

发电机励磁系统的非线性大干扰抑制控制器

姜 因[†], 刘 婷, 张 铁, 井元伟

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 针对具有励磁控制的单机无穷大系统, 基于backstepping方法提出了一种非线性大干扰抑制控制方案. 重点考虑发电机转子受到外界未知大扰动对系统输出的影响, 利用minimax方法可有效降低以往由简单估计干扰上界或不等式放缩带来的保守性, 从而确保单机无穷大系统具有良好的鲁棒性和对大干扰的不敏感性. 考虑系统受到短路接地故障或者发电机发生机械功率扰动等突发性大干扰的情形, 对单机无穷大系统进行仿真实验, 结果表明这种控制方案可有效改善电力系统暂态稳定的动态过程.

关键词: 发电机励磁系统; 非线性系统; 大干扰抑制; backstepping; minimax

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Nonlinear large disturbance attenuation controller for generator excitation systems

JIANG Nan[†], LIU Ting, ZHANG Tie, JING Yuan-wei

(Faculty of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China)

Abstract: A nonlinear large disturbance attenuation control scheme is proposed based on the backstepping method for the single-machine infinite-bus excitation system. Focus is given to the impact on the generator rotor caused by the unknown external disturbances on the system output. The minimax method is employed in the disturbance treatment to reduce the conservativeness brought by the estimation of the upper bound of the disturbance and the inequality scaling. This ensures the single-machine infinite-bus system of a high robustness and a low sensitivity to large disturbances. For testing the impact caused by the short-circuit ground fault or the large abrupt disturbances of mechanical power, we perform a simulated experiment on a single-machine infinite-bus system; simulation results show that the control scheme can effectively improve the dynamic process of transient stabilization of the power system.

Key words: generator excitation systems; nonlinear systems; large disturbance attenuation; backstepping; minimax

1 引言(Introduction)

电力系统大型发电机组的励磁控制是改善电力系统稳定性的有效而又经济的手段之一. 近年来, 发电机的励磁调节器多是基于发电机的机端电压偏差进行PID调节, 该类型调节器虽可保证发电机机端电压的调节精度, 但难以有效改善电力系统的稳定性和故障后系统的动态性能.

随着电力系统规模升级、远距离输电方式的出现以及快速励磁系统的引入, 系统中容易产生低频振荡现象, 因此提高电力系统小干扰稳定性问题已成为主要的研究目标. 大量的研究集中在寻找新的发电机励磁调节规律的问题上^[1-2], 但是这些励磁控制器的设计都是依据近似线性化的数学模型, 当实际系统的运行状态对于所设计的平衡状态有较大偏差时, 对运行

状态远离平衡点的电力系统难以发挥有效的作用. 特别是当电力系统遭受大的干扰后, 电力系统的暂态稳定性就成了限制电网传输容量的一个主要矛盾. 因此, 为提高电力系统暂态稳定性, 鲁棒非线性励磁控制的设计研究取得了重要进展. 文献[3]首次从理论上把微分几何方法应用于发电机励磁控制设计中, 但是由于反馈精确线性化方法要求模型精确可知, 使得在实际中达不到理论上的控制效果. 文献[4-6]提出了多种非线性鲁棒励磁控制规律, 这些鲁棒镇定控制器和干扰抑制控制器的设计基础都是通过构造保证系统无源性的能量函数而得到的. 然而由于能量函数不易找到, 故这种方法存在一定局限性, 而且即使在能量函数找到以后, 控制器的设计也是比较复杂的. minimax控制方法为抑制突发性的大干扰提供了有效途径. 文献

收稿日期: 2012-09-26; 收修改稿日期: 2013-05-17.

[†]通信作者. E-mail: jiangnan@ise.neu.edu.cn; Tel.: +86 24-83684583.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N110404032); 国家自然科学基金重点资助项目(61233002); 国家自然科学基金青年基金资助项目(61304021).

[7-8]针对非线性不确定系统设计了鲁棒minimax控制器,有效的抑制了不确定性因素带来的影响.文献[9]应用minimax输出反馈控制方法研究了电网系统的鲁棒镇定问题.文献[10-11]对电力系统非线性汽门和并联电容器的大干扰抑制问题进行较为深入的研究.通过改变干扰信号的形式和幅值,验证了所研究的控制方法对干扰是不具敏感性的.

本文将讨论发电机组励磁系统的minimax鲁棒控制器设计方法.首先假设系统的不确定性可以用参数扰动的形式来表示,通过设计backstepping控制器保证系统在参数存在不确定性下仍是稳定的.同时重点讨论在机械功率存在扰动及传输线出现故障等情况下系统的动态响应.在系统模型中干扰项的处理上,没有简单估计干扰上界或进行不等式放缩^[12].利用minimax方法充分估计突发性大干扰对系统的影响,有效地降低了干扰处理的保守性,从而确保发电机系统对大干扰不具敏感性.最后,对具有励磁控制的单机无穷大系统进行仿真实验,结果表明这种控制方案可以保证系统在出现较大参数扰动时仍能保持稳定运行.

2 系统模型的描述 (Description of system model)

考虑带有励磁控制的单机无穷大总线系统(single-machine infinite-bus system, SMIB),系统结构如图1所示.

