

姚薇.基于PID预测控制的机炉协调控制系统[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(4):83-89.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.04.012

Yao W. Coordinated Control System of Thermal Power Plant Based on PID & Predictive Control [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 34(4) : 83-89. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.04.012

基于PID预测控制的机炉协调控制系统

姚薇*

(江苏电子产品装备制造工程技术研究开发中心,江苏淮安223003;
淮安信息职业技术学院自动化学院,江苏淮安223003)

摘要:机炉协调控制系统的热力过程控制是典型的多变量系统.本文提出一种在多变量条件下,结合PID和模型预测控制相融合的控制策略——MIMOPID-MAC.根据Lyapunov稳定性理论,此算法对于闭环控制系统具有稳定性.燃气锅炉的模拟实验证明了该控制策略具有较小的稳态误差、较短的上升时间、较小的超调,保证每个控制变量跟踪设定值快且平滑,对于外部干扰和模型不确定时具有很好的适应性和鲁棒性.在一定程度上摆脱了PID调节时间较长,MAC稳态误差较大的问题.

关键词:模型预测控制;PID控制;多变量模型;机炉协调控制

中图分类号:TP273 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2019)04-0083-07

Coordinated Control System of Thermal Power Plant Based on PID & Predictive Control

Yao Wei

(Jiangsu Electronic equipment Manufacturing Engineering Technology Research and Development Center, Huai'an 223003, China;
School of Automation, Huai'an Vocation College of Information Technology, Huai'an 223003, China)

Abstract: Boiler coordinated control system in thermal power unit was the typical multivariable system in thermal process. A new Model Algorithmic Control (MAC), in the form of state-space equation, combined with PID in multivariate conditions and called MIMOPID-MAC (MPID-MAC) was provided. According to Lyapunov's second stability theorem, it was able to prove that the new algorithm has the stability of closed-loop system. Simulation experiments with gas boiler show that this control strategy has the advantages as smaller steady-state errors, shorter rise time of PID and smaller overshoot of MAC, and gets rid of longer regulation time of PID and larger steady-state error of MAC to some degree. This control strategy guarantee each controlled variable to track their setting value fast and smoothly and has good adaptiveness and robustness to external disturbance and the model uncertainty.

Keywords: Model predictive control; PID control; multivariate model; boiler coordinated control

随着电力系统的快速发展,风力、太阳能等多种新能源发电的开发与并网运行,影响着电网的频率和电能质量,现代火电厂中热力发电机组的协调控制系统是满足电网负荷需求和保证机组本身稳定运行的

收稿日期:2018-11-19

基金项目:江苏省高等学校自然科学研究项目资助(18KJB510003);淮安市创新能力建设计划项目资助(HAP201805)

*通信作者,E-mail:yaowei19830103@126.com

重要措施.传统的机炉协调控制系统只有“机跟炉”或“炉跟机”2 种模式,系统本身的非线性和不确定性对控制品质有很大的影响,系统的动态设计也变得困难^[1-2].

越来越多的研究倾向于将神经网络、模糊控制、遗传算法、自适应控制等先进控制策略引入到机炉协调控制系统中,以解决多变量系统的控制问题.文献[3-4]将一般预测控制策略应用于 256 MW 热电厂的温度控制系统中;文献[5]论证了基于遗传算法的 PI 控制器能有效地控制 325 MW 发电厂的蒸汽温度;文献[6]引入自适应的优化控制策略应用于燃煤锅炉的蒸汽温度控制中;文献[7]提出了一种利用自适应反演算法的火电单元机组协调控制策略,达到了较好的控制目的,但是在控制器的参数设定规律上依赖大量的实验数据,系统建模容易影响系统结构和增加干扰.综上所述,非线性模型控制仍然需要进一步探究.

本文提出一种新的多变量控制策略——基于时间域的多变量 PID 模型算法控制(MIMOPID-MAC),这种控制策略是多变量模型算法控制(MAC)和 PID 方法相结合,引入了误差权重因素,依据 PID 控制规律重构目标函数,且控制器兼顾 PID 和 MAC 的优点.仿真实验证明了 MIMOPID-MAC 控制器具有更好的动态和稳态性能,抗干扰解耦能力强.

