

负荷跟踪型发电系统协调控制方式的智能化

马立新, 江霓, 袁淑娟

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 针对智能电网中火力发电的主要设备——锅炉中蒸汽温度控制系统的时变特性和系统大滞后特性, 电网要求发电机组既能快速响应负荷变化, 又能保证自身的安全、稳定、经济运行. 为了提高电力系统的安全运行水平, 以及常规电源的利用效率, 结合了锅炉对负荷需求响应快, 以及汽轮机随主蒸汽压力变化平稳的优点, 提出了一种负荷跟踪型的机炉协调控制方式, 并加入了基于模糊 PID (proportional-integral-derivative, 比例-积分-微分) 算法控制的智能时间常数补偿环节. 该环节能在负荷变化较大、需要利用锅炉蓄热时发挥作用. 仿真实验结果表明, 与常规 PID 控制的协调系统相比, 模糊 PID 控制能够得到更佳的动态性能参数和控制效果.

关键词: 智能电网; 协调控制系统; 模糊比例-积分-微分控制器; 智能控制方法仿真

中图分类号: TU 411

文献标志码: A

文章编号: 1007-2861(2013)02-0144-06

Intelligent Coordination and Control of Load Tracking Type Power Generation System

MA Li-xin, JIANG Ni, YUAN Shu-juan

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: According to the time-varying and lag characteristics of the control steam for steam temperature in a boiler, a power grid requires that the generator can quickly respond to load changes, and ensure safety, stability and economic operation. To improve safety and efficiency in the conventional power supply, this paper proposes a coordination and control method with a load-tracking model. It combines advantages of the boiler's quick responding to the load, and the turbine's stably following changes in the main steam pressure. In addition, an intelligent time-constant compensation part using the fuzzy PID (proportional-integral-derivative) control algorithm is added. Thus, the intelligent part can work properly when large load changes occur and where the boiler thermal storage is needed. The simulation results show that, compared with the traditional PID control, the fuzzy PID control can derive better dynamic performance parameters and a better control effect.

Key words: smart grid; coordinated control system (CCS); fuzzy PID (proportional-integral-derivative) controller; intelligent control method for the simulation

火力发电是智能电网发电环节中的重要组成部分. 锅炉是火力发电厂的重要组成部分, 其中从锅炉传送到汽轮机的蒸汽温度控制是一直以来的研究重点. 传统的 PID (proportional-integral-derivative, 比例-积分-微分) 控制在锅炉控制中占主导地位, 并且以其控制原理简单、工作可靠等特点得到了广泛应用.

针对锅炉控制系统中具有的大时滞、非线性、时变性、强耦合等特点, 传统 PID 控制由于存在参数选择困难, 超调量过大等问题, 导致其应用受到了局限^[1]. 单纯的模糊控制虽然在简化算法、解决非线性问题方面具有一定的优势, 但在控制系统精度、静态误差和稳定性方面效果不是很理想. 在此基础上, 给常规的模糊

收稿日期: 2012-09-27

基金项目: 国家科技部政府间科技合作资助项目(2009014); 上海市高等学校内涵建设资助项目(2012085)

通信作者: 马立新(1960—), 男, 教授, 博士, 研究方向为电力系统稳定性、配电网规划与优化配置、电力负荷需求分析与预测方法等.

E-mail: hongjyz@163.com

控制器加上积分器可以成功地消除静态误差, 并且可将智能控制与常规 PID 控制相结合, 形成智能 PID 控制. 目前, 这种新型控制器已引起了人们的普遍关注和极大兴趣, 并已得到了较为广泛的应用^[2]. 在 PID 的 3 个参量的调节过程中加入模糊补偿信号, 可使系统的运行性能得到很大的提升. 本研究介绍了锅炉发电设备的机炉协调控制方式, 并在主蒸汽温度控制的混合模糊部分中加入了模糊 PID 补偿控制环节, 应用 Matlab 软件对 PID 算法、模糊算法、带积分环节的模糊算法、模糊 PID 算法 4 种算法进行仿真实验, 证明了在锅炉蒸汽温度控制中, 模糊 PID 智能控制方法的优越性.

