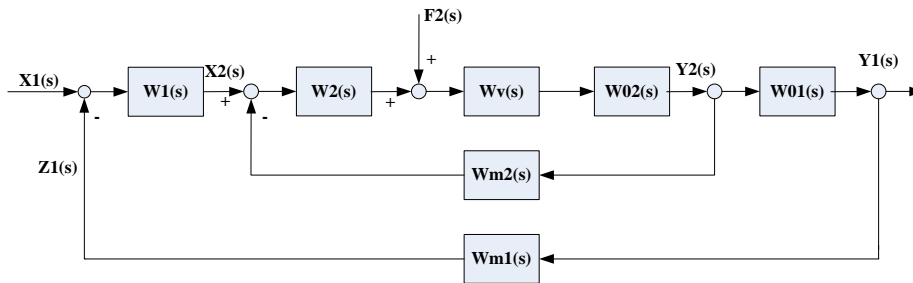


Figure 3. Cascade control system block diagram
图 3. 串级控制系统方框图

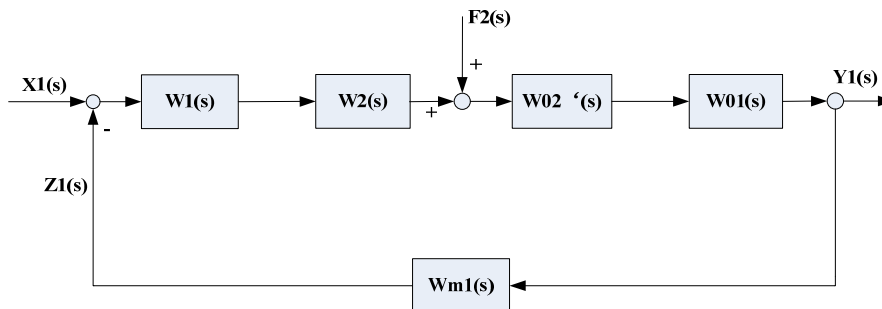


Figure 4. Equivalent block diagram of a cascade control system
图 4. 串级控制系统等效方框图

在干扰作用下的传递函数为:

$$\frac{Y_1(s)}{F_2(s)} = \frac{W_{o2}W_{o1}(s)}{1+W_1(s)W_2(s)W_{o2}W_{o1}(s)W_{m2}(s)} \quad (3-2)$$

对于一个控制系统来说, 当它在给定信号作用下, 其输出量能实时复现输入量的变化, 即 $\frac{Y_1(s)}{X_1(s)}$ 越接近于“1”, 则系统的控制性能越好。当它在干扰作用下, 其控制作用能迅速克服干扰的影响, 即 $\frac{Y_1(s)}{F_2(s)}$ 越接近于“0”, 则系统的控制性能越好, 系统抗干扰能力就越强。对于图 3 所示的串级控制系统, 其抗干扰能力可用下式表示^[10]:

$$\frac{Y_1(s)/X_{1(s)}}{Y_1(s)/F_2(s)} = W_1(s)W_2(s) \quad (3-3)$$

若串级控制系统中的主、副调节器均采用纯比例作用, 其比例放大系数分别为 K_1 、 K_2 , 则式 3-3 可写成

$$\frac{Y_1(s)/X_{1(s)}}{Y_1(s)/F_2(s)} = K_1K_2 \quad (3-4)$$

式 3-4 表明, 串级控制系统中主、副调节器的放大系数乘积越大, 则串级控制系统抗干扰能力就越强, 因此主参数的控制质量就越高^[11]。

由于二次扰动通过主、副回路的调节后对主被控量的影响很小, 故在选择副回路时应尽可能把被控过程中变化剧烈、频繁、幅度大的主要扰动包括在副回路中。因此, 在串级控制结构模式下可将重整器的干扰包含在二次扰动中, 副回路能对其快速有效地抑制^[12]。