1 多变量模型算法控制

MAC 是典型的模型预测控制算法,系统结构如图 1 所示.其核心优点是在线滚动优化和反馈校正,通过实时反馈信息循环迭代,优化控制量,增强了系统鲁棒性^[8-12].

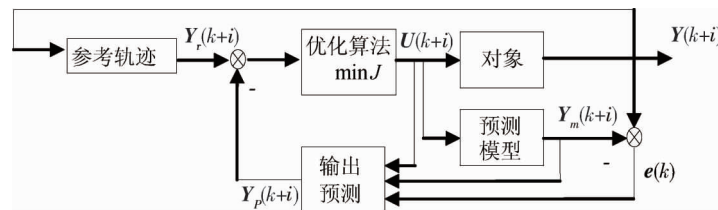


图 1 MAC 模型算法控制

构建预测模型,假设系统有 m 个输入, n 个输出,模型时域是 N ,控制时域是 M ,预测时域长度是 P ,则 MAC 的预测状态空间模型构建如下:

$$\begin{cases} X_m(k) = A_m X_m(k-1) + B_m U(k-1); \\ Y_m(k) = C_m X(k). \end{cases} \quad (1)$$

式中: $X_m(k)$ 为 k 时刻的系统状态矩阵, $X_m(k) = [x_{m_1}(k), x_{m_2}(k), \dots, x_{m_n}(k)]^T$; A_m, B_m, C_m 分别是预测模型状态空间方程的系统矩阵、输入矩阵和输出矩阵; $U(k-1)$ 为 $k-1$ 时刻控制量, $U(k-1) = [u_1(k), u_2(k), \dots, u_n(k-1)]^T$; $Y_m(k)$ 为 k 时刻的系统输出, $Y_m(k) = [y_{m_1}(k), y_{m_2}(k), \dots, y_{m_n}(k)]^T$; $X(k)$ 为系统 k 时刻的状态矩阵.

通过递归推导,得出未来 P 步预测模型的输出矩阵:

$$\hat{Y}_m(k+i) = G U(k) + F U(k-1) + H e(k), \quad i=0,1,2,\dots,P-1. \quad (2)$$

式中: $\hat{Y}_m(k+i)$ 为 k 时刻的预测输出; G 为系统矩阵, $G = C_m [A_m^{P-1} B_m, A_m^{P-2} B_m, \dots, B_m]$; F 为状态空间增益修正矩阵; H 为系统误差修正矩阵; $e(k)$ 为 k 时刻输出测量值与模型预测值之间的误差.

$\hat{Y}_m(k+P)$ 为未来 P 步的预测输出矩阵,令 $Y_p(k+P) = \hat{Y}_m(k+P)$, 则多变量 MAC 的最优性能目标函数为

$$J(k) = [Y_p(k+P) - Y_r(k+P)]^T Q [Y_p(k+P) - Y_r(k+P)] + \hat{U}(k)^T R \hat{U}(k). \quad (3)$$

式中: $J(k)$ 为预测模型的二次型性能指标函数; $Y_p(k+P)$ 为未来 P 步的预测输出矩阵; $Y_r(k+P)$ 为参考轨迹在 P 步的值; Q 为误差加权矩阵; $\hat{U}(k)$ 为预测控制量输出矩阵; R 为控制量加权矩阵.

求解最优控制,使 $\frac{\partial J(k)}{\partial \hat{U}(k)} = 0$, 则得到 k 时刻的最优控制规律为

$$\hat{U}(k) = [R + G^T Q G]^{-1} G^T Q [C_m X_m(k) + Y_r(k+P) - C_m A_m^P X_m(k) + Y_p(k)]. \quad (4)$$

式中: $\mathbf{Y}_p(k)$ 为 k 时刻实际输出测量值.

