

带电压反馈的非线性最优励磁控制器设计

杨伟, 李仁东

(南京理工大学动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 传统非线性控制器对系统暂态时的角频率和功角的稳定具有显著效果, 但对机端电压的控制却并不理想。为解决这一问题, 将状态反馈精确线性化理论和最优控制理论相结合设计了一种非线性最优励磁控制器, 并在控制中引入电压反馈, 即将具有良好机端电压控制效果的基于电压偏差的 PID 控制和非线性最优控制相结合设计了一种新型励磁控制器。通过使用 Matlab 对算例进行仿真, 验证了该控制器在小扰动和大扰动情况下不仅能够保证角频率、功角的稳定, 还能很好地稳定机端电压, 明显改善了传统控制器在机端电压控制方面的缺陷。

关键词: 精确线性化; 最优控制; 励磁控制; 电压反馈; Matlab

Design of nonlinear optimal excitation controller with voltage feedback

YANG Wei, LI Ren-dong

(College of Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Traditional nonlinear controller is good at the control of angular frequency and load angle, but weak at the control of terminal voltage. To solve this problem, a non-linear optimal excitation controller based on exact feedback linearization and optimal control theory is designed. In this design terminal voltage is introduced as a feedback. Because of the introduction of terminal voltage feedback, the controller can stabilize the terminal voltage effectively. The application to an example system using Matlab verifies that in a small disturbance and large disturbance cases this controller can not only ensure the stability of angular frequency and load angle, but also can effectively stabilize the terminal voltage, which remarkably improves the deficiencies in the control of terminal voltage of the traditional excitation control.

Key words: exact feedback linearization; optimal control; excitation control; voltage feedback; Matlab

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)14-0110-05

0 引言

发电机励磁控制除维持机端电压恒定和保证并联运行的机组间无功功率合理分配外, 也是改善和提高电力系统稳定的最经济、有效的技术手段之一^[1]。针对发电机励磁控制系统的强非线性特点, 通常采用的方法是对其进行线性化处理。近年来, 随着非线性控制理论的迅速发展, 较好地解决了非线性控制系统的大范围线性化问题。运用非线性理论设计的励磁控制器在改进大干扰稳定方面比线性控制方法优越^[1-4]。

大量的研究表明非线性励磁控制在电力系统受到小扰动和大扰动时, 具有突出的提高系统功角和频率稳定的能力^[5-6], 但由于其控制量中没有机端电压项, 所以在机端电压控制方面效果并不是很理想^[7]。而 PID 控制对机端电压具有优良的控制效

果^[8-9], 因而将基于机端电压偏差的 PID 控制和非线性励磁控制相结合可以达到在电力系统稳态和暂态时对发电机功角、频率和机端电压的良好控制效果。

1 励磁控制的基本理论

1.1 状态反馈精确线性化

由于电力系统是强非线性系统, 如果采用在一点处近似线性化的数学模型, 按线性系统进行设计的控制规律, 在远离近似线性化所选的状态点处, 对系统的控制可能达不到理想的效果。如果能够在一定条件下, 将一个仿射非线性系统进行精确线性化^[10-13], 那么这个状态反馈可保证控制系统的稳定性, 并且能有较好的动态品质。

当发电机励磁为快速可控硅励磁方式时, 发电机励磁控制系统可以用以下非线性微分方程描述:

$$\begin{cases} \dot{E}'_q = \frac{-1}{T_d'} E'_q + \frac{1}{T_{d0}} \frac{x_d - x'_d}{x_{d\Sigma}} V_s \cos \delta + \frac{1}{T_{d0}} u_f \\ \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{H} P_M - \frac{D}{H} (\omega - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H} \frac{E'_q V_s}{x_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{\omega_0 V_s^2}{2H} \left(\frac{x'_d - x_q}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \right) \sin 2\delta \\ \dot{\delta} = \omega - \omega_0 \end{cases}$$

这是一个仿射非线性系统^[14-15]。

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u_f, x(0) = x_0 \quad (1)$$

式(1)中: $x = [E'_q, \omega, \delta]^T$, $x_0 = [E'_{q0}, \omega_0, \delta_0]^T$

$$f(x) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_d'} E'_q + \frac{1}{T_{d0}} \frac{x_d - x'_d}{x_{d\Sigma}} V_s \cos \delta \\ \frac{\omega_0}{H} P_M - \frac{D}{H} (\omega - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H} \frac{E'_q V_s}{x_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{\omega_0 V_s^2}{2H} \left(\frac{x'_d - x_q}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \right) \sin 2\delta \\ \omega - \omega_0 \end{bmatrix}$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{d0}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