由于 SOFC 热管理系统有两个操纵量, 为燃烧室入口甲烷流量和空气流量, 而被操纵量有四个, 分别为重整器反应温度、电堆入口空气温度和电堆入口氢气温度以及电堆温度。通过实验研究发现, 重整器的重整效率在 800℃~850℃时基本稳定(氢气是由甲烷重整反应得来)。故可将重整器温度作为在一定范围变化的约束条件给出, 即可减少一个被控变量。另外, 电堆入口空气流量远远大于氢气流量, 故在经过热平衡器时, 只要换热面积足够大, 则两者就能在短时间内消除温差, 达到温度平衡, 且平衡温度由空气温度决定。因此, 系统结构简化为两输入两输出, 串级控制结构如图 5 所示。

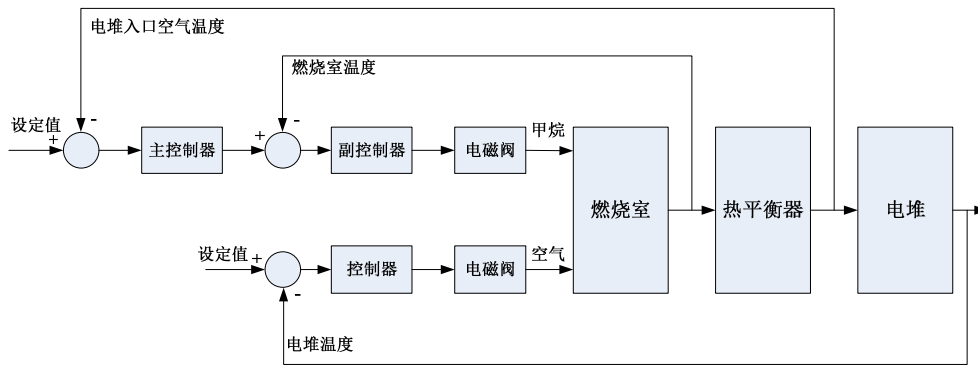


Figure 5. SOFC thermal management system cascade control structure
图 5. SOFC 热管理系统串级控制结构

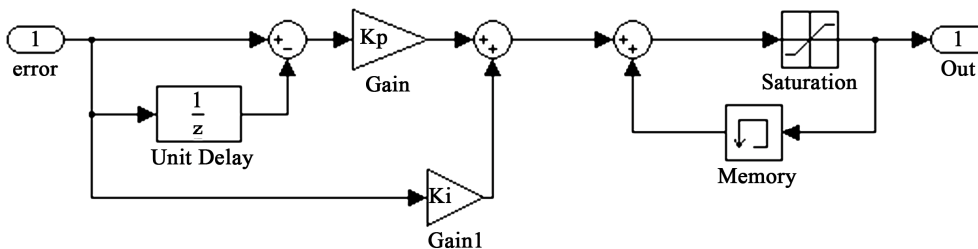


Figure 6. PI controller design
图 6. PI 控制器设计

在图 5 中，电堆入口空气的温度由内外两个控制环构成：在外环中，主控制器根据设定值与电堆入口空气温度的差值，采用 PI 控制算法对电堆入口空气温度进行控制，其输出成为了副控制器的给定值；在内环中，副控制器接受主控制器的输出把它当成设定值，并选择一个时延较小的副参数，使等效过程的时间常数减小，以提高系统的工作频率，加快反应速度，其采用 PI 控制算法使燃烧器的温度跟随主控制器的输出。

PI 控制是比例积分控制。P 具有比例调节作用，一旦系统出现偏差，它就立即产生调节作用以减少偏差。I 具有积分调节作用，它可使系统消除稳态误差，提高误差度。

PI 控制算法分为位置式和增量式两种，在本文中由于采用电磁阀来控制气流量，因此，位置式对应阀门的开度，增量式对应阀门开度的变化。为了防止控制器故障引起的控制量大幅变化，从而导致电磁阀的开度大幅变化，造成电磁阀损坏，同时也基于减小电磁阀动作误差的需要，在这里采用数字增量型 PI 控制算法，使控制器在上一采样周期阀门开度的基础上，根据误差控制本次采样周期阀门开度的变化，其算法如公式 3-5 所示：

$$\Delta U(k) = K_p * (e(k) - e(k-1)) + K_i * e(k) \quad (3-5)$$

Simulink 下的增量型 PI 控制的设计如图 6 所示 [13]。

在这种控制结构中，如果空气的流量突然增大，

首先将使燃烧室温度降低，同时由于传输管道和热平衡器等迟滞容积的存在，电堆入口空气的温度不会立即降低，所以主控制器的输出也即副控制器的给定值也不会立即变化，此时整个控制系统就相当于以燃烧器温度为被控对象的单环 PI 控制系统，副控制器会立即检测到燃烧器温度的降低，及时加大甲烷流量来抑制这个扰动。这样，控制系统就同时缩短了检测通道和控制通道，能够很好的抑制空气流量变化带来的扰动，同时缩短调节时间，并减小超调量。

