

超临界机组协调系统的模糊增益调度预测控制

姜 川, 吕剑虹

(东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210000)

摘 要:针对火电厂超临界机组多变量锅炉-汽机协调系统在大工况范围内运行具有强非线性特点,提出了一种基于模糊增益调度的预测控制方法。通过现场试验获取多个工况点处的协调系统传递函数模型,结合增益调度和模糊逻辑推理方法建立全局自适应模糊模型,利用预测控制技术确保控制系统全局优化品质。基于模糊增益调度的预测控制方法设计火电厂超临界机组协调控制系统,并在大工况范围内进行变负荷仿真试验。结果表明:相较于常规预测控制算法和 PID 控制方法,基于模糊增益调度的预测控制方法能够在大工况范围内快速跟踪负荷变化,且协调控制系统各输出被调量跟随设定值变化的速度更快,动态偏差更小,控制执行机构动作较快,控制作用变化相对平稳,稳定性好。

关 键 词:超临界机组;协调控制系统;模糊模型;预测控制;增益调度

中图分类号:TK221

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.01.004

[引用本文格式]姜 川,吕剑虹.超临界机组协调系统的模糊增益调度预测控制[J].热能动力工程,2022,37(1):28-33. JIANG Chuan, LYU Jian-hong. Fuzzy gain scheduling model predictive control for supercritical units coordination system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(1): 28-33.

Fuzzy Gain Scheduling Model Predictive Control for Supercritical Units Coordination System

JIANG Chuan, LYU Jian-hong

(College of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210000)

Abstract: A predictive control method based on fuzzy gain scheduling is proposed for the multivariable boiler-turbine coordination system of supercritical units in thermal power plants, which has strong nonlinearity characteristics in a wide range of operating conditions. The transfer function models of the coordinated system at multiple operating points are obtained through field test. The global adaptive fuzzy model is established by combining with gain scheduling and fuzzy logic reasoning method. The predictive control technology is used to ensure the global optimization quality of the control system. Based on fuzzy gain scheduling model predictive control method, the coordinated control system of supercritical units in thermal power plants is designed, and the variable load simulation test is carried out in a wide range of working conditions. The results show that compared with the conventional predictive control algorithm and PID control method, the predictive control method based on fuzzy gain scheduling can quickly track load changes in a wide range of working conditions, each output regulated variable of the coordinated control system varies with the set value faster, the dynamic deviation is smaller, the control actuator moves faster, the control action changes relatively smoothly, and the stability is good.

Key words: supercritical unit, coordinated control system, fuzzy model, predictive control, gain scheduling

引 言

随着技术进步和经济发展,火电机组朝着大容量、高参数方向不断发展。大型火电机组根据电网要求大范围调整负荷,机炉协调控制系统被控对象动态特性变化很大,存在严重的非线性,且锅炉侧被控对象具有大惯性、大迟延的特性,常规线性控制手段难以保证全局控制品质^[1-2]。为此,需要对机炉协调控制系统全局非线性优化控制方法做进一步研究。

预测控制^[3]是一种基于模型的先进控制技术,通过滚动优化和反馈校正策略,在线弥补模型误差等不确定性,但当被控对象具有强非线性时,会出现模型失配的严重问题,无法达到优化控制的目的。增益调度控制^[4]能够较好适应工况变化,是解决系统非线性问题的一种有效控制方法,但是缺少合理的推理手段,当实际工况偏离设计工况时,难以保证系统的全局控制品质。文献[5-6]针对不同的系统,研究了鲁棒控制和 PID 控制与增益调度控制相结合的控制策略,通过引入增益调度控制策略使控制系统具有一定的自适应能力,但这些控制策略仍存在复杂的计算,限制了增益调度的实际应用。

本文提出一种基于模糊增益调度的预测控制算法(Fuzzy Gain Scheduling Model Predictive Control, FGSMP),应用于国内某电厂 660 MW 超临界机组协调控制系统的设计,通过仿真试验验证了 FGSMP 算法的有效性及其优越性。

