

PEM燃料电池空气供给系统氧匮乏的模型预测控制*

于树友¹, 陈虹¹, 张东波², 郭洪艳¹

1. 吉林大学控制科学与工程系, 长春 130025

E-mail: yushuyou@126.com

2. 中国第一汽车集团公司技术中心, 长春 130011

E-mail: beiziyuxiang@163.com

摘 要: 质子交换膜(PEM)燃料电池因其高效、低污染、良好的环境友好性及紧凑的物理结构被认为是最有前途的车载动力源之一。阴极侧氧气的供给是影响PEM燃料电池输出功率和使用寿命的重要因素。当电池负载增加时, 其输出电流也将发生变化, 此时电堆内部化学反应进程加速, 反应气体质量减少, 如果不及时加以控制, 就会导致空气供给系统氧匮乏问题的产生。基于Pukrushpan建立的反应气体流率模型, 本文讨论了PEM燃料电池空气供给系统氧匮乏的模型预测控制。设计的控制系统在负载电流需求发生变化时, 可以通过调节进气歧管压力, 改变阴极入口氧气流量, 使燃料电池系统效率保持在期望值附近, 同时保证满足系统的约束。

关键词: 质子交换膜(PEM)燃料电池, 模型预测控制, 空气供给系统, 氧匮乏

Model Predictive Control for Oxygen Starvation in Air Supply System of PEM Fuel Cell

Yu Shuyou¹, Chen Hong¹, Zhang Dongbo², Guo Hongyan¹

1. Dept. Control Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, P. R. China

E-mail: yushuyou@126.com

2. Research and Development Center, FAW, Changchun 130011, P. R. China

E-mail: beiziyuxiang@163.com

Abstract: Proton exchange membrane (PEM) fuel cell stack is considered as promising vehicle power source because of its outstanding performance and compact structure. The supply of oxygen to the cathode is one of the key factors in operation of a fuel cell stack. When current is drawn from a fuel cell, the air supply system should replace the reacted oxygen. Otherwise the cathode will suffer from oxygen starvation which damages the stack and limits the power response of the fuel cell. A model predictive control is designed to regulate the excess oxygen ratio in the cathode during step changes in fuel cell current demand. Simulation results indicate that the design system can improve the dynamic performance and gain well control effect as well as satisfying the constraints.

Key Words: PEM fuel cell, Model predictive control, Air supply system, Oxygen starvation

1 引言(Introduction)

质子交换膜(PEM)燃料电池具有可在室温条件下运行, 启动迅速; 能量转化效率高, 效率随输出变化的特性好; 无污染; 构造简单, 便于维护保养; 燃料补充方便, 可再生; 环境适应性强等优点^[1]。PEM燃料电池可用作便携电源、小型移动电源、备用电源、不间断电源, 以满足野外供电、应急供电以及高可靠性、高稳定性供电的需要。从目前发展情况看, PEM燃料电池是技术最成熟的电动车动力源, PEM燃料电池电动车被业内公认为是电动车的未来发展方向。

独立的燃料电池堆是不能应用于汽车的, 它必须和氢气供给和循环系统、空气供给系统、水/热管理系统和控制系统组成燃料电池系统, 才能对外输出功率^[2]。目前, 国内外对PEM燃料电池的研究还主要集中在基础研究上(尤其是基础功能材料)^[3,4], 对控

制方面的研究很少, 并且仅仅局限在物料传递与传质、水/热平衡模型分析和建模^[5], 而要保证电池的最佳性能, 就必须在系统的运行环节对反应气体参数、电池中的水含量、电池温度等参数随负载和工作条件变化进行实时控制。

在维持合适的温度和湿度条件下, 燃料电池功率的产生就依赖于阴极侧氧气和阳极侧氢气的连续供给。当电池驱动的负载发生变化时, 其输出电流也将发生变化, 电堆内部化学反应进程加速, 反应气体质量减少, 如果不及时加以控制, 就会导致空气供给系统氧匮乏问题的产生^[6]。所以根据负载电流的变化对通入空气的压力和流量进行控制, 并快速响应, 能够大大提高燃料电池的净效率, 具有十分重要的意义。Pukrushpan^[6,7]建立了反应气体流率模型, 并将其线性化, 利用前馈和反馈控制方法实施控制策略, 获得了比较满意的效果, 但其缺点是没有考虑系统约束; Sun和Kolmanovsky^[8]提出一种可以处理约束的鲁棒参考管理方法, 但它是以增加系统的保守性为代价的, Gilbert和Kolmanovsky^[9]提出的快速参考管理方法也存在同样的问题。

