

发电机的浸入与不变自适应反步鲁棒励磁控制器^{*}

陈登义¹, 孔繁镍², 王希平³

(1. 广西工业职业技术学院 电子与电气工程系, 广西 南宁 530001;

2. 广西大学 电气工程学院, 广西 南宁 530004;

3. 河北水利电力学院 电力工程系, 河北 沧州 061001)

摘 要: 针对含有不确定参数的发电机励磁控制系统, 设计了一种新型的自适应反步鲁棒励磁控制器。在设计过程中, 基于反步法逐步进行控制器的设计, 并引入非线性阻尼算法来减小反步法的“计算膨胀”问题, 有效地增强了控制器的鲁棒性。接着介绍了应用浸入与不变自适应控制设计阻尼系数的自适应估计律。通过 MATLAB 软件进行仿真研究, 验证了该算法的有效性和优越性。

关键词: 发电机励磁控制器; 反步法; 浸入与不变自适应控制; 非线性阻尼算法

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)03-0030-05

Immersion and Invariant Adaptive Backstepping Robust Control of Generator Excitation System^{*}

CHEN Dengyi¹, KONG Fannie², WANG Xiping³

(1. Department of Electronics and Electrical Engineering, Guangxi Vocational and Technical Institute of Industry, Nanning 530001, China;

2. School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

3. Department of Power Engineering, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou 061001, China)

Abstract: According to the generator excitation control system with uncertain parameters, a novel adaptive backstepping robust controller was designed. In the design process, based on the backstepping method for designing the controller, the nonlinear damping algorithm to reduce the "coefficient expansion" of the backstepping method was introduced, which could effectively improve the robustness of the controller. And the adaptive estimation of damping coefficient was designed by using the I&I adaptive control method. The simulation research was carried out by MATLAB software to verify the effectiveness and superiority of the algorithm.

Key words: generator excitation controller; backstepping method; immersion and invariant adaptive control; nonlinear damping algorithm

0 引 言

发电机励磁系统是所有电力系统模型中最成熟的系统之一。然而, 随着控制理论的发展, 许多

控制方法已经被引入到励磁控制器的设计中。由于要研究的电力系统是一个强非线性系统, 因此采取非线性设计工具可以设计出控制性能更好的励磁控制器。

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51167003); 广西省自然科学基金项目(2014GXNSFAA118320); 河北省教育厅青年基金项目(QN2017345)

作者简介: 陈登义(1979—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为电力系统分析与控制。

孔繁镍(1974—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制、控制理论及其在电力系统应用。

王希平(1979—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为电力系统分析与控制。

随着非线性控制理论的发展,发电机励磁控制也随之发生了很多变化。学者们已经将许多非线性控制方法引入到励磁控制器的设计中,主要有微分几何方法^[1]、反馈线性化方法^[2]、最优控制理论^[3]、鲁棒控制^[4]、自适应反步法^[5-7]、滑模控制^[8-10]等。这些控制方法使发电机励磁系统的控制性能进一步加强。自适应反步法是一种处理非线性系统强有力的工具,采用该方法设计的励磁控制器能够更加适用于电力系统这种非线性系统。传统的自适应励磁控制器对参数估计的能力较差,为此引入了文献[11]提出的浸入与不变自适应控制(Immersion and Invariant Adaptive Control, I&I)。该方法可以提高控制器的自适应能力。

另外,由于反步法存在“计算膨胀”问题,所设计的传统反步控制器具有局限性。在现有的文献中,减小“计算膨胀”的方法主要有两种:动态面控制^[12]和非线性跟踪微分器算法^[13]。其中,动态面控制只能使闭环系统半全局稳定,并且存在小的跟踪误差;非线性跟踪微分器算法设计过程复杂,不易理解。因此,以上两种方法并不是最好的,需要寻找新的控制策略来弥补这些不足。通过查找文献发现,文献[14]把引起“计算膨胀”的虚拟控制量的导数看作不确定项,引入鲁棒项来减少“计算膨胀”。受文献[14]的启发,本文引入了非线性阻尼算法,处理易引起“计算膨胀”的不确定项,克服了上述两种控制方法的缺陷。非线性阻尼算法已被广泛地应用于处理不确定项^[15],且设计过程简单,易被初学者接受。

