

PEMFC 分布式发电系统动态协调控制仿真

张颖颖, 曹广益, 朱新坚

(上海交通大学 电信学院自动化系 燃料电池研究所, 上海 200030)

摘要: 对为建筑提供热电联供的 60 kW PEMFC 分布式发电系统进行研究, 并根据物质的动态流动和电化学反应过程建立了发电系统模型, 针对系统对发电效率和稳定运行的要求, 以及多参数非线性强动态耦合的特点, 对系统的控制设计不再强调某个参数, 而是着眼于整个系统的协调运行。模拟 15 个家庭一天典型的电能需求进行了系统的动态仿真实验, 实验结果说明, 提出的系统控制方案可行, 工作点的优化搜索能够使系统良好的响应实时负载, 单神经元 PI 解耦控制器则使系统始终在理想的压力和湿度条件下稳定运行。这些将为系统的进一步优化设计和开发应用提供指导。

关键词: 质子交换膜燃料电池(PEMFC); 分布式发电; 动态仿真; 协调控制; 单神经元 PI 解耦控制; 优化搜索

中图分类号: TM911.4

文献标识码: A

符号表

m —质量/kg	W —质量流量/kg $^{\circ}$ s $^{-1}$
N —电池个数	I —电流/A
M —摩尔分子质量/kg $^{\circ}$ mol $^{-1}$	F —法拉第常数
R —气体常数/J $^{\circ}$ (mol $^{\circ}$ K) $^{-1}$	θ , 6.487 $\times 10^4$ C $^{\circ}$ mol $^{-1}$
V —体积/m 3	T —温度/K
n_d —电渗透系数	A —反应面积/m 2
c_{wa} 、 c_{wc} —膜阳极侧和阴极侧的水浓度/mol $^{\circ}$ m $^{-2}$	D_w —扩散系数/m 2 ^{\circ}s $^{-1}$
k_p —水力渗透系数/m 2 ^{\circ}s $^{-1}$	t_m —膜厚度/m
c_f —磺酸根基团浓度/mol $^{\circ}$ m $^{-2}$	μ —水粘度/Pa $^{\circ}$ s
η_{act} —极化电动势/V	E —开路电压/V
σ —内阻率/ Ω^{-1} ^{\circ}m $^{-1}$	η_{ohmic} —欧姆电动势/V
下标	ξ_i —拟和得到的模型参数
an—阳极	in—进入
react—参加反应	mem—穿过质子交换膜
st—电堆	out—排出
gen—产生	

1 引言

近年来, 世界范围内出现的电力紧张、电网故障

以及提出的电力体制改革使分布式发电成为研究热点。其中, 质子交换膜燃料电池(PEMFC)因有高效、洁净等优点, 以及在交通业和小规模分布式发电双重市场的应用潜力而备受关注^[1], 目前已经被列入我国“九五”、“十五”期间重点支持的高新技术。PEMFC 分布式发电系统除电堆本体, 还包括空压机、增湿器、各种阀和泵等辅助设备。系统性能不仅受压力、温度、湿度等参数的影响, 还与负载特性和周围环境有关。因此, 系统要安全、可靠、持久且高性能的运行, 其控制设计十分重要。过去, 有些文献都是仅强调系统某一项或者几项性能参数的控制, 所以往往在为控制而建立的系统模型中忽略或者简化处理了系统的其它过程, 结果使特定参数的控制设计变得相对简单。但是, 实际的 PEMFC 系统是强非线性动态和参数耦合的系统, 前面的研究得到的控制设计应用到实际系统中时, 其可行性和控制结果需要进一步的分析和验证。从系统层次上进行各种性能参数的协调控制设计对发电系统的实际应用更为重要。

本文在国内属首次从系统层次上对 60 kW PEMFC 分布式发电系统进行仿真和控制。笔者将重点放在系统内物质的动态流动和电化学反应过程, 在 MATLAB SIMULINK 环境里实现了 60 kW PEMFC 发电系统的动态模型, 并且设计了系统的协调控制方案, 目的使发电系统实时运行时能够在响应负载功率需求的同时保持理想的运行压力和湿度。最后进行的系统仿真实验通过模拟典型的家庭负载验证了该系统良好的控制运行结果。

2 PEMFC 分布式发电系统的动态建模

2.1 供气系统和排气系统

图 1 为 60 kW PEMFC 分布式发电系统的结构

收稿日期: 2005-04-22; 修订日期: 2005-09-12

基金项目: 国家“863”计划发展基金资助项目(2002AA517020)

作者简介: 张颖颖(1979), 女, 山东东营人, 上海交通大学博士研究生

框图。系统阳极侧，氢气由高压罐存储，一级减压后降为 0.6 MPa，二级减压阀调节氢气流量。减压阀的模型可以简化为导致的压力差与通过的氢气流量之间是平方的函数关系。氢气进入电堆之前由水泵向其注入水实现增湿，增湿器的稳态模型主要根据理想气体状态方程和物理化学原理来描述发生的氢气湿度和流量的变化。在系统阴极侧，空压机将空气送往进气管道，由于供气管道较长，而且管道内空气温度较高，因此需要根据管道内的气体流动性质