*此项工作得到国家杰出青年科学基金项目(编号60725311), 教育部新世纪优秀人才支持计划(2004)资助。 论文第一作者受国家留学基金委“国家建设高水平大学公派研究生项目”资助作为联合培养博士研究生目前在德国斯图加特大学系统理论与自动控制研究所学习。

本文采用准无限时域模型预测控制方法^[10]解决PEM燃料电池空气供给系统的氧匮乏问题。首先简要介绍了Pukrushpan建立的PEM燃料电池系统反应气体流率模型,将燃料电池空气供给系统氧匮乏问题归结为约束最优化问题;然后采用准无限时域模型预测控制设计控制器。仿真结果表明设计的系统可以在满足约束的条件下提高系统的性能,并且在负载条件变化时使燃料电池系统效率保持在期望值附近。

2 燃料电池反应气体流率模型及氧匮乏控制问题 (Airflow model and oxygen starvation control problem of PEM fuel cell)

2.1 PEM燃料电池反应气体流率模型(Airflow model of PEM fuel cell)

我们关注PEM燃料电池反应压力和流率的动态行为,忽略与温度调节和散热相关的慢动态行为;假定平均的堆温度对建模、分析和控制器设计都易于调节,阴极和阳极的入口反应气流能够可靠并迅速加湿。同时假设燃料电池各部分的相对湿度在系统运行过程中保持不变,并且不考虑压缩机动态和进气歧管动态。

本文中我们采用Pukrushpan建立的反应气体流率模型,包括以下几部分:阴极气流模型、阳极气流模型、膜水合模型、出气歧管模型以及氢气流模型。系统模型参数和详细的模型描述见^[6, 7]。

阴极气流模型表征了燃料电池电堆阴极空气流的流量动态,根据质量守恒定律和理想气体法则,可以得到阴极侧气体的流量动态方程:

$$\frac{dm_{O_2}}{dt} = W_{O_2,in} - W_{O_2,out} - W_{O_2,rct} \quad (1)$$

$$\frac{dm_{N_2}}{dt} = W_{N_2,in} - W_{N_2,out} \quad (2)$$

$$\frac{dm_{w,ca}}{dt} = W_{v,ca,in} - W_{v,ca,out} + W_{v,gen} + W_{v,mbr} \quad (3)$$

阴极入口气体的流量由热力学性质求出:

$$W_{O_2,in} = y_{O_2} \frac{1}{1 + \Omega_{atm}} W_{sm,out} \quad (4)$$

$$W_{N_2,in} = y_{N_2} \frac{1}{1 + \Omega_{atm}} W_{sm,out} \quad (5)$$

$$W_{v,ca,in} = \frac{\Omega_{ca,in}}{1 + \Omega_{atm}} W_{sm,out} \quad (6)$$

进气歧管出口流量 $W_{sm,out}$ 与进气歧管压力 p_{sm} 、阴极压力 p_{ca} 相关,由线性喷嘴方程求出:

$$W_{sm,out} = k_{sm,out} (p_{sm} - p_{ca}) \quad (7)$$

y_{O_2} , y_{N_2} 为干燥大气条件下氧气、氮气的质量分数为, Ω_{atm} , $\Omega_{ca,in}$ 为标准大气压的湿度率、阴极入口的湿度率, $k_{sm,out}$ 为进气歧管出口常数。

阴极出口气体的流量由热力学性质求出:

$$W_{O_2,out} = \frac{m_{O_2}}{m_{w,ca}} W_{ca,out} \quad (8)$$

$$W_{N_2,out} = \frac{m_{N_2}}{m_{w,ca}} W_{ca,out} \quad (9)$$

$$W_{v,ca,out} = \frac{p_{v,ca} V_{ca} M_v}{RT_{st} m_{w,ca}} W_{ca,out} \quad (10)$$