1 全局自适应模糊模型的建立

1.1 基准工况点传递函数模型的获取

以某电厂 660 MW 超临界机组协调系统为研究对象,研究工况范围为 330 ~ 660 MW,选取 350, 400, 450, 500, 550, 600 和 650 MW 工况点为基准工况点,在各基准工况点处分别进行给水流量、汽机阀门开度和燃料流量的扰动试验。根据试验数据拟合各扰动对机组实发功率、主蒸汽压力以及分离器温度的传递函数模型如表 1 所示。

1.2 增益调度变量的模糊化处理

根据非线性系统的实际动态特性,可选取变化

缓慢的物理量作为调度变量^[7]。选电网负荷指令 N_e 作为调度变量,将 500 MW 作为零基准负荷 N_e^0 , 负荷变化范围 $[N_e^0 - 150, N_e^0 + 150]$, 定义模糊变量 $\delta N_e = N_e - N_e^0$ 。基于模糊集理论对论域 $[-150, 150]$ 进行模糊化处理,划分 7 个模糊集合得到 1 组模糊语言值: {负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}, 表示为: $FL(\delta N_e) = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, 选取如图 1 所示的三角形隶属度函数。

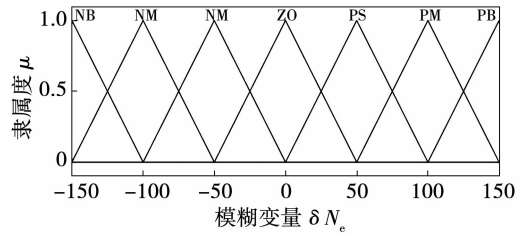


图 1 模糊变量隶属度函数分布

Fig. 1 Fuzzy variable membership function distribution

2 基于模糊增益调度的预测控制

2.1 增量型扩展状态空间模型

将状态空间模型变换为增量型扩展状态空间模型^[8],即把输出方程并入状态方程得到:

$$\begin{bmatrix} \Delta x(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(\delta N_e) & \theta \\ C(\delta N_e)A(\delta N_e) & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B(\delta N_e) \\ C(\delta N_e)B(\delta N_e) \end{bmatrix} \Delta u(k) \quad (1)$$

其中, A, B, C —系统矩阵; θ —零矩阵; I —单位矩阵; x —状态变量; y —输出被调量; u —输入控制量; k —采样时刻。

记作:

$$\begin{aligned} \bar{x}(k+1) &= \bar{A} \cdot \bar{x}(k) + \bar{B} \cdot \Delta u(k) \\ y(k) &= \bar{C} \cdot \bar{x}(k) \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 预测模型的多步输出

将式(2)作为预测模型对系统未来 N_p 步输出进行预测:

$$\hat{Y} = K_x \cdot \hat{x}(k) + K_u \cdot \Delta U \quad (3)$$

其中,

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \begin{bmatrix} \tilde{y}(k+1) \\ \tilde{y}(k+2) \\ \vdots \\ \tilde{y}(k+N_p) \end{bmatrix}, \Delta \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_p-1) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K}_x = [\overline{\mathbf{CA}} \quad \overline{\mathbf{CA}}^2 \quad \cdots \quad \overline{\mathbf{CA}}^{N_p}]^T。$$
$$\mathbf{K}_u = \begin{bmatrix} \overline{\mathbf{CB}} & \boldsymbol{\theta} & \cdots & \boldsymbol{\theta} \\ \overline{\mathbf{CA}}\overline{\mathbf{B}} & \overline{\mathbf{CB}} & \cdots & \boldsymbol{\theta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \overline{\mathbf{CA}}^{N_p-1}\overline{\mathbf{B}} & \overline{\mathbf{CA}}^{N_p-2}\overline{\mathbf{B}} & \cdots & \overline{\mathbf{CB}} \end{bmatrix},$$

表 1 基准工况点协调系统传递函数模型

Tab.1 The transfer function model of the coordinated system of the reference operating point

