

一类非线性系统鲁棒控制及应用

张 敏^{1,2}, 罗 安²

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙, 410083;
2. 湘潭工学院信息与电气工程系, 湖南 湘潭, 411201)

摘要: 包含不确定扰动项的线性系统的鲁棒控制表现为 L_2 增益抑制问题. 利用非线性系统线性化技术, 将包含不确定性的非线性模型进行部分线性化处理. 以此为基础, 利用线性系统的鲁棒控制理论, 讨论了单机-无穷大电力系统, 得出发电机的励磁鲁棒控制器; 针对发生三相短路故障的线路末端, 给出了其发电机功角、角速度和输出电压的仿真曲线. 研究表明: 鲁棒控制器在提高系统稳定性、稳定系统输出电压等方面有良好的控制效果.

关键词: 非线性系统; 鲁棒控制; 单机-无穷大系统; 线性化

中图分类号: TP29 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9792(2003)02-0188-04

将现代控制理论与电力系统模型相结合, 产生电力系统最优控制. 但为了解决系统中的非线性和不确定性问题, 产生了非线性系统的几何理论和鲁棒控制理论^[1,2]. 非线性系统几何理论中的精确线性化方法被用于解决大型发电机的励磁控制、无功补偿的非线性控制等^[1], 控制效果较好. 如用于解决具有双励磁机的混合多机电力系统综合控制器^[3]. 除了上述线性化理论外, 还有分散非线性控制技术^[4,5], 用于解决最优励磁控制和多机电力系统镇定问题. 此外, 广义哈密顿(Hamilton)系统的几何结构被用于励磁控制系统的稳定性问题^[6]. 鲁棒控制理论如电力系统鲁棒控制方法、非线性 H_∞ 励磁控制器的递推设计方法同样在电力系统控制技术中得到了广泛应用^[7-9].

作者结合鲁棒控制理论和非线性系统的线性化理论, 对于具有不确定性的非线性系统, 讨论以反馈线性化为基础的 H_∞ 控制器, 并将其应用于解决发电机励磁控制问题.

1 线性系统的 L_2 增益抑制问题

图 1 为 H_∞ 状态反馈控制的基本框图. 设广义控制对象 G 的状态空间实现为:

$$\begin{cases} \dot{z} = Az + B_1 w + B_2 v, \\ y = Cz + D_{11} w + D_{12} v, \\ r = z. \end{cases} \quad (1)$$

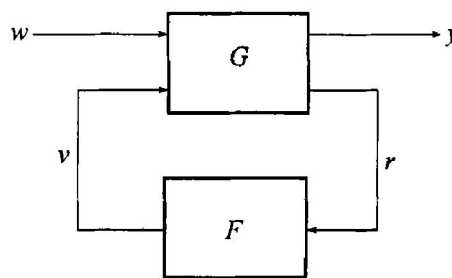


图 1 H_∞ 控制框图

式中: w 为干扰输入, 是不确定量, 但属于可描述集合, 即

$$w \in L_2 = \{w(t) | \int_0^T w^2(t) dt < \infty\}.$$

即 L_2 中包含能量有限信号. 使用状态反馈控制 $v = Fz$, 可得闭环控制系统由 w 到 y 的闭环传递函数矩阵为

$$T_{yw}(s) = (C + D_{12}F)(sI - A - B_2F)^{-1}B_1 + D_{11}. \quad (2)$$

在(1)式中, 令 $D_{11} = 0, D_{12} = 0$, 并定义 H_∞ 范数为

$$\|T_{yw}(s)\|_\infty = \sup_{w \neq 0} \frac{\|y\|_2}{\|w\|_2}. \quad (3)$$

其中: $\|\cdot\|_2$ 为信号的 L_2 范数.

$$\|y\|_2 = \left(\int_{-\infty}^{\infty} |y(t)|^2 dt \right)^{1/2}.$$

在系统中, 各种不确定因素都归结为一扰动量 $w \in L_2$. 为消除不确定性对控制系统性能的影响, 使控制系统具有鲁棒性, 将一种 H_∞ 控制为 L_2 增益抑

制问题^[7], 即求一状态反馈 $v = Fz$, 闭环系统为(将 $v = Fz$ 代入(1)式即得, 令 $D_{11} = D_{12} = 0$):

$$\begin{cases} \dot{z} = (A + B_2F)z + B_1w, \\ y = Cz. \end{cases} \quad (4)$$

由(3)式定义的 H_∞ 范数小于给定的正数 $\gamma > 0$, 即

$$\int_0^\infty (\|y(t)\|^2 + \|u(t)\|^2) dt < \gamma^2 \int_0^\infty \|w(t)\|^2 dt. \quad (5)$$

且 $A + B_2F$ 为稳定矩阵.

