

# 基于遗传算法的机炉协调系统 PID 控制器优化

薛亚丽, 李东海, 吕崇德

(清华大学热能工程系 电力系统及发电设备控制和仿真重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 设计有效的机炉协调控制系统对提高热工自动化水平具有重要意义。针对火电机组的机炉控制系统, 提出了一种基于遗传算法的多变量 PID 控制器参数优化方法。利用遗传算法提供的通用框架, 在控制系统结构和控制器形式确定的情况下对控制参数进行全局优化。方法具有全局并行优化和面向目标函数的特点, 与广义 ZN 整定方法相比的仿真研究表明, 优化后的协调控制系统的动态性能有明显改善, 并且容易扩展到其它控制方案下的参数优化, 显示了方法的可行性和适用性。

**关 键 词:** 遗传算法; PID 控制器; 机炉协调

中图分类号: TK323 文献标识码: A

## 1 前 言

设计有效的火电机组机炉协调控制系统是提高热工自动化水平和实现电网自动发电控制的关键。协调控制系统是一个具有慢时变、非线性、不确定性和强耦合的多变量复杂系统, 其控制系统的设计随着人们对单元机组的认识和控制理论的发展而不断深入。除了以常规的 PID 控制器实现的协调控制方法外, 还出现了各种先进控制方法, 如模糊控制和神经元控制、预测控制、鲁棒控制、多变量频率域控制、反馈线性化方法和自抗扰控制等<sup>[1~3]</sup>。但是, 这些方法的复杂性限制了其现场应用。在我国现有的热工过程控制中, PID 控制仍占 90% 以上, 即使在目前较为先进的分散控制系统 DCS 中也采用常规 PID 作为基本控制策略, 因此研究协调控制系统中 PID 控制器的优化设计, 对提高机组的运行水平具有重要的现实意义。

多数协调控制系统在进行简单的预补偿后, 按照单回路控制器设计方法进行参数整定<sup>[4]</sup>, 忽略了耦合对其它回路的影响; 而且传统的 PID 控制器整定方法只适用于低阶有理传递函数对象, 即使获得

较为准确的数学模型, 很多 PID 并没有得到很好的整定。本文基于最佳保持策略的遗传算法, 提出了一种通用的多变量 PID 控制器优化整定方法, 具有全局并行优化能力和直接面向目标函数的特点。对某机炉协调控制系统的优化结果表明, 相对于传统的 ZN 整定方法, 本文方法的控制效果有明显改善, 并且容易扩展到其它控制方案下的参数优化, 显示了方法的可行性和通用性。

## 2 协调控制系统的特性和要求

在锅炉燃烧正常、给水正常和发电机励磁系统正常工作的前提下, 锅炉—汽轮机系统可在给定的工况点下简化为一个具有强耦合的双输入双输出系统:

$$\begin{bmatrix} N_E \\ P_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu \\ n \end{bmatrix}$$

其中:  $N_E$ —机组电功率;  $P_T$ —机前压力;  $\mu$ —汽机调门开度指令;  $n$ —给煤机转速的给定值。

为了保证机炉系统能够快速响应电网负荷的需要, 同时维持机组的主要运行参数稳定在允许的范围内, 对机炉协调控制系统提出如下要求: (1) 在稳定负荷时, 能够消除由锅炉侧内部扰动引起的机前压力和机组功率的波动; (2) 在机组负荷指令变化时, 能够使机组输出功率快速适应负荷要求, 同时必须保证机前压力尽可能不变, 或至少变化不超出允许范围。

根据长期运行实践经验总结出的一些协调控制方案, 如直接能量平衡法、炉膛辐射能信号超前控制和柔性控制等, 这些方法都面临着参数整定的问题。此时, 对于既定的控制策略, 协调控制系统优化设计的任务是恰当选择控制器参数, 使得机组能迅速适

收稿日期: 2005-03-21; 修订日期: 2005-05-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50376029)