2 新型的多变量 MIMOPID-MAC 预测控制策略

将 PID 控制参数 K_p, K_i, K_d 引入到 MAC 性能目标函数式中, 进行最优控制求解, 这样可融合 PID 控制策略和模型预测控制策略的优点, 避免了其各自的缺点^[13-16].

改进后的 MIMOPID-MAC 性能目标函数为

$$J = \min [K_i \hat{\mathbf{E}}(k)^T \mathbf{Q} \hat{\mathbf{E}}(k) + K_p \Delta \hat{\mathbf{E}}(k)^T \mathbf{Q} \Delta \hat{\mathbf{E}}(k)^T] + K_d \Delta^2 \hat{\mathbf{E}}(k)^T \mathbf{Q} \Delta^2 \hat{\mathbf{E}}(k)^T + \hat{\mathbf{U}}(k)^T \mathbf{R} \hat{\mathbf{U}}(k). \quad (5)$$

式中: K_p, K_i, K_d 为比例、积分、微分系数; $\hat{\mathbf{E}}(k)$ 为预测误差; $\Delta \hat{\mathbf{E}}(k)$ 为预测误差增量.

且有

$$\hat{\mathbf{E}}(k) = [\mathbf{E}(k+1)^T, \dots, \mathbf{E}(k+P)^T]^T;$$

$$\Delta \mathbf{E}(k) = [\Delta \mathbf{E}(k+1)^T, \dots, \Delta \mathbf{E}(k+P)^T]^T;$$

$$\Delta^2 \mathbf{E}(k) = [\Delta^2 \mathbf{E}(k+1)^T, \dots, \Delta^2 \mathbf{E}(k+P)^T]^T;$$

$$\hat{\mathbf{U}}(k) = [\mathbf{U}(k)^T, \dots, \mathbf{U}(k+P-1)^T]^T;$$

$$\mathbf{U}(k+1) = [u_1(k+i), \dots, u_m(k+i)]^T, i=0, 1, 2, \dots, P-1.$$

式中: $\mathbf{E}(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻的误差; $\Delta \mathbf{E}(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻的误差增量; $\Delta^2 \mathbf{E}(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻的误差增量的增量; $\hat{\mathbf{U}}(k)$ 为最优预测控制规律矩阵; $u_m(k+i)$ 为 $k+i$ 时刻的控制量.

$k+i$ 时刻的误差:

$$\mathbf{E}(k+i) = \mathbf{Y}_p(k+i) - \mathbf{Y}_r(k+i) = \mathbf{Y}_m(k+i) + \mathbf{Y}_p(k) - \mathbf{Y}_m(k) - \mathbf{Y}_r(k+i) = \mathbf{G}_i \mathbf{U}(k) + \mathbf{D}_i(k). \quad (6)$$

式中: $\mathbf{E}(k+i)$ 为系统误差; $\mathbf{Y}_p(k+i)$ 为 $k+i$ 时刻预测模型输出; $\mathbf{Y}_r(k+i)$ 为 $k+i$ 时刻参考轨迹; $\mathbf{Y}_m(k+i)$ 为 $k+i$ 时刻系统输出; \mathbf{G}_i 为输入矩阵; $\mathbf{U}(k)$ 为控制序列; $\mathbf{D}_i(k)$ 为系统矩阵, $\mathbf{D}_i(k) = (\mathbf{C}_m \mathbf{A}_m^i - \mathbf{C}_m) \mathbf{X}_m(k) + \mathbf{Y}_p(k) - \{\mathbf{C}(k) - [\mathbf{C}(k) - \mathbf{Y}_p(k)] \lambda^i\} (\mathbf{C}(k)$ 为设定值矩阵; λ^i 为参考轨迹衰减因子).

$$\mathbf{G}_i = [\mathbf{C}_m \mathbf{A}_m^{i-1} \mathbf{B}_m, \mathbf{C}_m \mathbf{A}_m^{i-2} \mathbf{B}_m, \dots, \mathbf{C}_m \mathbf{B}_m]. \quad (7)$$

