

基于改进粒子群算法的 H_∞ 次优控制 在 PEMFC 混合发电系统中的应用

李奇¹, 陈维荣¹, 刘述奎², 程站立¹, 刘小强¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 成都电业局, 四川 成都 610021)

摘要: 为了改善粒子群算法 (PSO) 的全局搜索能力, 通过提高平衡点多样性提出一种改进粒子群算法 (MPSO)。结合 H_∞ 次优控制方法, 将加权函数的选取转化成优化问题, 并将该方法应用于质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 混合发电系统的过氧比 (OER) 控制。动态仿真结果证明, 在大负载电流变化、参数扰动、环境干扰和量测噪声影响下该方法能够维持系统 OER 在最优值附近, 保证了系统的稳定运行。同时与其他控制方法比较, 证明该方法具有较好的抗扰性和鲁棒稳定性。

关键词: 质子交换膜燃料电池; 混合发电系统; 改进粒子群算法; H_∞ 次优控制; 过氧比

H_∞ suboptimal control for proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) hybrid power generation system based on modified particle swarm optimization

LI Qi¹, CHEN Wei-rong¹, LIU Shu-kui², CHENG Zhan-li¹, LIU Xiao-qiang¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. Chengdu Electric Power Bureau, Chengdu 610021, China)

Abstract: In order to improve the ability of global search of particle swarm optimization(PSO), a modified particle swarm optimization (MPSO) is proposed by increasing the diversity of equilibrium point. A H_∞ suboptimal control method is combined with MPSO, in which the selection of weighting functions is expressed as an optimization problem. And the proposed method is applied to control the oxygen excess ratio (OER) of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) hybrid power generation system. The dynamic simulation results demonstrate that the method can maintain the OER to be close to the optimal value and guarantee stable operation of the system under large variation of load current, parameter perturbation, environmental disturbance and measurement noise. The comprehensive comparison with other control methods verifies that the proposed method has better disturbed resistance and robust stability.

Key words: proton exchange membrane fuel cell; hybrid power generation system; modified particle swarm optimization; H_∞ suboptimal control; oxygen excess ratio

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0126-06

0 引言

质子交换膜燃料电池 (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) 具有高功率密度、低运行温度、快速响应、稳定性好以及无污染等特点^[1-4], 是一种极具吸引力的发电装置, 适用于可移动动力源和分布式发电等。PEMFC 发电系统是一个非线性、强耦合的复杂动态系统, 当被驱动的

负载发生变化时, PEMFC 电堆内部反应气体流量会随之变化。当阴极氧气流量过低, 则会使电堆供氧不足, 降低系统的输出功率, 即产生氧匮乏现象^[2-4]; 当氧气流量超过一定限度后, 会使空气供应系统的寄生功耗加大, 降低系统的净输出功率。因此, 为了防止在大电流负载条件下 PEMFC 发电系统出现氧匮乏现象和空气压缩机“喘振”现象^[2-3], 必须对空气流量进行精确控制, 同时加入超级电容器构成混合发电系统, 用以满足短时间内的负载需求, 加快系统调节时间, 使系统过氧比 (Oxygen Excess Ratio, OER) 达到最佳值^[2]。

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目 (109160); 国家重点实验室自主研究课题 (重点) (2008TPL-Z01)

目前, 已有大量文献对 PEMFC 发电系统进行建模与控制研究。陈启梅等^[1]采用底层循环方式建立了由燃料电池和燃气轮机组成的混合发电系统, 并在常压下对其工作性能进行了分析; Pukrushpan 等^[2]对 PEMFC 空气供应系统进行建模并提出一种前馈和状态反馈相结合的最优控制方法; Vahidi 等^[3]采用预测控制对燃料电池混合发电系统进行电流管理; 李奇等^[4]对质子交换膜燃料电池空气供应系统的供气管道压力进行了 H_∞ 最优控制。但以上文献所采用的控制方法没有充分地考虑 PEMFC 混合发电系统在工作过程中受到不确定性以及外界干扰的影响, 因此所设计的控制器不具备较好的抗扰性和鲁棒稳定性。