满足(5)式的最优控制律为

$$v^* = -B_2^T P^* z. \quad (6)$$

P^* 为黎卡梯(Riccati)方程

$$A^T P + PA + \frac{1}{\gamma^2} PB_1 B_1^T P - PB_2 B_2^T P + C^T C = 0 \quad (7)$$

的半正定解. 对应的最严重干扰为

$$w^* = \frac{1}{\gamma^2} B_1^T P^* z. \quad (8)$$

2 在单机-无穷大电力系统中的应用

对图 2 所示与无穷大系统连接的发电机进行必要的假设, 如发电机励磁系统时间常数 $T_e = 0$, 暂态过程中机组输入机械功率不变, 瞬时凸极效应忽略不计等, 可得如下系统模型:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{\delta} = \omega - \omega_0 = f_1, \\ \dot{x}_2 = \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{T_j} (P_m - P_e - P_D) + d_2 w = f_2 + d_2 w, \\ \dot{x}_3 = E'_q = -\frac{1}{T_{d0}'} E_q + \frac{1}{T_{d0}'} u_f + d_3 w \\ = f_3 + g_3 u_f + d_3 w, \\ y = h(x) = \delta - \delta_0. \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_e = \frac{E'_q V_s}{x_d \Sigma'} \sin \delta + \frac{V_s^2 (x_d' - x_q)}{x_d \Sigma' x_q \Sigma} \sin 2\delta$,
 $E'_q = \frac{x_d \Sigma' E_q'}{x_d \Sigma'} - \frac{(x_d - x_d') V_s \cos \delta}{x_d \Sigma'}$,
 $P_D = D(\omega - \omega_0)$.

δ 为发电机功角; ω 为转子角速度; ω_0 为同步速度; E'_q 为交轴暂态电势; T_j 为机组惯性常数; P_m 为发电机输入机械功率; P_e 为发电机电磁功率; P_D 为阻尼功率; u_f 为励磁电压; T_{d0}' 为发电机定子绕组开路时转子绕组时间常数; w 为干扰量; V_s 为母线电压;

D 为阻尼系数; x_d 和 x_d' 分别为发电机直轴同步电抗和暂态电抗; x_q 为交轴同步电抗; $x_d \Sigma' = x_d' + x_T + x_L$; $x_q \Sigma = x_q + x_T + x_L$; x_T 和 x_L 分别为变压器和线路电抗.

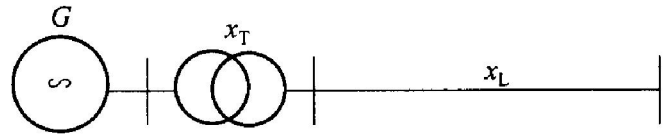


图 2 单机-无穷大系统

令 $f = [f_1 \ f_2 \ f_3]^T$,
 $g = [0 \ 0 \ g_1]^T$,

进行如下坐标变换:

$$z_1 = h(x) = \delta - \delta_0 = \Delta \delta,$$

$$z_2 = L_f h(x) = \frac{\partial h}{\partial x} f = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\omega - \omega_0] = \omega - \omega_0 = \Delta \omega,$$

$$z_3 = L_f^2 h(x) + L_g L_f h(x) w = \dot{\omega}.$$

令 $z = [z_1 \ z_2 \ z_3]^T = [\Delta \delta \ \Delta \omega \ \dot{\omega}]^T$, 则在新坐标下, 非线性系统(9)转化为:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2, \\ \dot{z}_2 = z_3, \\ \dot{z}_3 = \frac{\omega_0}{T_j} (-P_e - P_D) + d_2 \dot{w} = v + w'. \end{cases} \quad (10)$$

