

基于鲁棒自适应策略的燃气轮机系统控制器设计

摘要

太阳能、风能和潮汐能等可再生能源的发电系统,具有间歇性发电的特性。因此,具有快速响应、发电效率高的燃气轮机发电系统,能够在可再生能源发电间歇出现时充当替代系统,不仅稳固电网的负荷能力,还有助于推动可再生能源的发展。由于燃气轮机是一个模型包含未知的复杂非线性系统,目前针对转速环节主要采取传统 PID 控制技术。然而,实际运行中系统工况发生变化时,控制器参数不能随着这些变化做出相应的调整,使得控制效果欠佳,执行器故障的出现也可能导致系统无法正常工作。因而,本文针对单轴燃气轮机的孤岛发电模式,结合燃气轮机系统特性,基于反步法的设计思路,引入不依赖于系统模型的鲁棒自适应控制策略,并加入容错控制和 Nussbaum 函数构造转速控制器。在控制器设计过程中融合动态面方法,解决高阶系统中反步法引起的计算爆炸问题。最后,通过仿真,验证了控制器的可靠性。

关键词

燃气轮机;反步法;鲁棒自适应控制;容错控制;动态面设计

中图分类号 TP13

文献标志码 A

收稿日期 2017-12-31

资助项目 国家自然科学基金(61772095,61403048)

作者简介

谭雪琴,女,硕士生,研究方向为鲁棒控制.tanxqn@163.com

苏晓杰(通信作者),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为模糊智能系统的控制与信号处理.suxiaojie@cqu.edu.cn

0 引言

我国能源消费结构以煤炭为主,天然气、风能、太阳能和水电等清洁能源占比远低于煤炭。大量消费煤炭、用煤方式不清洁等,带来的环境污染问题越来越严重,其他问题也日益凸显。减少煤炭消费量、降低火力发电在发电系统中所占比例、增加清洁能源使用份额和发电占比并逐渐替代环境污染较大的能源,这些措施都能够有效改善气候条件。

全球气候状况不容乐观,寻求清洁可再生能源替代开发过度且污染严重的化石能源,成为新一代能源技术的发展趋势。然而,部分可再生能源具有发电间歇的特点,包括太阳能、风能和潮汐能等,这种特性造成发电系统不能满足用户侧稳定的能量需求,限制了此类可再生能源的推广应用。以天然气为燃料的燃气轮机发电系统,能够快速响应用电侧的电量需求且发电效率高,在发电系统中具备独特的优势。因而,燃气轮机发电系统作为发电间歇时的替代系统,能够实现持续的能源供应。

在一份能源中长期发展报告中,提出应该增加天然气在能源结构中所占的比例,并将其纳入新能源战略规划中需要大力发展的绿色能源。加之近年来西气东输项目为国内中东部地区输送了大量天然气,国内页岩气开发也取得重大进展,这些都将助推天然气产业的发展。燃气轮机广泛应用于发电系统,且配备回热器等装置之后能够回收利用废热、废气等,充分利用燃气轮机的余能能够大幅度提升总能源利用率,产生更多经济效益。利用天然气燃烧快速产生电能,可对电网调峰,加强电力供应的稳定性。而且,燃气轮机与可再生能源等多种形式的能源组成的混合系统,其快速响应和安全灵活的特性能够加强电网稳定性,推动可再生能源的应用。因而,了解燃气轮机内部机理和控制策略,有利于更好地利用燃气轮机发电。

燃气轮机运行机理涉及专业知识广且模型复杂,给燃气轮机模型分析和系统控制器设计带来一定难度。Rowen^[1]通过重型燃气轮机发电机组现场试验以及记录的实验数据,得出简化的燃气轮机数学模型,也称为 Rowen 模型。Tavakoli 等^[2]通过燃气轮机的运行分析估算出 Rowen 模型中的参数。文献[3-4]通过对模型进行改进提升其性能。然而,传统的燃气轮机系统控制策略主要采取 PID 技术^[5-7]。虽然通过现场扰动试验等能够得出 PID 控制器参数,使得不需要精确模

型就能够控制对象获得不错的控制效果,然而在运行中控制器参数不能随着负荷变化做出相应调整,可能导致控制效果欠佳.为了克服 PID 控制器参数固定的缺陷,进一步提高燃气轮机系统的抗干扰能力,寻求控制效果更佳策略也是许多学者的研究方向.

鲁棒自适应控制技术融合了自适应控制和鲁棒控制的特点,能够根据检测的系统输入输出状态确定合适的自适应规则,估计出系统不确定性的上限,保证做出的控制决策在系统扰动和模型包含未知的情况下依然能够保证系统稳定性,且系统变量能够在有限时间内收敛,适用于非线性系统.因此,针对燃气轮机系统模型复杂、非线性等难点,本文将鲁棒自适应控制技术引入转速控制系统中,并且采用 Lyapunov 方法等保证系统在稳定的前提下,验证系统的控制性能.