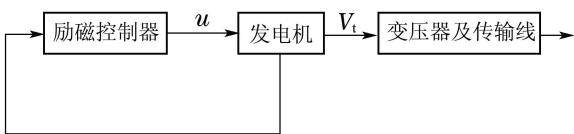


图1 单机无穷大励磁闭环控制系统结构图

Fig. 1 Excitation closed-loop control charts with SMIB

励磁控制系统的数学模型如下:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega_s \omega_r, \\ \dot{\omega}_r = \frac{1}{M}(-D\omega_r - a_1 E'_q \sin \delta + a_2 \sin(2\delta) + P_m), \\ \dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{d0}}(-bE'_q + c \cos \delta + u), \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{V_s}{X'_d \Sigma}, \quad a_2 = \frac{X_q - X'_d}{2X_q \Sigma X'_d \Sigma} V_s^2, \\ b &= \frac{X_d \Sigma}{X'_d \Sigma}, \quad c = \frac{X_d - X'_d}{X'_d \Sigma} V_s, \quad u = E_{fds} + u_f, \end{aligned}$$

E_{fds} 为励磁绕组电压, δ 为发电机转子运行角, ω_r 为相对角速度, ω_s 是发电机转子角速度, P_m 为原动机输出的机械功率, D , E'_q 分别为阻尼系数和发电机 q 轴暂态

电势, V_s 为无穷大母线电压, u_f 为励磁控制输入电压.

定义状态变量为

$$x_1 = \delta, \quad x_2 = \omega_r, \quad x_3 = E'_q,$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 分别为发电机转子受到的外界未知扰动,在功率方程的推导过程中,把发电机转速近似地以 $\omega_s = 1$ 来代替,则系统(1)可转化为

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad (2)$$

$$\dot{x}_2 = -b_1 x_3 \sin x_1 - b_2 x_2 + a_2 m_1 \sin(2x_1) + m_1 P_m + \varepsilon_1, \quad (3)$$

$$\dot{x}_3 = b_3 \cos x_1 - b_4 x_3 + E + u_1 + \varepsilon_2, \quad (4)$$

$$z = [q_1 x_1 \quad q_2 x_2]^T, \quad (5)$$

其中:

$$b_1 = \frac{V_s}{M X'_{d\Sigma}}, \quad b_2 = \frac{D}{M}, \quad m_1 = \frac{1}{M},$$

$$b_3 = \frac{X_d - X'_d}{T'_{d0} X'_{d\Sigma}} V_s, \quad b_4 = \frac{X_{d\Sigma}}{T'_{d0} X'_{d\Sigma}},$$

$$E = \frac{1}{T'_{d0}} E_{fds}, \quad u_1 = \frac{1}{T'_{d0}} u_f,$$

z 为调节输出, q_1 和 q_2 是非负的权重系数,它们表示 x_1 和 x_2 之间的加权比重, $q_1^2 + q_2^2 \leq 1$.

3 非线性大干扰抑制控制器设计 (Nonlinear large disturbance attenuation controller design)

非线性励磁大干扰抑制控制器的设计问题归结如下:对于任意给定小的 $\gamma > 0$,针对系统受到大的外界干扰和不确定性扰动的情形,求状态反馈 $u = \alpha(x_1, x_2, x_3)$,使得系统(2)-(5)对干扰有

$$V(x(t)) - V(x(0)) \leq \int_0^T (\gamma^2 \|\varepsilon\|^2 - \|z\|^2) dt,$$

且系统在平衡点附近渐近稳定.

Step 1 对于系统(2),将 x_2 看作虚拟控制,并选择 $x_2^* = -c_1 x_1, c_1 > 0$,定义

$$e_1 = x_1, \quad e_2 = x_2 - x_2^*.$$

选取第一个能量函数为

$$V_1 = \frac{\sigma}{2} e_1^2, \quad (6)$$

其中 $\sigma > 0$,则

$$\dot{V}_1 = \sigma e_1 e_2 - \sigma c_1 e_1^2.$$

Step 2 考虑子系统(2)-(3),对式(6)进行增广,构造新的存储函数

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_2^2. \quad (7)$$

为使所考虑的子系统针对任意的干扰都满足稳定不等式条件,定义能量函数

$$H_1 = \dot{V}_2 + \frac{1}{2} (\|z\|^2 - \gamma^2 \|\varepsilon_1\|^2) \quad (8)$$

及性能指标函数

$$J_1 = \int_0^\infty (\|z\|^2 - \gamma^2 \|\varepsilon_1\|^2) dt. \quad (9)$$

将 $\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + e_2 \dot{e}_2$ 代入式(8)有

$$\begin{aligned} H_1 = \dot{V}_1 + e_2 \dot{e}_2 + \frac{1}{2} (\|z\|^2 - \gamma^2 \|\varepsilon_1\|^2) = \\ -\sigma c_1 e_1^2 + e_2 (\sigma e_1 - b_1 x_3 \sin x_1 + \\ a_2 m_1 \sin(2x_1)) - b_2 x_2 + m_1 P_m + \varepsilon_1 + \\ \frac{1}{2} q_1^2 x_1^2 + \frac{1}{2} q_2^2 x_2^2 - \frac{1}{2} \gamma^2 \varepsilon_1^2 = \\ -\sigma c_1 e_1^2 + e_2 \sigma e_1 - b_1 x_3 \sin x_1 + \\ a_2 m_1 \sin(2x_1) - b_2 x_2 + m_1 P_m + \\ \frac{1}{2} q_1^2 e_1^2 + \frac{1}{2} q_2^2 (e_2 - c_1 e_1)^2 + \\ e_2 \varepsilon_1 - \frac{1}{2} \gamma^2 \varepsilon_1^2. \end{aligned} \quad (10)$$

针对每一个子系统, 笔者希望 J_1 越小越好, 如果存在一个干扰使得 J_1 最大, 那么这个干扰对系统性能的破坏程度是最大的. 已有结果对干扰的处理往往是人为的施加一个上界, 然而这个上界有时候是不合理的. 一些常规的做法是将能量函数中和干扰有关的项放缩掉, 这样处理会使得假设条件强化, 同时也增加了保守性. 笔者利用 minimax 的方法巧妙的推算出系统所能承受的最大干扰程度, 然后利用 backstepping 方法设计控制器.