综上所述,针对含有励磁控制的单机-无穷大(SMIB)系统,在阻尼系数难以精确测量的情况下,设计一种新型的自适应反步鲁棒励磁控制器。由于应用了 I&I 自适应控制设计了阻尼系数的自适应估计律,提高了励磁控制器的自适应能力;并且,引入非线性阻尼算法减小了反步法的“计算膨胀”问题。最后,通过 MATLAB 软件进行仿真研究,验证了该算法的有效性和优越性,且对扰动具有很好地抑制能力,使电力系统的静态和暂态稳定性得以保证。

1 系统模型

图 1 为含有发电机励磁控制的 SMIB 系统。

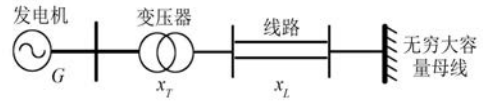


图 1 含发电机励磁控制的 SMIB 系统

由图 1 可见,则含励磁控制的发电机三阶系统模型为^[16]

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} = -\frac{D}{H}(\omega - \omega_0) + \frac{\omega_0}{H}P_m - \frac{\omega_0 E'_q V_s \sin \delta}{HX'_{d\Sigma}} \\ \dot{E}'_q = -\frac{1}{T'_d}E'_q + \frac{x_d - x'_d}{T_{d0}x'_{d\Sigma}}U_s \cos \delta + \frac{1}{T_{d0}}U_f \end{cases} \quad (1)$$

其中, $x'_{d\Sigma} = x'_d + x_T + x_L$, $T'_d = T_{d0}x'_{d\Sigma}/x_{d\Sigma}$, $x_{d\Sigma} = x_d + x_T + x_L$ 。

式中: δ ——发电机转子运行角;

ω ——发电机转子角速度;

D ——阻尼系数;

H ——发电机的转动惯量;

P_m ——发电机的机械功率;

E'_q ——发电机 q 轴暂态电势;

U_s ——母线电压;

x_d ——发电机 d 轴电抗;

x_q ——发电机 q 轴电抗;

x'_d ——发电机暂态电抗;

x_T ——变压器电抗;

x_L ——线路电抗;

T_{d0} ——励磁绕组时间常数;

U_f ——励磁控制电压。

其他无特殊说明的单位均为标么值。

另外,考虑到阻尼系数 D 具有不确定性,令 $\theta = -D/H$ 。

对 SMIB 系统进行坐标变换,令:

$$\begin{cases} x_1 = \delta - \delta_0 \\ x_2 = \omega - \omega_0 \\ x_3 = \dot{\omega} \end{cases} \quad (2)$$

那么,SMIB 系统模型可变为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = \theta x_3 + f(x) + g(x)u \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中,

$$\begin{aligned} u &= U_i/T_{d0}, \\ g(x) &= -\omega_0 V_s \sin(x_1 + \delta_0)/T'_d H x'_{d\Sigma}, \\ f(x) &= -\omega_0 V_s E'_q / H x'_{d\Sigma} [\sin(x_1 + \delta_0)/T'_d - \\ &\quad \cos(x_1 + \delta_0)x_2] - \omega_0 V_s^2 (x_d - x'_d) \\ &\quad \sin 2(x_1 + \delta_0)/T_{d0} H (x'_{d\Sigma})^2 \end{aligned}$$

2 控制器设计

步骤1:定义误差面 $e_1 = x_1, e_2 = x_2 - x_{2d}$, 其中, x_{2d} 是虚拟控制量。对 e_1 求导, 得:

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_1 = x_2 = e_2 + x_{2d} \quad (4)$$

根据文献[14], 由于式(4)中的 e_2 和状态量 x_2 有关, 把 e_2 看作不确定项, 做假设1如下:

假设1: 令 $|e_2| \leq \alpha_1$, 其中 α_1 是未知的正常数。

应用非线性阻尼算法, 补偿不确定项 e_2 。由文献[15], 取非线性阻尼项为 $\alpha_1^2 e_1 / 2\varepsilon_1$, 用于克服不确定项 e_2 。取 x_{2d} 为

$$x_{2d} = -c_1 e_1 - \alpha_1^2 e_1 / 2\varepsilon_1 \quad (5)$$

其中, $c_1 > 0, \varepsilon_1 > 0$ 。

取 Lyapunov 函数为

$$V_1 = 0.5 e_1^2 \quad (6)$$

则 V_1 对于时间的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= e_1 \dot{e}_1 = e_1 e_2 + e_1 x_{2d} = \\ &= -c_1 e_1^2 - \alpha_1^2 e_1^2 / 2\varepsilon_1 + e_1 e_2 = \\ &= -c_1 e_1^2 - \alpha_1^2 e_1^2 / 2\varepsilon_1 + |e_1| \cdot |e_2| \leq \\ &= -c_1 e_1^2 - \alpha_1^2 e_1^2 / 2\varepsilon_1 + \alpha_1 \cdot |e_1| \end{aligned} \quad (7)$$

当满足 $|e_1| \geq 2\varepsilon_1 / \alpha_1$ 时:

$$V_1 \leq -c_1 e_1^2 \leq 0 \quad (8)$$

与反步法相比, 没有了耦合项 $e_1 e_2$, 使 x_1 子系统趋于渐近稳定。

步骤2: 定义误差面 $e_3 = x_3 - x_{3d}$ 。对 e_2 求导, 得:

$$\dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \dot{x}_{2d} = (e_3 - \dot{x}_{2d}) + x_{3d} \quad (9)$$

同理, e_3 和状态量 x_3 有关, $\dot{x}_{2d}$ 和状态量 x_2 有关, 把 $(e_3 - \dot{x}_{2d})$ 看作不确定项, 做假设2如下:

假设2: 令 $|e_3 - \dot{x}_{2d}| \leq \alpha_2$, 其中 α_2 是未知的正常数。

同理, 由文献[15], 取非线性阻尼项为: $\alpha_2^2 e^2 / 2\varepsilon_2$, 用于克服不确定项 $(e_3 - \dot{x}_{2d})$ 。取 x_{3d}

为

$$x_{3d} = -c_2 e_2 - \alpha_2^2 e_2 / 2\varepsilon_2 \quad (10)$$

其中, $c_2 > 0, \varepsilon_2 > 0$ 。

扩展 Lyapunov 函数为

$$V_2 = V_1 + 0.5 e_2^2 \quad (11)$$

则 V_2 对于时间的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + e_2 \dot{e}_2 = -c_1 e_1^2 + e_2 [(e_3 - \dot{x}_{2d}) + x_{3d}] = \\ &= -c_1 e_1^2 + e_2 (e_3 - \dot{x}_{2d}) + e_2 (-c_2 e_2 - \alpha_2^2 e_2 / 2\varepsilon_2) = \\ &= -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 + |e_2| \cdot |(e_3 - \dot{x}_{2d})| - \alpha_2^2 e_2^2 / 2\varepsilon_2 = \\ &= -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 + \alpha_2 |e_2| - \alpha_2^2 e_2^2 / 2\varepsilon_2 \end{aligned} \quad (12)$$

当满足 $|e_2| \geq 2\varepsilon_2 / \alpha_2$ 时:

$$V_2 \leq -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 \leq 0 \quad (13)$$

与反步法相比, 没有了耦合项 $e_2 e_3$, 使 x_2 子系统趋于渐近稳定。

步骤3: 对 e_3 求导, 得:

$$\dot{e}_3 = \dot{x}_3 - \dot{x}_{3d} = \theta x_3 + f(x) + g(x)u - \dot{x}_{3d} \quad (14)$$

由于 $\dot{x}_{3d}$ 直接计算会引起“计算膨胀”, 为了减小“计算膨胀”, 根据文献[14], 把 $\dot{x}_{3d}$ 看作不确定项, 做假设3如下:

假设3: 令 $|\dot{x}_{3d}| \leq \alpha_3$, 其中 α_3 是未知的正常数。

根据浸入与不变(I&I)自适应控制设计自适应估计律为

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\theta}} &= -x_3 \cdot \{f(x) + g(x)u + \\ &\quad [\hat{\theta} + \varphi(x_1, x_2, x_3)]x_3\} \end{aligned} \quad (15)$$

其中, $z = \hat{\theta} - \theta + \varphi(x_1, x_2, x_3)$, 是参数估计误差, $\varphi(x_1, x_2, x_3)$ 是待设计的函数。

同理, 由文献[15], 取非线性阻尼项为 $\alpha_3^2 e_3 / 2\varepsilon_3$, 用于克服不确定项 $\dot{x}_{3d}$ 。取反馈控制律 u 为

$$\begin{aligned} u &= -1/g(x) \cdot \{f(x) + [\hat{\theta} + \varphi(x_1, x_2, x_3)]x_3 + \\ &\quad c_3 e_3 + \alpha_3^2 e_3 / 2\varepsilon_3\} \end{aligned} \quad (16)$$

其中, $c_3 > 0, \varepsilon_3 > 0$ 。

按照文献[17]中选取 $\varphi(x_1, x_2, x_3)$ 的方法, 取 $\varphi(x_1, x_2, x_3)$ 如下:

$$\varphi(x_1, x_2, x_3) = \int_0^{x_3} x_3 dx_3 = 0.5 x_3^2 \quad (17)$$

取整个系统的 Lyapunov 函数为

$$V = V_2 + 0.5 e_3^2 + 0.5 z^2 \quad (18)$$

则 V 对于时间的导数为

$$\begin{aligned}
\dot{V} + \dot{V}_2 + e_3 \dot{e}_3 + z\dot{z} = & -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 + e_3(\theta x_3 + f(x) + g(x)u - \dot{x}_{3d}) + z(-zx_3^2) = \\
& -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 + e_3(-\dot{x}_{3d}) + e_3(-c_3 e_3 - zx_3 - \alpha_3^2 e_3^2 / 2\varepsilon_3) - (zx_3)^2 = \\
& -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 - c_3 e_3^2 - ze_3 x_3 - (zx_3)^2 + |e_3| |-\dot{x}_{3d}| - \alpha_3^2 e_3^2 / 2\varepsilon_3 = \\
& -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 - c_3 e_3^2 - ze_3 x_3 - (zx_3)^2 + \alpha_3 |e_3| |-\dot{x}_{3d}| - \alpha_3^2 e_3^2 / 2\varepsilon_3
\end{aligned} \quad (19)$$

根据文献[18]证明过程,由 LaSalle's 不变集定理,估计误差导数收敛到不变集 $E = \{(x, z) \in R^1 \times R^1 : zx_3 = 0\}$ 中,即意味着 $\lim_{t \rightarrow \infty} z(t)x_3(t) = 0$ 成立,则 $\lim_{t \rightarrow \infty} z(t)x_3(t)e_3(t) = 0$ 。

说明参数估计误差是渐近稳定的。

当满足 $|e_3| \geq 2\varepsilon_3/\alpha_3$ 时:

$$V \leq -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 - c_3 e_3^2 - (zx_3)^2 \leq 0 \quad (20)$$

由于 $V \leq 0$, 所以 x_3 子系统趋于渐近稳定。

因此,在反馈控制律式(16)的作用下,闭环系统的误差动态为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - c_1 e_1 - \alpha_1^2 e_1^2 / 2\varepsilon_1 \\ \dot{e}_2 = e_3 - c_2 e_2 - \alpha_2^2 e_2^2 / 2\varepsilon_2 \\ \dot{e}_3 = zx_3 - c_3 e_3 - \alpha_3^2 e_3^2 / 2\varepsilon_3 \end{cases} \quad (21)$$