1 燃气轮机系统模型

单轴燃气轮机发电机组由燃气轮机、永磁同步电机、电力电子变换装置等构成.在近几十年关于燃气轮机的研究中,大量文献针对 Rowen 模型进行控制策略研究,或者根据现场试验对 Rowen 模型进行修正.在 Rowen 建立的单轴燃气轮机模型中,如图 1 所示主要划分为 3 部分,分别为燃料系统、燃料控制系统和涡轮.其中,燃料系统根据外界负荷的需求对系统下达燃料信号,通过燃料信号的作用,系统向燃烧室送入对应的燃料量^[8].进入燃烧室的燃料在燃烧过程中释放出大量能量,这些能量随着燃气流入

涡轮,进入涡轮后流经静叶与动叶,膨胀做功推动转子旋转产生机械能,继而带动永磁同步电机做功为负载侧输送电能.

图 1 中, n 代表燃气轮机转速, MIN 为低值门, $\max F$ 、 $\min F$ 分别为燃料信号的最大值、最小值. k_1 为最小负荷常数, k_f 为燃料系数且取值范围为 $0 \sim (1 - k_1)$. a, b, c 代表阀门位置常数, K_a, T_a 为燃料传动系统参数.经燃烧室流出的气体流量由 W_f 表示, T_{CD}, T_{CR}, T_{TD} 为气体从燃烧室流出进入涡轮之间的延迟时间.函数 f_1, f_2 分别为系统输出转矩函数和燃烧室排出气体温度函数. T_{SH}, T_{TR} 为温度控制系统时间常数, G_{SH} 为辐射屏蔽比例系数. $T_R, \omega_{ref}, a_{ref}$ 分别为温度参考信号、转速参考信号和加速度参考信号. G_{TC}, T_{TC} 为温度控制环节参数. T 和 P 分别表示输出的转矩与功率.

建立孤岛模式下燃气轮机发电系统的数学模型:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1.3}{J}x_2 - \frac{1}{2J}x_1 + \frac{0.201 - T_e}{J}, \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{T_{CD}}x_3 - \frac{1}{T_{CD}}x_2, \\ \dot{x}_3 = \frac{K_a}{T_a}x_4 - \frac{1}{T_a}x_3, \\ \dot{x}_4 = \frac{ck_f}{a}x_1u - \frac{b}{a}x_4 + \frac{ck_1}{a}, \\ y = x_1, \end{cases} \quad (1)$$

其中, x_1 代表燃气轮机转速 ω , ω_{ref} 为设定转速参考值, x_2 为进入涡轮气体流量 W_{f_2} , x_3 为燃烧室燃料流

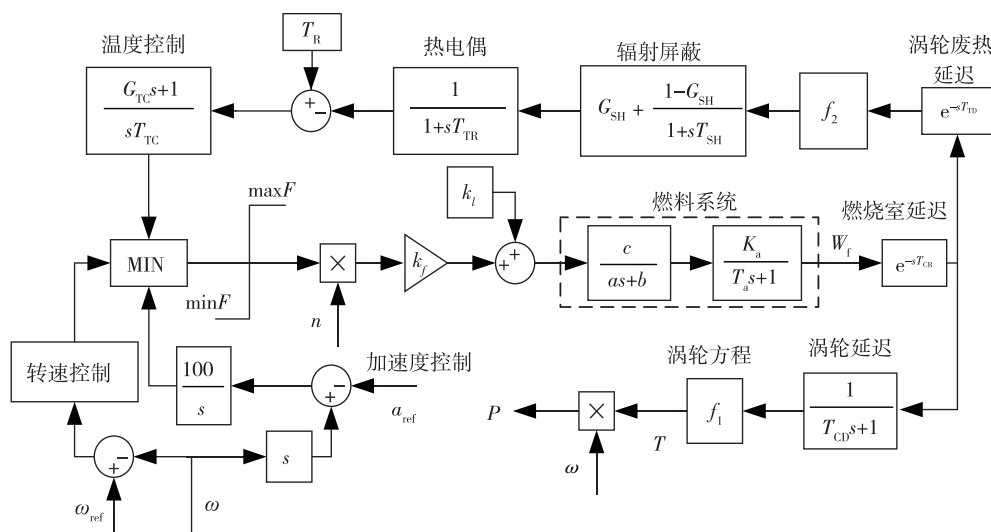


图 1 Rowen 模型

Fig. 1 Block scheme of Rowen's model

量 W_{f_3}, x_4 为经过阀门调整后进入的燃料量. T_e 为永磁同步电机的电磁转矩, J 为转动惯量, T_{CD} 为涡轮环节时间参数. a, b, c 为阀门位置常数, K_a, T_a 为燃料传动系统参数. k_f 为最小负荷常数, 其中 k_f 的取值范围为 $k_1 \sim (1 - k_1)$.

2 燃气轮机鲁棒自适应容错控制

考虑执行器故障的情况下, 系统表达式(1)可以改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_i = g_i x_{i+1} + \theta_i^T \varphi_i(\bar{x}_i) + \Delta_i, \\ \dot{x}_4 = g_4(x) u_a + \theta_4^T \varphi_4(\bar{x}_4) + \Delta_4, \\ y = x_1, \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\bar{x}_i \triangleq [x_1, \dots, x_i]^T \in \mathbf{R}^i (i = 1, \dots, 4)$ 为状态矩阵, y 为控制器输出, g_i 为控制器增益, θ_i 为参数矩阵, $\varphi_i^T(\bar{x}_i) = [x_1, \dots, x_i]$, $\varphi_i(\bar{x}_i) \in \mathbf{R}^i$, Δ_i 为未知扰动项, u_a 为系统实际控制器输入.