作者简介: 薛亚丽(1975-), 女, 河北冀城人, 清华大学博士后。

应电网负荷变化的要求, 同时保证机前压力的变化不超出允许的范围。

本文以一种单向解耦的机炉协调控制结构为例进行其参数优化, 方法同样适用于其它控制方案的参数优化问题。

### 3 基于遗传算法的控制参数优化

遗传算法是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化概率搜索算法, 以“生成—检验”的方式进行多点并行搜索以达到优化的目的。遗传算法只需利用目标函数的数值信息, 既不需要目标函数和优化参数间显式的函数关系, 也不限制目标函数具有线性、连续、可微的特性, 因此容易和控制领域中的优化问题相结合, 从而显示出良好的适应性和通用性。

在图 1 所示的协调控制系统中,  $R$  是设定值,  $U$  是控制量,  $Y$  是控制输出,  $G(s)$  是机炉对象的传递函数, CCS

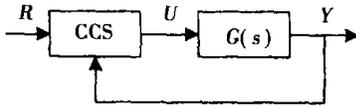


图 1 控制系统结构图

表示协调控制器。多变量耦合的影响使得控制器参数的整定非常繁琐, 具有全局收敛和并行优化能力的遗传算法成为解决这一问题的有力工具。

采用具有最佳保持策略的实数编码遗传算法进行多变量 PID 的参数优化。对于确定的控制结构, 首先将待优化参数进行实数编码, 构成进化种群中的一个个体; 然后在搜索空间内随机生成一定数量的个体构成初始种群, 并进行选择、交叉和变异运算, 生成新的种群。种群不断进化直至最终获得最优解  $X^*$ 。种群的评价通过对控制系统进行特定的扰动, 按照目标函数的定义计算得到。算法操作步骤见图 2, 其中虚线框内是遗传算法的优化过程。

在应用遗传算法进行控制参数优化时, 目标函数和扰动方式的定义因问题而宜。本文以直观的动态约束函数指标作为约束惩罚条件<sup>[5]</sup>, 不满足约束的解在以后的进化过程中将会很快被淘汰; 以误差

积分指标作为在众多非劣解中优选的依据, 两类指标共同作用给出评价函数的值, 即对于第  $i$  种扰动下的系统第  $j$  个输出  $y_{ij}(t)$ , 其相对于设定值的误差积分值为  $E_{ij}$ , 则目标函数按下式计算:

$$J_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} w_{ij} E_{ij}$$

其中, 惩罚系数  $w_{ij}$  经由动态约束函数  $F(t)$  确定:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1 & y_{ij}(t) \in F(t) \\ 100 & y_{ij}(t) \notin F(t) \end{cases}$$

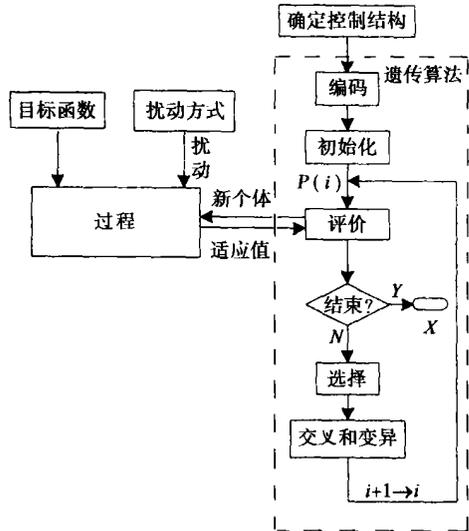


图 2 遗传算法进行控制参数优化的流程图

本文的遗传算程序在 Matlab 环境下的遗传算法工具箱 GAOT 的基础上修改而成<sup>[9]</sup>, 并结合了最佳保持策略, 即上代产生的最佳个体不经任何操作直接进入下一代, 替换到下一代中的最差个体。这种具有最佳保持策略的遗传算法是全局收敛的。

### 4 机炉协调控制系统的优化

以文献[7]中的 300 WM 燃煤低循环倍率再热机组的机炉协调系统为例说明本文方法的有效性。根据对多台大型燃煤机组动态特性的研究以及动态特性实验的结果, 辨识得到了 210 MW 和 270 MW 两个典型工况下的线性化模型<sup>[7-8]</sup>。