经检验系统(1)满足精确线性化条件。

通过坐标变换系统(1)可转换成布鲁诺夫斯基标准型。

$$\dot{z} = Az + Bv \quad (2)$$

其中: $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$; $B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 。则非线性状态反馈为:

$$u_f = a(x) + b(x)v = \frac{-\tilde{f}_1(x) + v}{\tilde{g}_1(x)} \quad (3)$$

$$\tilde{f}_1(x) = \frac{\omega_0}{H} \frac{V_s}{x_{d\Sigma} T_{d0}} E'_q \sin \delta - \frac{D}{H} \dot{\omega} - \frac{\omega_0 V_s}{H x_{d\Sigma}} E'_q \cos \delta (\omega - \omega_0) - \frac{\omega_0 V_s^2}{H} \left(\frac{x'_d - x_q}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \right) \cos 2\delta (\omega - \omega_0)$$

$$\tilde{g}_1(x) = -\frac{\omega_0}{H} \frac{V_s}{x_{d\Sigma} T_{d0}} \sin \delta$$

其中: $E'_q = \frac{T_{d0}}{T_d'} E'_q - \frac{x_d - x'_d}{x_{d\Sigma}} V_s \cos \delta$ 。

1.2 求解最优控制规律

对于定常系统 $\dot{X} = AX + BU$, 最优控制规律实质上是寻找反馈矩阵 K , 使二次型目标函数最优。二次性能指标为^[15]:

$$\min J = \int_0^{\infty} [x^T(t)Q\dot{x}(t) + U^T(t)RU(t)]dt$$

其中: Q 、 R 为对应的状态量和控制量的权矩阵; Q 为正定或半正定阵; R 为正定阵。权矩阵直接反映了系统的各种性能指标要求, 如系统的动态品质要求、抗干扰能力的要求等。

利用极值定理可以证明这个最佳控制规律是存在的, 而且是唯一的。

其表达式是: $U = -R^{-1}B^T P X = -K X$ 。

其中矩阵 P 满足Riccati代数方程式 $PA + A^T P -$

$PBR^{-1}BP + Q = 0$ 的解。

当选定了权矩阵后利用 Matlab 软件中 221pr.m 函数求解状态反馈系数, 便可以得到最优控制规律, 将其代入式(3)便可求出非线性最优控制规律。

2 带电压反馈的非线性最优励磁控制器设计和仿真

2.1 算例参数

图1为单机无穷大系统, 其中各参数为:

同步发电机参数(隐极式): $H = 8(s)$, $D = 5$, $V_s = 1.0(p.u)$, $T_{d0} = 10(s)$, $X_d = 2.534$, $X'_d = 0.318$, $X_q = 2.534$ 。变压器及线路参数: $X_T = 0.1$, $X_L = 0.73$ 。

系统平衡点的参数: $P_c = 0.5$, $\delta_0 = 70^\circ$ 。

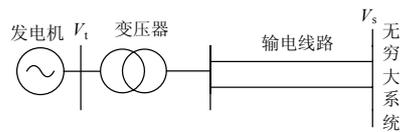


图1 单机无穷大系统

Fig.1 Single-generator infinite bus system

当给定 Q 以及 R 值后, 可以求解最优控制器反馈系数矩阵 K , 对线性化后的系统进行最优励磁控制设计。

仿真时依次改变 Q 和 R 值, 观察控制效果。在综合选择参数的动态响应中, 选择 $D = \text{diag}[520 \ 50 \ 1]$, $R = 0.01$ 的作用比较理想。

利用 Matlab 软件中 1pr.m 函数求解式(2)所表示的系统的状态反馈系数, 可以得到: $v = -228z_1 - 115z_2 - 18z_3$ 。将其代入式(3)即可求得非线性最优励磁控制器控制规则(不带电压反馈),