定义:

$$\hat{\mathbf{E}}(k) = [\mathbf{E}(k+1)^T, \dots, \mathbf{E}(k+P)^T]^T = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_1(k) + \mathbf{G}_1 \mathbf{U}(k) \\ \vdots \\ \mathbf{D}_p(k) + \mathbf{G}_p \mathbf{U}(k+P-1) \end{bmatrix} = \mathbf{D}(k) + \mathbf{G} \mathbf{U}(k). \quad (8)$$

式中:

$$\mathbf{D}(k) = [\mathbf{D}_1(k)^T, \dots, \mathbf{D}_p(k)^T]^T \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_1 & 0 & \dots & 0 \\ \mathbf{G}_2 & \mathbf{G}_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ \mathbf{G}_p & \mathbf{G}_{p-1} & \dots & \mathbf{G}_1 \end{bmatrix}.$$

根据递推关系:

$$\Delta \mathbf{E}(k) = \Delta \mathbf{D}(k) + \mathbf{G} \Delta \hat{\mathbf{U}}(k);$$

$$\Delta^2 \mathbf{E}(k) = \Delta^2 \mathbf{D}(k) + \mathbf{G} \Delta^2 \hat{\mathbf{U}}(k).$$

将上式代入目标函数式 (5), 令 $\frac{\partial J}{\partial \mathbf{U}(k)} = 0$, 则有

$$K_p [\mathbf{G}^T \mathbf{Q} \Delta \mathbf{D}(k) + \mathbf{G}^T \mathbf{Q} \mathbf{G} \Delta \hat{\mathbf{U}}(k)] + K_i [\mathbf{G}^T \mathbf{Q} \mathbf{D}(k) + \mathbf{G}^T \mathbf{Q} \mathbf{G} \hat{\mathbf{U}}(k)] + K_d [\mathbf{G}^T \mathbf{Q} \Delta^2 \mathbf{D}(k) + \mathbf{G}^T \mathbf{Q} \mathbf{G} \Delta^2 \hat{\mathbf{U}}(k)] + \hat{\mathbf{U}}(k)^T \mathbf{R} \hat{\mathbf{U}}(k) = 0. \quad (9)$$

引入后移算子 q^{-1} , 可得到式 (10)

$$[K_p (1 - q^{-1})^2 + K_i + K_d (1 - q^{-1})^4] [\mathbf{G}^T \mathbf{Q} \mathbf{D}(k) + \mathbf{G}^T \mathbf{Q} \mathbf{G} \hat{\mathbf{U}}(k) + \mathbf{R} \hat{\mathbf{U}}(k)] = 0. \quad (10)$$

令 $\mathbf{W} = K_p (1 - q^{-1})^2 + K_i + K_d (1 - q^{-1})^4$, 则最优控制变量 $\hat{\mathbf{U}}(k)$ 为

$$\hat{U}(k) = - [WG^TQG + R]^{-1}WG^TQD(k). \tag{11}$$

3 新型的多变量预测控制 MIMOPID-MAC 的稳定性分析

考虑到系统给定值会引起系统的不稳定^[17],我们令设定值矩阵 $C(k) = [C_1(k), C_2(k), \dots, C_n(k)]_{n \times 1}^T = [0]_{n \times 1}$ ($C_n(k)$ 为设定值序列),则反馈控制规律如式(12)所示.

$$\hat{U}(k) = -ZX(k). \tag{12}$$

式中: Z 为输入矩阵, $Z = [WG^TQG + R]^{-1}WG^TQD_0(k)$ ($D_0(k)$ 为设定值为 0 时的系统矩阵; $D_0(k) = [D_{10}(k)^T, D_{20}(k)^T, \dots, D_{p0}(k)^T]^T$ ($D_{i0} = C_m A_m^i - C_m, i = 1, 2, \dots, P$)).