对 H_1 关于 ε_1 求一阶导数, 并且导数等于 0, 则 $e_2 - \gamma^2 \varepsilon_1 = 0$, 进而有

$$\varepsilon_1^* = \frac{1}{\gamma^2} e_2, \quad (11)$$

继续求二阶导数, 有

$$\frac{\partial^2 H_1}{\partial \varepsilon_1^2} = -\frac{\gamma^2}{2} < 0,$$

可知 H_1 关于 ε_1 有极大值, 即

$$\max H_1 = \max \{ \dot{V}_2 + \frac{1}{2} [\|Z\|^2 - \gamma^2 \|\varepsilon_1\|^2] \}.$$

上式两边同时取积分, 有

$$\begin{aligned} \max \int_0^\infty H_1 dt = \\ \max \{ \int_0^\infty \dot{V}_2 dt + \frac{1}{2} \int_0^\infty (\|Z\|^2 - \gamma^2 \|\varepsilon_1\|^2) dt \}. \end{aligned}$$

令 $\bar{H}_1 = \int_0^\infty H_1 dt$, 则

$$\max \bar{H}_1 = \max \{ (V_2(\infty) - V_2(0)) + \frac{J_1}{2} \}.$$

由 $\frac{J_1}{2} = \bar{H}_1 - \Delta V_2$, 有

$$\max \left(\frac{J_1}{2} \right) \leq \max(\bar{H}_1) - \min(\Delta V_2).$$

注 1 假设干扰 ε_1 使得存储函数 V_2 的衰减为 0, 即 $\min(\Delta V_2) = 0$, 也就是说系统受到充分大干扰 ε_1 的影响, V_2

不衰减, 此时 $\max(\frac{J_1}{2})$ 等价于 $\max(\bar{H}_1)$. 即, 如果 ε_1 使得函数 H_1 取最大值就等价于使性能指标 J_1 取得最大值, 进而说明 ε_1 确实是使系统受影响最大的干扰.

将式(11)代入式(8), 则

$$\begin{aligned} H_1 = \dot{V}_1 + e_2 \dot{e}_2 + \frac{1}{2} (\|z\|^2 - \gamma^2 \|\varepsilon_1\|^2) = \\ -\sigma c_1 e_1^2 + e_2 (\sigma e_1 - b_1 x_3 \sin x_1 - \\ b_2 x_2 + m_1 P_m + a_2 m_1 \sin(2x_1)) + \\ \frac{1}{2} q_1^2 e_1^2 + \frac{1}{2} q_2^2 e_2^2 - q_2^2 c_1 e_1 e_2 + \\ \frac{1}{2} q_2^2 c_1^2 e_1^2 + \frac{1}{2\gamma^2} e_2^2 = \\ -\alpha e_1^2 + e_2 (h_1 x_1 + h_2 x_2 - b_1 x_3 \sin x_1 + \\ a_2 m_1 \sin(2x_1) + m_1 P_m), \end{aligned}$$

其中:

$$\begin{aligned} \alpha &= \sigma c - \frac{1}{2} q_1^2 - \frac{1}{2} q_2^2 c_1^2, \\ h_1 &= \sigma - q_2^2 c_1 + \frac{1}{2\gamma^2} c_1, \\ h_2 &= \frac{1}{2} q_2^2 - b_2 + \frac{1}{2\gamma^2} + c_1, \end{aligned}$$

并且令

$$\begin{aligned} h_1 x_1 + h_2 x_2 - b_1 x_3 \sin x_1 + a_2 m_1 \sin(2x_1) + \\ m_1 P_m = -c_2 e_2, \end{aligned}$$

则可选择

$$\begin{aligned} x_3^* = \frac{1}{b_1 \sin x_1} (h_1 x_1 + h_2 x_2 + a_2 m_1 \sin(2x_1) + \\ m_1 P_m + c_2 e_2), \end{aligned} \quad (12)$$

则 $H_1 = -\alpha e_1^2 - c_2 e_2^2 \leq 0$.