210 MW 负荷下的线性化模型为:

$$g_{1.1}(s) = \frac{4.565 \times 10^6 s^3 + 4.795 \times 10^4 s^2 + 1.214 \times 10^2 s}{2.162 \times 10^9 s^5 + 4.955 \times 10^8 s^4 + 1.330 \times 10^7 s^3 + 1.371 \times 10^5 s^2 + 6.150 \times 10^2 s + 1}$$

$$g_{1.2}(s) = \frac{8.165 \times 10^4 s^3 + 1.768 \times 10^4 s^2 + 3.124 \times 10^2 s + 1.420}{2.162 \times 10^9 s^5 + 4.955 \times 10^8 s^4 + 1.330 \times 10^7 s^3 + 1.371 \times 10^5 s^2 + 6.150 \times 10^2 s + 1} e^{-135s}$$

$$g_{2.1}(s) = \frac{-2.041 \times 10^7 s^4 - 7.570 \times 10^5 s^3 - 3.350 \times 10^4 s^2 - 3.157 \times 10^2 s - 0.8}{5.741 \times 10^9 s^5 + 7.852 \times 10^8 s^4 + 1.777 \times 10^7 s^3 + 1.616 \times 10^5 s^2 + 6.590 \times 10^2 s + 1}$$

$$g_{2.2}(s) = \frac{2.569 \times 10^5 s^3 + 3.228 \times 10^4 s^2 + 4.288 \times 10^2 s + 1.510}{5.741 \times 10^9 s^5 + 7.852 \times 10^8 s^4 + 1.777 \times 10^7 s^3 + 1.616 \times 10^5 s^2 + 6.590 \times 10^2 s + 1} e^{-135s}$$

270 MW 负荷下的线性化模型为:

$$g_{1.1}(s) = \frac{4.308 \times 10^6 s^3 + 5.688 \times 10^4 s^2 + 1.865 \times 10^2 s}{8.836 \times 10^8 s^5 + 2.086 \times 10^8 s^4 + 6.796 \times 10^6 s^3 + 8.653 \times 10^4 s^2 + 4.850 \times 10^2 s + 1}$$

$$g_{1.2}(s) = \frac{6.082 \times 10^4 s^3 + 1.355 \times 10^4 s^2 + 2.862 \times 10^2 s + 1.590}{8.836 \times 10^8 s^5 + 2.086 \times 10^8 s^4 + 6.796 \times 10^6 s^3 + 8.653 \times 10^4 s^2 + 4.850 \times 10^2 s + 1} e^{-95s}$$

$$g_{2.1}(s) = \frac{-3.488 \times 10^7 s^4 - 1.317 \times 10^6 s^3 - 4.306 \times 10^4 s^2 - 4.481 \times 10^2 s - 1.384}{2.683 \times 10^9 s^5 + 3.804 \times 10^8 s^4 + 1.009 \times 10^7 s^3 + 1.095 \times 10^5 s^2 + 5.390 \times 10^2 s + 1}$$

$$g_{2.2}(s) = \frac{2.074 \times 10^5 s^3 + 2.658 \times 10^4 s^2 + 4.075 \times 10^2 s + 1.670}{2.683 \times 10^9 s^5 + 3.804 \times 10^8 s^4 + 1.009 \times 10^7 s^3 + 1.095 \times 10^5 s^2 + 5.390 \times 10^2 s + 1} e^{-95s}$$

由于燃料侧扰动  $n$  到功率  $N_E$  和机前压力  $P_T$  这两个通道的动态特性比较接近, 因此采用比例解耦器  $K$  (见图 3) 以获得单向近似解耦的效果。控制系统采用与文献 [7] 相同的结构。

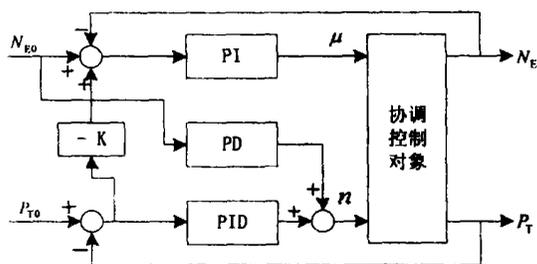


图 3 协调控制系统示意图

以下根据 270 MW 的线性模型进行多变量 PID 控制器的优化设计, 然后用 210 MW 的线性模型检验控制系统的鲁棒性。

在 270 MW 负荷下, 计算静态解耦比例系数为  $K=0.952$ 。参考第 2 节所述的控制要求, 采用功率设定值扰动和给煤侧扰动作为激励信号, 优化指标是两种扰动分别发生时, 功率和机前压力的 IAE 指标“加权”。动态约束函数  $F(t)$  定义为: 设定值阶跃响应的超调量小于 10%, 扰动响应的幅值小于 20%。每代种群由 100 个个体组成, 个体结构如下:

$$k_{p1}, k_{i1}, k_{p2}, k_{i2}, k_{d2}, k_{p12}, k_{d12}$$

PI                      PID                      PD

进化 100 代后得到 PID 控制器 (以下称 GA-PID) 参数如下 (其中的理想微分在实现时以实际微分代替):

$$K_{p1} = (8.6934s + 0.09557) / s$$

$$K_{PID} = (134.47s^2 + 1.7761s + 0.0069698) / s$$

$$K_{PD} = 0.59433 + 55.427s$$

以下分别针对 270 MW 和 210 MW 两个工况进行动态响应测试, 并与文献 [7] 中用广义 ZN 方法整定的控制器 (以下简称 ZN-PID) 进行对比。

#### 4.1 功率阶跃响应测试

功率  $N_E$  设定值单位阶跃响应见图 4。由图中可以看出, 采用遗传算法优化的 PID 控制器 (GA-PID) 比广义 ZN 方法 (ZN-PID) 整定的控制器能更快地跟踪功率的要求; 机前压力的波动范围相差不大, 但是 GA-PID 的过渡过程明显更快。

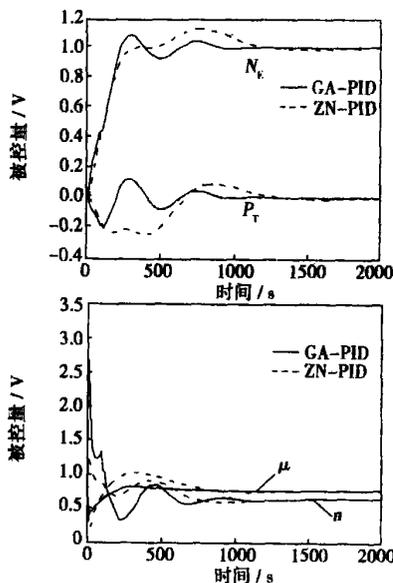


图 4  $N_E$  设定值单位阶跃响应曲线

#### 4.2 给煤机转速 $n$ 发生扰动的实验

给煤机转速  $n$  发生幅值为 0.3 的阶跃扰动, 系统输出见图 5。此时, 功率和机前压力的响应非常接近, GA-PID 控制下两者的变化幅度均小于 ZN-PID 控制。

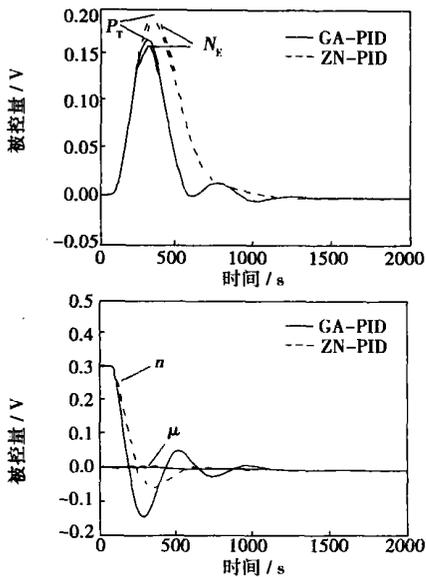


图 5 给煤机转速发生 0.3 阶跃扰动的响应曲线

### 4.3 鲁棒性试验

将所设计的控制器用到 210 MW 负荷模型上, 分别进行  $N_E$  阶跃扰动测试和给煤转速设定值  $n$  的扰动测试, 结果见图 6。GA-PID 控制品质与 270 MW 相比略有下降, 但仍具有一定的鲁棒性; 功率和机前压力的动态响应仍明显优于 ZN-PID, 表现为功率跟踪更平稳迅速, 抗扰动能更好。