将式(12)带入式(1)中,所得预测模型的闭环系统状态方程如式(13)所示.

$$X_m(k+1) = A_m X_m(k) - B_m ZX_m(k). \tag{13}$$

定义 Lyapunov 函数如式(14)所示,且是正定的:

$$V(X_m(k)) = X_m(k)^T \bar{S} X_m(k); \tag{14}$$

$$(A_m - B_m Z)^T \bar{S} (A_m - B_m Z) - \bar{S} = -Q_1. \tag{15}$$

式中: $V(X_m(k))$ 为 Lyapunov 函数; \bar{S}, Q_1 为对称正定矩阵.

式(15)中,假设 \bar{S}, Q_1 是正定矩阵且满足 Riccati 方程,则 Lyapunov 函数 $V(X_m(k))$ 的增量如式(16)所示.

$$\begin{aligned} \Delta V(X_m(k)) &= V(X_m(k+1)) - V(X_m(k)) = X_m(k+1)^T \bar{S} X_m(k+1) - X_m(k)^T \bar{S} X_m(k) = \\ &X(k)^T (A_m - B_m Z)^T \bar{S} (A_m - B_m Z) X_m(k) - X_m(k)^T \bar{S} X_m(k) = \\ &X(k)^T [(A_m - B_m Z)^T \bar{S} (A_m - B_m Z) - \bar{S}] X_m(k). \end{aligned} \tag{16}$$

根据式(15)有

$$\Delta V(X_m(k)) = -X_m(k)^T Q_1 X_m(k) < 0. \tag{17}$$

经过此番证实可得出结论:Lyapunov 函数优化了 MIMOPID-MAC 的控制策略,也证实了该闭环系统是渐进稳定的.

4 系统模拟仿真分析

4.1 热电厂发电机组的数学模型构建

热电厂包含锅炉、涡轮机、电能、控制器和其他装置,是具有多变量、强耦合、强干扰和大延时的复杂系统^[18].考虑负载和子系统,热电机组是具有 2 输入 2 输出的多变量控制对象 (TITO)^[19] (如图 2 所示).

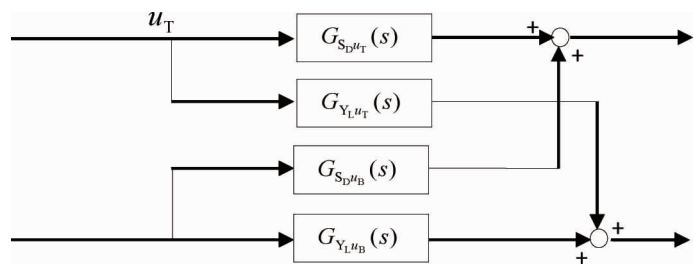


图 2 热电厂机炉协调控制系统

被控变量: S_D 为热电机组的输出功率; Y_L 为汽轮机调节阀压力;

控制变量: u_T 为主蒸汽阀门的开启度; u_B 为燃烧锅炉的负荷.

可构建热电机组的数学模型.

$$\begin{bmatrix} S_D(s) \\ Y_L(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{S_D^{u_T}}(s) & G_{S_D^{u_B}}(s) \\ G_{Y_L^{u_T}}(s) & G_{Y_L^{u_B}}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_T(s) \\ u_B(s) \end{bmatrix}. \tag{18}$$

式中: $S_D(s)$ 为热电机组输出功率的模型函数; $Y_L(s)$ 为汽轮机调节压力的模型函数; $G_{S_D^{u_T}}(s), G_{S_D^{u_B}}(s), G_{Y_L^{u_T}}(s), G_{Y_L^{u_B}}(s)$ 为所对应的传递函数, $G_{Y_L^{u_B}}(s)$ 是负值 (u_T 增大, Y_L 减少),其他 3 个是正值; $u_T(s)$ 为蒸汽阀门的开启度模型函数; $u_B(s)$ 为燃烧锅炉负荷的模型函数.