1 机炉协调控制方式

1.1 机炉协调控制系统

锅炉汽轮机协调控制系统 (coordinated control system, CCS) (见图 1) 根据输出要求负荷需求信号 (megawatt demand, MWD)^[3], 同时控制锅炉的输入燃料调节器、给水调节器和输出调节器, 是一种结合了汽轮机跟踪锅炉以及锅炉跟踪汽轮机两种控制方式优点的控制系统^[4].

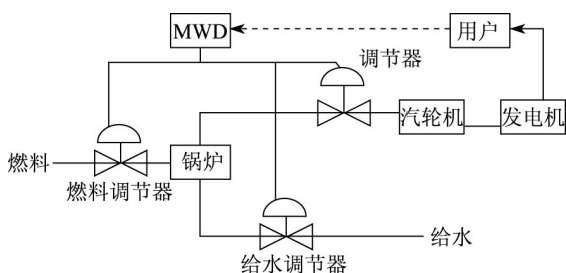


图 1 锅炉汽轮机协调控制系统
Fig. 1 CCS of boiler steam turbine

1.2 传统的控制策略

蒸汽温度控制可独立地控制主蒸汽温度和再热蒸汽温度. 由于过热器和再热器处在同一燃烧气体路径中, 如果发生激烈干涉, 过热器的延迟时间约为 30 min, 因此, 传统控制会选择 PID 串级控制方法. 此外, 由于用户端反馈的负荷需求量时高时低, 且高低量相差 2 倍以上情况时有发生, 因此, 为了更好地响应负荷需求, 目前大多数发电厂都采用了锅炉汽轮机协调控制方式, 同时控制锅炉燃料端、汽轮机蒸汽输入端和给水控制端, 以提高发电效率并节能环保.

尽管如此, 由于锅炉控制系统本身具有的大时滞、非线性、时变性、强耦合等特点, 在采取了以上两种对策的同时, 还需引入模糊智能控制算法, 以更好地实现当延迟时间较长时, 对锅炉主蒸汽温度的控制.

2 模糊 PID 控制器的结构

模糊控制器是以被调量与定值之间的误差 e 和误差变化率 e_c 作为控制器的输入量, 因此, 其作用与常规 PD (proportional-derivative, 比例-微分) 控制器相类似. 由于积分控制可以消除静态误差, 因此, 将 PID 控制策略加入模糊控制中是改善模糊控制器稳态性能的一种途径^[5], 其系统结构如图 2 所示.

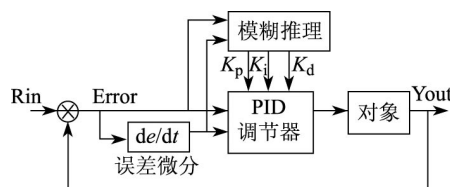


图 2 模糊 PID 控制系统结构图^[6]

Fig. 2 Structure diagram of fuzzy PID control system^[6]

模糊推理以误差 $e = r(k) - y(k)$ 及其误差变化率 $e_c = e(k) - e(k - 1)$ 为输入量, PID 控制器参数的模糊调整量 $\Delta K_p, \Delta K_i$ 和 ΔK_d 为输出量^[7], 用来根据被控对象的状态调节 PID 的 3 个控制参数^[8]:

$$K_p(k) = K_p(k - 1) + \Delta K_p, \tag{1}$$

$$K_i(k) = K_i(k - 1) + \Delta K_i, \tag{2}$$

$$K_d(k) = K_d(k - 1) + \Delta K_d, \tag{3}$$

式中, K_p, K_i, K_d 为初始设定的 PID 参数.

3 混合模糊控制理论

3.1 超调防止型混合模糊控制

在火力发电设备中, 控制系统的超调量控制一直是个难点. 本研究尝试将模糊控制应用于抑制系统的超调量. 首先, 考虑超调量是如何引起的. 在 PID 控制中, 时间域表示如下:

$$MV = P \cdot E + D \cdot \frac{dE}{dt} + I \int E dt, \tag{4}$$

$$E = PV - SP, \tag{5}$$

式中, MV 为操作量, E 为偏差值, SP 为设定值, PV 为设备状态值, P 为比例增益, D 为微分增益, I 为积分增益^[9].