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO) 是于 1995 年提出的一种生物进化算法^[5]。该算法中每个粒子代表解空间的一个候选解, 粒子在搜索空间以一定的速度飞行, 飞行速度根据飞行经验以及与该粒子邻近的粒子经验来调整大小、方向。为了提高算法的全局搜索能力, 本文通过提高平衡点多样性提出一种改进粒子群算法(MPSO)。

本文采用基于 MPSO 算法的 H_∞ 次优控制方法使 PEMFC 混合发电系统的 OER 维持在最优值附近, 并通过动态负载变化仿真, 检验所设计控制器的抗扰性和鲁棒稳定性, 同时与其他控制方法比较进一步证明该方法的优越性。

1 PEMFC 混合发电系统模型

1.1 PEMFC 混合发电系统建模

PEMFC 混合发电系统是由 PEMFC 电堆、超级电容器、增湿器、空气压缩机、散热器、氢气罐、气液分离器和 DC/DC 变换器等装置组成^[2-4]。该系统的示意图如图 1 所示。

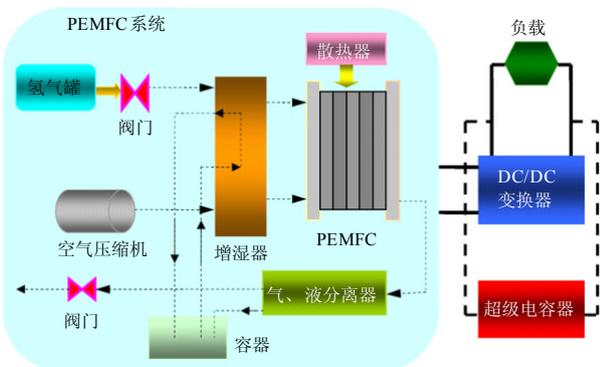


图 1 PEMFC 混合发电系统示意图

Fig.1 Schematic of PEMFC hybrid system

PEMFC 发电系统的净输出功率是由系统输出

功率和寄生功率决定, 而寄生功率主要由空气压缩机产生^[2-4]。OER 表明 PEMFC 发电系统的供氧状况, 是衡量系统发电性能的主要指标。为使系统的净输出功率达到最高, 必须保证 OER 为最优值。一旦达到最优 OER, 若再继续增加就会引起寄生功率增加, 进而恶化系统净输出功率^[2-3]。定义过氧比为阴极供应的氧气流量与消耗的氧气流量之比:

$$\lambda_{O_2} = \frac{W_{O_2, in}}{W_{O_2, ret}} \quad (1)$$

本文采用 J.T. Pukrushpan 的八阶 PEMFC 发电系统模型^[2]。该系统模型线性化后的状态方程如下:

$$\begin{cases} \Delta \dot{x} = A \Delta x + B_u \Delta u + B_w \Delta w \\ \Delta z = C_z \Delta x + D_{zu} \Delta u + D_{zw} \Delta w \\ \Delta y = C_y \Delta x + D_{yu} \Delta u + D_{yw} \Delta w \end{cases} \quad (2)$$

式中: Δx 是系统状态变量的增量; Δy 是测量输出变量的增量; $\Delta z = [\Delta P_{net}, \Delta \lambda_{O_2}]$ 是性能输出变量的增量; $\Delta u = \Delta v_{cm}$ 是压缩机控制电压的增量; $\Delta w = \Delta I_{fc}$ 是 PEMFC 输出电流的增量。