计算空气的流量、温度和压力的变化情况。空气在进入电堆之前也要经过增湿，其增湿过程和氢气一样。在建立阴极排气部分的模型时，由排气管道表示从电堆阴极出口到空气降压排空之间的内容，排气管道内的气体流动计算根据喷嘴流量方程。水气分离设备将阴极出口气体所携带的水分离出来送水箱存储，可以简化假设经水气分离后有 90% 的水被回收。

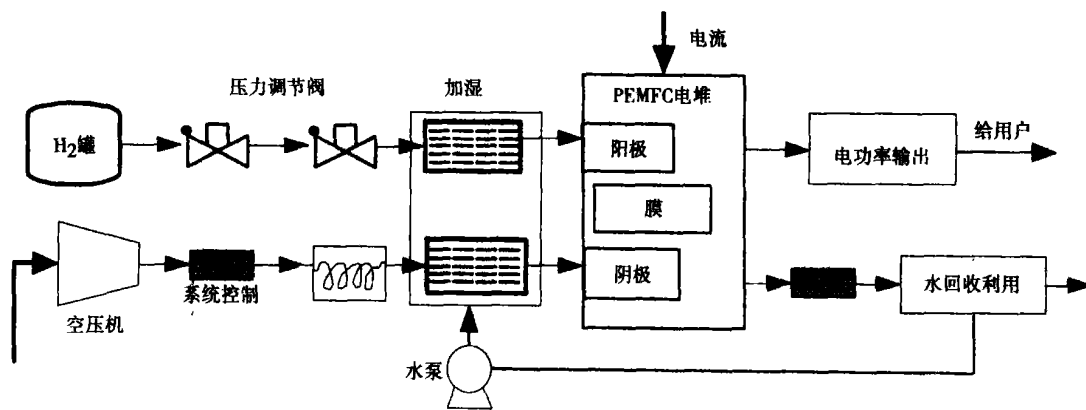


图 1 60 kW PEMFC 分布式发电系统的结构框图

2.2 PEMFC 电堆的阳极和阴极^[4]

氢气在电堆阳极发生氧化反应。根据质量守恒，阳极流道内的氢气和水的质量分别为：

$$\dot{m}_{H_2, an} = W_{H_2, an, in} - W_{H_2, an, react} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{w, an} = W_{v, an, in} - W_{v, an, out} \quad (2)$$

式中：参加反应的氢气量可以根据氧化反应原理求得：

$$W_{H_2, an, react} = M_{H_2} \times n \times I_{st} \quad (3)$$

根据氢气和水的质量可分别求出阳极氢气和水的分压，而总的阳极压力则由氢气分压和水分压组成：

$$P_{an} = P_{H_2, an} + P_{v, an} = \frac{m_{H_2, an} \times R_{H_2} \times T_{st}}{V_{an}} + \frac{m_{w, an} \times R_v \times T_{st}}{V_{an}} \quad (4)$$

阳极湿度为：

$$\phi_{an} = P_{v, an} / P_{sat}(T_{st}) \quad (5)$$

式中的饱和水蒸气压力 P_{sat} 是温度的函数。目前的系统模型重点研究物质的动态流动和电化学反应以及导致的电堆压力和湿度的变化，而电堆温度的动

态特性相对缓慢，且更多的与系统的热管理设计联系在一起，因此可将其作为 PEMFC 系统热电联供时的内容进行独立研究^[4-5]，而本文进行发电系统建模时先简化假设 T_{st} 恒定。

阴极流道的模型结构与阳极相似，不同的是阴极内发生的是氧气的还原反应，有水产生。阴极内氧气、氮气和水的质量分别为：

$$\dot{m}_{O_2, ca} = W_{O_2, ca, in} - W_{O_2, ca, out} - W_{O_2, ca, react} \quad (6)$$

$$\dot{m}_{N_2, ca} = W_{N_2, ca, in} - W_{N_2, ca, out} \quad (7)$$

$$\dot{m}_{w, ca} = W_{v, ca, in} - W_{v, ca, out} + W_{w, ca, gen} + W_{w, ca, mem} \quad (8)$$