由图 3 所示的 PID 控制器可见, 从有偏差的状态到收敛为目标值之间较容易发生超调量^[10], 其开环传递函数 $H(s)$ 在拉普拉斯空间中可表示为

$$H(s) = \frac{sK_p + K_i}{s(1 + sT_a)^2} = \frac{K_i(s \frac{K_p}{K_i} + 1)}{s(1 + sT_a)^2}, \tag{6}$$

式中, K_p 为比例增益, K_i 为积分增益, T_a 为时间常数, s 为拉普拉斯算子. 若假设 $K_p = K_i T_a$, 可得

$$H(s) = \frac{K_i}{s(1+sT_a)}. \quad (7)$$

因此, 整体传递函数 $I(s)$ 可表示为

$$I(s) = \frac{\frac{K_i}{s(1+sT_a)}}{1 + \frac{K_i}{s(1+sT_a)}} = \frac{K_i}{s^2 T_a + s + K_i}. \quad (8)$$

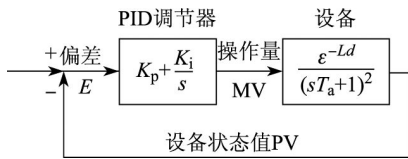


图 3 PID 控制器
Fig. 3 PID controller

虽然图 3 中的模型为二次延时系统, 但因实际设备在一般情况下的阶数更高, 考虑到在理论研究中若传递函数阶数较高, 则仿真控制参量非常难以调节, 因此, 本研究将研究对象设定为二次延时系统^[11], 从而得到了该等价模型的传递函数:

$$G(s) = \frac{\varepsilon^{-Ls}}{s^2 T_1 + s T_2 + T_3}, \quad (9)$$

式中, $T_1 = T_a/K_i$, $T_2 = 1/K_i$, $T_3=1$, L 为延迟时间. 该模型的阶跃响应 $Y(s)$ 为

$$Y(s) = \frac{\varepsilon^{-Ls}}{s^2 T_1 + s T_2 + T_3} \frac{1}{s} = \frac{\frac{1}{T_1} \varepsilon^{-Ls}}{s^2 + s \frac{T_2}{T_1} + \frac{T_3}{T_1}} \frac{1}{s}. \quad (10)$$

假设 $\zeta = \frac{T_2}{2T_1}$, $\omega^2 = \frac{T_3}{T_1} - (\frac{T_2}{2T_1})^2$, 则式 (10) 可转化为

$$Y(s) = \frac{\varepsilon^{-Ls}}{s^2 T_1 + s T_2 + T_3} \frac{1}{s} = \frac{\frac{1}{T_1} \varepsilon^{-Ls}}{(s + \zeta + j\omega)(s + \zeta - j\omega)} \frac{1}{s}. \quad (11)$$

若将式 (11) 的分子表示为 $N(s)$, 分母表示为 $D(s)$, 由展开定理, 则拉普拉斯逆变换可表示为

$$Y(t) = \left(\frac{N(s)}{dD(s)} \right)_{s \rightarrow \infty} \delta(t) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{N(s)}{ds} \right)_{s=s_i} u(t), \quad (12)$$

式中, $\delta(t)$ 为单位脉冲函数, i 为 $1 \sim n$ 的正数, s_i 为 $Y(s)$ 的极点, $u(t)$ 为阶跃函数. 由于式 (11) 和 (12) 的

第一项为 0, 故可以展开为

$$Y(t) = \left(\left(\frac{N(s_1)}{dD(s_1)} \right) \varepsilon^{s_1 t} + \left(\frac{N(s_2)}{dD(s_2)} \right) \varepsilon^{s_2 t} + \left(\frac{N(s_2^*)}{dD(s_2^*)} \right) \varepsilon^{s_2^* t} \right) u(t), \quad (13)$$

式中, s_2 与 s_2^* 为共轭复数关系. 根据存在复极点的情况展开定理, 可得

$$Y(t) = \left(\frac{N(0)}{dD(0)} \right) \varepsilon^{0t} + \varepsilon^{-\zeta t} \operatorname{Re} \left(2 \frac{N(-\zeta + j\omega)}{dD(-\zeta + j\omega)} \varepsilon^{j\omega t} \right) u(t). \quad (14)$$

从式 (14) 中可以得出, $s_1=0$, $s_2 = -\zeta + j\omega$, $s_2^* = -\zeta - j\omega$.