为了防止在大电流负载条件下 PEMFC 发电系统出现“氧匮乏”现象和空气压缩机“喘振”现象^[2-3], 本文加入超级电容器来满足短时间内的负载需求, 以便加快 PEMFC 系统的调节时间。通常超级电容器的电量由荷电状态(State of Charge, SOC)来衡量。SOC 和充电电流 I_{cap} 的关系如下^[3]:

$$\frac{dSOC}{dt} = \frac{1}{C v_{max}} I_{cap} \quad (3)$$

式中: C 是电容值; v_{max} 是最大充电电压。DC/DC 变换器输出电流 I_{dc} 、超级电容器输出电压 v_{cap} 和负载电流 I_{des} 可表示为:

$$I_{dc} = \eta_{dc} \frac{I_{fc} v_{fc}}{v_{cap}} \quad (4)$$

$$v_{cap}(t) = SOC(t) v_{max} \quad (5)$$

$$I_{des} = I_{dc} + I_{cap} \quad (6)$$

式中: η_{dc} 是变换器效率; I_{fc} 和 v_{fc} 是 PEMFC 系统的输出电压和电流。因此式(3)可表示为:

$$\frac{dSOC}{dt} = \frac{1}{C v_{max}} (\eta_{dc} \frac{I_{fc} v_{fc}}{v_{max} SOC} - I_{des}) \quad (7)$$

根据文献[2]和[3], 选取该系统工作运行点为 PEMFC 输出电流 $I_{fc} = 191$ A, 净输出功率 $P_{net} = 40$ kW, 空气压缩机机端电压 $v_{cm} = 164$ V, 过氧比 $\lambda_{O_2} = 2$, $SOC = 0.61$ 。

1.2 H_∞ 混合灵敏度问题

在 H_∞ 混合灵敏度问题中, 频域函数 $W_s(s)$ 、 $W_r(s)$ 和 $W_t(s)$ 用来加权重要的性能信号, 可构

成图 2 所示的增广系统 $P(s)$ ，进一步通过上分式变换 (Upper LFT)，可将混合灵敏度问题转换为标准 H_∞ 控制问题。图 2 中， $G(s)$ 为被控对象； $K(s)$ 为控制器； y 为系统输出信号； u 为控制输入； r 为参考输入； e 为跟踪误差； d 为环境干扰输入； n 为量测噪声输入； z_1 、 z_2 、 z_3 为加权增广系统的评价信号。

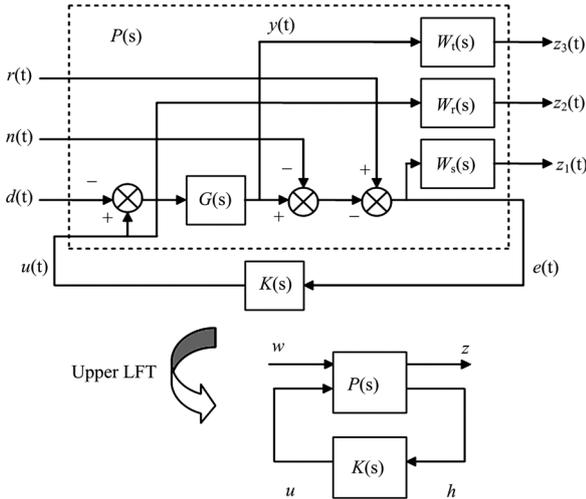


图 2 H_∞ 混合灵敏度问题和标准 H_∞ 控制问题结构图

Fig.2 Structure of H_∞ mixed-sensitivity problem and standard H_∞ control problem

H_∞ 次优控制问题就是寻求真实有理函数控制器 $K(s)$ ，使得 w 至 z 的闭环系统稳定，且存在 $\gamma > 0$ 使其满足范数要求^[4]，即

$$\|H_\infty(s)\|_\infty = \left\| \begin{matrix} W_s S \\ W_r R \\ W_t T \end{matrix} \right\| < \gamma \quad (8)$$

$$\begin{cases} S = (I + GK)^{-1} \\ R = K(I + GK)^{-1} = KS \\ T = GK(I + GK)^{-1} = I - S \end{cases} \quad (9)$$