Step 3 考虑子系统(2)-(4), 对式(7)进行增广, 构造新的存储函数如下:

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2} e_3^2, \quad (13)$$

其中 $e_3 = x_3 - x_3^*$. 选择能量函数

$$H_2 = \dot{V}_3 + \frac{1}{2} (\|z\|^2 - \gamma^2 \|\varepsilon\|^2) \quad (14)$$

及性能指标函数

$$J_2 = \int_0^\infty (\|z\|^2 - \gamma^2 \|\varepsilon\|^2) dt, \quad (15)$$

进而有

$$\begin{aligned} H_2 = \dot{V}_3 + \frac{1}{2} (\|z\|^2 - \gamma^2 \|\varepsilon\|^2) = \\ \dot{V}_2 + e_3 \dot{e}_3 + \frac{1}{2} q_1^2 x_1^2 + \frac{1}{2} q_2^2 x_2^2 - \\ \frac{1}{2} \gamma^2 \varepsilon_1^2 - \frac{1}{2} \gamma^2 \varepsilon_2^2 = \\ H_1 + e_3 (\dot{x}_3 - \dot{x}_3^*) - \frac{1}{2} \gamma^2 \varepsilon_2^2. \end{aligned} \quad (16)$$

又由于

$$\begin{aligned} \dot{x}_3^* = & -\frac{x_2 \cos x_1}{b_1 \sin^2 x_1} (h_1 x_1 + h_2 x_2 + \\ & a_2 m_1 \sin(2x_1) + m_1 P_m + c_2 e_2) + \\ & \frac{1}{b_1 \sin x_1} (h_1 x_2 + h_2 \dot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + \\ & 2a_2 m_1 \cos(2x_1) + c_2 c_1 \dot{x}_1). \end{aligned}$$

将式(17)代入式(16), 则

$$\begin{aligned} H_2 = & -\alpha e_1^2 - c_2 e_2^2 - \frac{1}{2} \gamma^2 \varepsilon_2^2 + \\ & e_3 [b_3 n_3 - b_4 x_3 + E + u_1 + \varepsilon_2 + \\ & \frac{x_2 n_3}{b_1 n_1^2} (h_1 x_1 + h_2 x_2 + a_2 m_1 \sin(2x_1) + \\ & m_1 P_m + c_2 e_2) - \frac{1}{b_1 n_1} (h_1 x_2 + \\ & (h_2 + c_2)(-b_1 x_3 n_1 - b_2 x_2 + \\ & a_2 m_1 n_2 + m_1 P_m + \frac{1}{\gamma^2} e_2) + \\ & 2a_2 m_1 n_4 x_2 + c_2 c_1 x_2)], \end{aligned} \quad (17)$$

其中:

$$\begin{aligned} n_1 = & \sin x_1, \quad n_2 = \sin(2x_1), \\ n_3 = & \cos x_1, \quad n_4 = \cos(2x_1). \end{aligned}$$

对 H_2 分别关于 ε_2 求一阶导, 并令其导数等于0, 可得 $e_3 - \gamma^2 \varepsilon_2 = 0$, 则

$$\varepsilon_2^* = \frac{1}{\gamma^2} e_3. \quad (18)$$

将式(18)代入式(17)得

$$\begin{aligned} H_2 = & -\alpha e_1^2 - c_2 e_2^2 - \frac{1}{2} \gamma^2 \varepsilon_2^2 + \\ & e_3 [b_3 n_3 - b_4 x_3 + E + u_1 + \frac{1}{2\gamma^2} x_3 + \\ & (\frac{x_2 n_3}{b_1 n_1^2} - \frac{1}{2\gamma^2 b_1 n_1}) (h_1 x_1 + h_2 x_2 + \\ & a_2 m_1 \sin(2x_1) + m_1 P_m + c_2 x_2 + c_2 c_1 x_1) - \\ & \frac{1}{b_1 n_1} (h_1 x_2 + (h_2 + c_2)(-b_1 x_3 n_1 - b_2 x_2 + \\ & a_2 m_1 n_2 + m_1 P_m + \frac{1}{\gamma^2} x_2 + \frac{1}{\gamma^2} c_1 x_1) + \\ & c_2 c_1 x_2 + 2a_2 m_1 n_4 x_2)]. \end{aligned}$$

令

$$\begin{aligned} N_1 = & \frac{n_3 x_2}{b_1 n_1^2} - \frac{1}{2\gamma^2 b_1 n_1}, \quad N_2 = \frac{h_1}{b_1 n_1}, \\ N_3 = & \frac{h_2 + c_2}{b_1 n_1}, \quad N_4 = \frac{2a_2 m_1 n_4}{b_1 n_1}, \quad N_5 = \frac{c_2 c_1}{b_1 n_1}, \end{aligned}$$

则

$$\begin{aligned} H_2 = & -\alpha e_1^2 - c_2 e_2^2 + e_3 [b_3 n_3 - b_4 x_3 + E + \\ & u_1 + \frac{1}{2\gamma^2} x_3 + N_1 (h_1 x_1 + h_2 x_2 + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & a_2 m_1 \sin(2x_1) + m_1 P_m + c_2 x_2 + c_2 c_1 x_1) - \\ & (N_2 x_2 + N_3 (-b_1 x_3 n_1 - b_2 x_2 + \\ & a_2 m_1 n_2 + m_1 P_m + \frac{1}{\gamma^2} x_2 + \frac{1}{\gamma^2} c_1 x_1) + \\ & N_4 x_2 + N_5 x_2)]. \end{aligned}$$

进而上式可写为

$$\begin{aligned} H_2 = & -\alpha e_1^2 - c_2 e_2^2 + e_3 (h_3 x_1 + \\ & h_4 x_2 + h_5 x_3 + h_6 + u_1). \end{aligned}$$

选择

$$u_1 = -h_3 x_1 - h_4 x_2 - h_5 x_3 - h_6 - c_3 e_3,$$

其中:

$$\begin{aligned} h_3 = & N_1 h_1 + c_2 c_1 + \frac{N_3}{\gamma^2} c_1, \\ h_4 = & N_1 h_2 + c_2 x_2 + N_2 - N_3 b_2 + \frac{N_3}{\gamma^2} + N_4 + N_5, \\ h_5 = & -b_4 + \frac{1}{2\gamma^2} - b_1 n_1 N_3, \\ h_6 = & b_3 n_3 + E + (N_1 - N_3) \frac{1}{M} P_m + \frac{a_2 n_2 N_1}{M}. \end{aligned}$$