同阳极相似，阴极流道内反应消耗的氧气和产生的水，以及导致的阴极压力和湿度的变化规律分别为：

$$W_{O_2, ca, react} = M_{O_2} \times n \times I_{st} \quad (9)$$

$$W_{w, ca, gen} = M_v \times n \times I_{st} \quad (10)$$

$$P_{ca} = P_{O_2, ca} + P_{N_2, ca} + P_{v, ca} = \frac{m_{O_2, ca} \times R_{O_2} \times T_{st}}{V_{ca}} + \frac{m_{N_2, ca} \times R_{N_2} \times T_{st}}{V_{ca}} + \frac{m_{v, ca} \times R_v \times T_{st}}{V_{ca}} \quad (11)$$

$$\phi_{ca} = P_{v, ca} / P_{sat}(T_{st}) \quad (12)$$

2.3 PEMFC 电堆内膜的水合

单独建立模型研究膜的水合性质是为了详细计算膜的含水量 λ 和穿过膜的水流量 $W_{v,mem}$, 这两个参数对电堆阳极、阴极和输出电压的计算都十分重要。根据机理研究, 水在质子膜内有 3 种传递方式: 电迁移、压力迁移和浓差反向扩散。简化认为膜内的压力梯度和水浓度梯度都沿膜的厚度线性变化, 那么穿过膜的水流量为:

$$W_{v,mem} = M_v \times A \times n \times (n_d \frac{I_{st}}{AF} - D_w \frac{c_{wc} - c_{wa}}{t_m} - \frac{k_p}{\mu} \lambda_{cf} \frac{p_{ca} - p_{an}}{t_m}) \quad (13)$$

根据 Nafion 膜的研究结果^[5~9], λ, n_d, D_w, c_w 都可以经验的表示成电堆阳极和阴极湿度的函数关系。

2.4 PEMFC 电堆的电压和功率

大量文献研究了 PEMFC 的电压模型, 有机理的也有经验的方法。而控制要求模型具有合理和简化的特点, 因此本文参考 J. C. Amphlett 提出 GSSEM 的建模方法^[7~8], 并结合一些电池水传输性质的研究结果, 采用机理和经验相结合的方法得到了电堆的输出电压:

$$V_{st} = n \cdot V_{fc} = n(E - \eta_{act} - \eta_{ohmic}) \quad (14)$$

$$E = E^0 + 4.308 \times 10^{-5} T_{st} [\ln(P_{H_2, an} / 101325) + \ln(P_{O_2, ca} / 101325) / 2] \quad (15)$$

$$E^0 = 1.53 - 2.04 \times 10^{-3} \cdot T_{st} + 3.1 \times 10^{-9} \cdot T_{st}^2 + 6.06 \times 10^{-13} \cdot T_{st}^3 + 1.78 \times 10^{-4} \cdot T_{st} \ln(T_{st}) \quad (16)$$

$$\eta_{act} = \xi_1 + \xi_2 T_{st} \ln(c_{O_2}) + \xi_3 T_{st} \ln(A) + \xi_4 T_{st} \ln(CH_2) + \xi_5 T_{st} \ln(I_{st}) + \xi_6 T_{st} \quad (17)$$

$$c_{O_2} = \frac{P_{O_2, ca} / 101325}{5.08 \times 10^6 \exp(-498 / T_{st})} \quad (18)$$

$$c_{H_2} = \frac{P_{H_2, an} / 101325}{1.09 \times 10^6 \exp(77 / T_{st})} \quad (19)$$

$$\eta_{ohm} = \frac{I_{st} \cdot t_m}{A \cdot \sigma_{mem}}, \sigma_{mem} = (0.00514\lambda - 0.00326) \times \exp[1.268(1.603 - 1/T_{st})] \quad (20)$$

式(14)~式(20)将 PEMFC 电堆电压建模为电流、温度、压力、膜的水含量以及部分物理参数的函数, 经实验验证, 该模型能很好的反映 PEMFC 电堆的电压特性。

3 PEMFC 分布式发电系统的协调控制方案

3.1 PEMFC 分布式发电系统的控制目标^[10]

根据系统工作原理, 提高压力有益于提高 PEMFC 电堆的性能, 因此, 系统通常工作在增压条件下以获得更高的系统效率和能量密度。但是, 系统除了电堆本体以外还有很多辅助设备, 如泵、阀和空压机等, 它们直接利用系统产生的电能, 而且压力越高功耗越大。经验表明, 千瓦级 PEMFC 发电系统的最佳工作压力为 0.2~0.3 MPa, 而且通常保持空气侧的压力略高于氢气侧。考虑到质子交换膜的安全性, 膜两侧的气体压力差也不能太大^[10]。所以, 60 kW PEMFC 发电系统的阴极压力设定 0.3 MPa, 阳极压力始终比阴极压力低 0.01 MPa。阳极和阴极流量都保持 100% 的饱和湿度水平, 由阴极排气带出电堆内多余的水。PEMFC 电堆的温度越高性能越好, 但是, Nafion 膜的耐温程度有限, 故电堆工作温度通常低于 90 °C。实验表明, 该系统压力理想时 75 °C 为最佳电堆温度。60 kW PEMFC 发电系统要稳定运行, 就要控制所有操作参数都保持理想的稳定状态, 同时, 为了实现系统效率并满足用户需求, 系统必须良好的跟随负载的功率变化。