模拟仿真系统的控制对象为 300 MW 燃煤锅炉再热机组,依照式(18)可构建其数学模型如下:

$$\left\{ \begin{aligned} G_{S_{D^{u_B}}}(s) &= \frac{2.069(1 - 311s)}{(1 + 149s)^2(1 + 22.4s)}; \\ G_{S_{D^{u_T}}}(s) &= \frac{4.665s(1 + 99s)}{(1 + 50s + 58^2s^2)(1 + 4.1s)}; \\ G_{Y_{L^{u_B}}}(s) &= \frac{1.265(1 + 205s)}{(1 + 128s)^2(1 + 11.7s)}; \\ G_{Y_{L^{u_T}}}(s) &= -1.42(0.04 + \frac{0.96}{1 + 70s}). \end{aligned} \right. \quad (19)$$

受控对象具有强耦合性,其数学模型会随着不同的外因变化而变化,优化后的机炉协调控制系统具有很好的闭环稳定性和高品质的输入输出特性,因此锅炉和发电机组会随着电网负荷做出相应的变化,以确保汽轮机调节阀不会超出极限.

4.2 MIMOPID-MAC 控制系统仿真与分析

将式(19)转换成预测模型的状态空间方程,然后将 MIMOPID-MAC 控制策略应用系统进行性能分析.参数设置如下:预测时域长度 $P = 5$, 控制时域 $M = 5$, 采样时间 $T_s = 0.5$, 误差加权矩阵 $Q = I$, 控制变量加权矩阵 $R = 10^{-4}I$, MIMOPID-MAC 控制器的 3 个可调节 PID 参数 $K_p = 16.2, K_i = 66.6, K_d = 8$.

MIMOPID-MAC 控制算法的阶跃响应曲线如图 3 所示,功率的设定值 S_{D0} 产生了 15 MW 的阶跃变化,主蒸汽机压力的设定值 Y_{L0} 产生了 5 MPa 的阶跃变化,可以看出,优化后系统具有更好的适应性和较强的稳定性.

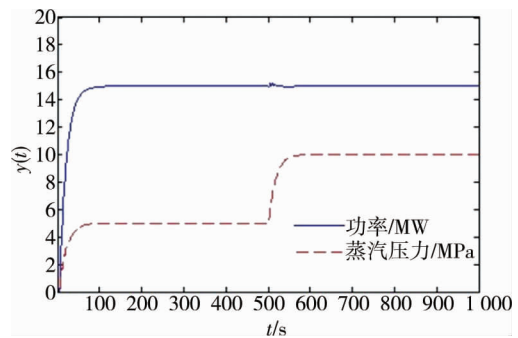


图 3 MIMOPID-MAC 的输出响应

热机组是一个多变量、强耦合、强干扰和大延时等综合问题影响下的复杂系统, MIMOPID-MAC 控制器可以在短短 52 s 内稳定主蒸汽压力,即使系统在强耦合的影响下会有些变化,但这种变化很小(最大值仅 1.6%),并且能快速回到设定值.系统稳态和动态状态下的性能分析如表 1 所示,数据反映出系统性能良好,并达到期望的控制效果.图 4 是系统变量的绝对误差曲线,可看出综合误差绝对值近似为恒定值.综合分析可得:优化后的 MIMOPID-MAC 算法具有稳定性好、动态性能强和解耦优点.