由 $u_1 = \frac{1}{T'_{d0}} u_f$, 可得

$$\begin{aligned} u_f = & T'_{d0} [\frac{c_3}{b_1 n_1} (h_1 x_1 + h_2 x_2 + a_2 m_1 \sin(2x_1) + \\ & m_1 P_m + c_2 x_2 + c_2 c_1 x_1) - h_3 x_1 - h_4 x_2 - \\ & h_5 x_3 - h_6 - c_3 x_3]. \end{aligned} \quad (19)$$

因此有

$$H_2 = -\alpha e_1^2 - c_2 e_2^2 - c_3 e_3^2 \leq 0. \quad (20)$$

令

$$V(x) = 2V_3(e_1, e_2, e_3),$$

则

$$\dot{V} \leq \gamma^2 \|\varepsilon\|^2 - \|z\|^2. \quad (21)$$

在反馈控制律(19)下闭环误差系统为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - c_1 e_1, \\ \dot{e}_2 = -c_2 e_2 - e_1, \\ \dot{e}_3 = -c_3 e_3. \end{cases} \quad (22)$$

对任意给定的 $t > 0$ 及初始状态, 对式(21)两侧积分可得到耗散不等式, 且对任意的干扰都有 $H_2 \leq 0$, 在反馈控制律(19)下闭环误差系统(22)都是渐近稳定的, 则当 $t \rightarrow \infty$ 时, $e_1 \rightarrow 0, e_2 \rightarrow 0, e_3 \rightarrow 0$. 根据虚拟控制的定义可知, 状态 x_1, x_2, x_3 是有界收敛的.

4 仿真分析(Simulation analysis)

以下将给出针对如图1所示的单机无穷大系统设计干扰抑制控制器的仿真分析, 仿真参数选取如表1所示.

表 1 物理参数

Table 1 Physical parameters

参数	取值	参数	取值	参数	取值
ω_s	1.0 p.u.	M	7 s	V_s	0.995 p.u.
D	0.1 p.u.	T_{d0}	7.4 p.u.	E_{fds}	1.8846 p.u.
P_{m0}	0.9 p.u.	$T_{H\Sigma}$	0.2 p.u.	X_T	0.15 p.u.
X_d	1.8 p.u.	C_H	0.3	X'_d	0.3 p.u.
X_l	1.0 p.u.	C_{ml}	0.7		

在模型中所定义的系统参数计算如下:

$$b_1 = 47.0059, b_2 = 0.014285714,$$

$$b_3 = 0.2123, b_4 = 0.3485,$$

$$E = 0.25467, m_1 = 44.87857,$$

$$m_2 = 5, d_1P = 28.2735, d_2P = 1.35.$$

1) 机械功率存在20%可恢复扰动. 同步发电机工作在稳定的平衡点, 在10 s时机械功率出现20%的扰动, 但在10.1 s后恢复到原数值, 即 $P + \Delta P(t)$, 其中:

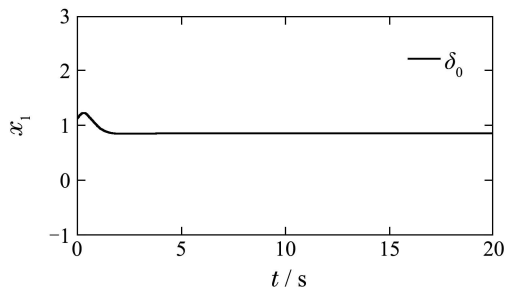
$$\Delta P(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 10 \text{ s}, \\ 0.2, & 10 \text{ s} \leq t \leq 10.1 \text{ s}, \\ 0, & 10.1 \text{ s} < t, \end{cases}$$

其中 t 的单位是s, 闭环系统的动态响应如图2所示.

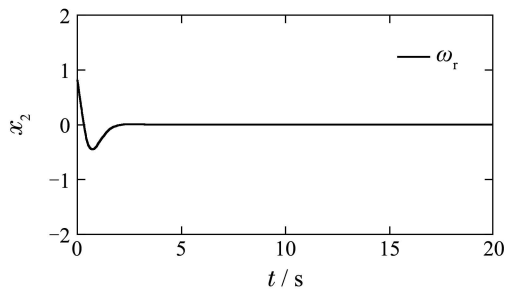
2) 机械功率存在30%可恢复扰动. 同步发电机工作在稳定的平衡点, 在10 s时机械功率出现30%的扰动, 但在10.1 s后恢复到原来数值, 即 $P + \Delta P(t)$, 其中

$$\Delta P(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 10 \text{ s}, \\ 0.3, & 10 \text{ s} \leq t \leq 10.1 \text{ s}, \\ 0, & 10.1 \text{ s} < t, \end{cases}$$

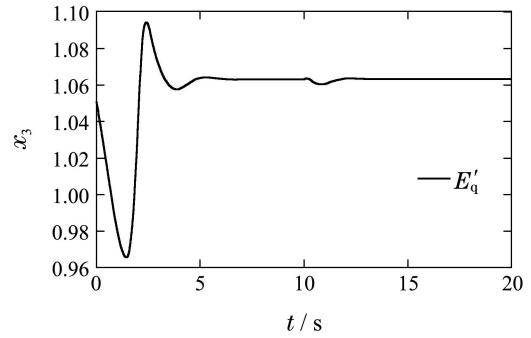
其中 t 的单位是s, 利用控制器(19)的闭环系统的动态响应如图3所示, 文献[13]中常规非线性鲁棒控制器的闭环系统响应如图4所示.