工况点	被调量	给水流量 $D_w/\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	汽机阀门开度 $u_T/\%$	燃料流量 $F_u/\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$
350 MW	机组实发功率 P_e/MW	$\frac{0.148}{(1+110s)^2} - \frac{0.144}{1+5000s}$	$\frac{2.5}{1+22s} - \frac{2.5}{(1+250s)(1+300s)}$	$\frac{1.31}{(1+250s)(1+1500s)}$
	主蒸汽压力 p_T/MPa	$\frac{0.0129}{(1+65s)(1+120s)} - \frac{0.0125}{1+1300s}$	$-\frac{0.27}{1+80s}$	$\frac{0.042}{(1+150s)(1+1300s)}$
	分离器温度 $t_{\text{sep}}/^\circ\text{C}$	$-\frac{0.15}{(1+150s)(1+400s)}$	$-\frac{1.15}{(1+200s)^2}$	$\frac{1.34}{(1+150s)(1+1600s)}$
400 MW	机组实发功率 P_e/MW	$\frac{0.159}{(1+95s)^2} - \frac{0.154}{1+4400s}$	$\frac{2.8}{1+15s} - \frac{2.8}{(1+200s)^2}$	$\frac{1.35}{(1+180s)(1+1250s)}$
	主蒸汽压力 p_T/MPa	$\frac{0.0135}{(1+50s)(1+100s)} - \frac{0.0129}{1+1000s}$	$-\frac{0.29}{1+78s}$	$\frac{0.047}{(1+120s)(1+1050s)}$
	分离器温度 $t_{\text{sep}}/^\circ\text{C}$	$-\frac{0.165}{(1+135s)(1+300s)}$	$-\frac{1.18}{(1+175s)(1+180s)}$	$\frac{1.4}{(1+120s)(1+1400s)}$
450 MW	机组实发功率 P_e/MW	$\frac{0.167}{(1+85s)^2} - \frac{0.161}{1+3850s}$	$\frac{3.1}{1+12s} - \frac{3.1}{(1+150s)^2}$	$\frac{1.4}{(1+160s)(1+1100s)}$
	主蒸汽压力 p_T/MPa	$\frac{0.014}{(1+40s)(1+85s)} - \frac{0.0131}{1+950s}$	$-\frac{0.3}{1+74s}$	$\frac{0.053}{(1+110s)(1+900s)}$
	分离器温度 $t_{\text{sep}}/^\circ\text{C}$	$-\frac{0.171}{(1+120s)(1+285s)}$	$-\frac{1.2}{(1+150s)(1+170s)}$	$\frac{1.45}{(1+105s)(1+1250s)}$
500 MW	机组实发功率 P_e/MW	$\frac{0.174}{(1+80s)^2} - \frac{0.166}{1+3400s}$	$\frac{3.3}{1+10s} - \frac{3.3}{(1+120s)(1+140s)}$	$\frac{1.48}{(1+155s)(1+1000s)}$
	主蒸汽压力 p_T/MPa	$\frac{0.0147}{(1+30s)(1+80s)} - \frac{0.0136}{1+880s}$	$-\frac{0.31}{1+73s}$	$\frac{0.06}{(1+100s)(1+800s)}$
	分离器温度 $t_{\text{sep}}/^\circ\text{C}$	$-\frac{0.176}{(1+110s)(1+260s)}$	$-\frac{1.23}{(1+135s)(1+160s)}$	$\frac{1.51}{(1+100s)(1+1100s)}$
550 MW	机组实发功率 P_e/MW	$\frac{0.181}{(1+80s)^2} - \frac{0.17}{1+3000s}$	$\frac{3.6}{1+10s} - \frac{3.6}{(1+90s)(1+135s)}$	$\frac{1.58}{(1+150s)(1+950s)}$
	主蒸汽压力 p_T/MPa	$\frac{0.0153}{(1+25s)(1+80s)} - \frac{0.014}{1+820s}$	$-\frac{0.33}{1+73s}$	$\frac{0.066}{(1+100s)(1+750s)}$
	分离器温度 $t_{\text{sep}}/^\circ\text{C}$	$-\frac{0.18}{(1+100s)(1+250s)}$	$-\frac{1.25}{(1+120s)(1+150s)}$	$\frac{1.67}{(1+100s)(1+1000s)}$
600 MW	机组实发功率 P_e/MW	$\frac{0.186}{(1+80s)^2} - \frac{0.173}{1+2700s}$	$\frac{3.9}{1+10s} - \frac{3.9}{(1+65s)(1+130s)}$	$\frac{1.69}{(1+147s)(1+920s)}$
	主蒸汽压力 p_T/MPa	$\frac{0.0158}{(1+22s)(1+80s)} - \frac{0.0146}{1+775s}$	$-\frac{0.38}{1+73s}$	$\frac{0.082}{(1+100s)(1+720s)}$
	分离器温度 $t_{\text{sep}}/^\circ\text{C}$	$-\frac{0.183}{(1+93s)(1+245s)}$	$-\frac{1.27}{(1+105s)(1+144s)}$	$\frac{1.82}{(1+100s)(1+930s)}$
650 MW	机组实发功率 P_e/MW	$\frac{0.19}{(1+80s)^2} - \frac{0.174}{1+2500s}$	$\frac{4.1}{1+10s} - \frac{4.1}{(1+50s)(1+125s)}$	$\frac{1.76}{(1+145s)(1+900s)}$
	主蒸汽压力 p_T/MPa	$\frac{0.016}{(1+20s)(1+80s)} - \frac{0.0149}{1+750s}$	$-\frac{0.42}{1+73s}$	$\frac{0.095}{(1+100s)(1+700s)}$
	分离器温度 $t_{\text{sep}}/^\circ\text{C}$	$-\frac{0.185}{(1+90s)(1+240s)}$	$-\frac{1.28}{(1+100s)(1+140s)}$	$\frac{1.91}{(1+100s)(1+900s)}$

