

质子交换膜燃料电池的连续模型 预测控制器的设计

张君, 章琳, 喻梅文

(浙江省中西医结合医院, 杭州 310003)

摘要: 在对质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 的工作原理进行研究分析的基础上, 对其进行了数学描述, 并在 Matlab/Simulink 仿真平台下建立了质子膜燃料电池的动态仿真模型; 维持 PEMFC 系统的正常运行需要良好的控制系统; 通过将拉盖尔函数应用到连续模型预测控制 (CMPC) 算法中, 分析了 CMPC 的不足之处并通过指数权值函数进行了简单的修正, 随后将两种控制策略与传统的离散预测控制 (DMPC) 施加到 PEMFC 系统中去并进行了仿真对比分析, 仿真结果证明了 CMPC 算法的有效性以及优越性。

关键词: 质子交换膜燃料电池; 连续预测控制; 拉盖尔函数; 指数权值函数

Continuous Model Predictive Controller for a Proton Exchange Membrane Fuel Cell

Zhang Jun, Zhang Lin, Yu Meiwen

(Zhejiang Provincial Joint Hospital of Chinese Medicine and Western Medicine, Hangzhou 310003, China)

Abstract: Based on the research and analysis of the proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) working principle, the mathematical description of PEMFC was given and its dynamic simulation model was established in Matlab/Simulink. Maintaining a fuel cell system in correct operating conditions requires good system control. The continuous model predictive controller (CMPC) was designed using Laguerre functions; besides, a simple modification strategy was proposed by using index weighting function. Two control strategies and the traditional DMPC were applied to control the output power of the PEMFC system. The results show the effectiveness and superiority of the CMPC algorithm.

Keywords: PEMFC; CMPC; Laguerre functions; index weighting function

0 引言

目前, 随着世界人口的增长和社会经济的飞速发展, 人类社会对能源的需求越来越大, 利用能源的范围也逐步扩大。但现阶段, 世界能源利用还是以天然气、石油和煤等化石燃料为主, 这些化石燃料的能量转换主要是通过热力学过程来实现的。然而, 由于热力学过程受卡诺循环的限制, 能量转化效率低, 能源浪费现象严重, 而且会引发大气污染和温室效应等一系列环境问题, 使人类的生存环境日趋恶劣。同时, 化石燃料属于不可再生资源, 储量有限。因此, 开发高效环保的可再生能源已经成为一项刻不容缓的工作, 各类燃料电池的研发就是在这样的背景下展开的。氢作为可持续能源之一, 以其丰富的元素储存和宇宙中所有常规燃料的最高能量含量而受到研究人员的极大关注。质子交换膜燃料电池燃料通过氢氧化合作用, 直接将化学能转化为电能, 具有较高的能量密度, 较快的启动时间 (≤ 1 s)。其发电效率高、工作温度低、可靠性高、无

污染、使用灵活等优点受到世人广泛的青睐^[1-4]。为了提高 PEMFC 系统的运行性能及效率, 延长电池使用寿命, 保证系统安全、可靠地运行, 需要有效的控制系统对其进行控制。模型预测控制 (MPC) 算法采用了多步预测、滚动优化和反馈校正的控制策略, 具有控制效果好、鲁棒性强、对模型精确性要求低等优点, 保证了系统在整个状态空间内具有较好的运动品质。连续模型比离散模型更接近实际, 更紧凑; 连续模型预测控制 (CMPC) 具有快速且不定期的采样间隔, 不像离散模型预测控制 (DMPC) 那样具有固定而且严格的采样率; 由于控制信号何时达稳态很难精确确定, CMPC 没有精确的控制域参数; CMPC 对于扰动有更好的闭环响应; 总之, CMPC 可以在连续时间下更有效的实现对系统地控制并在快速采样率下提高系统的控制性能^[1-10]。