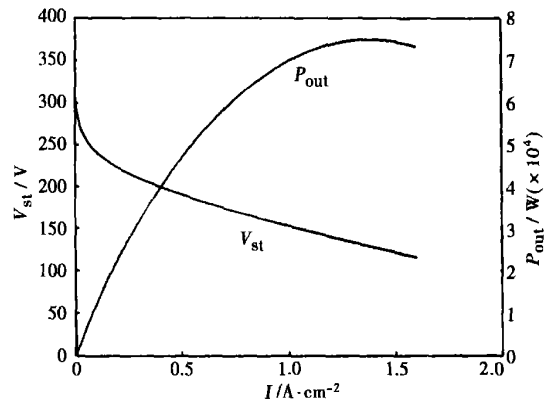


图 2 PEMFC 电堆电压、功率和电流密度的关系曲线

3.2 PEMFC 分布式发电系统的控制设计

通过分析提出的系统控制方案, 对阳极和阴极湿度的稳定控制可以通过调节水泵向增湿器注入的水流量来实现。调节通过二级减压阀的氢气流量控制 PEMFC 电堆的阳极压力, 阴极压力则通过调节空压机出口的空气流量进行控制。60 kW PEMFC 电堆的极化特性决定, 当操作参数一定时, 电堆电压和功率与电流密度之间的关系可由确定的曲线进行描述, 如图 2 所示。因此, 系统要实时响应负载的功率需求, 只需要在确定的功率—电流密度曲线上实时的找到最佳工作点即可, 该过程可通过迭代搜索来

实现。

根据模型分析, 阳极和阴极各自的湿度和压力之间是非线性动态耦合的, 而且, 两个电极之间的压力和湿度由于膜的水传递过程也发生了耦合。因此, 系统的控制设计必须实现必要的解耦功能。同时, 由于发电系统本身的非线性动态特性以及实时负载的扰动影响, 还要求系统控制必须具有自适应能力和抗干扰能力。传统的 PID 控制方法由于算法简单、鲁棒性好和可靠性高, 仍然在实际的工业控制中处于主导地位, 但是对复杂的 PEMFC 发电系统无法实现理想的控制效果, 因此, 决定将带二次型性能指标的单神经元与 PI 控制方法相结合, 使其具有设计要求的自适应和强抗干扰能力^[1]。系统参数的控制方案在图 3 中给出, 由两个二变量单神经元 PI 解耦控制器分别实现两个电极的压力和湿度的稳定控制。

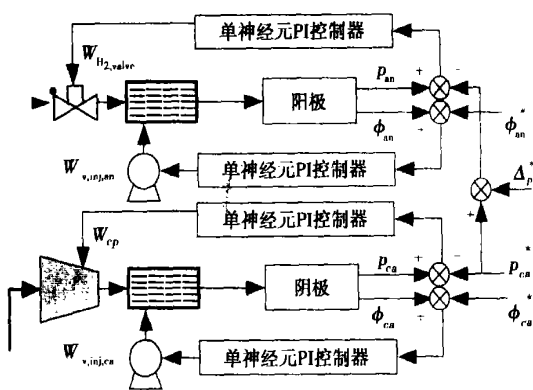


图 3 PEMFC 发电系统的控制设计方案

采用单神经元 PI 控制算法中, 借用了最优控制中二次型性能指标的思想, 通过修改神经元控制器的权系数 w_i , 对控制误差 $e(k)$ 进行约束控制。二次型目标函数取 $J = e^2(k)$ 。加权系数的调整沿着 J 对 w_i 的负梯度方向进行搜索, 经过规范化之后得到的学习算法为:

$$\begin{cases} u(k) = u(k-1) + K \sum_{i=1}^2 w'_i(k) x_i(k) \\ w'_i(k) = w_i(k) / \sum_{i=1}^2 |w_i(k)| \\ w'_i(k) = w_i(k-1) + \eta_i K e(k) x_i(k) \text{sign}\{[e(k) - e(k-1)] / [u(k-1) - u(k-2)]\}, i=1, 2 \end{cases} \quad (21)$$

式中: $\eta_i (i=1, 2)$ —比例和积分的学习速率; K —神经元比例系数。输出 $u(k)$ 调节可调参数, 输入 x_i

(k)为:

$$\begin{cases} x_1(k) = e(k) \\ x_2(k) = e(k) - e(k-1) \end{cases} \quad (22)$$

4 PEMFC 分布式发电系统的仿真控制实验

表 1 60 kW PEMFC 发电系统仿真模型中的参数

T_{st}/K	348.15	V_{an}/m^3	0.005
A/cm^2	600	V_{ca}/m^3	0.01
t_m/cm	0.0175	k_p/m^2	5×10^{-19}
$c_f/mol \cdot m^{-2}$	1.2×10^3	$\mu/Pa \cdot s$	3.565×10^{-4}
n	300		