式中： S 为灵敏度函数； R 为输入灵敏度函数； T 为互补灵敏度函数。

对于图 2 所示的标准 H_∞ 控制问题，其状态空间如下：

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_1 w + B_2 u \\ z = C_1 x + D_{11} w + D_{12} u \\ h = C_2 x + D_{21} w + D_{22} u \end{cases} \quad (10)$$

由 Glover-Doyle 算法^[6]可以通过求解两个 Riccati 代数方程得到该系统的次优控制器 $K(s)$ ，但是该方法需要系统满足较多苛刻的假设条件才能进行求解，不利于解决标准 H_∞ 控制问题。本文采用 LMI 解法只需要系统满足 (A, B_1) 是可稳定的和 $(C_1,$

$A)$ 是可检测的这个基本假设条件，则存在满足式 (8) 的 $K(s)$ 的充要条件为 LMI^[7]：

$$\begin{bmatrix} N_X^T \\ I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} AX + XA^T & XC_1^T & B_1 \\ C_1 X & -\gamma I & D_{11} \\ B_1^T & D_{11}^T & -\gamma I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_X \\ I \end{bmatrix} < 0$$

$$\begin{bmatrix} N_Y^T \\ I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} YA + A^T Y & YB_1 & C_1^T \\ B_1^T Y & -\gamma I & D_{11}^T \\ C_1 & D_{11} & -\gamma I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_Y \\ I \end{bmatrix} < 0$$

$$\begin{bmatrix} X & I \\ I & Y \end{bmatrix} \geq 0, \text{rank} \begin{bmatrix} X & I \\ I & Y \end{bmatrix} \leq n_p + n_c \quad (11)$$

将式 (11) 作为特征值问题 (EVP)，采用内点法求解该存在不等式约束的凸优化问题，即可得到可行解 (X, Y) 。

2 改进粒子群优化算法

2.1 MPSO 算法的基本原理

对于复杂寻优问题，传统 PSO 算法难以跳出局部极值点，会使平衡点陷入停滞状态，造成早熟收敛^[5,8]。针对传统 PSO 算法搜索性能取决于对全局搜索和局部搜索能力的平衡特性，本文在其基础上进行改进，提出了一种具有较好的全局搜索能力的 MPSO 算法。

为了增加平衡点的多样性，使各个粒子的平衡点在早期收敛阶段分布在一个较大的区域内，使粒子具有较好的全局搜索能力，而在后期阶段使粒子的平衡点分布在一个较小的区域内，使粒子在该区域内进行细致的搜索^[5]。因此，将传统 PSO 算法中的群体最佳位置替换为按个体最优位置排序后，最前面的 s 个粒子个体最优位置的加权平均 p_g ，而将个体最佳位置替换为排序后粒子当前位置与前一时刻经历位置的加权平均 p_b ：

$$p_g = \sum_{j=1}^s \xi_j p_j \quad (12)$$

$$\xi_j = \frac{1/F_j}{\sum_{k=1}^s \frac{1}{F_k}} \quad (13)$$

$$p_b = \frac{F_i p_{i-1} + F_{i-1} p_i}{F_i + F_{i-1}} \quad (14)$$

式中： F_j 为个体最优位置 p_j 对应的适应值（假设为最小化问题且 $F_j > 0$ ）； ξ_j 是加权系数。

由于增加平衡点的多样性会降低收敛速度和局部搜索性能^[9]，本文引入 BFGS 拟牛顿法以提高算

法的收敛速度和局部搜索能力。具体实现为每隔 E 代, 从粒子群中选取 5% 的较优粒子进行一次拟牛顿法搜索。其中 Hessian 矩阵可由下式迭代近似求得:

$$H_{i+1} = H_i + \frac{y_i y_i^T}{y_i^T \Delta x_i} - \frac{H_i^T \Delta x_i^T \Delta x_i H_i}{\Delta x_i^T H_i \Delta x_i} \quad (15)$$

$$y_i = \nabla F(x_{i+1}) - \nabla F(x_i) \quad (16)$$

2.2 基于 MPSO 算法的 H_∞ 次优控制器设计

为实现最优控制目标, 从动态角度考虑, 目标函数选取积分时间误差绝对值 (ITAE) 指标作为系统性能指标, 该指标可以兼顾受扰动时系统在振荡过程中及趋于平稳时的输出误差。同时为减小控制增益, 在目标函数中加入控制器的 H_∞ 范数项, 并加入调节时间项, 用以防止调节时间过长, 故目标函数定义如下:

$$F = \omega_1 \int_{t_1}^{t_2} [(t_2 - t_1) |N_c(t) - N_{cr}|] dt + \omega_2 \|K\|_\infty + \omega_3 t_s \quad (17)$$

式中: N_{cr} 是压缩机的参考流量值; t_s 是调节时间; t_1 和 t_2 是响应开始和结束时间; ω_1 、 ω_2 和 ω_3 是可调权值。

为了不失一般性和不增加系统阶数, 将 W_s 和 W_t 的结构取为一阶连续时间形式, W_r 为标量形式, 即:

$$\begin{cases} W_s = \frac{HF_1 s + DC_1 |BW_1| \sqrt{\frac{HF_1^2 - 1}{1 - DC_1^2}}}{s + |BW_1| \sqrt{\frac{HF_1^2 - 1}{1 - DC_1^2}}} \\ W_r = k_2 \\ W_t = \frac{HF_3 s + DC_3 |BW_3| \sqrt{\frac{HF_3^2 - 1}{1 - DC_3^2}}}{s + |BW_3| \sqrt{\frac{HF_3^2 - 1}{1 - DC_3^2}}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: DC_1 和 DC_3 为直流增益; BW_1 和 BW_3 是穿越频率; HF_1 和 HF_3 是高频增益; k_2 是常数项。

根据 PEMFC 系统对抗干扰性、鲁棒稳定性和鲁棒性能的要求, 该 H_∞ 混合灵敏度设计问题可以表述为如下带不等式约束的优化问题:

$$\begin{cases} \min F \\ \text{s.t. } \bar{\sigma}(\gamma W_s^{-1}) + \bar{\sigma}(\gamma W_t^{-1}) \geq 1 \\ \gamma(W_s, W_r, W_t) < 0.707 \\ \theta_1(W_s, W_r, W_t) > 10 \\ \theta_2(W_s, W_r, W_t) > 30 \\ \theta_3(W_s, W_r, W_t) < 1.3 \end{cases} \quad (19)$$

式中: γ 是次优 H_∞ 范数 (小于 0.707); 性能指标 θ_1 是增益裕度 (大于 10 dB); θ_2 是相角裕度 (大于 30°); θ_3 是超调量 (小于 30%)。此外, 为了防止系统总线电压出现较大波动, 采用 PID 调节使超级电容器的荷电状态保持在工作运行点的 $[-0.05, 0.05]$ 范围

内变化^[3]。

MPSO 算法具体流程如下:

Begin

Step1: 令 $n=0$, 初始化种群中粒子的位置与速度, 设定最大速度 V_{max} 与位置边界 X_{max} , X_{min} , 得到 W_s 、 W_r 和 W_t ;

Step2: 采用 LMI 方法求解式 (11), 构造增广系统 $P(s)$ 寻找次优控制器 $K(s)$, 根据式 (19) 计算每个粒子的适应值, 并据此更新粒子的个体最优位置及它们对应的适应值;

Step3: 将粒子按其个体最优位置从优到劣进行排序;

Step4: 根据式 (12) ~ (14) 对每个粒子计算个体最优位置 p_b 与全局最优位置 p_g ;