设式 (14) 中各项的分母^[12]为

$$\frac{dD(s)}{ds} = 2s(s + \zeta) + (s + \zeta)^2 + \omega^2, \quad (15)$$

则式 (14) 可转化为

$$Y(t) = \left(\frac{\frac{1}{T_1}}{\zeta^2 + \omega^2} + \varepsilon^{-\zeta t} \operatorname{Re} \left(2 \frac{\frac{1}{T_1} \varepsilon^{-Ls}}{2j\omega(-\zeta + j\omega)} \varepsilon^{j\omega t} \right) \right) u(t), \quad (16)$$

$$Y(t) = \left(\frac{\frac{1}{T_1}}{\zeta^2 + \omega^2} + \frac{1}{T_1} \varepsilon^{-\zeta t} \operatorname{Re} \left(2 \frac{(\omega - j\zeta) \cos(\omega t) + j \sin(\omega t)}{\omega(\zeta^2 + \omega^2)} \varepsilon^{-Ls} \right) \right) u(t). \quad (17)$$

应用拉普拉斯变换中在时间域里的转移定理对式 (17) 进行延迟时间的处理, 根据式 (11) 和 (12), 整理可得

$$Y(t) = \frac{1}{T_3} \left(1 - \left(\left(\frac{\zeta}{\omega} \right)^2 + 1 \right)^{0.5} \varepsilon^{-\varepsilon(t-L)} \sin \left(\omega(t-L) + \arctan \frac{\zeta}{\omega} \right) \right) u(t-L). \quad (18)$$

将衰减系数 $\gamma = \zeta/\omega$ 代入式 (18), 整理可得

$$Y(t) = \frac{1}{T_3} (1 - (\gamma^2 + 1)^{0.5} \varepsilon^{-\gamma\omega(t-L)} \sin(\omega(t-L) + \arctan \gamma)) u(t-L). \quad (19)$$

因此, 式 (19) 中的超调量 V 可表示为

$$V = \frac{\left. \frac{dY(t)}{dt} \right|_{t=L} - \lim_{t \rightarrow \infty} Y(t)}{\lim_{t \rightarrow \infty} Y(t)} = \varepsilon^{-\gamma\pi}, \quad (20)$$

且由式 (11)和(12), 可得

$$\gamma = \frac{\frac{T_2}{2T_1}}{(\frac{T_2}{T_1} + (\frac{T_2}{2T_1})^2)^{0.5}} \quad (21)$$

结合 $K_p=K_iT_a$ 与式 (7), (8), 可得到式 (21) 中的 γ 如下式所示:

$$\gamma = \frac{\frac{K_i}{2K_p}}{(\frac{1}{K_p} + (\frac{K_i}{2K_p})^2)^{0.5}} = \left(\frac{K_i^2}{4K_p + K_i^2} \right)^{0.5} \quad (22)$$

由式 (22) 可见, 由于 $\lim_{K_p \rightarrow \infty} \gamma = 0$, $\lim_{K_p \rightarrow 0} \gamma = 1$, 若减小比例增益 K_p 、增大积分增益 K_i 使 γ 值增大, 就能够抑制超调量. 基于上述考虑, 利用模糊控制, 在 PI (proportional-integral, 比例-积分) 调节器的 P, I 参量中添加补偿, 使 K_p 减小, K_i 增大, 从而在理论上得出“调整控制系统增益的控制回路具有防止超调效果”的结论. 因此本研究认为, 既然模糊 PID 控制器能在抑制延时系统超调时发挥作用, 那么对于锅炉主蒸汽温度控制中的大延时特性, 即用户电量负荷需求变化较大时, 控制系统延迟时间变长的特点, 混合模糊控制也应具有较好的控制效果.