表 1 MIMOPID-MAC 的性能

性能指标	上升时间/s	超调量/%	设定时间/s	稳态误差/%
S_D	42	0	68	0
Y_L	45	0	72	0

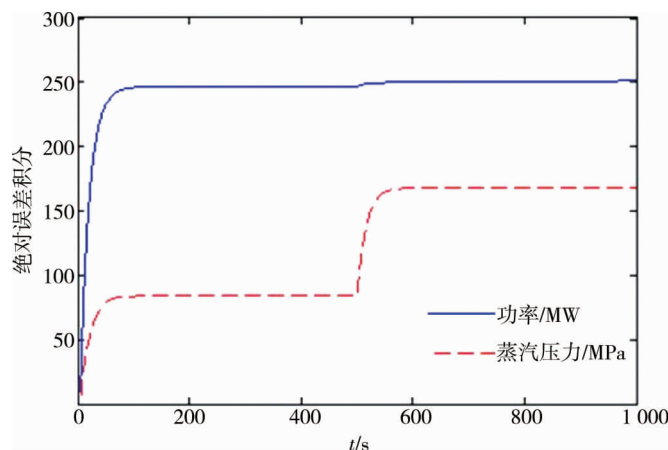


图 4 MIMOPID-MAC 的积分绝对误差

4.3 多种控制方式的控制性能的对比分析

如图5所示是MIMOPID-MAC和MPID这2种控制方法的输出阶跃响应曲线比较,实线代表MIMOPID-MAC策略控制变量,虚线代表MPID策略的控制变量,其系统性能指标比较如表2和表3所示.从上述图表分析可以看出:MIMOPID-MAC控制策略更适用于长时间延迟热电机组系统,与MPID相比,在稳态性能方面,MIMOPID-MAC策略的设置时间更短、稳态误差更小;在解耦方面,MIMOPID-MAC策略不仅不会带来明显的振荡,且具有一定的解耦特性.

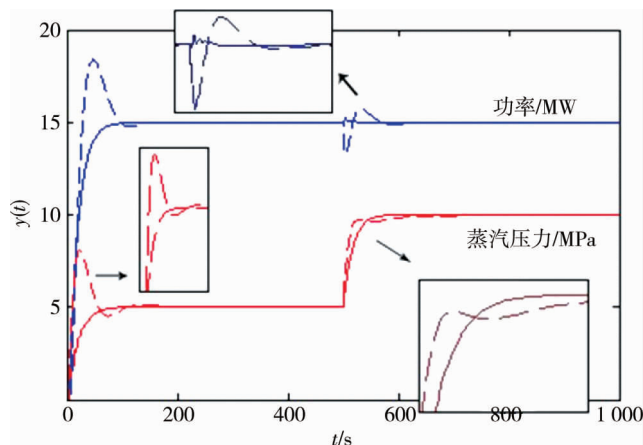


图5 MIMOPID-MAC和MPID输出比较

表2 功率 S_D 的MIMOPID-MAC和MPID性能比较

性能指标	上升时间/s	超调/%	设置时间/s	稳态误差/%
MIMOPID-MAC	42	0.00	68	0.048
MPID	26	22.67	89	0.330

表3 MIMOPID-MAC和MPID蒸汽压力 Y_L 数据比较

性能指标	上升时间/s	超调/%	设置时间/s	稳态误差/%
MIMOPID-MAC	43	0	72	0.01
MPID	31	62	157	0.80

如图6所示是多变量MIMOPID-MAC和多变量MMAC这2种控制策略的输出阶跃响应比较.实线代表MIMOPID-MAC策略控制变量,虚线代表MMAC策略控制变量,系统性能指标如表4和表5.从表4和表5可以看出:MIMOPID-MAC策略具有更快速的动态性能、更短的响应时间、较好的稳态性能.

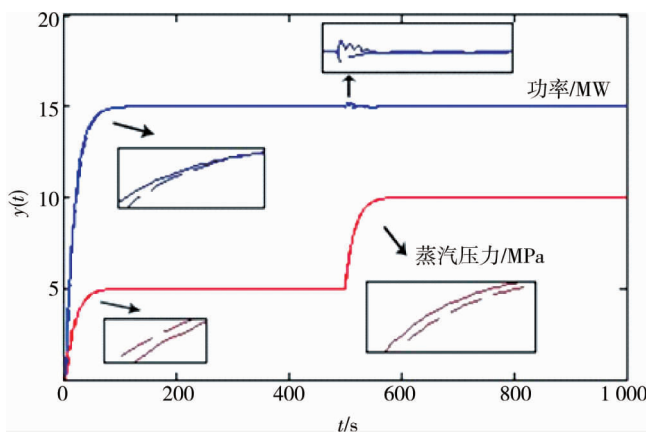


图6 多变量MIMOPID-MAC多变量MMAC输出比较

表4 MIMOPID-MAC和MMAC性能比较

性能指标	上升时间/s	超调/%	设置时间/s	稳态误差/%
MIMOPID-MAC	42	0.00	68	0.048
MPID	26	22.67	89	0.330

表5 MIMOPID-MAC和MMAC之间的蒸汽压力 Y_L 比较

性能指标	上升时间/s	超调/%	设置时间/s	稳态误差/%
MIMOPID-MAC	43	0	72	0.01
MPID	31	62	157	0.80

5 结论

1) MIMOPID-MAC 控制策略优化了预测模型的性能目标函数,兼顾了传统 PID 控制策略的优点.根据 Lyapunov 第二稳定性定理,可以证明,该算法具有优越的闭环稳定性.