2.3 状态估计

由式(3)可知预测模型的多步输出与当前状态 $\tilde{x}(k)$ 有关,但在实际工业控制过程中系统状态往往不可测,可通过卡尔曼滤波器实现系统状态的实时估计^[9],即:

$$\begin{cases} \tilde{x}(k) = \bar{A} \cdot \tilde{x}(k-1) + \bar{B} \cdot \Delta u(k-1); \\ P_k = \bar{A} \cdot P_k \cdot \bar{A}^T + Q_k; \\ x_e(k) = y(k) - \bar{C} \cdot \tilde{x}(k); \\ K_k = P_k \cdot \bar{C}^T \cdot (\bar{C} \cdot P_k \cdot \bar{C}^T + R_k)^{-1}; \\ P_k = P_k - K_k \cdot (\bar{C} \cdot P_k \cdot \bar{C}^T + R_k) \cdot K_k^T; \\ \tilde{x}(k) = \tilde{x}(k) + K_k \cdot x_e(k) \end{cases}$$

(4)

式中: $\tilde{x}(k)$ —后验状态估计值; $x_e(k)$ —先验状态估计值; K_k —卡尔曼增益矩阵; P_k —估计误差协方差矩阵; Q_k —激励噪声协方差矩阵; R_k —测量噪声协方差矩阵。

2.4 最优控制作用的计算

预测控制通过滚动优化的策略计算最优控制量,常用二次型函数作为控制系统性能指标:

$$J = \min \{ (\tilde{Y} - W)^T E (\tilde{Y} - W) + \Delta \tilde{U}^T G \Delta \tilde{U} \}$$

(5)

式中: $W = [w(k+1) \quad w(k+2) \quad \cdots \quad w(k+N_p)]^T$ 为输出参考轨迹; $w(k+j)$ — $k+j$ 时刻输出被调量的设定值; E —输出误差加权系数矩阵; G —控制增量变化量加权系数矩阵; J —控制系统性能指标。

根据最小二乘法则,可得控制规律:

$$\Delta \tilde{U} = (K_u^T E K_u + G)^{-1} K_u^T E (W - K_x \tilde{x}(k))$$

(6)

取前 N_c 项为最优控制增量 $\Delta u(k)$,实际控制指令 $u(k)$ 计算为:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$$

(7)