3.2 时间常数补偿型模糊控制

基于 3.1 节中提到的模糊补偿信号, 设计出时间常数补偿控制系统, 由在锅炉负荷变化时为使控制性能提高而进行先行补偿控制的补偿模糊部分构成. 由于火力发电系统中, 用户电量需求在高低负荷之间的时间常数相差 2 倍以上情况时有发生, 因此, 本研究考虑加入一个基于模糊 PID 算法控制的时间常数补偿环节, 用来控制设备输出功率, 同时克服锅炉控制系统大时滞的不足.

图 4 所示为时间常数补偿系统的模型, 其传递函数 $H(s)$ 可表示为

$$H(s) = (F(s) + 1) \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \frac{\varepsilon^{-Ls}}{(sT_a + 1)^2} \quad (23)$$

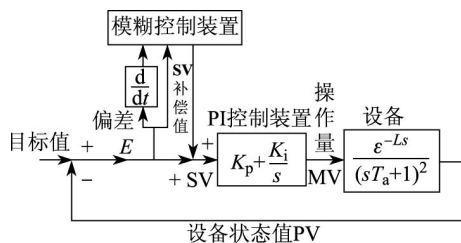


图 4 模糊 PID 控制的时间补偿系统模型

Fig. 4 Time compensation model of fuzzy PID control system

为了提高整个模型的最大梯度(上升的斜率), 作

如下变换:

$$F(s) + 1 = sT_a + 1, \quad (24)$$

$$F(s) = sT_a. \quad (25)$$

根据式 (24) 和 (25), 能够改变式 (23) 的上升趋势. 实际上, 由于 T_a 的变化, 模糊控制器在任何状态下都必须使之上升到最佳的状态.

若模糊传递函数为 $Ff(s)$, 则时间常数的变量可以表示为

$$Ff(s) = \frac{s(T_a - T_{fa})}{sT_{fa} + 1}, \quad (26)$$

式中, T_{fa} 为基于模糊规则的时间常数. 若 $T_{fa} = T_a$, 则与不用模糊控制器进行补偿的情况相同, 开环传递函数 $H_1(s)$ 可表示为

$$H_1(s) = \frac{sK_p + K_i}{s(sT_a + 1)^2} \varepsilon^{-Ls}. \quad (27)$$

当 $T_{fa} = 0$ 时, 开环传递函数 $H_2(s)$ 为

$$H_2(s) = \frac{sK_p + K_i}{s(sT_a + 1)^2} \varepsilon^{-Ls}; \quad (28)$$

当 $T_{fa} \neq 0$ 时, 开环传递函数 $H_3(s)$ 为

$$H_3(s) = \frac{sK_p + K_i}{s(sT_a + 1)(sT_{fa} + 1)} \varepsilon^{-Ls}, \quad (29)$$

式中, 若 T_{fa} 的变化范围在 $0 \sim T_a$ 时, 则根据模糊输出, 式 (27) 和 (28) 之间的上升时间就可能是可变的.

本实验设备模型为具有式 (8) 和 (9) 的时间常数的模型, 适用于系统的模糊规则, 验证了控制响应的改善效果, 并推导出了如下的 3 个传递函数:

$$G_{p10}(s) = \frac{\varepsilon^{-10s}}{(10s + 1)^2}, \quad (30)$$

$$G_{p30}(s) = \frac{\varepsilon^{-10s}}{(30s + 1)^2}, \quad (31)$$

$$G_{p20}(s) = \frac{\varepsilon^{-10s}}{(20s + 1)^2}. \quad (32)$$

经过反复仿真实验, 最终确定时间常数补偿系统的传递函数为式 (32).

4 仿真实例分析

4.1 模糊控制代替 PID 控制

模糊控制是以模糊集合论、模糊语言变量及模糊逻辑推理为基础的计算机智能控制, 其核心环节为模糊规则. 图 5 和 6 分别为模糊控制系统的结构图和仿真图.