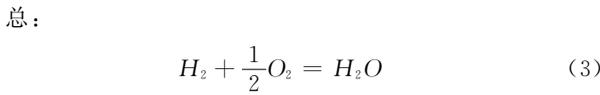
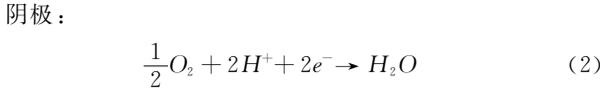
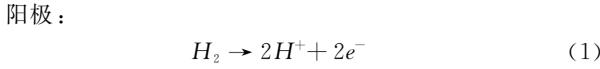
1 质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 动态模型介绍

质子交换膜燃料电池的反应是通过氧化还原反应实现的: 在催化剂的作用下, 阳极的氢分子解离为质子和电子, 质子通过质子交换膜到达阳极, 而电子则通过外电路到达阴极, 在阴极, 氧气与质子以及电子发生反应, 生成水并产生热量。PEMFC 反应式如下^[11-12]:

收稿日期: 2019-03-20; 修回日期: 2019-05-07。

基金项目: 杭州市科技软科学研究项目 (20180034M48)。

作者简介: 张君 (1987-), 男, 山东淄博人, 工学硕士, 主要从事燃料电池与预测控制方向的研究。



首先对模型做出如下假设: 假设所有气体均为理想气体, 并遵守一切理想气体的规律; 假设所有气体的相对湿度为 100%; 假设电池的各个部分的温度完全一致; 质子交换膜是完全加湿的并具有理想的质子传导性能。

鉴于质子交换膜燃料电池的工作原理, 根据文献 [5-6], 可以得到其数学模型:

$$E_{\text{nerst}} = \frac{\Delta G}{2F} + \frac{\Delta S}{2F}(T - T_{\text{ref}}) + \frac{RT}{2F}[\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2}\ln(P_{O_2})] \quad (4)$$

$$V_{\text{act}} = 0.9514 - 3.12 \cdot 10^{-3}T - 7.4 \cdot 10^{-5}T \ln(C_{O_2}) + 1.87 \cdot 10^{-4}T \ln(i) \quad (5)$$

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08 \cdot 10^6 e^{\frac{-4900}{T}}} \quad (6)$$

$$V_{\text{ohm}} = I(R_M + R_C) \quad (7)$$

$$R_M = \frac{\rho_M l}{A} \quad (8)$$

$$\rho_M = \frac{181.6[1 + 0.03(\frac{i_{FC}}{A}) + 0.062(\frac{T}{303})^2(\frac{i_{FC}}{A})^{2.5}]}{[\varphi - 0.634 - 3(\frac{i_{FC}}{A})]e^{4.18(\frac{i_{FC}}{A})}} \quad (9)$$

$$V_{\text{con}} = -B \ln\left(1 - \frac{I}{I_{\text{max}}}\right) \quad (10)$$

其中, ΔG (J/mol) 为吉布斯自由能 (237.16 KJ/mol); R 为普适气体常数 (8.314 J/K.mol); F 为法拉第常量 (96.487C); ΔS 为熵变 (164.025 J/mol); P_{H_2} 与 P_{O_2} 分别为 H_2 与 O_2 的压力。 T 为环境温度, T_{ref} 为参考温度 (298.15 K)。 V_{fc} 为活化极化电压, C_{O_2} 为有效氧浓度, i 为电流密度, V_{ohm} 为欧姆极化过电压, V_{con} 为浓度极化过电压, ρ_M 为质子交换膜对电子流的电阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$); R_M 为质子交换膜的等效阻抗, R_C 为阻碍质子通过质子交换膜的等效阻抗, l 为质子交换膜的厚度, B (V) 是由质子交换膜燃料电池本身决定的辅助系数。

单个燃料电池的输出电压以及输出功率可表示如下:

$$V_{\text{fc}} = E_{\text{nerst}} - V_{\text{act}} - V_{\text{ohmic}} - V_{\text{con}} \quad (11)$$

$$P_{\text{fc}} = V_{\text{fc}} i \quad (12)$$

图 2 给出的是一个质子交换膜燃料电池的动态模型。其中 q_{O_2} 和 q_{H_2} 分别为输入的氧气摩尔流量和氢气摩尔流量, K_{O_2} 和 K_{H_2} 分别为氧气和氢气的摩尔系数。