2.1 问题描述

当执行器故障发生时, 系统设计的控制输入和实际输入不相同, 可以表示为

$$u_a = \rho(t) u, \quad (3)$$

其中 u 为系统的设计控制输入, $\rho(t)$ 代表执行器的健康因子^[9]. $\rho(t) = 0$ 表示执行器完全失效; $\rho(t) = 1$ 表示执行器正常工作. 因本文只考虑执行器故障情况, 故取 $0 < \rho(t) < 1$.

在实际系统中, 燃气轮机系统模型参数难以测量, 因此, 为设计转速跟踪控制方案需要用到以下假设和引理.

假设 1 $y_d(t)$ 代表额定转速, 在实际工业过程中燃气轮机转速不为零, 即 $y_d(t) > 0$. 并且, 发电机组负载功率的变化使得转速产生相应的变化. 因而有 $\Pi_0 \triangleq \{(y_d, \dot{y}_d, \ddot{y}_d) : 0 \leq y_d^2 + \dot{y}_d^2 + \ddot{y}_d^2 \leq A_0\}$, 其中 A_0 是正常数.

假设 2 假设机组转速有界且不为零. 在表达式(2)中, 控制器增益 $g_4(x)$ 未知, 且该变量的范围可以表示为 $0 < B_0 \leq |g_4(x)| \leq B_1 < \infty$, 其中 B_0, B_1 为大于零的数.

注 1 进入燃烧室的燃料量受到燃料基准信号与转速共同作用^[8], 其表达式为

$$U_f = R_{FS} \times \omega, \quad (4)$$

其中 U_f 表示单位速度内流入燃烧室的单位燃料指令, 燃料冲程基准(Fuel Stroke Reference, FSR, 记其量值为 R_{FS}) 用于描述外界负荷需求的燃料量, 转子速度 ω 大于零.

注 2 单轴燃气轮机发电机组中选用永磁同步电机, 因而发电机电磁转矩表示为

$$T_e = \frac{P_e}{\omega} = \frac{P_{load}}{\omega}, \quad (5)$$

其中 P_e 表示电磁功率, P_{load} 表示负荷功率.

注 3 由于在实际燃气轮机系统中, 精确获取系统模型参数有难度, 因此本章基于参数 $g_i, \theta_i (i = 1, \dots, 4)$ 未知, 扰动 $\Delta_i (i = 1, \dots, 4)$ 未知, 且执行器出现未知时变故障的情况下进行可控制设计, 因此, 使得该设计具有一定的挑战.

假设 3 系统扰动量 $\Delta_i(t, x), i = 1, \dots, 4$, 满足 $|\Delta_i| \leq b_i \times \psi_i(x_1, \dots, x_i)$, 其中 b_i 为大于零的未知常数, ψ_i 为非负的已知光滑函数^[10].

假设 4 Lyapunov 函数的初始条件满足 $\sum_{i=1}^3 (z_i^2 + \tilde{\theta}_i^T \Gamma_i^{-1} \tilde{\theta}_i + y_i^2) + (z_4^2 + \tilde{\theta}_4^T \Gamma_4^{-1} \tilde{\theta}_4) + \sum_{i=1}^4 \frac{\tilde{b}_i^2}{\sigma_i} \leq 2\gamma$, 其中 γ 是给定的正数. 存在参数 $k_i, \sigma_i, \sigma_{\theta_i}, \sigma_{b_i}, \Gamma_i, i = 1, \dots, 4$, 使得整个燃气轮机闭环系统内的所有信号都能够半全局保持一致最终有界, 在这些系统设计参数选取恰当时, 系统稳定状态下的跟踪误差还可以达到尽可能小.

引理 1 $V(\cdot), \zeta(\cdot), N(\zeta(\cdot))$ 是定义在 $[0, t_f)$ 上的光滑函数(smooth function)^[11], 其中, $V(t) \geq 0$. $N(\zeta(\cdot))$ 是 Nussbaum 型函数(Nussbaum-type function)^[12], 本文取 $N(\zeta) = e^{\zeta^2} \cos\left(\frac{\pi}{2}\zeta\right)$. 对于任意 $t \in [0, t_f)$, 都满足:

$$0 \leq V(t) \leq c_0 + e^{-c_1 t} \int_0^t (g_0 N(\zeta) + 1) \zeta e^{c_1 \tau} d\tau,$$

其中, $c_0 > 0, c_1 > 0$ 且有 $g_0 \neq 0$. 因而 $V(t), \zeta(t), \int_0^t g_0 N(\zeta) \zeta d\tau$ 在 $[0, t_f)$ 上有界. 因而, 考虑

$$x(t) \in F(X(t)), \quad x(0) = x^0, \quad (6)$$

其中 $z \mapsto F(z) \subset \mathbf{R}^N$ 是在 \mathbf{R}^N 上的上半连续, 并具有非空紧凸值的特征. 对于每一个解, 包括初始值, 都能够最大限度地扩展.