Step5: 更新粒子的速度与位置, 并且若 $x_i > X_{max}$, 则 $x_i = 2X_{max} - x_i$, 若 $x_i < X_{min}$, 则 $x_i = 2X_{min} - x_i$;

Step6: 如果满足 E 次迭代, 则根据式 (15) 和 (16) 从粒子群中选取 5% 的较优粒子进行一次 BFGS 拟牛顿法局部搜索, 否则, 转 Step 7;

Step7: $n=n+1$, 如果满足结束条件, 则输出结果; 否则, 转 Step 2;

End

3 动态仿真结果

本文在 Matlab R2009b 环境下, 使用种群大小为 30 的 MPSO 算法对 3 个加权函数进行寻优。同时, 与相同条件下的带收敛因子的粒子群算法 (PSO-cf)^[10] 以及全面学习粒子群算法 (CLPSO)^[11] 的优化结果进行了比较。表 1 为 3 种优化算法的参数优化结果, 表 2 为算法的结果比较。在表 2 中, F_{op} 是 10 次实验中的最优值, F_a 和 F_s 是 10 次实验的平均最优值和标准方差。通过比较可知, MPSO 算法的 F_{op} 、 F_a 和 F_s 优于 PSO-cf 和 CLPSO 算法。

表 1 PSO-cf、CLPSO、MPSO 的参数优化结果

Tab.1 Parameter optimization result of PSO-cf, CLPSO and

算法	MPSO		
	PSO-cf	CLPSO	MPSO
DC ₁	100.004	90.198	90.031
BW ₁	9.958	11.946	11.997
HF ₁	0.186	0.209	0.195
k ₂	0.010	0.007	0.008
DC ₃	0.032	0.014 2	0.018
BW ₃	40.013	49.76 3	48.309
HF ₃	19.995	7.102	28.535

表 2 PSO-cf、CLPSO、MPSO 的算法结果比较

Tab.2 Comparison of the result of PSO-cf, CLPSO and MPSO

算法	进化代数	实验次数	F_{op}	F_a	F_s
PSO-cf	100	10	1.351	1.353	0.001 7
CLPSO	100	10	1.221	1.253	0.015
MPSO	100	10	1.215	1.216	0.001 3

图 3 所示是三种算法搜索到相对最优结果对应的 F_a 收敛曲线。由于是随机地对初始解进行选取，因此进化起始时的 F_a 比较大。然而随着进化代数的增加， F_a 快速地减小，最后逼近到最优解。

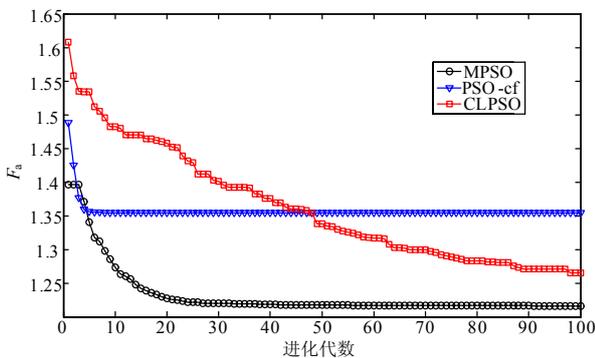


图 3 三种算法的 F_a 收敛过程

Fig.3 F_a convergence processes of the algorithms

为了验证所设计控制系统的抗扰性，图 4 中负载电流 I_{des} 在 100 A 至 230 A 的范围内进行多次突变， I_{dc} 和 I_{fc} 也会产生相应的变化。而 SOC 在控制系统作用下仍能保持在约束范围内，如图 5 所示。

为了比较所设计控制器的优越性，将基于 MPSO 算法的 H_{∞} 次优控制方法、基于 CLPSO 算法的 H_{∞} 次优控制以及文献[2]提出的线性最优二次型 LQR 控制方法分别对混合发电系统的 OER 进行动态仿真。如图 6 所示，基于 MPSO 算法的 H_{∞} 次优控制方法能够较好地维持 OER 在最优值 ($\lambda_{O_2} = 2$) [2] 附近，其他两种控制方法也具有较好的抗干扰