阴极出口流量 $W_{ca,out}$ 与阴极压力 p_{ca} 、出气歧管压力 p_{rm} 相关,也由线性喷嘴方程求出:

$$W_{ca,out} = k_{ca,out} (p_{ca} - p_{rm}) \quad (11)$$

m_{O_2} 、 m_{N_2} 、 $m_{w,ca}$ 分别表示阴极中氧气、氮气和水蒸汽的质量, M_{O_2} 、 M_{N_2} 、 M_a 、 M_{H_2} 和 M_v 分别表示氧气、氮气、空气、氢气和水的摩尔质量, 阴极气体总质量 m_{ca} 由下式计算:

$$m_{ca} = m_{O_2} + m_{N_2} + \frac{p_{v,ca} M_v}{RT_{st}} \quad (12)$$

式(11)(12)中, $p_{v,ca}$ 为阴极水蒸汽压力, $k_{ca,out}$ 为阴极出口常数, R 为普适气体常数; V_{ca} 为电堆阴极体积; T_{st} 为电堆温度。

氧气反应流量 $W_{O_2,rct}$ 和生成水流量 $W_{v,gen}$ 根据电化学原理得出:

$$W_{O_2,rct} = M_{O_2} \frac{nI_{st}}{4F} \quad (13)$$

$$W_{v,gen} = M_v \frac{nI_{st}}{4F} \quad (14)$$

其中, I_{st} 为负载电流; n 为电堆中燃料电池单体的数目; F 为法拉第常数。膜中水传输的流量 $W_{v,mbr}$ 将在膜水合模型中给出。

阳极气流模型表征了燃料电池电堆氢气流的流量动态。同样根据质量守恒定律和理想气体法则,可以得到阳极侧气体的流量动态方程:

$$\frac{dm_{H_2}}{dt} = W_{H_2,in} - W_{H_2,purge} - W_{H_2,rct} \quad (15)$$

$$\frac{dm_{w,an}}{dt} = W_{v,an,in} - W_{v,purge} - W_{v,mbr} \quad (16)$$

阳极入口氢气和水蒸汽的流量由热力学性质求出:

$$W_{H_2,in} = \frac{1}{1 + \Omega_{an,in}} W_{an,in} \quad (17)$$

$$W_{v,an,in} = \frac{\Omega_{an,in}}{1 + \Omega_{an,in}} W_{an,in} \quad (18)$$

$\Omega_{an,in}$ 为阳极入口湿度率。假设阳极排水流量 $W_{v,purge} = 0$; 同时假定阳极的氢气完全参与反应,即排出的氢气流量 $W_{H_2,purge} = 0$ 。阳极入口气体流量 $W_{an,in}$ 将在氢气流模型中给出。

氢气反应流量 $W_{H_2,rct}$ 根据电化原理得出:

$$W_{H_2,rct} = M_{H_2} \frac{nI_{st}}{2F} \quad (19)$$

膜水合模型中水传输的流量取决于三个过程：质子传输引起的水迁移，阴阳极压差引起的水的压力迁移，以及膜的阴阳极水浓度不同而引起的水的回扩散。

利用质量守恒定律和膜的性质求出膜中水传输的流量方程为：

$$W_{v,mbr} = M_v A_{fc} n(n_d \frac{i}{F} - D_w \frac{\phi_{ca} - \phi_{an}}{t_m}) \quad (20)$$

其中，电渗透系数 n_d 和扩散系数 D_w 随膜的水含量 μ_m 而变化，膜的水含量 μ_m 是阴极水含量 μ_{ca} 和阳极水含量 μ_{an} 的平均值， ϕ_{atm} 、 ϕ_{ca} 分别表示周围空气、阴极以及阴极入口期望的相对湿度， A_{fc} 为电池的有效面积； i 为电池的电流密度； t_m 为膜的厚度。

出气歧管模型是在恒温假设的前提下，由质量守恒定律和理想气体法则得出的：

$$\frac{dp_{rm}}{dt} = \frac{R_a T}{V_{rm}} (W_{ca,out} - W_{rm,out}) \quad (21)$$

其中，出气歧管出口流量 $W_{rm,out}$ 与出气歧管压力 p_{rm} 、回压阀开度 A_r 相关，由非线性喷嘴方程求出：

$$W_{rm,out} = \begin{cases} \frac{C_D A_r p_{rm}}{\sqrt{RT_{rm}}} (PR)^\gamma \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma-1} S \right\}^{\frac{1}{2}}, & PR > PR_{crit} \\ \frac{C_D A_r p_{rm}}{\sqrt{RT_{rm}}} \gamma^{\frac{1}{2}} \left\{ \frac{2}{\gamma+1} \right\}^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}, & PR \leq PR_{crit} \end{cases} \quad (22)$$