以上各种测试下的 IAE 指标值见表 1。从数值上看, 经过优化的 GA-PID 控制对应的指标值明显小于 ZN-PID 整定的控制系统。

表 1 各回路 IAE 指标比较

方法	$N_E$ 单位阶跃		$n$ 阶跃 0.3		SUM
	IAE( $N_E$ )	IAE( $P_T$ )	IAE( $N_E$ )	IAE( $P_T$ )	
270 MW					
GA-PID	140.33	60.877	43.094	45.252	289.55
ZN-PID	181.21	150.42	64.963	68.341	464.93
210 MW					
GA-PID	224.72	125.85	78.893	82.663	512.13
ZN-PID	387.57	359.98	88.806	90.064	926.42

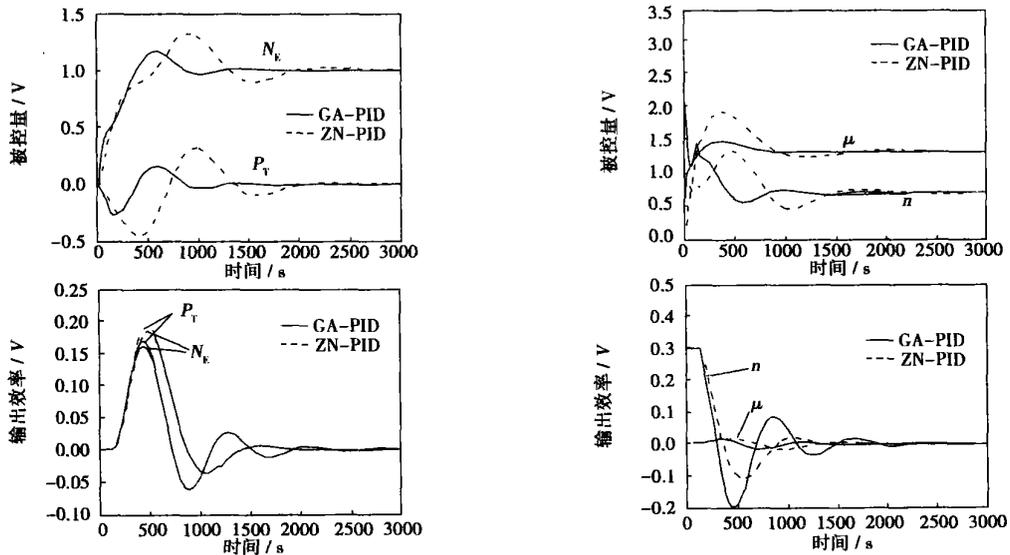


图 6 210 MW 负荷下的动态响应

## 5 结论

针对机炉协调系统, 提出一种基于遗传算法的多变量 PID 控制器参数全局优化方法, 并以某 300 MW 火电机组为例, 对其控制参数进行优化。与传统的 ZN 整定方法相比, 在控制品质上有明显改善。

本文方法的主要特点是: (1)在现有控制结构的基础上, 对基本控制单元 PID 控制器参数进行优化, 以期获得更好的整定, 无需对现场控制结构进行改造。(2)直接针对目标函数进行优化, 原则上不受被控对象特性和表达形式的限制。(3)优化中同时考虑了

(下转第 87 页)