由 LaSalle's 定理可知:对于系统(3),在反馈控制律式(16)的作用下,闭环系统式(21)在平衡点处是渐近稳定的。

3 仿真结果

应用 MATLAB 软件进行仿真研究。仿真所用参数如下: $\delta_0 = 30^\circ$, $H = 16$, $P_m = 1$, $T_{d0} = 12$, $V_s = 1$, $\omega_0 = 314.159 \text{ rad/s}$, $x_T = 0.1$, $x'_d = 0.25$, $x_d = 2.5$, $x_L = 0.3$, $c_1 = c_2 = c_3 = 2$, $\varepsilon_1 = 0.5$, $\varepsilon_2 = 0.1$, $\varepsilon_3 = 0.05$, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1$ 。

选择如下两种情况进行仿真:

(1) 假设在 $t = 0.2 \text{ s}$ 时,发电机的转子角速度发生了突变,即 $\Delta\omega/\omega_0 = 0.5\%$ 。代表系统受到了小干扰,功角响应和转速响应仿真结果分别如图 2 和图 3 所示。

(2) 假设在 $t = 0.3 \text{ s}$ 时,线路中发生三相短路

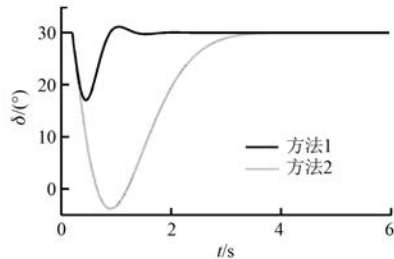


图2 小干扰时功角响应曲线

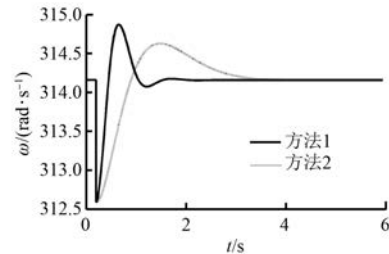


图3 小干扰时转速响应曲线

故障,0.1 s 后切除故障,代表系统受到了大干扰,功角响应和转速响应仿真结果如图 4 和图 5 所示。

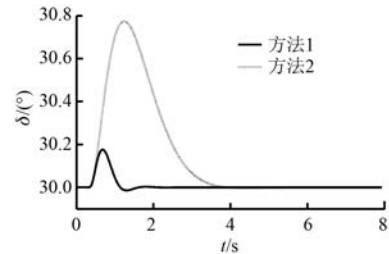


图4 大干扰时功角响应曲线

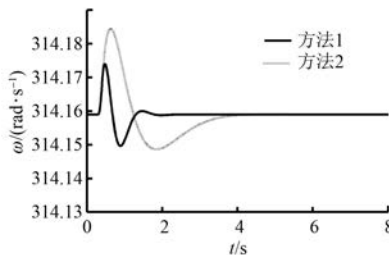


图5 大干扰时转速响应曲线

在图 2~图 5 中,方法 1 为浸入与不变自适应反步鲁棒控制(本文的控制策略),方法 2 为浸入与不变自适应反步控制。

从图 2 和图 3 可以看出,当系统受到小干扰时,发电机转速偏离同步转速,采用方法 1 设计的控制器恢复时间减少了约 70%,并且发电机功角响应曲线的振荡范围相对较小。

从图 4 和图 5 可以看出:当系统受到大干扰时,控制器 1 在约 1.5 s 内就可以消除短路故障,恢复到原来的稳定状态。与控制器 2 相比,超调

量小,振荡范围小,曲线收敛速度快,提高了控制器的暂态性能。

参数 θ 估计性能对比如图 6 所示。在图 6 中,实线为本文采用的 I&I 控制方法,虚线为传统的自适应控制方法。从图 6 中可以看出:在对不确定参数估计方面,I&I 优于传统的自适应控制,其估计值更接近真实值。