将当前时刻 k 的控制量 $u(k)$ 传给被控对象实施控制作用,再以 $k+1$ 时刻为基点进行下一时刻最优控制量计算,实现滚动优化。

3 仿真试验

将基于模糊增益调度的预测控制算法应用于国

内某 660 MW 超临界机组协调控制系统中,针对全局自适应模糊模型,设计具有全局优化功能的受限预测控制系统。

控制器的输入量:

$$u = [u_T \quad D_w \quad F_u]^T$$

(8)

控制器的输出量:

$$y = [P_e \quad p_T \quad T_{sep}]^T$$

(9)

式中: u_T —汽机阀门开度,%; D_w —给水流量,t/h; F_u —燃料量,t/h; P_e —机组输出功率,MW; p_T —主蒸汽压力,MPa; T_{sep} —分离器出口温度,℃。

按照实际运行要求,各个控制量及控制增量约束条件为:

$$\begin{cases} 60\% \leq u_T \leq 95\% \\ 700 \text{ t/h} \leq D_w \leq 2240 \text{ t/h} \\ 70 \text{ t/h} \leq F_u \leq 340 \text{ t/h} \\ -0.1\% \leq \Delta u_T \leq 0.1\% \\ -25 \text{ t/h} \leq \Delta D_w \leq 25 \text{ t/h} \\ -15 \text{ t/h} \leq \Delta F_u \leq 15 \text{ t/h} \end{cases}$$

(10)

控制器的主要设计参数如表 2 所示。

表 2 控制器主要设计参数

Tab.2 The main design parameters of the controller

参 数	数 值
采样周期 T_s /s	5
预测步长 N_p	100
控制步长 N_c	30
输出误差加权系数矩阵 E	30I
控制增量变化量加权系数矩阵 G	I

注:I—单位矩阵。

3.1 升负荷斜坡响应仿真试验

为验证 FGSMPC 算法的优越性,将该算法与预测控制算法(Model Predictive Control, MPC)和 PID 控制方法进行对比。在此次试验中,功率指令以 2.0% 最大连续负荷工况(MCR)的升速率从 400 MW 斜坡变化至 500 MW。图 2 为机组协调控制系统中各输出被调量的动态响应曲线,图 3 为相应的控制作用变化曲线。

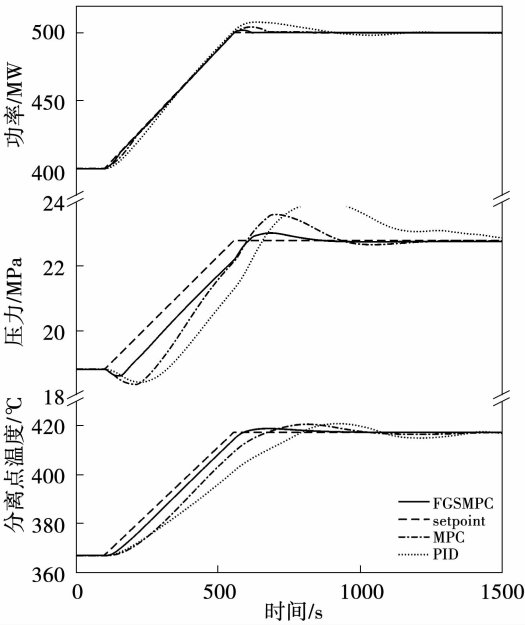


图2 机组各输出被调量动态响应曲线
Fig.2 Dynamic response curve of each output
regulated variable of unit