$PR = \frac{p_{atm}}{p_{rm}}$, $S = 1 - (PR)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$, 临界压降 PR_{crit} 定义为：

$$PR_{crit} = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (23)$$

式(22)(23)中， T_{rm} 表示出气歧管温度，根据假设条件，它与电池温度相同； p_{atm} 表示标准大气压； V_{rm} 为出气歧管体积； R_a 为空气的气体常数； C_D 为出气歧管卸流系数； γ 为指定的空气热度。由于电池阳极采用高压氢气罐供气，所以氢气流量可以通过一个快速传动阀来调节。

氢气流模型是假定氢气流量直接通过压力反馈进行控制，于是有下面的方程：

$$W_{an,in} = k_1 (k_2 p_{sm} - p_{an}) \quad (24)$$

其中， k_1 为压力比例系数， k_2 是考虑进气歧管到阴极的压力降设定的。

2.2 氧匮乏控制问题(control problem of oxygen starvation)

PEM燃料电池长期稳定地工作主要取决于其内部部件状态和外部操作条件，因此必须控制其主要工作参数，使它在负载和工作条件不断变化的情况下，始终处于良好的运行状态，并保证电池的高性能。定义过氧比 λ_{O_2} 为：

$$\lambda_{O_2} = \frac{W_{O_2,in}}{W_{O_2,rct}} \quad (25)$$

过氧比 λ_{O_2} 表明燃料电池系统的供氧状况，是衡量系统性能的重要指标。由(13)式可以看出，负载电流需求 I_{st} 直接影响氧气反应流量 $W_{O_2,rct}$ ，进而影响过氧比 λ_{O_2} 。当PEM燃料电池系统工作在输入为 $p_{sm} = 1.3 \text{ atm}$ ，负载电流需求为 $I_{st} = 100 \text{ A}$ 时，可以保证系统输出最优的过氧比 $\lambda_{O_2}^{opt} = 1.91$ ，此时系统的效率达到最高^[7]。当负载电流需求 I_{st} 发生变化时，采用固定的进气歧管压力控制输入将会使系统的性能指标输出 λ_{O_2} 偏离原来的最佳工作点，导致系统的效率降低和物理结构的损坏。

选择系统状态 $[m_{O_2}, m_{N_2}, m_{w,ca}, m_{H_2}, m_{w,an}, p_{rm}]^T$ ，系统输入为进气歧管压力 p_{sm} 和负载电流需求 I_{st} ，本文中我们假设系统的状态完全可测。当负载电流变化时我们可以通过调整进气歧管压力使系统状态保持在理想的工作点附近，过氧比保持在期望值附近；同时考虑到系统物理结构的限制必须使进气歧管压力满足约束条件。

PEM燃料电池空气供给系统氧匮乏问题可以描述为调节进气歧管压力 p_{sm} 来降低负载电流需求 I_{st} 的变化对过氧比 λ_{O_2} 的影响，同时保证系统约束满足。

3 准无限时域模型预测控制(Quasi-infinite horizon NMPC)

模型预测控制的机理可以描述为：在每一采样时刻，根据当前量测信息在线求解一个有限时域开环最优控制问题，并将得到的控制序列的第一个元素作用到被控制对象上。由于可以在线的并且显式的处理系统约束，使得这种倚赖实时数值优化的方法获得了广泛的关注。文献[10]提出的准无限时域NMPC通过非线性优化问题中引入终端代价和终端不等式约束，成功地解决了非线性MPC的稳定性问题。

考虑如下非线性离散系统：

$$x(k+1) = f(x(k), u(k)), \quad x(0) = x_0 \quad (26)$$

其中， $x(k) \in R^n$ 、 $u(k) \in R^m$ 分别表示 k 时刻系统的状态和输入，

$$x(k) \in X, \quad u(k) \in U, \quad k \geq t \quad (27)$$

其中 U 是控制输入的可行解集合， X 是系统状态的可行解集合。在本节中我们假设系统的状态完全可测，系统的模型是精确已知的，并且不考虑外部扰动对系统的影响。

假设系统满足下面的条件：

A1: $f: R^n \times R^m \rightarrow R^n$ 是连续的，且 $f(0,0) = 0$ ，即 $0 \in R^n$ 是系统的平衡点；

A2: $U \subset R^m$ 是紧的、凸的， $X \subset R^n$ 是连通的，点 $(0,0)$ 包含于集合 $X \times U$ 的内部。