2 控制器的设计

针对质子交换膜燃料电池反映过程特性, 基于模型的传统控制技术面临极大的困难, 智能控制发挥了一定的作

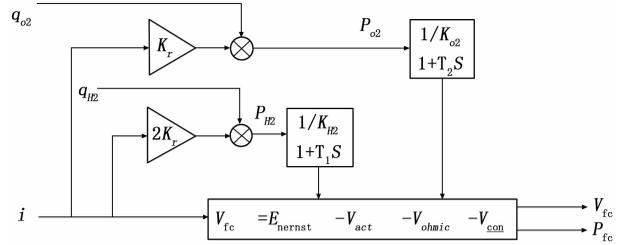


图 2 质子交换膜燃料电池的动态模型

用。为了实现质子交换膜燃料电池稳定的输出电压及功率, 必须在其反映过程中实施先进的过程控制策略。预测控制是一种基于模型的控制方法, 其具有对模型要求低、在线计算方便、种植质量好等特点。预测模型的功能是根据对象的历史信息和未来输入预测其未来输出。状态方程、传递函数以及阶跃响应、脉冲响应这类非参数模型, 都可以作为预测模型使用。在过去的几十年中, 模型预测控制在学术及工业领域都得到了广泛的重视, 由于连续的模型预测控制 (CMPC) 在技术上更难实现, 绝大多数的 MPC 技术都集中在离散的模型预测控制 (DMPC) 上^[13]。类似 DMPC 的处理方式, 本文通过用拉盖尔函数辨识控制变量, 从而使 CMPC 能够顺利的应用于实践中。

拉盖尔函数如下^[14-16]:

$$l_1(t) = \sqrt{2p} \times e^{-pt}$$

$$l_2(t) = \sqrt{2p} \times (-2pt + 1)e^{-pt}$$

⋮

$$l_i(t) = \sqrt{2p} \times \frac{e^{pt}}{(i-1)!} \frac{d^{i-1}}{dt^{i-1}} [t^{i-1} e^{-2pt}] e^{-pt} \quad (13)$$

可进一步得到:

$$L(t) = e^{\lambda t} L(0) \quad (14)$$

其中: $L(t) = [l_1(t) \ l_2(t) \ \dots \ l_N(t)]^T$, p 为拉盖尔函数的比例因子:

$$A_p = \begin{bmatrix} -p & 0 & \dots & 0 \\ -2p & -p & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -2p & \dots & -2p & -p \end{bmatrix}$$

对于一个线性时不变系统, 当闭环系统稳定的时候, 当设定值改变或者存在负载扰动时控制信号将以指数形式收敛于一个常数, 从而其控制信号的微分收敛于 0, 因此, 在 $t_i \leq t \leq t_i + T_p$ (T_p 为预测域) 内, 控制信号可以是控制变量 $u(t)$ 或者控制变量的微分 $\dot{u}(t)$ 。对于渐进稳定的系统, 拉盖尔函数便是的条件是其绝对可积, 然而当系统输出非 0 稳态或有阶跃响应时, 控制变量 u 可能最终恒定在某一个值上而不能使用拉盖尔函数进行辨识 (不可积)。所以选取 $\dot{u}(t)$ 作为新的控制变量并满足绝对可积条件:

$$\int_{t_i}^{t_i+T_p} \dot{u}^2(t) dt < \infty \quad (15)$$

从而用 $\dot{u}(t)$ 可用拉盖尔函数进行辨识:

$$\dot{u}(t) = \sum_{i=1}^N c_i l_i(t) = L(t)^T \eta \quad (16)$$

其中: c_i 为脉冲响应系数, $\eta = [c_1 \ c_2 \ \dots \ c_N]^T$ 为系数向量。

类似 DMPC 的设计原则, CMPC 也是建立在缩减域原则的基础之上的, 对于一个连续的系统:

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_m(t) = \mathbf{A}_m \bar{x}_m(t) + \mathbf{B}_m u(t) \\ y(t) = \mathbf{C}_m \bar{x}(t) \end{cases} \quad (17)$$

记 $x(t) = [\dot{\bar{x}}_m(t) \ y(t)]^T$ 可进一步得到:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \mathbf{A}x(t) + \mathbf{B}u(t) \\ y(t) = \mathbf{C}_m x(t) \end{cases} \quad (18)$$

其中, $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_m & \mathbf{O}_m^T \\ \mathbf{C}_m & \mathbf{O}_{q \times q} \end{pmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_m \\ \mathbf{O}_{q \times q} \end{bmatrix}, \mathbf{C} = [\mathbf{O}_m \ \mathbf{I}_{q \times q}]$

在 t_i 时刻预测 $t_i + \tau$ 时刻系统的状态以及输出可表示为:

$$\begin{cases} x(t_i + \tau | t_i) = e^{\mathbf{A}\tau} x(t_i) + \int_0^\tau e^{\mathbf{A}(\tau-\gamma)} \mathbf{B} \bar{u}(\gamma) d\gamma \\ y(t_i + \tau | t_i) = \mathbf{C} e^{\mathbf{A}\tau} x(t_i) + \mathbf{C} \int_0^\tau e^{\mathbf{A}(\tau-\gamma)} \bar{u}(\gamma) \eta \end{cases} \quad (19)$$

通过求得最优的控制变量使得性能指标:

$$J = \int_0^{T_p} [r(t_i + \tau) - y(t_i + \tau)]^T \mathbf{Q} [r(t_i + \tau) - y(t_i + \tau)] + \dot{u}(\tau)^T \mathbf{R} \dot{u}(\tau) d\tau \quad (20)$$

通过以上算法, CMPC 可以顺利地施加到被控系统上, 但是注意到其预测的系统矩阵含有正实部的特征根并带有积分环节, 对于具有强耦合、非线性比较强以及比较复杂的系统而言, T_p 选取的过小, 系统很难达稳态; T_p 选取的过大, 系统的海瑟矩阵过大 (海瑟矩阵表明一个系统的健康性), 易造成数值解病态, 参照 DMPC 的修正策略, 通过引入指数权值函数 $e^{-\alpha t}$ 进行修正^[13-16]。

定义:

$$x_a(t_i + t | t_i) = e^{-\alpha t} x(t_i + t | t_i) \quad (21)$$

$$\dot{u}_a(\tau) = e^{-\alpha \tau} \dot{u}(\tau) \quad (22)$$

联合以上几式可以进一步得到:

$$x_a(t_i + \tau | t_i) = e^{\mathbf{A}\tau} x(t_i) +$$

$$\int_0^\tau e^{\mathbf{A}(\tau-\gamma)} [\mathbf{B}_1 L_1(\gamma)^T \mathbf{B}_2 L_2(\gamma)^T \dots \mathbf{B}_m L_m(\gamma)^T] d\gamma \eta \quad (23)$$

$$\dot{u}_a(\tau) = [\mathbf{L}_1(\tau)^T \mathbf{L}_2(\tau)^T \dots \mathbf{L}_m(\tau)^T] \eta \quad (24)$$