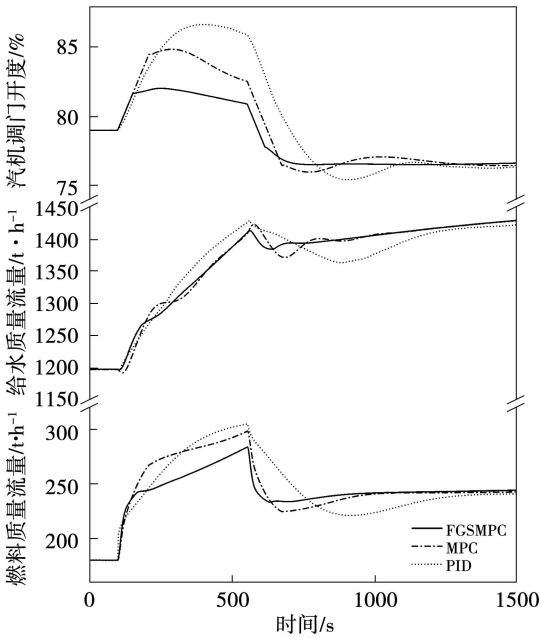


图3 机组各输入调节量变化曲线
Fig.3 Variable curve of each input adjustment
quantity of unit

MPC 算法相较于 PID 控制方法,机组输出功率响应速度相当,但超调量较小,主蒸汽压力和分离器出口温度响应速度较快、动态偏差较小;FGSMP 算法与 MPC 算法相比,各输出被调量跟随设定值变化

速度更快,并且最大动态偏差更小;FGSMP 算法相较于 PID 和 MPC 算法,控制执行机构动作快,控制作用变化相对平稳,稳定性好。总体而言,FGSMP 算法控制效果要优于 MPC 算法和 PID 控制,而 MPC 算法要优于 PID 控制。

3.2 大工况范围变负荷仿真试验

为进一步验证 FGSMP 算法的有效性,设计机组在自动发电控制 (Automatic Generating Control, AGC) 运行方式下的仿真试验。在此次试验中,功率指令先以 13.2 MW/min,即 2.0% MCR 的速率从 400 MW 升负荷至 600 MW,再以 9.9 MW/min (1.5% MCR) 的速率降负荷至 500 MW。图 4 为机组协调控制系统中各动态响应曲线,图 5 为相应的控制作用变化曲线。

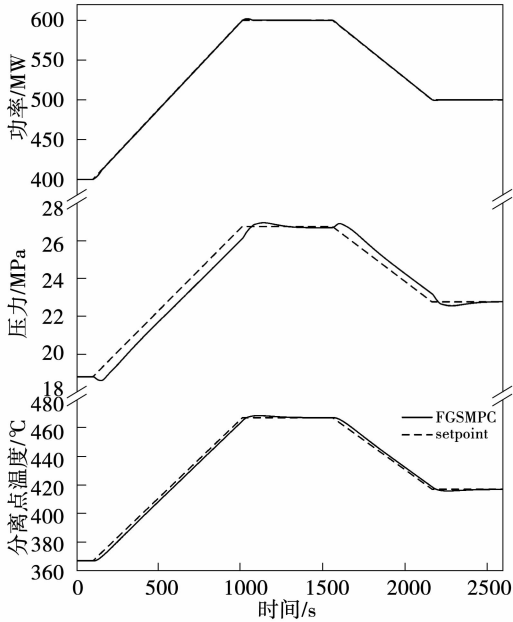


图4 机组各输出被调量动态响应曲线
Fig.4 Dynamic response curve of each output
regulated variable of unit

由图 4 可知,在升、降负荷过程中,机组输出功率快速跟随电网负荷指令变化,主蒸汽压力最大动态偏差约 0.6 MPa,分离器出口温度动态偏差在 3 °C 以内,均严格控制在允许范围内。从图 5 中可以看出,在升、降负荷指令下达后,燃料量和给水流量变化迅速,从而有效提升了机炉协调系统中锅炉