4. 系统热管理仿真

Simulink 是 Matlab 软件的扩展，它能实现动态系统建模和仿真。由于 Simulink 提供了一些功能分类的基本系统模块，用户只需知道这些模块的输入输出及其功能，就可通过调用这些基本模块，并把它们连接起来构成所需要的系统模型进行仿真和分析 [13]。

本文采用 Simulink 对单回路控制和串级控制进行仿真比较，以验证串级控制方法在 SOFC 热管理系统上的有效性。

电堆正常的工作温度为 720℃，电堆入口空气温度在系统正常工作时应保持在 750℃。为了验证 SOFC 热管理系统在串级控制下其调节时间和抗干扰能力是否优于单回路控制，假设在 Simulink 仿真控制模型中的第 8000 个采样周期，由于负载电流突然增大使电堆的工作温度陡升了 50℃，Simulink 下系统的单回路控制结构图如图 7 所示，仿真结果如图 8 和图 9 所示。

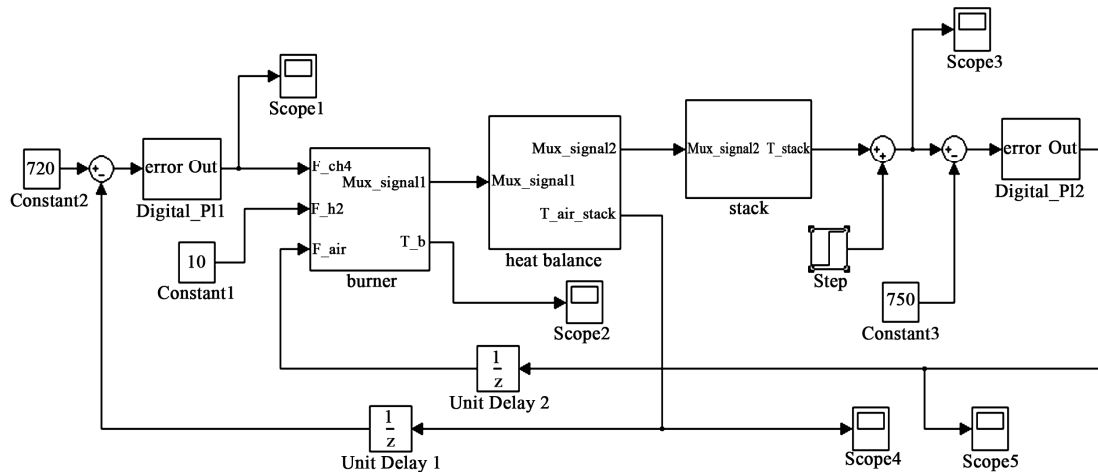


Figure 7. Single-loop control
图 7. 单回路控制

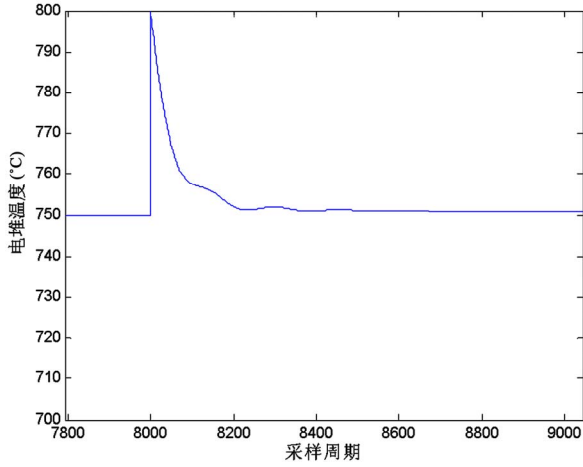


Figure 8. Single-loop control stack temperature
图 8. 单回路控制电堆温度

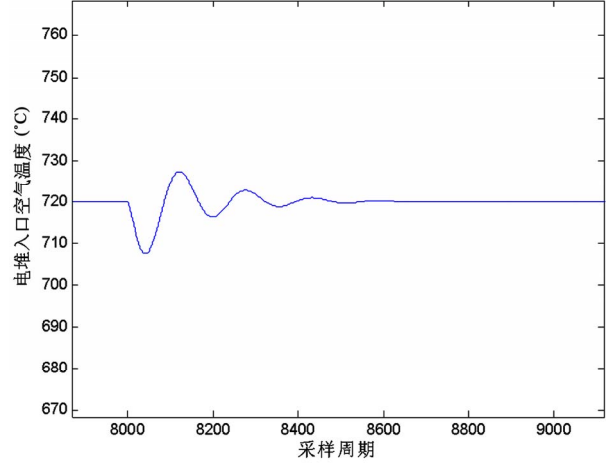


Figure 9. Single-loop control stack inlet air temperature
图 9. 单回路控制电堆入口空气温度

系统串级控制结构如图 10 所示，仿真结果如图 11 和图 12 所示。

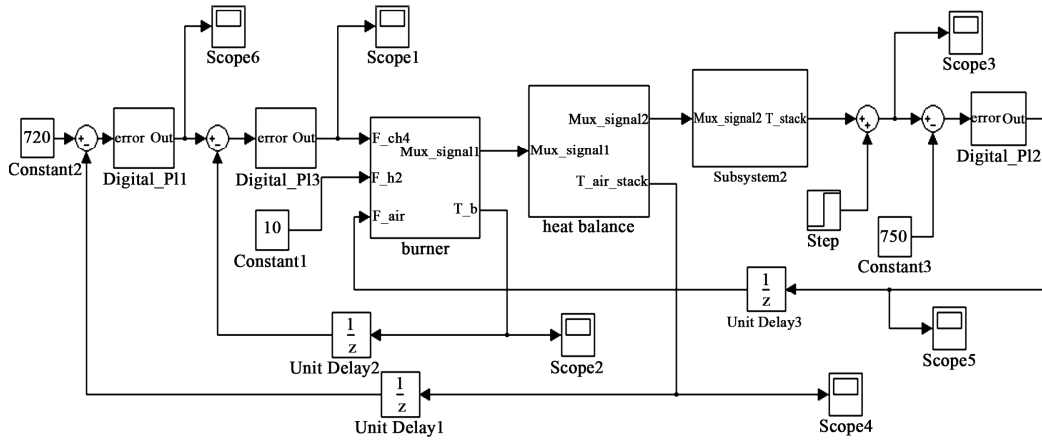


Figure 10. Cascade control
图 10. 串级控制

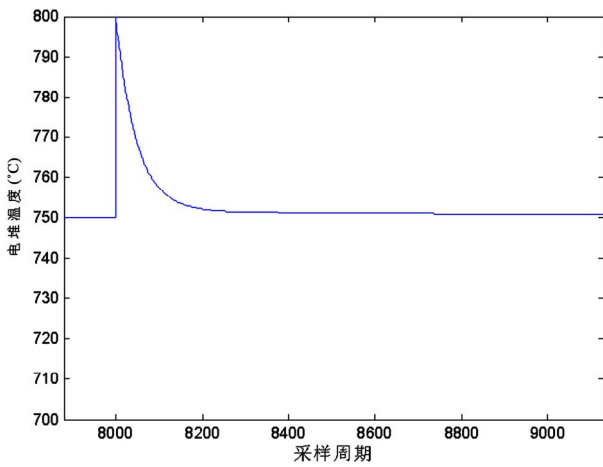


Figure 11. cascade control stack temperature
图 11. 串级控制电堆温度

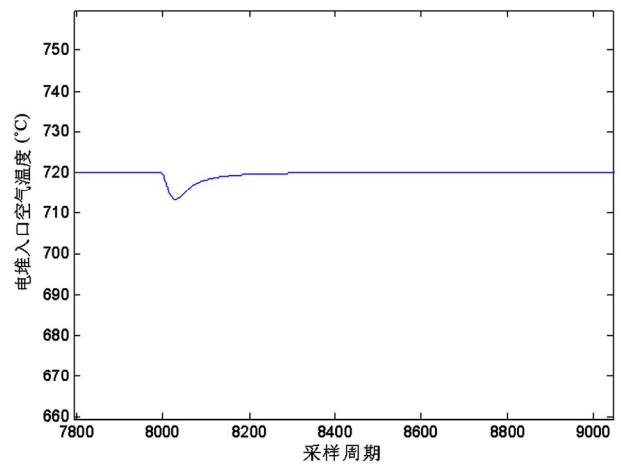


Figure 12. Cascade control stack inlet air temperature
图 12. 串级控制电堆入口空气温度

Table 1. Cascade control stack inlet air temperature