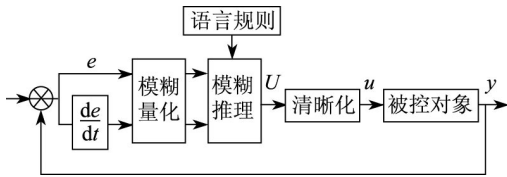


图 5 模糊控制系统结构图^[1]

Fig. 5 Structure diagram of fuzzy control system^[1]

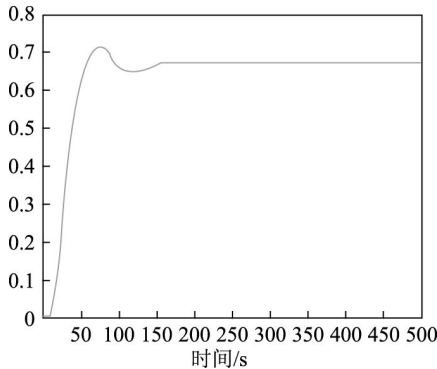


图 6 模糊控制系统仿真图

Fig. 6 Simulation diagram of fuzzy control system

通过仿真实验发现, 采用模糊算法的系统的调节时间明显短于传统的 PID 控制, 但是系统存在 25% 的静态误差. 这是因为常规的二维模糊控制器以误差和误差变化率作为输入变量, 只具有比例和微分控制作用, 不具有积分控制作用, 加之模糊控制器特有的量化过程, 模糊控制系统不能消除静态误差^[1].

4.2 带积分环节的模糊控制

针对典型模糊控制系统没有考虑积分环节会产生较大静态误差的情况, 通过添加积分项来解决此问题. 图 7 为带积分环节的模糊控制系统仿真图. 图 8 为带积分环节的模糊控制与常规模糊控制的仿真波形对比. 可以看出, 带积分环节的模糊控制系统可以很好地消除系统的静态误差^[2].

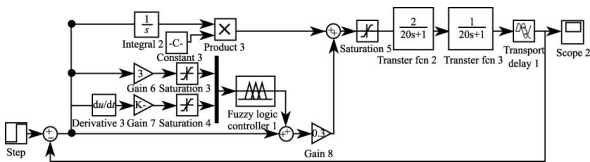


图 7 带积分环节模糊控制系统仿真模型

Fig. 7 Simulation model of fuzzy control system with integral element

4.3 模糊 PID 控制

模糊 PID 控制是一种新型控制器, 因其不依赖系统精确数学模型, 以及对系统的参数变化具有较好的鲁棒性的特点而受到广泛的应用.

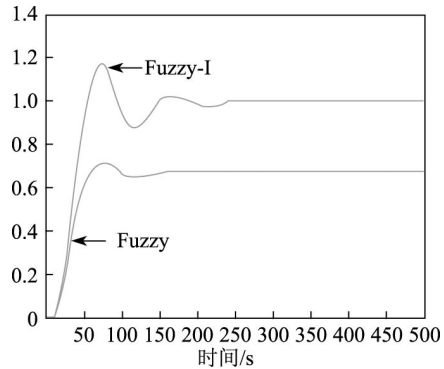


图 8 带积分环节模糊控制与常规模糊控制仿真图对比
Fig. 8 Comparison of simulation diagrams of fuzzy control with integral element and conventional fuzzy control

基于时间常数补偿控制的模型采用了模糊 PID 控制算法. 图 9 和 10 为不同延迟时间条件下, 4 种算法的仿真图对比.

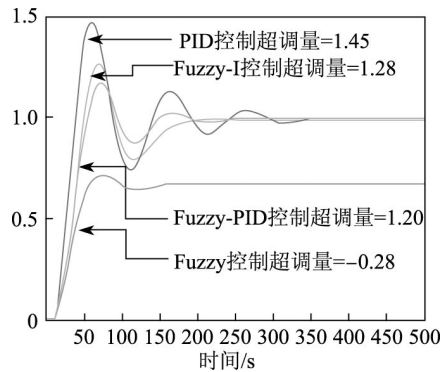


图 9 延迟时间为 10 s 时, 4 种算法的仿真图对比
Fig. 9 Comparison of simulation images of four kinds of algorithm when delay time for 10 s

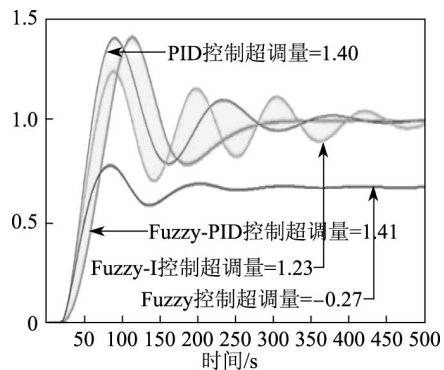


图 10 延迟时间为 20 s 时, 4 种算法的仿真图对比
Fig. 10 Comparison of simulation images of four kinds of algorithm when delay time for 20 s