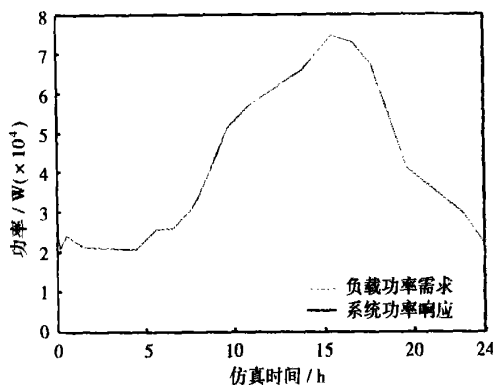


图 4 仿真中的负载功率需求和系统的功率响应

根据模型描述, 在 MATLAB/SIMULINK 环境里以模块化方式实现了 60 kW PEMFC 发电系统的动态模型。系统的主要模型参数见表 1。根据夏季 15 个家庭典型的电需求数据给仿真系统输入一个实时变化的负载(见图 4)。再利用 M-function 模块分别实现图 3 所示的 4 个单神经元 PI 控制器, 并与发电系统连接。根据单神经元的学习规律, w_i 的初始状态随意选择, 对 $\eta_i (i=1, 2)$ 和 K 进行适当调整, 神经元就可以通过自学习对控制误差实现良好的制约。仿真控制实验中, 设定阳极压力控制器的参数分别为 $\eta_1 = 100, \eta_2 = 0.10, K = 1 \times 10^{-6}$, 阳极湿度控制器的参数设定 $\eta_1 = 100, \eta_2 = 0.10, K = 3 \times 10^{-5}$, 阴极压力控制器的参数为 $\eta_1 = 1 \times 10^5, \eta_2 = 0.01, K = 1 \times 10^{-5}$, 阴极湿度控制器的参数分别设定 $\eta_1 = 100, \eta_2 = 0.10, K = 3$ 。系统工作点采用等步长迭代搜索方法, 搜索步长为 1×10^{-4} 。图 4 给出了 60 kW PEMFC 发电系统一天内的功率输出结果, 可以看到, 尽管负载的功率需求实时变化, 但是该系统

仍然能够良好地响应负载需求。图 5 ~ 图 9 则给出了系统运行时各种操作参数的控制结果。在系统的协调控制作用下, PEMFC 电堆的阴极压力始终稳定的保持在 0.3 MPa 水平, 阳极压力也稳定地保持与阴极压力之间 0.01 MPa 的压力差, 阳极和阴极的相对湿度都基本上保持在 100% 饱和的理想水平, 压力和湿度控制的误差都很小。阴极增湿注入的水流量始终为零, 则是由于系统初始运行时阴极湿度已经饱和的结果。

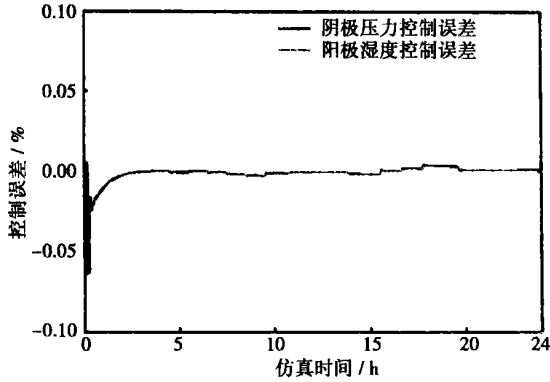


图 5 阴极和阳极压力的仿真控制结果

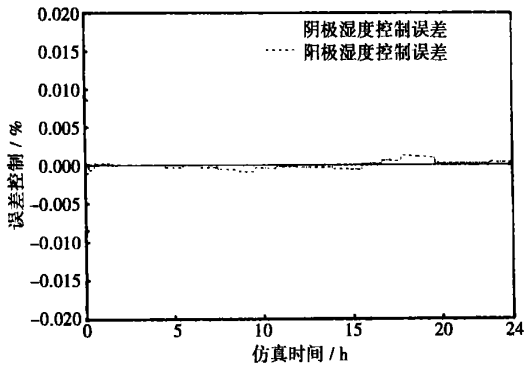


图 6 阴极和阳极湿度的仿真控制结果

5 结 论

60 kW PEMFC 分布式发电系统为建筑提供所需要的电能。本文属国内首次对整个发电系统进行了动态建模, 并提出了系统完整的协调控制方案。针对系统的强非线性动态和多参数耦合的特性, 以及系统负载实时变化的功率需求特点, 采用带二次型性能指标的单神经元 PI 解耦控制方法分别对电堆阳极和阴极的压力、湿度进行稳定控制, 同时采用等

步长迭代方法优化搜索系统的最佳工作点, 使发电系统实时响应负载的功率需求。系统的控制仿真实验结果说明, 提出的系统协调控制方案合理可行。这将有助于 PEMFC 分布式发电系统的进一步优化设计和发电系统的研制。