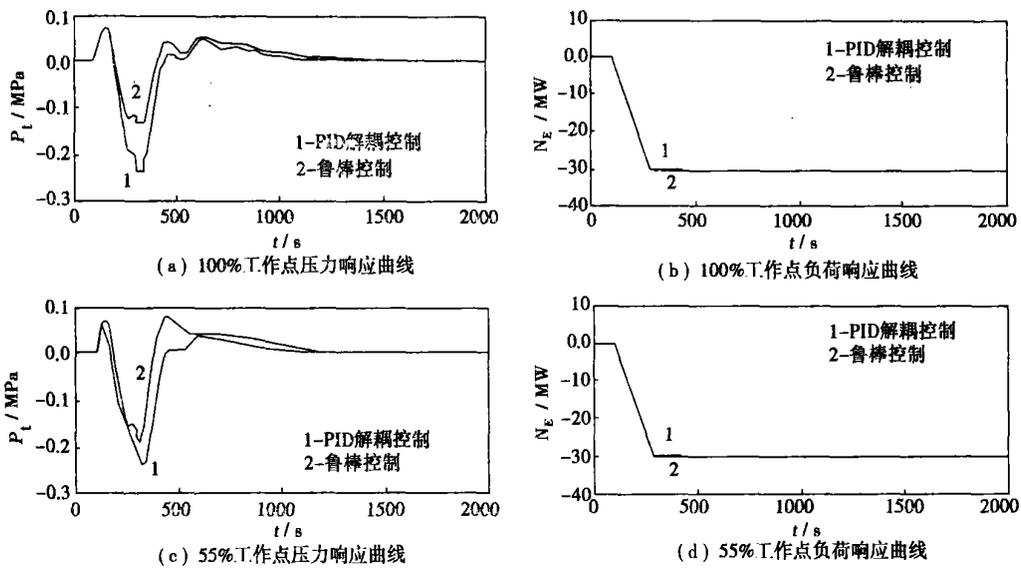


图 3 负荷扰动仿真实验

## 6 结束语

本文研究了某 330 MW 机组非线性模型, 并求取了其工作点线性化传递函数, 然后在其 100% 负荷—压力工作点设计了鲁棒控制器。通过对鲁棒控制器进行简化, 发现其解耦原则接近机对炉的单向解耦, 据此原则简单的单向解耦 PID 控制器, 并用工程方法整定参数, 得到最优的 PID 控制器同鲁棒控制器降阶后两者传递函数非常近似。通过仿真实验比较不同工作点下负荷扰动的响应曲线, 证明了采用此方法得到的 PID 控制器是鲁棒的。这样的协调控制系统设计方法和参数整定方法具有物理意义明

确, 便于工程实用的优点, 类似的协调控制系统已经在日本 Chita 电站 700 MW 机组中获得应用。

### 参考文献:

- [1] 吴国垣, 李东海, 薛亚丽. 机炉协调控制的分散 PID 整定[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(2): 262-265.
- [2] 于达仁, 翁一武, 王仲奇. 火电单元机组的柔性控制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 129-133.
- [3] 田 亮, 曾德良, 刘吉臻, 等. 简化的 330 MW 机组非线性动态模型. 中国电机工程学报, 2004 24(8): 180-184
- [4] TANWEN. Robust control for an non linear boiler-turbine system[J]. *Control Theory And Applications* 1999(6): 863-867.
- [5] 于达仁, 徐志强, 翁一武, 等. DEB 的新认识—增益调度控制[J]. 热能动力工程, 1999 14(5): 379-381.

(辉 编辑)

(上接第 83 页)

设定值响应和干扰响应, 区别于传统整定方法的单一目标优化, 显示了方法的灵活性。(4)当协调控制系统采用其它控制结构时, 只需重新定义目标函数和扰动方式, 本文的方法仍可适用, 显示了方法的通用性。

### 参考文献:

- [1] 宋春平. 自适应预估控制研究及其在火电机组中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2000.
- [2] 王东风, 韩 璞, 曾德良. 单元机组协调控制系统发展和现状[J]. 中国电力, 2002, 35(11): 69-73.
- [3] 黄焕袍, 武利强, 韩京清, 等. 火电单元机组协调系统的自抗扰控制方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2004 24(10): 168-173.

- [4] 吴国垣, 李东海, 薛亚丽, 等. 机炉协调控制的分散 PID 整定[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004(2): 262-265.
- [5] VLACHOS C, WILLIAMS D, GOMM J B. Genetic approach to decentralized PI controller tuning for multivariable processes[J]. *IEE Proceedings on Control Theory and Applications*, 1999, 1: 58-64.
- [6] HOUCK G, JOINES J, KAY M. A genetic algorithm for function optimization: a matlab implementation[R]. U.S.A: North Carolina State University, 1995.
- [7] 刘红波, 李少远, 柴天佑. 协调控制系统多变量 PID 控制器的自整定方法[J]. 自动化仪表, 2003, 24(6): 10-15.
- [8] LIU H B, LI S Y, CHAI T Y. Intelligent decoupling control of power plant main steam pressure and power output[J]. *Electrical Power and Energy Systems* 2003, 25: 809-819.

(辉 编辑)

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  $H_\infty$  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-**