将其带入性能指标的表达式中便可得到新的性能指标。

部分程序实现如下:

```
function [Omega, Psi] = cmc(A, B, p, N, Tp, Q, R);
[n, n_in] = size(B);
tau_del = 0.001/max(p);
Tpm = max(Tp);
tau = 0; tau_del; Tpm;
Np = length(tau);
N_pa = sum(N);
Omega = zeros(N_pa, N_pa);
Psi = zeros(N_pa, n);
S_in = zeros(n, N_pa);
R_L = eye(N_pa, N_pa);
kk = 1;
```

```
fori = 1:n_in
    R_L(kk, kk-1+N(i), kk, kk-1+N(i)) = R(i, i) * R_L(kk,
kk-1+N(i), kk, kk-1+N(i));
    kk = kk+N(i);
end
[Al, L0] = lagc(p(1), N(1));
Eae = expm(A * tau_del);
Eap = expm(Al * tau_del);
L = Eap * L0;
Y = -B(:, 1) * L' + Eae * B(:, 1) * L0';
X = lint(A, p(1), Y);
S_in(:, 1; N(1)) = X;
In_s = 1;
forjj = 2:n_in;
    [Al, L0] = lagc(p(jj), N(jj));
    Eap = expm(Al * tau_del);
    L = Eap * L0;
    Y = -B(:, jj) * L' + Eae * B(:, jj) * L0';
    X = lint(A, p(jj), Y);
    In_s = N(jj-1) + In_s;
    In_e = In_s + N(jj) - 1;
    S_in(:, In_s; In_e) = X;
end
S_sum = S_in;
fori = 2:Np-1;
    kk = 1;
    [Al, L0] = lagc(p(kk), N(kk));
    Eap = expm(Al * tau_del);
    S_sum(:, 1; N(kk)) = Eae * S_sum(:, 1; N(kk)) + S_in(:, 1; N
(kk)) * (Eap^(i-1));
    In_s = 1;
    for kk = 2:n_in;
        [Al, L0] = lagc(p(kk), N(kk));
        Eap = expm(Al * tau_del);
        In_s = N(kk-1) + In_s;
        In_e = In_s + N(kk) - 1;
        S_sum(:, In_s; In_e) = Eae * S_sum(:, In_s; In_e) + S_in(:, In
s; In_e) * (Eap^(i-1));
    end
    phi = S_sum;
    Omega = Omega + phi' * Q * phi;
    Psi = Psi + phi' * Q * Eae^i;
end
Omega = Omega * tau_del + R_L;
Psi = Psi * tau_del;
```

3 仿真结果及分析

为验证所设计控制系统有效性, 在 Matlab/Simulink 仿真平台上对 3 种控制策略下的 PEMFC 系统进行了仿真试验。假定氧气是充足的, 选取氢气的摩尔流量作为控制变量。模型预测控制系统通过调节氢气摩尔流量来实现 PEMFC 电池输出功率的恒定。为了测试氢气摩尔流量变

化的及时性以及有效性, PEMFC 输出功率在 0~18S 设定值为 0.5 W, 18~36 S 设定值为 0.6 W, 进行仿真实验。DMPC 主要参数如下: $N_p = 20, N_c = 2, u \in [-0.1, 0.2], \Delta u \in [-0.2, 0.2]$ 输出权值矩阵为单位矩阵, 控制权值矩阵为 0.3 倍的单位矩阵; CMPC 及 ICMPC 主要控制参数如下: $p = 0.85, N = 80, T_p = 200, u \in [-1, 1], \Delta u \in [-0.5, 0.5], \alpha = 10.1$, 权值矩阵 $R = 0.4$ 倍的单位矩阵, 三中控制策略下的输出功率、控制变量(氢气流量)曲线以及控制变量的增量曲线变化如图 3~5 所示。其中, DMPC 表示传统离散模型预测控制; CMPC 表示连续模型预测控制; ICMPC 表示指数权值函数修正之后的连续模型预测控制。