命题 1 如果 $X_0 \in [0, t_f) \rightarrow \mathbf{R}^N$ 满足式(6)中有界极大解的条件, 那么就有 $t_f = \infty$ ^[13].

2.2 鲁棒自适应容错控制器设计

结合燃气轮机系统模型特性, 考虑系统模型未知, 扰动未知, 引入不依赖于系统模型的鲁棒自适应控制策略设计转速控制器. 由于在执行器故障发生的情况下, 系统依然根据接收到的信息对整个系统

施加控制,然而时变未知的故障容易导致系统运行在不稳定状况下,因此引入容错控制策略.由于系统控制器增益未知,故引入 Nussbaum 函数来设计控制器避免未知项.在动态面迭代设计中,前 3 步中引入虚拟控制器 α_i 和一阶滤波器 $\alpha_{(i+1)f}$,直到第 4 步设计出实际控制器 u ,因而在故障发生的情况下,系统实际输入可以表达为 $u_a = \rho(t)u$.

构造 z_1 为转速追踪误差,引入坐标变换如下:

$$\begin{aligned} z_1 &= x_1 - y_d, \\ z_i &= x_i - \alpha_{if}, \quad i = 2, 3, 4. \end{aligned} \quad (7)$$

定义误差面

$$y_i = \alpha_{if} - \alpha_{i-1}, \quad i = 2, 3, 4, \quad (8)$$

其中 α_i 为虚拟控制器, α_{if} 为滤波器,且满足:

$$\xi_i \alpha_{if} + \alpha_{if} = \alpha_{i-1}, \quad \alpha_{if}(0) = \alpha_{i-1}(0), \quad i = 2, 3, 4, \quad (9)$$

因而,当 $i = 1$ 时,系统的虚拟控制器可以设计为

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= N(\zeta_1) \eta_1, \\ \eta_1 &= k_1 z_1 + \hat{\theta}_1^T \varphi_1 - \dot{y}_d + \hat{b}_1 \psi_1 \tanh\left(\frac{z_1 \psi_1}{\varepsilon_1}\right), \\ \dot{\zeta}_1 &= \nu_1 z_1 \eta_1, \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $k_1 = k_{10} + 2, k_{10} > 0; \hat{\theta}_1$ 和 \hat{b}_1 分别为 θ_1, b_1 的估计值; ε_1 为大于零的数.

当 $i = 2, 3$ 时,系统的虚拟控制器可以设计为

$$\begin{aligned} \alpha_i &= N(\zeta_i) \eta_i, \\ \eta_i &= k_i z_i + \hat{\theta}_i^T \varphi_i - \frac{\alpha_{i-1} - \alpha_{if}}{\xi_i} + \hat{b}_i \psi_i \tanh\left(\frac{z_i \psi_i}{\varepsilon_i}\right), \\ \dot{\zeta}_i &= \nu_i z_i \eta_i, \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $k_i = k_{i0} + 2$, 且 $k_{i0} > 0; \hat{\theta}_i$ 和 \hat{b}_i 分别为 θ_i, b_i 的估计值; ε_i 为大于零的数; $i = 2, 3$.

当 $i = 4$ 时,设计控制器为

$$\begin{aligned} u &= N(\zeta_4) \eta_4, \\ \eta_4 &= k_4 z_4 + \hat{\theta}_4^T \varphi_4 - \frac{\alpha_3 - \alpha_{4f}}{\xi_4} + \hat{b}_4 \psi_4 \tanh\left(\frac{z_4 \psi_4}{\varepsilon_4}\right), \\ \dot{\zeta}_4 &= \nu_4 z_4 \eta_4, \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $\hat{\theta}_4$ 和 \hat{b}_4 分别为 θ_4, b_4 的估计值, $k_4 > 0$.

定理 1 选取更新率

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\theta}}_i &= \Gamma_i (z_i \varphi_i - \sigma_{\theta_i} \hat{\theta}_i), \\ \dot{\hat{b}}_i &= \sigma_i \left[z_i \psi_i \tanh\left(\frac{z_i \psi_i}{\varepsilon_i}\right) - \sigma_{b_i} \hat{b}_i \right], \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $\Gamma_i = \Gamma_i^T > 0, \sigma_i > 0, \sigma_{\theta_i}, \sigma_{b_i}$ 为大于零的设计值.由上式给出的更新率可以得到误差 z_1 收敛到零,且 z_i 有界,进而保证系统所有信号半全局一致最终

有界.