其中:

$$\begin{cases} v = \frac{\omega_0}{T_j} (-P_e - P_D), \\ w' = d_2 \dot{w}. \end{cases} \quad (11)$$

整理式(10), 得以下线性系统:

$$\begin{cases} \dot{z} = Az + B_1 w' + B_2 v, \\ y = Cz. \end{cases} \quad (12)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$C = [1 \ 0 \ 0].$$

3 励磁鲁棒控制器

对形如(12)的线性系统, 应用 L_2 增益抑制控制, 将 A, B_1, B_2, C 代入(7)式, 解出此矩阵方程, 得

$$P^* = [p_{ij}(\gamma)]_{3 \times 3}. \quad (13)$$

$\gamma \geq 1$ 时, P^* 为正定阵, 系统的最优控制规律和

最严重干扰分别为

$$\begin{cases} v^* = -B_2^T P^* z = -p_{31} \Delta \delta - p_{32} \Delta \omega - p_{33} \dot{\omega}, \\ w^* = \frac{1}{\gamma^2} B_1^T P z = \frac{1}{\gamma^2} (p_{31} \Delta \delta + p_{32} \Delta \omega + p_{33} \dot{\omega}). \end{cases} \quad (14)$$

由式(11)和(14)可得

$$\dot{w} = \frac{1}{d_2} w^* = \frac{1}{\gamma^2 d_2} (p_{31} \Delta \delta + p_{32} \Delta \omega + p_{33} \dot{\omega}),$$

即

$$w^* = \frac{1}{\gamma^2 d_2} (p_{31} \int_0^t \Delta \delta dt + p_{32} \Delta \delta + p_{33} \Delta \omega). \quad (15)$$

由式(9)中 P_e 和 P_D 的表达式, 可得

$$P_e = \frac{V_s}{x_d \Sigma} (E'_q \sin \delta + E'_q \cos \delta \Delta \omega) + \frac{2V_s^2(x'_d - x_q)}{x_d \Sigma x_q \Sigma} \cos 2\delta \Delta \omega, \\ P_D = D \dot{\omega}.$$

将 P_e 和 P_D 代入式(11)中第 1 项, 并考虑到 $v^* = -p_{21} \Delta \delta - p_{32} \Delta \omega - p_{33} \dot{\omega}$, 可得

$$-p_{31} \Delta \delta - p_{32} \Delta \omega - p_{33} \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{T_j} \left[-\frac{V_s}{x_d \Sigma} (E'_q \sin \delta + E'_q \cos \delta \Delta \omega) - \frac{2V_s^2(x'_d - x_q)}{x_d \Sigma x_q \Sigma} \cos 2\delta \Delta \omega - D \dot{\omega} \right]. \quad (16)$$

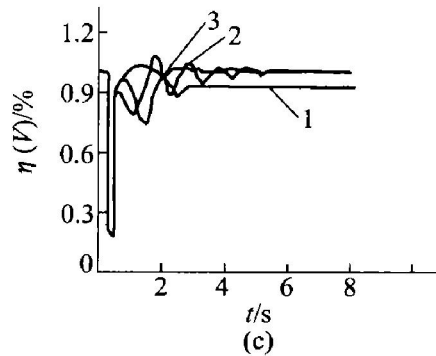
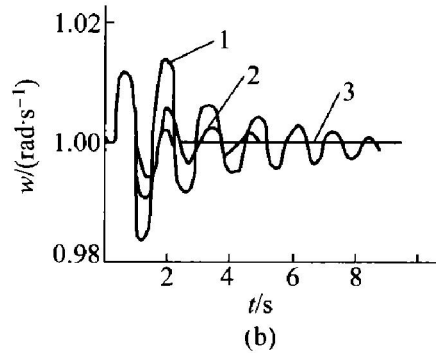
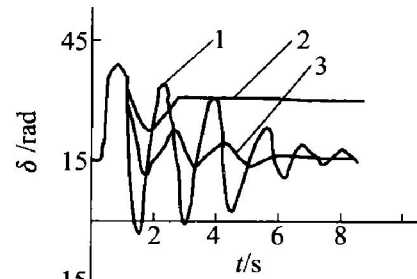
将式(9)中的 E'_q 代入式(16), 并利用式(15), 得