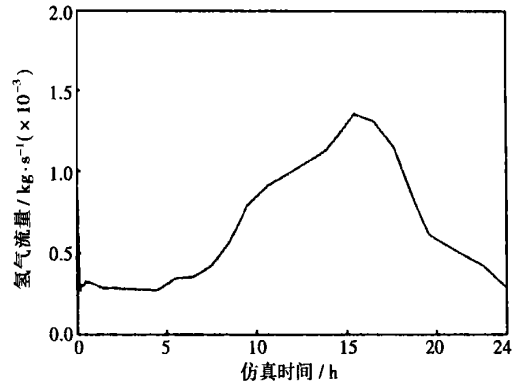


图 7 系统实时运行时通过减压阀的氢气流量

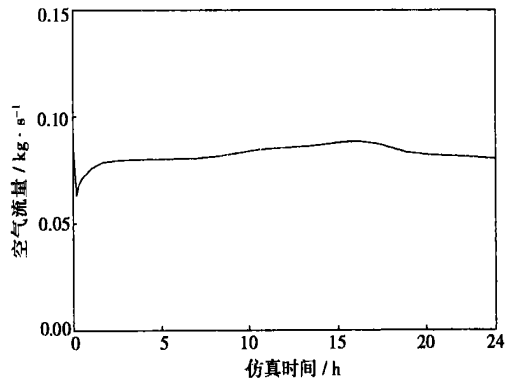


图 8 系统实时运行时空压机出口的空气流量

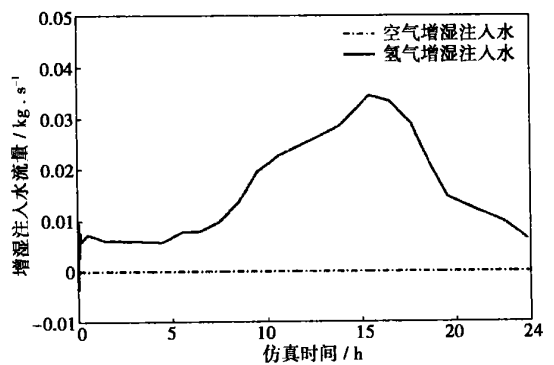


图 9 系统实时运行时反应气体增湿的水流量

(下转第 95 页)

FGD 装置经济性是可行的。

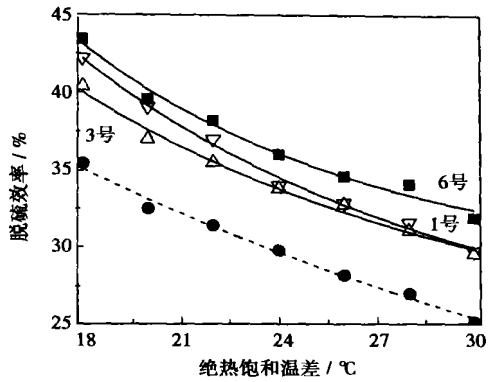


图 5 6 号在半干式喷雾干燥脱硫工艺中的应用

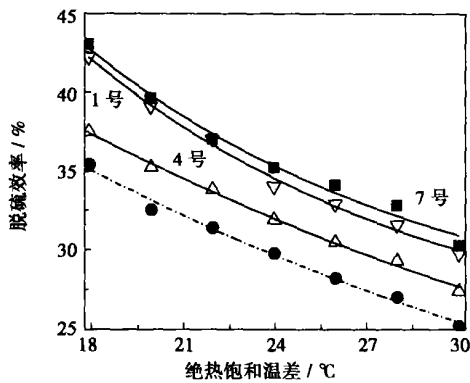


图 6 7 号在半干式喷雾干燥脱硫工艺中的应用

(2) 复合添加剂进一步提高脱硫效率的机理与

成份间的协同作用有关, 其效果很大程度上取决于其成份。本文中由己二酸和 NaCl 组成的复合添加剂效果最好 (见表 1)。同时它们价格便宜、易于获得、使用方便, 可以广泛应用于 FGD 装置, 取得可观的经济效益。

(3) 复合添加剂效果与采用的脱硫工艺及操作条件也有关, 应结合实际情况使用。

注: 由于保密原因, 本文不公开复合添加剂成份的配比。

参考文献:

- [1] 王乃华, 高翔, 王庆东, 等. 浆液组分添加剂对喷雾干燥烟气脱硫性能影响的研究[J]. 动力工程, 2001, 21(3): 1280-1284.
- [2] 吴忠标, 余世清, 莫建松. 己二酸强化石灰石浆液脱硫工艺过程研究[J]. 高校化学工程学报, 2003, 17(5): 540-544.
- [3] ROCHELLE G T, KING C J. The effect of additives on mass transfer in CaCO_3 or CaO slurry scrubbing of SO_2 from waste gases[J]. *Ind Eng Chem Fundam* 1977, 16(1): 67-75.
- [4] FREY D D, KING C J. Effects of surfactants on mass transfer during spray drying[J]. *AIChE Journal* 1986, 32(3): 437-443.
- [5] 石发恩, 李振坦. 石灰湿式烟气脱硫中复合添加剂的研究[J]. 四川有色金属, 2003(3): 27-29.
- [6] 孙文寿. 添加剂强化石灰石/石灰湿式烟气脱硫研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- [7] 陈志强. 文丘里洗涤器内石灰石法烟气脱硫技术及其添加剂的理论及实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2001.
- [8] 王凤东. 喷雾干燥法烟气脱硫技术理论与实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2001.