证明

当 $i = 1, 2, 3$ 时,选取 Lyapunov 函数

$$V_i(t) = \frac{1}{2} z_i^2 + \frac{1}{2} \tilde{\theta}_i^T \Gamma_i^{-1} \tilde{\theta}_i + \frac{1}{2\sigma_i} \tilde{b}_i^2 + \frac{1}{2} y_{i+1}^2, \quad i = 1, 2, 3, \quad (14)$$

其中 $\tilde{b}_i = b_i - \hat{b}_i, \tilde{\theta}_i = \theta_i - \hat{\theta}_i, i = 1, 2, 3, 4$.对式(14)求导,得到:

$$\begin{aligned} \dot{V}_i(t) &\leq -k_i z_i^2 + g_i z_i z_{i+1} + g_i z_i y_{i+1} + \frac{1}{\nu_i} g_i N(\zeta_i) \dot{\zeta}_i + \\ &\frac{1}{\nu_i} \dot{\zeta}_i + \sigma_{\theta_i} \tilde{\theta}_i^T \dot{\hat{\theta}}_i + \Delta_i z_i - b_i z_i \psi_i \tanh\left(\frac{z_i \psi_i}{\varepsilon_i}\right) + \\ &y_{i+1} \dot{y}_{i+1} + \sigma_{b_i} \tilde{b}_i \dot{\hat{b}}_i. \end{aligned} \quad (15)$$

由假设 3 可知, $|\Delta_i z_i| \leq b_i |z_i| \psi_i$, 且从文献 [14] 可知:

$$0 \leq |x| - x \tanh\left(\frac{x}{\varepsilon}\right) \leq 0.2785\varepsilon, \quad (16)$$

式中 $\varepsilon > 0$, 且 $x \in \mathbf{R}$.由杨氏不等式可以得到:

$$\begin{aligned} g_i z_i z_{i+1} &\leq z_i^2 + \frac{1}{4} g_i^2 z_{i+1}^2, \\ g_i z_i y_{i+1} &\leq z_i^2 + \frac{1}{4} g_i^2 y_{i+1}^2. \end{aligned} \quad (17)$$

考虑到 x_i 和 z_i 的关系,有

$$\begin{aligned} x_1 &= z_1 + y_d \triangleq \beta_1(z_1, y_d) \\ x_i &= z_i + \alpha_{i-1} + y_i \triangleq \beta_i(z_1, \dots, z_i, y_2, \dots, y_i, y_d, \dot{y}_d, \\ &\quad \hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_i, \hat{b}_1, \dots, \hat{b}_i), \quad i = 2, 3, 4, \end{aligned}$$

其中 $\beta_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 是连续方程.

将式(8)、(9) 带入式(15) 中的 \dot{y}_{i+1} , 得到:

$$\begin{aligned} \dot{y}_2 &= \frac{\alpha_1 - \alpha_{2f}}{\xi_2} - \frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} z_1 - \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_d} \dot{y}_d - \frac{\partial \alpha_1}{\partial \dot{y}_d} \ddot{y}_d - \\ &\frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}_1} \dot{\hat{\theta}}_1 - \frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{b}_1} \dot{\hat{b}}_1 = -\frac{y_2}{\xi_2} + \Xi_2, \\ \dot{y}_{i+1} &= \frac{\alpha_i - \alpha_{(i+1)f}}{\xi_{i+1}} - \sum_{k=1}^i \frac{\partial \alpha_i}{\partial z_k} z_k - \sum_{k=2}^i \frac{\partial \alpha_i}{\partial y_k} y_k - \\ &\frac{\partial \alpha_i}{\partial y_d} \dot{y}_d - \frac{\partial \alpha_i}{\partial \dot{y}_d} \ddot{y}_d - \sum_{k=1}^i \frac{\partial \alpha_i}{\partial \hat{\theta}_k} \dot{\hat{\theta}}_k - \sum_{k=1}^i \frac{\partial \alpha_i}{\partial \hat{b}_k} \dot{\hat{b}}_k = \\ &-\frac{y_{i+1}}{\xi_{i+1}} + \Xi_{i+1}, \quad i = 2, 3. \end{aligned} \quad (18)$$

引入连续函数

$$\begin{aligned} z_1 &\triangleq \tilde{w}_1(z_1, z_2, y_2, y_d, \hat{\theta}_1, \hat{b}_1) \\ z_i &\triangleq \tilde{w}_i(z_1, \dots, z_{i+1}, y_2, \dots, y_{i+1}, y_d, \dot{y}_d, \hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_i, \\ &\quad \hat{b}_1, \dots, \hat{b}_i), \quad i = 2, 3, 4. \end{aligned}$$

由上面的推导,可以得出 Ξ_{i+1} 有最大值 M_{i+1} , 详见文献[8]. 因而有

$$y_{i+1}\dot{y}_{i+1} = y_{i+1} \left(-\frac{y_{i+1}}{\xi_{i+1}} + \Xi_{i+1} \right) \leq -\frac{y_{i+1}^2}{\xi_{i+1}} + \frac{1}{2}y_{i+1}^2 + \frac{1}{2}M_{i+1}^2. \quad (19)$$