2) 通过热电机组仿真实验分析,MIMOPID-MAC 控制系统具有较小的稳态误差、更小的超调、更短的上升时间,此外,其动态性能、稳态性能也是令人满意的,并具有一定的解耦能力.

3) 当然,MIMOPID-MAC 策略中确定的参数测定问题目前尚未解决.在后续的工作中,我们研究如何利用智能算法来自动确定参数.

参考文献:

- [1] 宋新立,王成山,刘涛,等.电力系统全过程动态仿真中的机炉协调控制系统模型研究[J].中国电机工程学报,2013,33(25):167-172.
- [2] 俞金树.热电厂多炉多机协调控制系统研究[J].电力学报,2017,32(2):168-174.
- [3] Lazar M, Pastravanu O. A neural predictive controller for nonlinear systems[J]. Mathematics and Computer in Simulation, 2002,60(3/5):315-324.
- [4] Venkateswarlu C, Rao K V. Dynamic recurrent radial basis function network model predictive control of unstable nonlinear processes [J]. Chemical Engineering Science, 2005(60):6718-6732.
- [5] Ghaffari A, Mehrabian A R, Mohammad-Zaheri M. Identification and control of power plant de-superheater using soft computing techniques[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2007,20(2):273-287.
- [6] Kwok K E, Ping M C, Li P. A mode l-based augmented PID algorithm[J]. Journal of Process Control, 2000,10(1):9-18.
- [7] 席嫣娜,王印松.一种自适应反演算法的火电单元机组协调控制策略[J].中国电机工程学报,2018,38(7):2070-2081.
- [8] 郭伟,姚少杰.基于时域的PID动态矩阵控制算法改进[J].仪器仪表学报,2007,28(12):2174-2178.
- [9] Rouhani R, Mehra R K. Model algorithmic control (MAC); basic theoretical properties [J]. Automatica, 1982, 18(4):401-414.
- [10] Mehra R K, Rouhani R, Rault A, et al. Model algorithmic control: Theoretical results on robustness [C]// JACC, 1979:387-392.
- [11] Rao C V, Rawlings J B. Steady states and constraints in model predictive control [J]. AIChE Journal, 1999, 45(6):1266-1278.
- [12] 张殿平,钟礼今,邓坚,等.700 MW 锅炉多煤种低氮燃烧自适应优化控制[J].广东电力,2015,28(9):18-21.
- [13] 姚薇,郭伟.基于概率约束的DMC预测控制算法研究[J].武汉理工大学学报,2006,28(8):100-103.
- [14] Green M, Limebeer D J N. Linear robust control [M]. New York: Dover Publications, 2012.
- [15] 郭伟,王汉杰,夏友量,等.基于状态空间方程的多变量PID-MAC在锅炉燃烧控制系统中的应用[J].热力发电,2014,43(9):48-59.
- [16] 郭伟,姚少杰.基于PID的DMC算法性能分析及其在过热蒸汽温度控制中的仿真[J].热力发电,2008,37(1):53-64.
- [17] Bevrani H, Hiyama T, Bevrani H. Robust PID based power system stabilizer: design and real-time implementation [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011, 33(2):179-188.
- [18] 赵文杰,牛玉广,刘吉臻.基于多模型的过热汽温自适应串级控制[J].计算机仿真,2003,20(5):107-109.
- [19] 仇韬,丁艳军,吴占松,等.基于预测模型的多PID控制器模糊加权控制[J].中国电机工程报,2006,26(24):121-124.