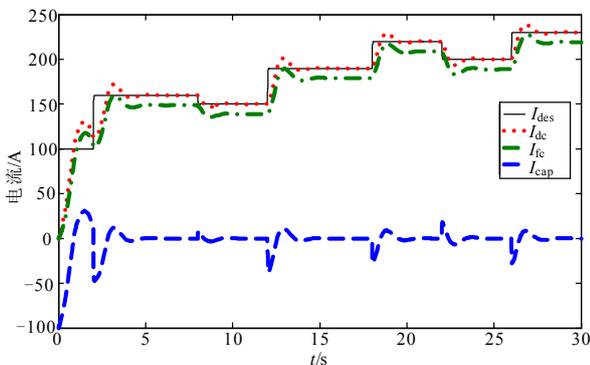


图 4 总线电流变化响应曲线

Fig.4 Response curve of bus current

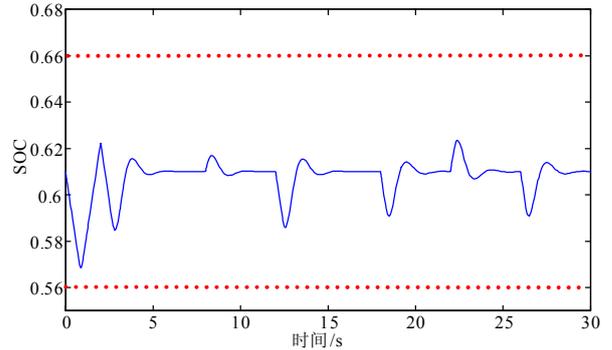


图 5 SOC 变化响应曲线

Fig.5 Response curve of SOC

性。为了进一步验证控制器的鲁棒稳定性，根据文献[12]假设混合系统的空气供应管道相对增湿度、水蒸气饱和压力和质子膜水蒸气扩散系数出现 50% 的参数摄动，同时将环境干扰信号（平均值为 0、方差为 10）加入到系统输入端，将量测噪声信号（平均值为 0、方差为 1）加入到控制器输入端。如图 7 所示，基于 MPSO 算法的 H_{∞} 次优控制方法仍然能够使系统 OER 维持在最优值附近，而其他两种控制方法均较远偏离最优 OER。因此，通过比较证明基于 MPSO 算法的 H_{∞} 次优控制方法具有较好的抗扰性和鲁棒稳定性。

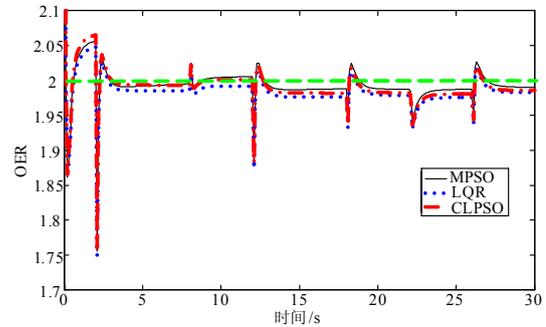


图 6 不同控制方法下的 OER 响应曲线

Fig.6 Response curves of OER under different control methods

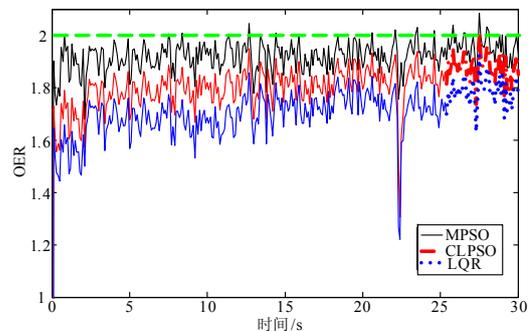


图 7 参数摄动、干扰信号和噪声信号下的 OER 响应曲线

Fig.7 Response curves of OER under parameter perturbation, disturbance and noise signal