侧的响应速度,进而缩短整个机炉协调控制系统的调节过渡过程时间。此外,在满足控制作用的约束条件下各控制量变化相对平滑,有利于控制系统的稳定。

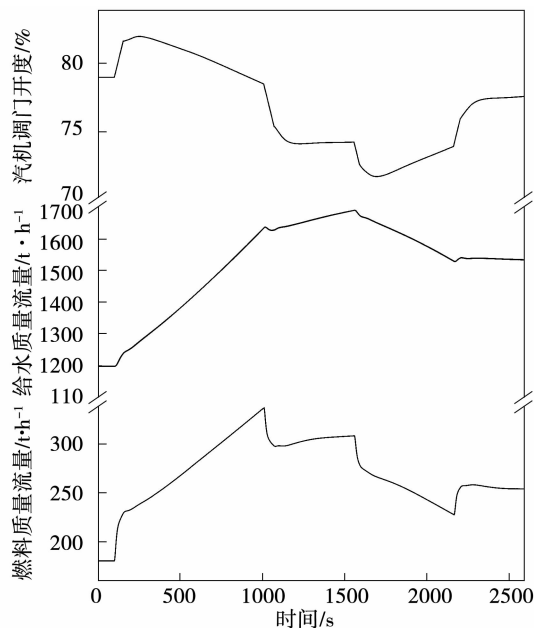


图5 机组各输入调节量变化曲线

Fig. 5 Variable curve of each input adjustment quantity of unit

4 结 论

(1) 将模糊逻辑推理和增益调度控制方法相结合,提升控制系统全局自适应能力;

(2) 利用预测控制的滚动优化策略,确保控制系统全局非线性控制品质;

(3) 适用于工况频繁变动的火电机组协调控制系统。

在机炉协调控制系统中应用 FGSMPC 算法,仿真结果表明:机组能够在大工况范围内快速跟踪负荷变化,具有一定的自适应能力,控制执行机构动作较快,系统稳定性和鲁棒性较好。

参考文献:

- [1] 刘吉臻,田 亮,曾德良,等. 660 MW 机组负荷-压力非线性特性的分析[J]. 动力工程,2005(4):533-536.
LIU Ji-zhen, TIAN Liang, ZENG De-liang, et al. Analysis on the nonlinearity of load-pressure characteristics of a 660 MW unit[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2005(4):533-536.
- [2] 周 罡,吕剑虹,韦红旗,等. 自动发电控制优化控制策略研究与应用[J]. 中国电力,2004(1):61-65.
ZHOU Gang, LYU Jian-hong, WEI Hong-qi, et al. Study and application of optimal control strategy for automatic generating control (AGC)[J]. Electric Power, 2004(1):61-65.
- [3] 席裕庚,李德伟,林 姝. 模型预测控制——现状与挑战[J]. 自动化学报,2013,39(3):222-236.
XI Yu-geng, LI De-wei, LIN Shu. Model predictive control-status and challenges [J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(3):222-236.
- [4] RUGH W J, SHAMMA J S. Research on gain scheduling[J]. Automatica, 2000, 36(10):1401-1425.
- [5] 林金星,沈 炯,李益国. 基于免疫优化的机炉协调系统模糊增益调度 H_∞ 鲁棒控制[J]. 中国电机工程学报,2008(17):92-98.
LIN Jin-xing, SHEN Jiong, LI Yi-guo. Fuzzy gain scheduled H_∞ robust control for boiler-turbine coordinated system based on immune optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2008(17):92-98.
- [6] DOUNIS A I, KOFINAS P, ALAFODIMOS C, et al. Adaptive fuzzy gain scheduling PID controller for maximum power point tracking of photovoltaic system [J]. Renewable Energy, 2013, 60(12):202-214.
- [7] HABBI H, ZELMAT M, BOUAMAMA B O. A dynamic fuzzy model for a drum-boiler-turbine system[J]. Automatica, 2003, 39(7):1213-1219.
- [8] 陈 超,梅 华,祁荣宾,等. 一种降低计算负荷的快速预测控制算法(英文)[J]. 计算机与应用化学,2015,32(1):25-29.
CHEN Chao, MEI Hua, QI Rong-bin, et al. A fast algorithm for reducing the computation burden of model predictive control[J]. Computers and Applied Chemistry, 2015, 32(1):25-29.
- [9] 熊志林,陶建峰,张峰榕,等. 采用状态估计的泵控非对称液压缸模型预测控制[J]. 西安交通大学学报,2017,51(4):109-115.
XIONG Zhi-lin, TAO Jian-feng, ZHANG Feng-rong, et al. A model predictive control strategy of pump-controlled asymmetric cylinders using state estimation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(4):109-115.

(丛 敏 编辑)