(辉 编辑)

(上接第 79 页)

参考文献:

- [1] ROBERT J BRAUN, SANFORD A KLEIN, DOUGLAS T REINDL. Review of state-of-the-art fuel cell technologies for distributed generation—a technical and marketing analysis[R]. Madison: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2000.
- [2] 卫东, 曹广益, 朱新坚. 基于一种改进自适应模糊神经技术的 PEMFC 系统建模和控制[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(9): 1581-1586.
- [3] 李果, 毋茂盛, 余达太. 燃料电池输出功率的预测控制[J]. 电源技术, 2004, 28(6): 348-350.
- [4] JAY T PUKRUSHPAN, HUEI PENG, AANNA G STEFANOPOULOU. Modeling and control of fuel cell systems and fuel processors[D]. USA: University of Michigan, 2003.
- [5] DUTTA S, SHIMPALEE S, VAN ZEE J W. Numerical prediction of mass-exchange between cathode and anode channels in a PEM fuel cell [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, 44(1): 2029-2042.
- [6] 葛善海, 衣宝廉, 徐宏峰. 质子交换膜燃料电池水传递模型[J]. 化工学报, 1999, 50(1): 39-48.
- [7] AMHLETT J C, BAUMERT R M, HARRIS T J, et al. Performance modeling of the ballard mark IV solid polymer electrolyte fuel cell[J]. *J Electrochem Soc* 1995 142(1): 1-8.
- [8] AMHLETT J C, BAUMERT R M, HARRIS T J, et al. Performance modeling of the ballard mark IV solid polymer electrolyte fuel cell[J]. *J Electrochem Soc* 1995 142(1): 9-15.
- [9] JAMES LARMINIE, ANDREW DICKS. Fuel cell systems explained [M]. England: John Wiley, 2002.
- [10] 马捷, 张忠利, 苏秋利, 等. 质子交换膜燃料电池膜内水迁移和水管理[J]. 华北电力大学学报, 2004, 31(1): 61-65.
- [11] 张世杰, 曹喜滨. 基于单神经元自适应 PID 控制的航天器大角度姿态机动[J]. 上海航天, 2003(6): 9-14.

(辉 编辑)

sults. In view of the above, the shock wave analysis based on the two-phase flow sonic velocity model is more suited for general applications. **Key words:** gas-solid two phase flow, sonic velocity, shock wave

湿法烟气脱硫旋流喷嘴雾化特性研究 = A Study of the Atomization Characteristics of Swirl Spray Nozzles Used in a Wet-process Flue-gas Desulfurization Unit [刊, 汉] / LI Zhao-dong, WANG Shi-he (Department of Municipal Construction Engineering, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096), WANG Xiao-ming (Guodian Environmental Protection Research Institute, Nanjing, China, Post Code: 210031) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 66 ~ 69

Atomization spray nozzles are key components in a wet-process flue-gas desulfurization sprinkling tower. The quality of atomization can directly affect desulfurization efficiency and the utilization rate of a desulfurization agent. Tests were conducted with the hollow cone-shaped and eccentric swirl nozzle often used in wet-process flue-gas desulfurization technology serving as an object of investigation. Developed were a series of geometrically similar spray nozzles and also those with a change only in outlet diameters. A systematic study was performed of the above-mentioned nozzle as regards the following characteristics: volumetric flow rate, atomization particle diameter, atomization angle, and atomization particle distribution, etc. From the tests a set of rules or laws governing the following factors were obtained: the variation of volumetric flow rate with a change in pressure and spray nozzle structure, the variation of atomization particle diameter with a change in pressure, flow rate and spray nozzle structure, the variation of atomization angle with a change in pressure, etc. Average-diameter span was used to indicate the dispersion degree for judging the distribution of atomization particles. Identified was a variation law governing a decrease in average diameter span with an increase in outlet diameter. **Key words:** wet-process flue gas desulfurization, swirl nozzle, atomization characteristics

新型下排气旋风分离器的流场和性能数值模拟 = Numerical Simulation of the Flow Field and Performance of an Innovative Cyclone Separator with a Downward Discharge of Gases [刊, 汉] / HUANG Sheng-zhu (Department of Thermal Energy & Power Engineering, Harbin Institute of Technology, Weihai, Shandong Province, China, Post Code: 264209), ZHU Lin (Weihai Boiler Works, Weihai, Shandong Province, China, Post Code: 264200), MA Chun-yuan (Institute of Energy and Power Engineering under the Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061), WU Shao-hua (Department of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 70 ~ 74