注1, 如果 $f(x_s, u_s) = 0$, 我们可以通过变量变换 $x' = x - x_s$, $u' = u - u_s$ 将系统的平衡点转换到 $(0, 0)$ 。

定义1 设 Ω 是平衡点的某一邻域

$$\Omega := \{x \in R^n \mid x^T P x \leq \alpha, \alpha > 0, P > 0\} \quad (28)$$

在 Ω 内假设存在一个局部渐近稳定的控制器 $u = Kx$ 满足下面的条件:

B1: $\Omega \subset X$;

B2: 对于所有的 $x \in \Omega$, 有 $Kx \in U$;

B3: 对于所有的 $x \in \Omega$, $x^T P x$ 满足H-J-B不等式

$$x^T(k+1)Px(k+1) - x^T(k)Px(k) \leq -x^T(k)[Q + K^T R K]x(k) \quad (29)$$

则 Ω 是非线性系统的一个终端域, $Kx(k)$ 和 $x^T P x$ 分别称为终端控制和终端代价函数。

注2: 定义1表明在终端域内, 局部控制器 $u = Kx$ 使得控制系统满足约束(27), 并且是正不变的, 即系统始于 Ω 的所有轨迹保持在 Ω 中。

设 k 时刻系统的状态为 $x(k)$, 离散系统准无限时域非线性模型预测控制的优化问题可描述为:

$$\min_{\bar{u}(\cdot)} J(x(k), \bar{u}(\cdot)) \quad (30)$$

$$J(x(k), \bar{u}(\cdot)) = \sum_{s=k}^{k+N-1} x^T(s)Qx(s) + u^T(s)Ru(s) + x^T(k+N)Px(k+N)$$

同时满足

$$\bar{x}(k+1) = f(\bar{x}(k), \bar{u}(k)), \bar{x}(k; x(k), k) = x(k) \quad (31a)$$

$$\bar{u}(\tau) \in U, \tau \in \{k, \dots, k+N-1\} \quad (31b)$$

$$\bar{x}(\tau; x(k), k) \in X, \tau \in \{k, \dots, k+N-1\} \quad (31c)$$

$$\bar{x}(k+N; x(k), k) \in \Omega \subseteq X \quad (31d)$$

其中 N 是预测时域, $\bar{x}(\tau; x(k), k)$ 是在控制 $\bar{u}(\cdot)$ 的作用下系统起始于 $x(k)$ 的预测状态轨迹。

对离散的非线性系统(26), 与文献[10]类似, 我们可以得出下面的两个结论:

定理1^[11]:

- 假设 A1-A2 成立;
- 对于离散非线性系统(26), 存在局部渐近稳定的控制器 $u = Kx$, 平衡点的邻域 Ω 满足条件 B1-B3;
- 在 $k=0$ 时刻开环最优控制问题(30)有可行解;

则在不考虑外部扰动和模型误差的情况下,

(a) 对于任意时刻 $k > 0$, 最优控制问题(30)有可行解;

(b) 系统是渐近稳定的。

引理1^[11]: 考虑非线性系统(26)在原点的线性化形式:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (32)$$

假设(33)是可稳定的, 则存在线性状态反馈控制 K , 使得 $A_k := A + BK$ 渐近稳定。记 $Q^* = Q + K^T R K \in R^{n \times n}$, $\kappa > 1$ 为常数, 则

(a) 离散Lyapunov方程

$$A_k^T P A_k - P + \kappa Q^* = 0$$

有唯一正定对称解,

(b) 存在一个常数 $\alpha \in (0, \infty)$, 使得平衡点的某一邻域

$$\Omega = \{x(k) \in X \mid x^T(k)Px(k) \leq \alpha\} \quad (33)$$

是非线性系统(1)的一个终端域, $u(k) = Kx(k)$ 和 $x^T(k)Px(k)$ 是对应的终端控制器和终端惩罚函数。

综上, 我们给出离散非线性系统的准无限时域模型预测控制的具体算法,

算法:

Step 1 按照引理1离线求解非线性系统的终端代价函数 P , 终端控制增益 K 和终端域 Ω ;

Step 2 在当前时刻 k , 设系统状态为 $x(k)$, 求解相应的优化问题 (30), 获得最优控制序列 $\bar{u}(\tau) \in U, \tau \in \{k, \dots, k+N_c-1\}$. 将控制序列 $\bar{u}(\tau)$ 的第一个元素作用于系统;