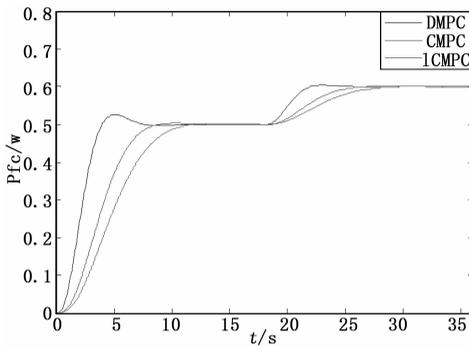


图 3 3 种控制策略下输出功率变化曲线

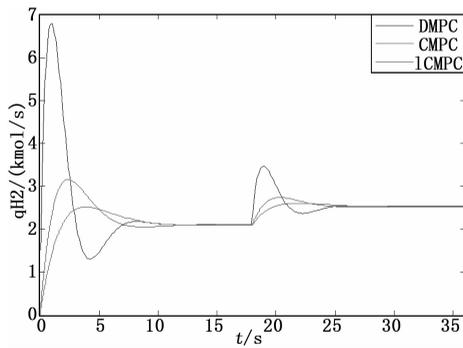


图 4 3 种控制策略下控制变量曲线

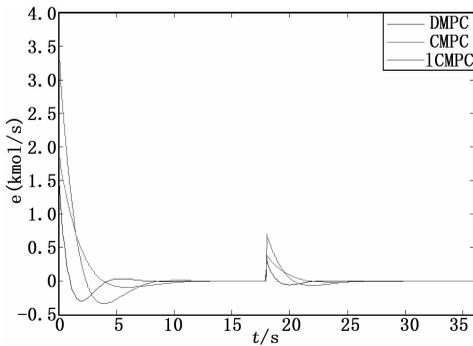


图 5 3 种控制策略下控制变量增量曲线

由仿真曲线可以得知, 3 种控制策略都可以实现对 PEMFC 的有效控制, 3 种控制策略下质子交换膜燃料电池的输出功率达到设定值的时间基本一致。DMPC 虽然有较

好的快速性但是却有相对较大的超调, DMPC 控制策略下氢气流量变化幅度较大, CMPC 以及修正之后的 CMPC 算法嵌入了积分环节, 虽然牺牲了一定的快速性, 但是其鲁棒性更强, 对于更恶劣的环境能起到跟好的调控作用, 而且 DMPC 是建立在离散的采样点之上而 CMPC 建立在实际的连续时间基础上, CMPC 更具有加现实的意义。

4 结论

质子交换膜燃料电池因其具有能量转化效率高、效率随输出变化特性好、无污染、构造简单、便于维护、运行噪声低、可靠性高等一系列的优点, 使其得到了广泛的研究与应用。在过去的几十年中, 模型预测控制在学术及工业领域都得到了广泛的重视, 由于连续的模型预测控制(CMPC)在技术上更难实现, 绝大多数的 MPC 技术都集中在离散的模型预测控制(DMPC)上。本文通过对质子交换膜燃料电池施加 CMPC 控制器, 并进行了简单的修正, 不仅使系统具有较好的响应特性, 而且还具有良好的鲁棒性和快速性, 得到了较理想的控制效果, 实现了质子交换膜燃料电池输出功率的恒定。

参考文献:

- [1] Du Z, Li H, Gu T. A state of the art review on microbial fuel cells: a promising technology for wastewater treatment and bioenergy [J]. *Biotechnology Advances*, 2007, 25: 464-482.
- [2] Das S, Recent M N. Development of microbial fuel cell: a review [J]. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 2010, 69: 727-731.
- [3] Logan B E. Scaling up microbial fuel cells and other bioelectrochemical systems [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, 85 (6): 1665-1671.
- [4] Pukrushpan J, Stefanopoulou A, Peng H. Control of fuel cell breathing [J]. *IEEE Control Systems*, 2004, 24 (2): 30-46.
- [5] Kunsch C, Puleston P F, Mayosky M A, et al. Sliding mode strategy for PEM fuel cells stacks breathing control using a super-twisting algorithm [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2009, 17 (1): 167-174.
- [6] 黄霞, 梁鹏, 曹效鑫, 等. 无介体微生物燃料电池的研究进展 [J]. *中国给水排水*, 2007, 23 (4): 1-6.
- [7] Pukrushpan J, Stefanopoulou A, Peng H. Control of fuel cell breathing [J]. *IEEE Control Systems*, 2004, 24 (2): 30-46.
- [8] Chotai A, Young P C, McKenna P G, et al. Proportional-integral-plus (PIP) design for delta operator systems: Parts 1 and 2 [J]. *International Journal of Control*, 1998, 70 (1): 123-147, 149-168.
- [9] Petrone R, Zheng Z, et al. A review on model-based diagnosis methodologies for PEMFCs [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38 (17): 7077-7091.