$$-p_{31} \Delta \delta - p_{32} \Delta \omega - p_{33} \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{T_j} \left[-\frac{V_s}{x_d \Sigma} \left(-\frac{1}{T_{d0}} E_q + \frac{1}{T_{d0}'} u_f + \frac{d_3}{\gamma^2 d_2} (p_{31} \int_0^t \Delta \delta dt + p_{32} \Delta \delta + p_{33} \Delta \omega) \right) \sin \delta + E'_q \cos \delta \Delta \omega \right] - \frac{2V_s^2(x'_d - x_q)}{x_d \Sigma x_q \Sigma} \cos 2\delta \Delta \omega - D \dot{\omega}.$$

求解上式关于 u_f 的代数方程, 即可求出励磁控制器 u_f .

4 实例与仿真

图 1 所示为单机-无限大系统. 系统参数为: 机组直轴同步电抗 $x_d = 0.82$, 交轴同步电抗 $x_q = 0.835$, 直轴暂态电抗 $x'_d = 0.145$, 时间常数 $T_j = 6.0$, $T_{d0}' = 2.80$, 变压器电抗 $x_T = 0.10$, 线路电抗 $x_L = 1.56$. 设系统在 0.15 s 时线路末端发生三相短路, 0.35 s 后恢复故障前运行状态. 利用电力系统动态仿真软件对上述系统和所给条件进行仿真计算. 图 3 分别给出了发电机功角、角速度和输出电压仿真曲线.



(a) 一功角曲线; (b) 一角速度曲线; (c) 一输出电压曲线
1—常规 PID 调节器控制效果;
2—基于线性二次型最优的精确线性控制器控制效果;
3—作者给出的鲁棒控制器控制效果

图 3 系统仿真曲线

5 结 论

结合非线性系统的线性化技术, 讨论了非线性系统的鲁棒控制, 并将其应用于单机-无穷大电力系统励磁控制器设计中. 从实例及其仿真结果看出, 所给出的控制器有良好的控制效果, 能有效地提高发电机运行的稳定性, 其响应速度优于常规 PID 调节器. 与只考虑系统非线性而不考虑系统不确定性的非线性几何控制器相比较, 在某些方面效果更好.

参考文献:

[1] 卢 强, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
[2] 吴 敏, 桂卫华. 现代鲁棒控制[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1998.
[3] 黄 健, 涂光瑜, 陈德树. 具有双励磁机的混合多机电力系统非

- 线性综合控制器的研究[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(5): 289-293.
- [4] LU Qiang, SUN Yuan zhang. Decentralized nonlinear optimal excitation control[J]. IEEE Transaction on Power System, 1996, 11(9): 977-984.
- [5] Chapman J W, Ilic M D, King C A, *et al.* Stabilizing a multi-machine power system via decentralized feedback linearizing excitation control[J]. IEEE Transaction on Power System, 1993, 8(5): 830-839.
- [6] 程代展, 席在荣, 卢 强, 等. 广义 Hamilton 控制系统的几何结构及其应用[J]. 中国科学(E 辑), 2000, 30(4): 341-355.
- [7] 卢 强, 孙元章. 电力系统非线性鲁棒控制研究[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(6): 361-365.
- [8] 卢 强, 梅生伟, 申铁龙, 等. 非线性 H_{∞} 励磁控制器的递推设计[J]. 中国科学(E 辑), 2000, 31(1): 56-72.
- [9] 梁志珊, 张化光, 王红月, 等. 同步发电机非线性预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(12): 52-56.

Robust controller of the excitation for generator

ZHANG Min^{1,2}, LUO An²

(1. College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Department of Information and Electricity Engineering, Xiangtan Polytechnic University, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The robust control for linear system with uncertain disturb is discussed, which behaves as L2-gain restraint. With linearization for nonlinear system, the nonlinear system with uncertainty is linearized. Based on this, the single-machine infinite-bus power system is studied and the robust controller of excitation for generator is obtained. An example is given that the fault of a three-phase short circuit occurs on the end of the transmission line and is removed in certain period. The simulation curves of the power-angle, angle velocity and voltage output are given, and the robust controller has good effect with respect to improvement for system stability and voltage output.

Key words: nonlinear system; robust control; single-machine infinite-bus system; linearization