将式(16)、(17)、(19)带入式(15)中,得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_i(t) \leq & -k_i z_i^2 + \left(z_i^2 + \frac{1}{4}g_i^2 z_{i+1}^2 \right) + \left(z_i^2 + \frac{1}{4}g_i^2 y_{i+1}^2 \right) + \\ & 0.2785\varepsilon_i + \sigma_{\theta_i} \tilde{\theta}_i^T \hat{\theta}_i + \sigma_{b_i} \tilde{b}_i \hat{b}_i + \\ & \left(-\frac{y_{i+1}^2}{\xi_{i+1}} + \frac{1}{2}y_{i+1}^2 + \frac{1}{2}M_{i+1}^2 \right) + \\ & \frac{1}{\iota_i} g_i N(\zeta_i) \dot{\zeta}_i + \frac{1}{\iota_i} \dot{\zeta}_i, \end{aligned} \quad (20)$$

其中,由于 $\sigma_{\theta_i} \tilde{\theta}_i^T \hat{\theta}_i \leq -\frac{\sigma_{\theta_i}}{2} \|\tilde{\theta}_i\|^2 + \frac{\sigma_{\theta_i}}{2} \|\theta_i\|^2$,

$\sigma_{b_i} \tilde{b}_i \hat{b}_i \leq -\frac{\sigma_{b_i}}{2} \|\tilde{b}_i\|^2 + \frac{\sigma_{b_i}}{2} \|b_i\|^2$, 带入式(20)有

$$\begin{aligned} \dot{V}_i(t) \leq & -c_{i1} V_i(t) + c_{i2} + \frac{1}{\iota_i} g_i N(\zeta_i) \dot{\zeta}_i + \\ & \frac{1}{\iota_i} \dot{\zeta}_i + \frac{1}{4} g_i^2 z_{i+1}^2, \end{aligned} \quad (21)$$

其中

$$k_{i0} = k_i - 2, k_{i0} > 0,$$

$$c_{i1} = \min \left(2k_{i0}, \frac{\sigma_{\theta_i}}{\lambda_{\max}(\Gamma_i^{-1})}, \sigma_{b_i} \sigma_i, 2 \left(\frac{1}{\xi_{i+1}} - \frac{1}{2} - \frac{1}{4} g_i^2 \right) \right),$$

$\lambda_{\max}(\Gamma_i^{-1})$ 表示矩阵 Γ_i 的最大特征值,

$$c_{i2} = \frac{\sigma_{\theta_i}}{2} \|\theta_i\|^2 + \frac{\sigma_{b_i}}{2} \|b_i\|^2 + 0.2785b_i \varepsilon_i + \frac{1}{2} M_{i+1}^2.$$

为了保证稳定性,因而需满足

$$\frac{1}{\xi_{i+1}} - \frac{1}{2} - \frac{1}{4} g_i^2 > 0.$$

将式(21)乘以 $e^{c_{i1}t}$, 并在 $[0, t]$ 上积分, 则有

$$\begin{aligned} V_i(t) \leq & V_i(0) e^{-c_{i1}t} + \int_0^t c_{i2} e^{c_{i1}(\tau-t)} d\tau + \int_0^t \frac{1}{4} g_i^2 z_{i+1}^2 e^{c_{i1}(\tau-t)} d\tau + \\ & \frac{1}{\iota_i} e^{-c_{i1}t} \int_0^t (g_i N(\zeta_i) \dot{\zeta}_i + \dot{\zeta}_i) e^{c_{i1}\tau} d\tau. \end{aligned} \quad (22)$$

式(22)中,若没有 $\int_0^t \frac{1}{4} g_i^2 z_{i+1}^2 e^{c_{i1}(\tau-t)} d\tau$ 项,则由

引理1,可以得出 $V_i(t), \zeta_i(t), \int_0^t g_i N(\zeta_i) \dot{\zeta}_i d\tau$ 在 $[0,$

$t_f)$ 有界. 则从命题1可以得出, $\frac{1}{\iota} \int_0^t (\rho g_4 N(\zeta) \dot{\zeta} +$

$\dot{\zeta}) e^{c_{41}\tau} d\tau$ 在 $[0, t_f)$ 上有界, 其中 $t_f = \infty$. 值得注意的是, 如果能保证 z_{i+1} 有界, 那么可以得到 $\int_0^t \frac{1}{4} g_i^2 z_{i+1}^2 \cdot e^{c_{i1}(\tau-t)} d\tau$ 有界. z_{i+1} 的有界性将在接下来的步骤中得到证明.

当 $i = 4$ 时, 选取 Lyapunov 函数

$$V_4(t) = \frac{1}{2} z_4^2 + \frac{1}{2} \tilde{\theta}_4^T \Gamma_4^{-1} \tilde{\theta}_4 + \frac{1}{2\sigma_4} \tilde{b}_4^2, \quad (23)$$

其中 $\tilde{b}_4 = b_4 - \hat{b}_4$. 对上式求导, 再积分, 得到

$$\begin{aligned} V_4(t) \leq & e^{-c_{41}t} V_4(0) + \frac{c_{42}}{c_{41}} (1 - e^{-c_{41}t}) + \\ & \frac{1}{\iota_4} \int_0^t (\rho g_4 N(\zeta_4) \dot{\zeta}_4 + \dot{\zeta}_4) e^{c_{41}(\tau-t)} d\tau. \end{aligned} \quad (24)$$