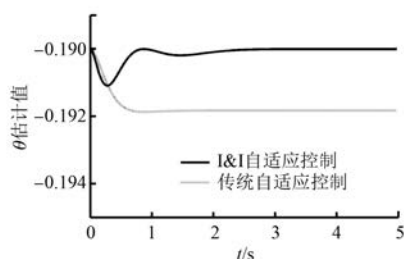


图 6 参数 θ 估计性能对比

4 结 语

本文针对含发电机励磁控制的 SMIB 系统,将阻尼系数作为不确定参数,采用 I&I、反步法和非线性阻尼算法,设计了一种新型的自适应反步鲁棒励磁控制器。在应用反步法设计控制器时,重点解决了怎么减小反步法的“计算膨胀”这一问题。本文引入非线性阻尼算法,设计非线性阻尼项来避免反复求导,减小了“计算膨胀”问题,增强了控制器的鲁棒性;并且,应用 I&I 设计阻尼系数的自适应估计律,突破了确定性-等价性原则。最后,通过大、小扰动两种仿真情况,验证了该算法的有效性和优越性。仿真结果表明,本文所设计的发电机励磁控制器具有较大的优势,明显改善电力系统的暂态和静态稳定性。

【参考文献】

- [1] 常鲜戎,张海生,崔赵俊.基于微分几何和扩张状态观测器的励磁控制[J].电力系统及其自动化学报,2015,27(8): 87-91.
- [2] 李天云,李慧敏,于兴林,等.基于反馈线性化的非线性鲁棒协调励磁控制[J].电网与清洁能源,2011,27(9): 11-15,31.
- [3] 罗建,任成君,冯树辉,等.基于线性最优控制和积分控制的励磁控制器设计[J].电力系统保护与控制,2013,41(11): 134-140.
- [4] 李啸骢,李文涛,徐俊华,等.不确定性电力系统鲁棒自适应励磁控制[J].电力系统及其自动化学报,2011,23(3): 13-17.
- [5] 王宝华,杨成梧,张强.自适应逆推励磁控制器设计[J].电工技术学报,2005,20(12): 91-94.
- [6] 姜囡,刘婷,张铁,等.发电机励磁系统的非线性大干扰抑制控制器[J].控制理论与应用,2013,30(10): 1315-1322.
- [7] 谷志锋,朱长青,邵天章,等.全状态 EKF 估计的最优鲁棒励磁控制设计[J].电力系统保护与控制,2013,41(19): 118-125.
- [8] 葛友,李春文,H.滑模鲁棒励磁控制器设计[J].中国电机工程学报,2002,22(5): 2-5.
- [9] 王宝华.逆推自适应滑模励磁控制器设计[J].电力自动化设备,2009,29(6): 54-57.
- [10] 余向阳,南海鹏,余娟,等.自适应积分逆推滑模励磁控制研究[J].中国电机工程学报,2009,29(10): 74-77.
- [11] ASTOLFI A, ORTEGA R. Immersion and invariance: A new tool for stabilization and adaptive control of nonlinear systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(4): 590-606.
- [12] 方一鸣,许衍泽,李建雄.具有输入饱和的电液伺服位置系统自适应动态面控制[J].控制理论与应用,2014,31(4): 511-518.
- [13] 甄红涛,齐晓慧,夏明旗,等.四旋翼无人机鲁棒自适应姿态控制[J].控制工程,2013,20(5): 915-919.
- [14] 王芳,宗群,田栢苓,等.基于鲁棒自适应反步的可重复使用飞行器再入姿态控制[J].控制与决策,2014,29(1): 12-18.
- [15] 郭一,刘金琨.飞行器航迹倾角的自适应动态面控制[J].北京航空航天大学学报,2013,39(2): 275-279.
- [16] 卢强,梅生伟,孙元章.电力系统非线性控制[M].2版.北京:清华大学出版社,2008.
- [17] 付俊,柴天佑,苏春翌,等.一类非线性系统的自适应输出跟踪控制(英文)[J].控制工程,2015,22(4): 731-736.
- [18] 张蕾,张爱民,韩九强,等.基于系统浸入和流形不变自适应方法的静止无功补偿器非线性鲁棒自适应控制方法[J].控制理论与应用,2013,30(1): 1-7.

收稿日期: 2017 -07 -10