表 1. 串级控制电堆入口空气温度

| T 表示采样周期 | | 调节时间 | 超调量 |
|----------|--------|-------|-------|
| 单回路控制 | 电堆温度 | 400 T | |
| | 入口空气温度 | 630 T | 1.43% |
| 串级控制 | 电堆温度 | 220 T | |
| | 入口空气温度 | 200 T | 0 |

仿真结果如表 1 示。

由表 1 表明, 当负载电流突然增大时, 若采用单回路控制, 则电堆温度和入口空气温度的调节时间分别为 400 T 和 630 T, 入口空气温度的超调量为 1.43%。而采用串级控制时, 电堆温度和入口空气温度的调节时间分别为 220 T 和 200 T, 且无超调量, 曲线特性明显优于单回路控制。因此, 当过程的容量滞后和干扰较大时, 若采用单回路控制, 则系统的过渡过程时间长、超调量大, 控制质量不理想。而采用串级控制时, 可选择一个时延较小的副参数, 构成一个副回路, 使等效过程的时间常数减小, 以提高系统的工作频率, 加快反应速度, 且副回路对于进入其中的干扰具有较强的校正能力, 故能得到较好的控制质量。故对于纯时延时延较大和负载电流频繁发生波动的情况下, 串级控制能实现对电堆温度和电堆入口空气温度的有效控制, 并提高响应速度和克服其多容积大滞后的缺点, 同时有效地提高能源利用率。

5. 结论

本文对于 SOFC 系统的热管理问题提供了一种可

选择的方法, 即串级控制方法。仿真结果表明, 串级控制相比于单回路控制, 即提高了系统的抗干扰能力, 又缩短了调节时间, 克服了其多容积大滞后问题, 而且控制曲线平滑稳定。因此, 本文提出的串级控制方法及模型对于 SOFC 的热管理是有效的。

参考文献 (References)

- [1] 姚思童, 司秀丽, 杨军等. 燃料电池的工作原理及其发展现状[J]. 沈阳工业大学学报, 1998, 35(1): 42-45.
- [2] 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): 683-689.
- [3] 魏增福, 郑金. 燃料电池发电的研究现状与应用前景[J]. 广东电力, 2009, 22(12): 1-6.
- [4] 黎永祥, 姚丹丹. 新型化学电源 - 燃料电池[J]. 湖南工业职业技术学院学报, 2006, 6(4): 31-35.
- [5] X. W. Zhang, S. H. Chan, H. K. Ho, J. Li, G. Li and Z. Feng. Nonlinear model predictive control based on the moving horizon state estimation for the solid fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(9): 2355-2366.
- [6] 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, 2008, 28(20): 94-98.
- [7] H. Zhang, L. Wang, S. Weng and M. Su. Performance research on the compact heat exchange reformer used for high temperature fuel cell systems. *Journal of Power Sources* 2008, 183(1): 282-294.
- [8] F. Mueller. The dynamics and control of integrated solid oxide fuel cell systems: Transient load following and disturbance rejection. Irvine: University of California, 2008.
- [9] 詹姆斯·拉米尼, 安德鲁·迪克斯. 燃料电池系统 - 原理、设计、应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 217-219.
- [10] 邵裕森. 过程控制及仪表[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003: 196-216.
- [11] 方康玲. 过程控制系统[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2007: 9-10.
- [12] 邵惠鹤. 工业过程高级控制[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1997: 2-3.
- [13] 陈永春. 从 Matlab/Simulink 模型到代码实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 25-30.