由引理1, 可以得出 $V_4(t), \zeta_4(t), \int_0^t N(\zeta_4) \dot{\zeta}_4 d\tau$ 有界. 则从命题1可以得出, $\int_0^t N(\zeta_4) \dot{\zeta}_4 d\tau$ 在 $[0, t_f)$ 上有界, 其中 $t_f = \infty$. 定义

$$C_4 \triangleq \sup_{\tau \in [0, t]} \left| \frac{1}{\iota_4} e^{-c_{41}t} \int_0^t (\rho g_4 N(\zeta_4) \dot{\zeta}_4 + \dot{\zeta}_4) e^{c_{41}\tau} d\tau \right|,$$

其中 $0 < C_4 < +\infty$. 因而, 由式(23)中选取的 Lyapunov 函数可知, $\frac{1}{2} z_4^2(t) \leq V_4(t)$. 则有

$$z_4(t) \leq \sqrt{2 \left(V_4(0) e^{-c_{41}t} + \frac{c_{42}}{c_{41}} + C_4 \right)}.$$

由上式, 得出 z_4 有界. 由 z_4 有界, 反推到式(22)中, 定义

$$\begin{aligned} C_3 \triangleq & \sup_{\tau \in [0, t]} \left| \int_0^t \frac{1}{4} g_3^2 z_4^2 e^{c_{31}(\tau-t)} d\tau + \right. \\ & \left. \frac{1}{\iota_3} \int_0^t (g_3 N(\zeta_3) \dot{\zeta}_3 + \dot{\zeta}_3) e^{c_{31}(\tau-t)} d\tau \right|, \end{aligned}$$

其中, $0 < C_3 < +\infty$. 则有

$$V_3(t) \leq V_3(0) e^{-c_{31}t} + \frac{c_{32}}{c_{31}} (1 - e^{-c_{31}t}) + C_3,$$

上式中, 可知 $V_3(t)$ 有界. 由式(14)可知, $\frac{1}{2} z_3^2(t) \leq V_3(t)$. 由此, 可以得出:

$$z_3 \leq \sqrt{2 \left(V_3(0) e^{-c_{31}t} + \frac{c_{32}}{c_{31}} + C_3 \right)},$$

上式中, 得出 z_3 有界.

重复上述过程, 直至第1个子系统. 定义

$$C_1 \triangleq \sup_{\tau \in [0, t]} \left| \int_0^t \frac{1}{4} g_1^2 z_2^2 e^{c_{11}(\tau-t)} d\tau + \right.$$

$$\frac{1}{\iota_1} \int_0^t (g_1 N(\zeta_1) \dot{\zeta}_1 + \zeta_1) e^{c_{11}(\tau-t)} d\tau \Big|,$$

其中 $0 < C_1 < +\infty$. 得出:

$$z_1(t) \leq \sqrt{2 \left(V_1(0) e^{-c_{11}t} + \frac{c_{12}}{c_{11}} + C_1 \right)},$$

从上式中,得出 z_1 有界.

通过反推,可以得到 $V_i(t), z_i$ 和 y_{i+1} 在 $[0, t_f]$ 上有界,且对于所有的 $t > 0$ 都成立,并且根据以上证明过程,能够严格地证明系统所有变量都有界.通过调节系统设置的参数,就能够得到尽可能小的 z_1 的值,即转速误差能够尽可能小.

3 仿真结果与性能比较

利用 Matlab 平台,验证在孤岛运行模式下燃气轮机执行器发生故障时,所设计的鲁棒自适应容错控制器的有效性.为了简化仿真,考虑燃气轮机系统模型中参数未知、扰动未知时,所设计的控制器的有效性.仿真参数如下表 1 所示,取执行器健康因子为 $\rho(t) = 0.8 + 0.2\cos(2\pi t)$,Nussbaum 型函数为 $N(\zeta) = e^{\zeta^2} \cos\left(\frac{\pi}{2}\zeta\right)$,仿真结果如图 2、图 3 所示.

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	取值	参数	取值
σ_1	0.01	ξ_4	0.08
σ_2	0.1	ε_1	0.001
σ_3	0.02	ε_2	0.001
σ_4	0.01	ε_3	0.001
σ_{b_1}	1	k_1	2.2
σ_{b_2}	1.5	k_2	2.5
σ_{b_3}	4.5	k_3	2.5
σ_{b_4}	2.5	k_4	7
ξ_2	0.12	ζ	1
ξ_3	0.05	ι	0.001

图 2 表示在执行器故障情况下转子的转速跟踪曲线,图 3 表示转速追踪的误差曲线.通过系统响应曲线,验证了燃气轮机发电机组在扰动未知且执行器发生故障时,所设计的控制器的有效性.