By employing a RNG (Renormalization Group) $k-\epsilon$ turbulent flow model, RSM (Reynolds Stress model) turbulent flow model and a Lagrangian model in a CFD (computational fluid dynamics) software - Fluent a numerical simulation was carried out for the gas-phase flow field and separation efficiency of an innovative cyclone separator with a downward discharge of gases. The cyclone separator features an improved construction with its two sides cut at the inside and outside. An analysis of its specific features and separation performance shows that the gas flow of the cyclone separator has generated three branch flows, namely, an apex vortex ring flow, a flow characterized by a direct entry into an exhaust pipe, and a flow, which after rotating at the outer wall makes its way downward to come to a conic surface, and then turns back to flow upward. The composite vortex structure of a tangential velocity distribution appears to be not distinct. The graded efficiency and pressure losses at different outlet velocities, obtained by simulations, can be used as a practical reference during the engineering design and type selection of cyclone separators. **Key words:** cyclone separator, flow field, RNG (renormalization group) $k-\epsilon$ turbulent flow model, RSM (Reynolds stress model) turbulent model, numerical simulation

PEMFC 分布式发电系统动态协调控制仿真 = Dynamic Simulation of Coordinated Control of PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) Distributed Power Generation System [刊, 汉] / ZHANG Ying-ying, CAO Guang-yi, ZHU Xin-jian (Automation Department of Fuel Cell Research Institute under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 75 ~ 79, 95

A study has been conducted for a 60 kW PEMFC (proton exchange membrane fuel cell) distributed power generation system, which provides electricity and heat energy for architectural buildings. A power generation system model was established based on the dynamic flow of masses and an electrochemical reaction process. To meet the requirements of the system for power generation efficiency and stable operation and to take into account the specific features of multi-parameter nonlinear and firm dynamic coupling, during the control design of the system, one will no longer focus on a specific parameter, but pay close attention to the coordinated operation of the system as a whole. Through the simulation of the typical power demand of fifteen families in a day a dynamic simulation test was performed of the system. The results of the test indicate that the proposed control scheme for the system is feasible and an optimal search of the working points enables the system to response adequately to a real-time loading. Moreover, single neuron-element PI decoupling controllers can at all times ensure a stable operation of the system under ideal pressures and humidity conditions. All the above can serve as a guide for the further design optimization of the system as well as for its development and applications. **Key words:** proton exchange membrane fuel cell (PEMFC), distributed power generation, dynamic simulation, coordinated control, single neuron PI decoupling control, optimal search

基于遗传算法的机炉协调系统 PID 控制器优化 = **Optimization of PID Controllers of a Boiler-turbine Coordinated Control System Based on a Genetic Algorithm** [刊, 汉] /XUE Ya-li, LI Dong-hai, LU Chong-de (Key Laboratory on Electric System and Power Generation Equipment Control and Simulation Affiliated to the Thermal Energy Engineering Department under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 80 ~ 83, 87

The design of an effective boiler-turbine coordinated control system is of major significance for enhancing the thermotechnical automation level of power plants. With respect to the boiler-turbine control system of a thermal power plant the authors have proposed a parameter optimization method for a genetic algorithm-based multivariable PID controller. By utilizing the general-use framework provided by a genetic algorithm a global optimization of the control parameters was conducted under a specified control system structure and controller format. The proposed method features a global-parallel optimization and is target-function oriented. A simulation study carried out by comparing with a generalized ZN setting method has shown that the dynamic performance of the coordinated control system after optimization has been markedly improved. Moreover, it can be easily extended to parameter optimization under other control schemes, displaying the feasibility and usability of the method under discussion. **Key words:** genetic algorithm, PID controller, boiler-turbine coordinated control

一种协调控制系统参数的鲁棒整定方法 = **A Robust Tuning Method for the Parameters of a Coordinated Control System** [刊, 汉] /TIAN Liang, LIU Xin-ping, YU Xi-rong, et al (Automation Department, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 84 ~ 87

After the linearization of a simplified nonlinear dynamic model for a 330 MW unit a robust controller was designed by utilizing a loop-shaping H_∞ method. Through a search optimization by using a genetic algorithm it has been found that robust controllers with better performance indexes are distributed within a specific space. The robust controller was decomposed into a control matrix and decoupling matrix. The principle of its decoupling was found to be as follows: in case of disturbances occurring at the governing valve of a steam turbine it is necessary to supply additional fuel to the boiler as rapidly as possible and avoid overshoot of the throttle pressure ahead of the turbine. In compliance with this principle a simple single-direction decoupling is designed and the PID controller is tuned using a relevant engineering method. The transfer function of the PID controller is very similar to that of the low-order item of a robust controller. Simulation experiments have demonstrated that the coordinated control system designed by using the above method possesses relatively good dynamic characteristics and robustness. **Key words:** coordinated control system, robustness, PID control, parameter tuning

基于模糊理论的黑体炉系统故障诊断的设计及实现 = **Design and Realization of Fault Diagnosis for a Black-**