(a)



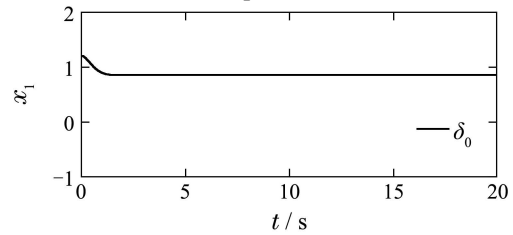
(b)



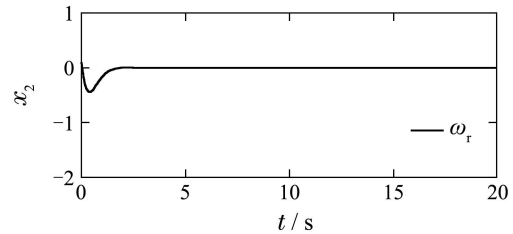
(c)

图 2 机械功率20%的扰动时具有控制器(19)的闭环系统响应

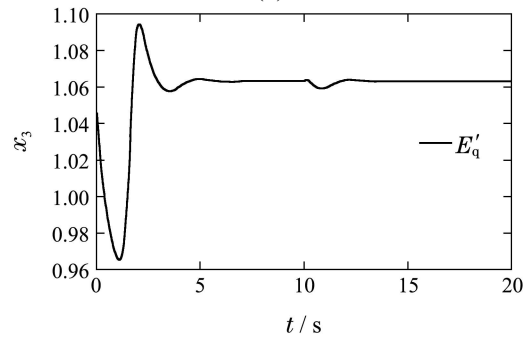
Fig. 2 The responding of the closed-loop system with controllers (19) when 20% disturbance occurs in the mechanical power



(a)



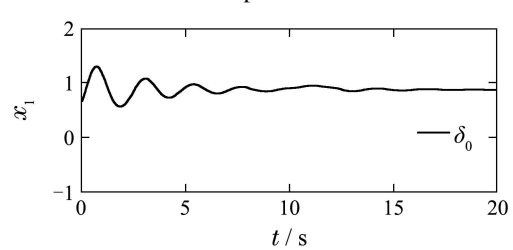
(b)



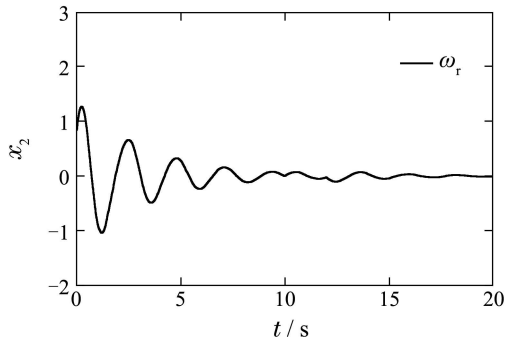
(c)

图 3 机械功率30%的扰动时具有控制器(19)的闭环系统响应

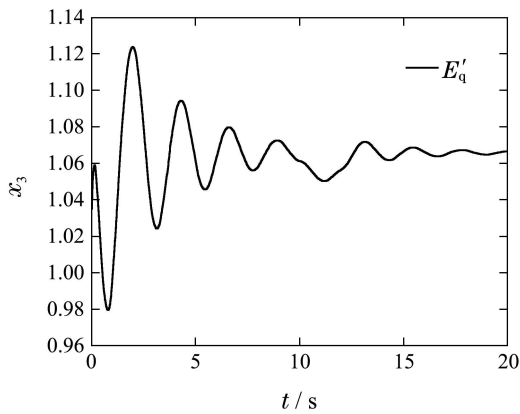
Fig. 3 The responding of the closed-loop system with controllers (19) when 30% disturbance occurs in the mechanical power



(a)



(b)



(c)

图4 机械功率30%的扰动时常规控制器的闭环系统响应
Fig. 4 The responding of the closed-loop system with conventional controllers when 30% disturbance occurs in the mechanical power

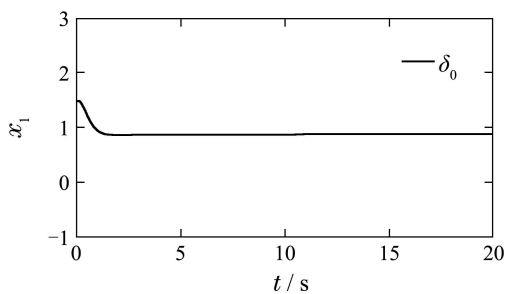
3) 机械功率发生不可恢复的扰动, 即机械功率突变到另一个值, 即

$$\Delta P(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 10\text{s} \\ 0.3, & 10\text{s} \leq t. \end{cases}$$

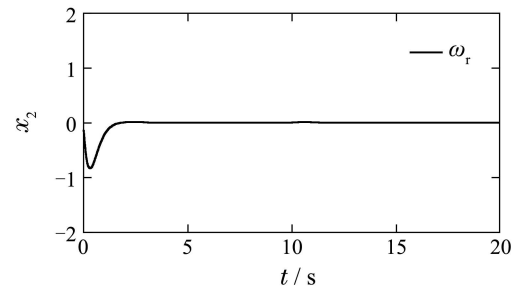
此时闭环系统的动态响应如图5所示.