4 结束语

燃气轮机模型参数获取较难,且未知扰动又易造成控制效果难以实现最佳.在执行器故障发生的情况下,可能会造成系统控制效果不理想,因此本文

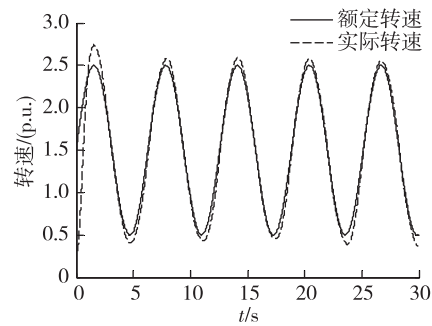


图 2 执行器故障情况下转速跟踪曲线

Fig. 2 Response of the rotor speed under actuator fault

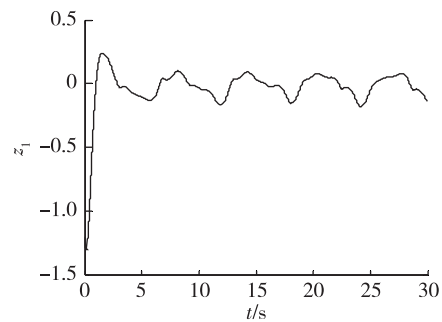


图 3 执行器故障情况下系统转速跟踪误差

Fig. 3 Tracking error of the system under actuator fault

引入不依赖于系统模型的鲁棒自适应控制策略,结合容错控制技术解决执行器故障引起的未知时变项.该方法在故障发生时控制器依然能够保持燃气轮机系统的稳定性,且能够保障闭环系统内所有信号半全局一致最终有界,误差信号最终收敛在原点的小邻域内,并且通过调节系统设置的参数,能够得到尽可能小的误差.并且,设计的自适应律能够对全局变量进行修正,使得系统在模型未知且执行器发生故障时,依然能够快速响应并跟踪上设计值.

参考文献

References

- [1] Rowen W I. Simplified mathematical representations of heavy-duty gas turbines [J]. Journal of Engineering for Gas Turbine & Power, 1983, 105(4): 865-869
- [2] Tavakoli M R B, Vahidi B, Gawlik W. An educational guide to extract the parameters of heavy duty gas turbines model in dynamic studies based on operational data [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1366-1374
- [3] Pourbeik P, Modau F. Model development and field testing of a heavy-duty gas-turbine generator [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 664-672
- [4] Enalou H B, Soreshjani E A. A detailed governor-turbine

- model for heavy-duty gas turbines with a careful scrutiny of governor features[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1435-1441
- [5] Xu X, Jia H J, Chiang H D, et al. Dynamic modeling and interaction of hybrid natural gas and electricity supply system in microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1212-1221
- [6] Jurado F, Saenz J R. Adaptive control of a fuel cell-microturbine hybrid power plant[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2003, 18(2): 342-347
- [7] Saha A K, Chowdhury S, Chowdhury S P, et al. Modeling and performance analysis of a micro-turbine as a distributed energy resource [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(2): 529-538
- [8] Wang D. Neural network-based adaptive dynamic surface control of uncertain nonlinear pure-feedback systems[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2011, 21(5): 527-541
- [9] Song Y D, Wang Y J, Wen C Y. Adaptive fault-tolerant PI tracking control with guaranteed transient and steady-state performance [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 62(1): 481-487
- [10] Hong F, Ge S S, Ren B, et al. Robust adaptive control for a class of uncertain strict-feedback nonlinear systems [J]. International Journal of Robust & Nonlinear Control, 2009, 19(7): 746-767
- [11] Zhao K, Song Y D, Wen C Y. Computationally inexpensive fault tolerant control of uncertain non-linear systems with non-smooth asymmetric input saturation and undetectable actuation failures [J]. IET Control Theory & Applications, 2016, 10(15): 1866-1873
- [12] Mohanty A, Yao B. Indirect adaptive robust control of hydraulic manipulators with accurate parameter estimates [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(3): 567-575
- [13] Ryan E P. A universal adaptive stabilizer for a class of nonlinear systems[J]. Systems & Control Letters, 1991, 16(3): 209-218
- [14] Polycarpou M M, Ioannou P A. A robust adaptive nonlinear control design[J]. Automatica, 1996, 32(3): 423-427

Robust controller design for gas turbine systems via robust adaptive control technique

TAN Xueqin¹ SU Xiaojie¹

¹ College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030

Abstract Lots of sustainable resources cannot provide continuous and stable energy for their characteristics of intermittent power providing, such as solar, wind, and tidal energy. Gas turbine power generation system demonstrates vast potential as an energy resource, due to its fast response and high efficiency characteristics, making it an ideal alternative source for hybrid renewable energy generation systems. However, its mathematical modeling often leads to complex nonlinear dynamics. Moreover, the most important part is the speed control loop, where traditional PID controllers were always applied. However, the parameters of controllers cannot be adjusted automatically, which will weaken the power system performance. Besides, considering that the actuator fault occurs, traditional controllers cannot guarantee the stability of the system, which may lead to failure of the plants operating. Therefore, by focusing on modeling a simplified single-shaft gas turbine generation system under stand-alone operation, this paper develops a control scheme for speed tracking loop based on the backstepping method. To account for modeling uncertainties and external disturbances, a robust adaptive control, combined with a dynamic surface control, is constructed. Besides, by considering the possibility of actuator faults, a fault tolerant control unit with Nussbaum-type functions is utilized. Finally, simulations verify that the presented controllers ensure high precision of tracking performance.

Key words gas turbine generation system; backstepping method; robust adaptive control; fault tolerant control; dynamic surface design