Step 3 在下一采样时刻, 获得系统状态 $x(k+1)$, 返回step 2。

4 PEM燃料电池空气供给系统氧匮乏的模型预测控制(Model predictive control for oxygen starvation in air supply system of PEM fuel cell)

4.1 线性化模型(Linearization model)

当PEM燃料电池系统工作在输入为 $p_{sm} = 1.3 \text{ atm}$, 负载电流需求为 $\omega_e = I_{st} = 100 \text{ A}$ 的情况下, 可以保证系统输出最优的过氧比 $y = \lambda_{O_2}^{opt} = 1.91$ 。与此对应的系统

状态为 $x_e = [0.855, 0.591, 3.249, 0.383, 0.281, 1.703]^T$ 。燃

料电池的空气供给系统是一个“快”速系统, 为了减小优化控制量的计算时间, 在求解控制量的过程中我们采用系统Jacobin线性化模型, 即把系统转化为约束的线性系统, 选择采样间隔 $T_s = 0.002 \text{ s}$ 。为了书写简便, 在不至于产生混淆的情况下, 以后用 x 、 u 分别代替 Δx_N 和 Δu_N , 对应系统的线性化方程为:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k)。$$

4.2 设计参数的选取(The parameters of systems)

为了使问题简化及加权矩阵具有比较明确的物理意义, 我们将 Q 取为对角阵,

$$Q = \text{diag}\{Q_{11}, Q_{22}, Q_{33}, Q_{44}, Q_{55}, Q_{66}\}, R = r$$

Q_{ii} 是对状态变量 x_i 的加权, Q_{ii} 的相对增加就意味着 x_i 权值在性能指标中的比重大, x_i 的稳态误差相对减小。另外, r 是对控制量 u 的加权, 当 r 相对较大时, 意味着控制能量较小, 反馈减弱, 而 r 取值较小时, 反馈增加, 系统动态响应迅速。

考虑到PEM燃料电池系统在负载电流需求变化过程中, 影响其性能指标 λ_{O_2} 的主要元素是阴极的氧气质量 m_{O_2} , 因此在选取加权对角阵 Q 的各元素时, 要赋以相对较大的权值, 限制 m_{O_2} 产生大的变化。适当减小 r 会获得较大的控制能量, 但 r 值的选取要考虑执行机构的能力(最大输出, 最大变化值)。本文中状态加权阵 Q 和控制加权阵 R 的权值分别为:

$Q = \text{diag}\{10, 0.01, 0.01, 0.01, 10, 0.01\}$, $R = 1$; 采用文献[11]提出的方法求解终端状态惩罚矩阵 P 。增大控制时域 N_c , 会增加在线的计算负担, 并且控制作用平缓, 系统的响应变慢。本文中我们取 $N_c = 30$, $N_p = 50$ 。

考虑到系统物理结构的限制, 必须使进气歧管压力满足系统约束 $(1-1.3)\text{atm} \leq u \leq (1.6-1.3)\text{atm}$ 。

4.3 仿真分析(Analysis of simulation)

下文中系统仿真都是基于PEM燃料电池系统非线性模型进行的。当负载电流存在 $+20\text{A}$ 阶跃扰动时 MPC控制的系统的输出响应特性为:

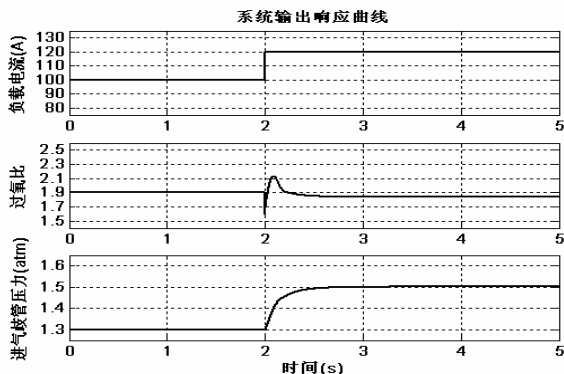


图1 $I_{st} = 100 \rightarrow 120\text{A}$ 时系统输出响应曲线

可以看出, 当系统工作在平衡点时, 进气歧管压力 $p_{sm} = 1.3\text{atm}$, 过氧比维持在 $\lambda_{O_2}^{opt} = 1.91$ 。当 $t = 2\text{s}$ 时, 负载电流出现 $+20\text{A}$ 的阶跃扰动, 导致过氧比 λ_{O_2} 偏离最佳工作点, 系统性能下降, 与此同时, MPC控制器迅速对偏差进行调节, 增大进气歧管压力, 加大阴极入口氧气流量, 很快使系统达到稳定, 并维持在比较理想的性能指标输出 $\lambda_{O_2} = 1.84$ 。