从图2-5的比较可以看出, 当机械功率的扰动增加和由可恢复扰动到不可恢复扰动时, 系统的动态响应并未发生明显变化, 可见所设计的干扰抑制控制器对干扰的变化是不敏感的.

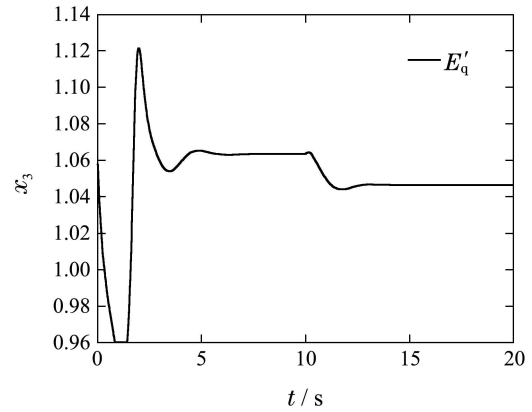
比较图3和图4可以看出, 针对较大的功率扰动, 文中所设计的控制器在曲线振荡幅度和收敛时间上均具有优势.



(a)



(b)



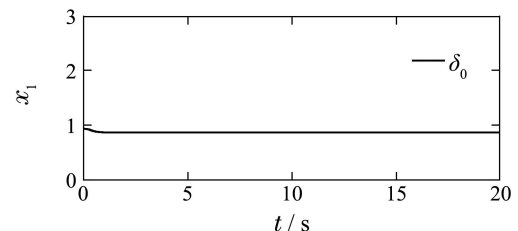
(c)

图5 机械功率存在不可恢复扰动时具有控制器(19)的闭环系统响应
Fig. 5 The responding of the closed-loop system with controller (19) when unrecoverable disturbance occurs in the mechanical power

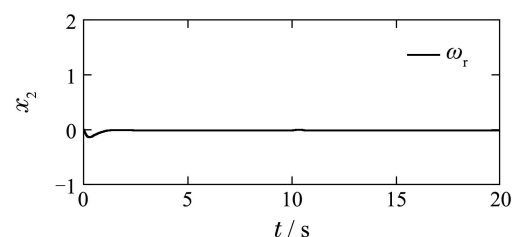
4) 输电线出现短路故障, 在10s时一条输电线路的送端发生瞬时三相对地短路故障, 10.1s时故障消失, 其中输电线阻抗变化如下:

$$X_L = \begin{cases} 0.5, & 0 \leq t < 10\text{s}, \\ \infty, & 10\text{s} \leq t \leq 10.1\text{s}, \\ 0.5, & 10.1\text{s} < t. \end{cases}$$

系统的动态响应如图6和图7所示.



(a)



(b)

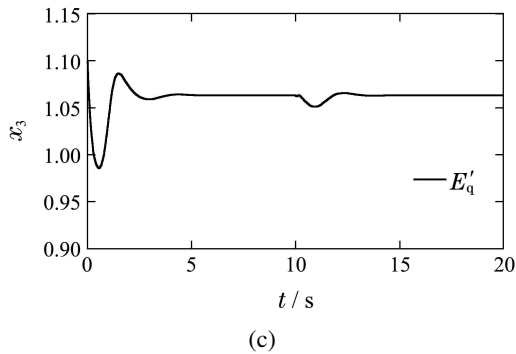


图 6 传输线存在短路故障时具有控制器(19)的闭环系统响应
Fig. 6 The responding of the closed-loop system with controllers (19) when a transmission line occurs the short-circuit fault

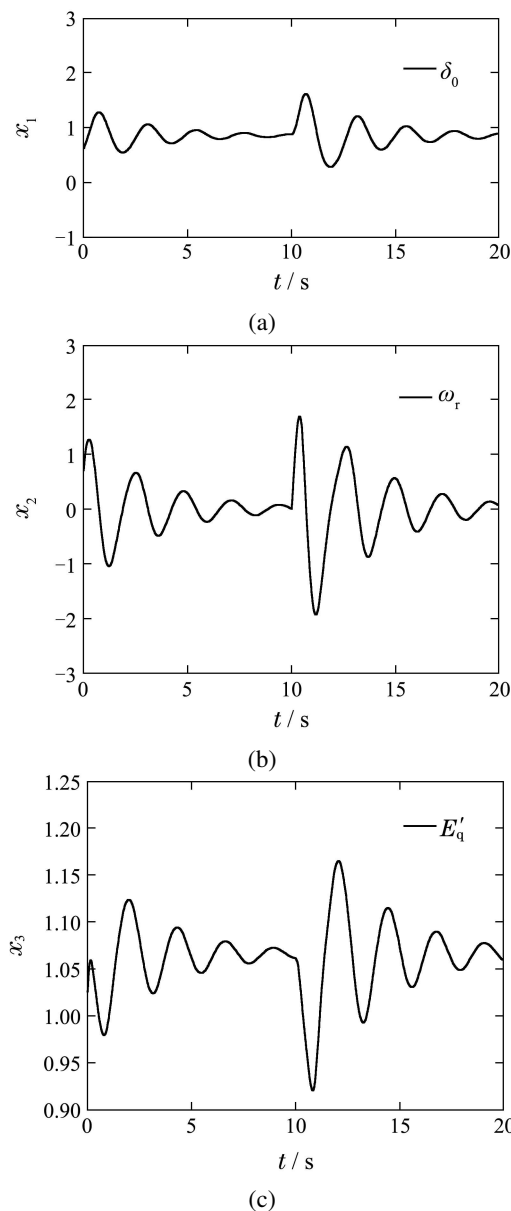


图 7 传输线存在短路故障时具有常规控制器的闭环系统响应
Fig. 7 The responding of the closed-loop system with the conventional controllers when a transmission line occurs the short-circuit fault

从图6可以看出,当输电线发生的短路故障消除后,系统的状态 x_1 重新回到平衡点.虽然改变了干扰的形式,但系统的响应曲线并未发生明显变化,可见系统的动态响应对于输电线短路故障扰动仍是不敏感的.