4.4 算法总结

由图 9 可见, 4 种算法的性能对比如表 1 所示. 可

见,通过阶跃响应仿真实验,与改进机炉协调控制和常规机炉跟踪协调控制相比,加入了模糊PID控制算法的机炉跟踪协调控制方案的仿真效果明显改善,取得了良好的控制效果,且对受控对象模型具有很强的适应性和鲁棒性^[13].

表1 4种算法的仿真结果的定量比较

Table 1 Numerical comparison of four algorithm's simulation results

算法	指标			
	峰值 时间/s	调节 时间/s	超调	静态 误差/%
PID 算法	65	400	1.45	0
Fuzzy 算法	75	200	-0.28	25
Fuzzy-I 算法	65	300	1.28	0
Fuzzy-PID 算法	65	200	1.20	0

5 结束语

在电力系统中,强化网厂协调,提高电力系统安全稳定运行水平已是智能电网研究的热点.运用智能方法可以优化电源结构和电网结构,对实施节能发电调度,提高常规电源的利用效率有很大的指导作用.

本工作提出了一种新的机炉协调控制方式并进行了相应的设计.由模糊控制在抑制系统超调方面的优势,联想到在锅炉蒸汽温度主控制系统中加入一个时间常数补偿控制环节,根据导出的时间常数补偿表达式,设计了模糊控制补偿器,使得该智能环节能在负荷变化较大、延迟时间较长、需要利用锅炉蓄热时发挥作用.仿真实验结果表明,模糊PID控制器比单纯模糊控制器在快速性、稳定性以及准确性方面有了很大的改善,在消除静态误差的同时节省了调节时间,提高了系统的响应效率.

当然,补偿环节的变化不够平稳,实际负荷变化下该系统的控制性能优化等问题,将在今后作进一步的研究.

参考文献:

- [1] NAKAMURA M, YOSHIKAI T, GOTO S, et al. Non-linear separation modeling and control of a boiler system by use of actual data of a thermal power plant [J]. *Electrical Engineering in Japan*, 2003, 144(4): 53-62.
- [2] 刘和勇,马立新,孙大帅,等.模糊算法在双容水箱液位控制系统中的应用[J].*微特电机*, 2010, 38(9): 70-72.
- [3] 史小平,张为平.汽轮发电机转速和负荷同时跟踪的一种控制方法[J].*中国电机工程学报*, 2003, 23(6): 209-212.
- [4] 刘廉隅,王晓妹,刘长良,等.超临界火电机组协调控制方式分析[J].*仪器仪表用户*, 2008, 15(1): 66-67.
- [5] 刘慧英,李斌,张丽江,等.炉温控制系统的仿真研究[J].*计算机仿真*, 2011, 28(6): 211-214.
- [6] 李广义,黄景涛,田韶超.感应炉温度模糊PID控制系统的研究[J].*电源技术*, 2012, 36(2): 255-258.
- [7] 郭献军,席原,王周梅,等.基于类前馈补偿的模糊PID控制在超超临界单元机组协调控制系统中的应用[J].*现代电力*, 2012, 29(4): 67-72.
- [8] 谢书明,柴天佑.一种参数自适应模糊PID控制器[J].*信息与控制*, 1998, 27(4): 255-259.
- [9] 胡包钢,应浩.模糊PID控制技术回顾及其面临的若干重要问题[J].*自动化学报*, 2001, 27(4): 567-584.
- [10] 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.
- [11] WANG W, LI H X, ZHANG J T. Intelligence-based hybrid control for power plant boiler [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2002, 10(2): 280-287.
- [12] 松村司郎,平山开一郎.发电设备中的控制技术[M].北京:机械工业出版社,2012: 2-31.
- [13] 吕剑虹,陈来九.模糊PID控制器及在气温控制系统中的应用研究[J].*中国电机工程学报*, 1995, 15(1): 16-21.