4 结论

本文在 Matlab R2009b 环境下, 提出一种基于 MPSO 算法的 H_∞ 次优控制方法, 将加权函数的选取转化成优化问题, 并采用该方法对 PEMFC 混合发电系统的 OER 进行控制。仿真结果证明, 在存在大负载电流变化、参数摄动、环境干扰和量测噪声条件下该方法能够维持系统 OER 在最优值附近, 保证了系统的稳定运行, 验证了所设计控制器的抗扰性和鲁棒稳定性, 同时与其他控制方法比较进一步证明该方法的优越性。

参考文献

- [1] 陈启梅, 翁一武, 翁史烈, 等. 燃料电池-燃气轮机混合发电系统性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (4): 31-35.
CHEN Qi-mei, WENG Yi-wu, WENG Shi-lie, et al. Performance analysis of a hybrid system based on a fuel cell and a gas turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (4): 31-35.
- [2] Pukrushpan J T, Stefanopoulou A G, Peng H. Control of fuel cell breathing[J]. IEEE Trans on Control Systems, 2004, 24 (2): 30-46.
- [3] Ardalan Vahidi, Stefanopoulou A G, Peng H. Current management in a hybrid fuel cell power system: a model-predictive control approach[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2006, 14 (6): 1047-1057.
- [4] 李奇, 陈维荣, 刘述奎, 等. 基于 H_∞ 鲁棒控制的质子交换膜燃料电池空气供应系统设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (5): 109-116.
LI Qi, CHEN Wei-rong, LIU Shu-kui, et al. Proton exchange membrane fuel cell air supply system design based on H_∞ robust control[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (5): 109-116.
- [5] 刘述奎, 陈维荣, 李奇, 等. 基于自适应聚焦粒子群算法的电力系统无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (13): 1-6.
LIU Shu-kui, CHEN Wei-rong, LI Qi, et al. Reactive power optimization in power system based on adaptive focusing particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (13): 1-6.
- [6] Doyle J C, Glover K, Khargonekar P P, et al. State-space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1989, 34 (8): 831-847.
- [7] Iwasaki T, Skelton E. All controllers for the general H_∞ control problem: LMI existence condition and state space formulas[J]. Automatica, 1994, 30 (8): 1307-1317.
- [8] 李奇, 陈维荣, 段涛, 等. 基于随机聚焦粒子群算法的多机系统 PSS 参数优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (13): 13-18.
LI Qi, CHEN Wei-rong, DUAN Tao, et al. Parameter optimization of multi-machine power system stabilizers based on stochastic focusing particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (13): 13-18.
- [9] Liang J J, Suganthan P N. Dynamic multi-swarm particle swarm optimizer with local search[C]. //Proc of IEEE International Congress on Evolutionary Computation. 2005: 522-528.
- [10] Eberhart R C, Shi Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization[C]. //Proc of IEEE International Congress on Evolutionary Computation. 2000: 84-88.
- [11] Liang J J, Qin A K, Suganthan P N, et al. Comprehensive learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal functions[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2006, 10 (3): 67-82.
- [12] Sun Jing, Kolmanovsky I V. Load governor for fuel cell oxygen starvation protection: a robust nonlinear reference governor approach[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2005, 13 (6): 911-920.

收稿日期: 2010-04-12

作者简介:

李奇 (1984-), 男, 博士研究生, 研究方向为鲁棒控制, 燃料电池混合发电系统建模、群体智能优化算法等;
E-mail: liqi0800@gmail.com

陈维荣 (1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为燃料电池混合动力技术、智能信息处理等;

刘述奎 (1984-), 女, 硕士, 研究方向为电力系统无功优化, 进化算法等。