通过和文献[13]中的常规控制比较(见图7),可看出所设计控制器在收敛时间和振荡幅度上是具有明显优势.

5 结论(Conclusions)

本文研究了带励磁控制的发电机系统的大干扰抑制问题.结合minimax方法的思想,设计了非线性大干扰逆推控制器,实现了对单机无穷大系统的稳定控制.由于minimax方法对干扰的巧妙处理,使得设计过程中即充分考虑了外部扰动的影响程度,又可以减少干扰项处理的保守性.考虑系统受到短路接地故障或者发电机发生机械功率扰动等突发扰动的情形,对系统的动态响应进行了分析.变化机械功率扰动的幅度的形式,系统的动态响应不仅能够很快收敛到稳定工作点,有效抑制外界干扰,同时对于大干扰是不敏感的.

参考文献(References):

- [1] KUNDER P. *Power Systems Stability and Control* [M]. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [2] 卢强,王仲鸿,韩英铎. 输电系统最优控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1984.
(LU Qiang, WANG Zhonghong, HAN Yingtuo. *Optimal Control of Transmission System* [M]. Beijing: Science Press, 1984.)
- [3] 卢强,孙元章. 电力系统非线性控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
(LU Qiang, SUN Yuanzhang. *Nonlinear Control in Power Systems* [M]. Beijing: Science Press, 1993.)
- [4] SHEN T, ORTEGA R, LU Q. Adaptive disturbance attenuation of Hamiltonian systems with parametric perturbation and application to power system [C] // *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control*. Sydney: IEEE, 2000, 7: 4939 – 4945.
- [5] SHEN T, MEI S, LU Q. Adaptive robust controller design for power system [C] // *Proceedings of the International Association of Science and Technology for Development International Conference*. Anaheim, CA: IASTED/ACTA Press, 2000: 84 – 88.
- [6] SHEN T, MEI S, LU Q. Robust nonlinear excitation control with disturbance attenuation for power system [C] // *Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control*. Piscataway, NJ: IEEE, 1999: 2491 – 2492.
- [7] REHMAN U, FIDAN B, PETERSEN I R. Robust minimax optimal control of nonlinear uncertain systems using feedback linearization with application to hypersonic flight vehicles [C] // *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control*. Shanghai: IEEE, 2009: 720 – 726.
- [8] 姜因, 井元伟. 基于T-S模型的非线性系统非脆弱极小极大控制 [J]. 控制理论与应用, 2008, 25(5): 925 – 928.
(JIANG Nan, JING Yuanwei. Non-fragile minimax control of nonlinear systems based on T-S fuzzy model [J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(5): 925 – 928.)
- [9] ATHANASIOS G X, POTA H R, SUBRAMANYAM P B, et al. Robust power system stabiliser design using minimax control approach: Validation using real-time digital simulation [C] // *Proceedings of the*

- 46th IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans: IEEE, 2007: 2427 – 2432.
- [10] JIANG N, LIU B, JING Y. Nonlinear steam valve adaptive controller design for the power systems [J]. *Intelligent Control and Automation*, 2011, 1(2): 31 – 37.
- [11] JIANG N, LIU B, KANG J, et al. The design of nonlinear disturbance attenuation controller for TCSC robust model of power system [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2012, 67(3): 1863 – 1870.
- [12] 秦伟伟, 马建军, 刘刚, 等. 一类干扰有界约束非线性系统的鲁棒模型预测 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(5): 709 – 714.
(QIN Weiwei, MA Jianjun, LIU Gang, et al. Robust model-predictive-control for a constrained nonlinear system with bounded disturbance [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(5): 709 – 714.)
- [13] LI W. *Study on the nonlinear adaptive robust control for power systems* [D]. Shenyang: Northeastern University, 2003.

作者简介:

姜 囡 (1979–), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事极小极大鲁棒控制、电力系统非线性控制研究, E-mail: jiangnan@ise.neu.edu.cn;

刘 婷 (1984–), 女, 博士研究生, 主要从事电力系统非线性控制研究, E-mail: liuting_tinka@sina.cn;

张 铁 (1956–), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事计算数学及有关研究, E-mail: ztmath@163.com;

井元伟 (1956–), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事复杂系统、远程通讯网络通信控制等研究, E-mail: jingyuanwei@ise.neu.edu.cn.

更正

《控制理论与应用》期刊2013年第30卷第9期第1201–1206页, 题为“观测器为基础的多包传输网络化系统故障检测”(作者: 张永, 赵敏, 刘振兴)论文的DOI由10.7641/CTA.2013.20496更改为10.7641/CTA.2013.20494.

特此说明。

《控制理论与应用》编辑部
2013年10月