下面考虑当负载电流由 $100 \rightarrow 120 \rightarrow 100\text{A}$ 变化时无控制的系统和MPC控制的系统过氧比响应特性, 相应过程如图2所示。在 $t = 2$ 时刻, 负载电流 I_{st} 从 100A 变到 120A , 无控制的系统的过氧比 λ_{O_2} 由原来的 1.91 降到 1.55 ; 而MPC控制的系统虽然过氧比 λ_{O_2} 响应过程出现一定的超调, 但是稳态时过氧比 λ_{O_2} 为 1.84 , 基本上达到了预期的控制目标。在 $t = 10$ 时刻, 负载电流扰动消失, 无控制的系统和MPC控制的系统最后都回到最优工作点, 但是MPC控制的系统仍出现一定的超调。

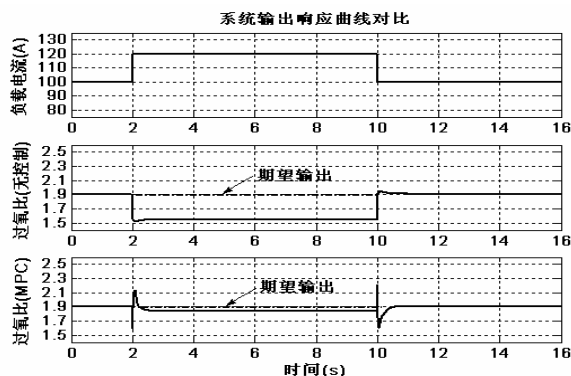


图2 $I_{st} = 100 \rightarrow 120 \rightarrow 100\text{A}$ 时系统过氧比响应曲线

5 总结(conclusion)

质子交换膜(PEM)燃料电池空气供给系统中氧匮乏问题直接影响着系统的性能。基于Pukrushpan建立的反应气体流率模型, 本文讨论了PEM燃料电池空气供给系统氧匮乏模型预测控制。设计的控制系统在负载电流需求发生变化时, 可以通过调节进气歧管压力, 加大阴极入口氧气流量, 使燃料电池效率保持在期望值附近, 同时保证满足系统的约束。

参考文献

- [1] MATSUMOTO T, WATANABE N, SUGIURA H, ISHIKAWA T. Development of fuel-cell hybrid vehicle[J]. SAE Paper No.2002-01-0096, 2002.
- [2] 陈全世, 齐占宁. 燃料电池电动汽车的汽车难关和发展全景. [J]汽车工程, 2001, 23(6): 361-364.
- [3] 吴承伟, 张伟. 国外燃料电池研究动向[J]. 能源工程. 2003, 2: 1-5.
- [4] 隋静, 黄红良, 陈红雨. 我国燃料电池的研究现状—第二届广州燃料电池会议述评[J]. 电源技术. 28(2): 125-129.
- [5] MOSDALE R, SRINIVASAN S. Analysis of performance and of water and thermal management in proton exchange membrane fuel cells [J]. Electrochimica Acta, 1995, 40(4): 413-421.
- [6] PUKRUSHPAN J T, STEFANOPOULOU A G, PENG H. Control of fuel cell breathing [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2004(4), 24(2): 30-46.
- [7] PUKRUSHPAN J T. Modeling and control of fuel cell systems and fuel processors. PhD thesis, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 2003.
- [8] SUN J, KOLMANOVSKY I. Robust reference governor for fuel cell oxygen starvation protection[J]. IEEE 2004 American Control Conf., 2004, submitted.
- [9] GILBERT E, KOLMANOVSKY I. Fast reference governors for systems with state and control constraints and disturbance inputs[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 1999(9): 1117-1141.
- [10] CHEN H, ALLGOWER F. A quasi-infinite horizon nonlinear model predictive control scheme with guaranteed stability [J]. Automatica, 1998, 34(10): 1205-1217.
- [11] 于树友, 陈虹, 赵海艳. 非线性离散时间系统的准无限时域 NMPC. 已投吉林大学学报(工学版).