如下所示:

$$u_f = \frac{H}{\omega_0} \frac{x'_{d\Sigma} T_{d0}}{V_s \sin \delta} \left(\frac{\omega_0 V_s \sin \delta}{H x'_{d\Sigma} T_{d0}} E_q - \frac{D}{H} \dot{\omega} - \frac{\omega_0 V_s}{H x'_{d\Sigma}} E'_q \cos \delta (\omega - \omega_0) - \frac{\omega_0 V_s^2}{H} \left(\frac{x'_d - x'_q}{x'_{d\Sigma} x'_{q\Sigma}} \right) \cos 2\delta (\omega - \omega_0) + 228(\delta - \delta_0) + 115(\omega - \omega_0) + 18\dot{\omega} \right) \quad (4)$$

2.2 非线性最优励磁控制器仿真

对于式(4)设计出来的控制规律,在图1所示的单机无穷大系统中进行静态小扰动仿真和暂态大扰动仿真,并分析仿真结果。

仿真算例:

静态小扰动仿真:在1s时发电机机械功率 P_m 由0.5增加到0.525并维持不变。

暂态大扰动仿真:在0.1s时一条线路上发生三相接地短路,100ms后,故障切除,系统单回路供电。

(1) 静态小扰动

仿真结果见图2。通过仿真,机端有功功率和功角在扰动结束后2~3s内稳定在新的状态。励磁控制器能够使系统很快地稳定在新的状态下。但是

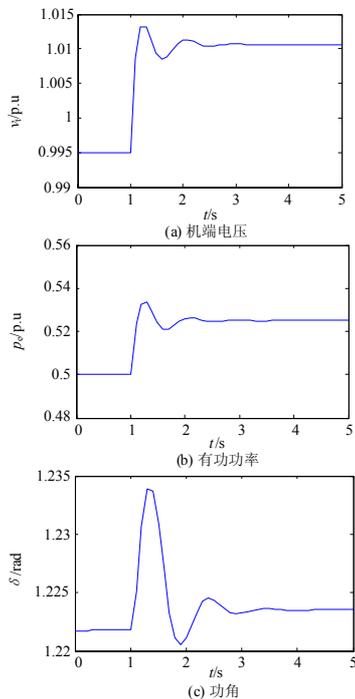


图2 静态小扰动仿真

Fig.2 Simulation of static stability

发电机机端电压,发生了偏移,机端电压不能得到有效控制。

(2) 暂态大扰动

仿真结果见图3。通过仿真,机端有功功率在扰动结束后3~4s内恢复到原来的状态,机端电压和功角稳定在新的平衡状态。励磁控制器能很好地提供阻尼,对于干扰具有很好的抑制能力,但机端电压出现了偏离,电压和有功功率的超调较大。

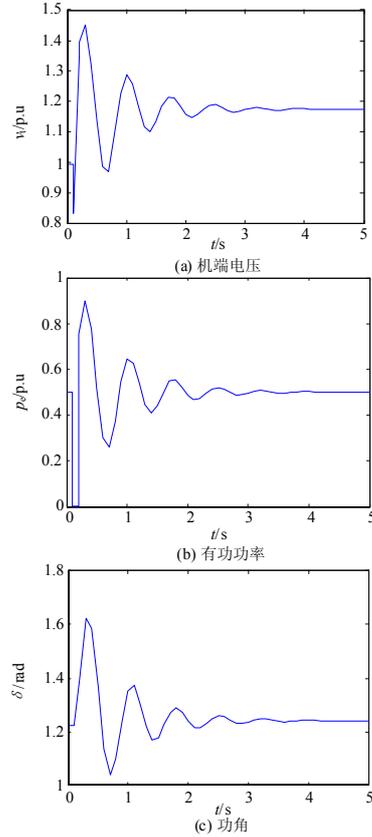


图3 暂态大扰动仿真

Fig.3 Simulation of transient stability

2.3 带电压反馈的非线性最优励磁控制器设计

通过仿真可以看出,当出现机械功率的阶跃变化或系统结构发生变化时,虽然该控制器能够很好地提供阻尼,系统能够稳定。但是发电机机端电压将会产生偏移,机端电压得不到控制,这是因为设计的过程中没有采用电压变量作为其中的反馈量。因此,考虑在反馈变量中加入电压调节。设计中加入机端电压偏差PID控制,用以调节电压达到要求值。

$$u_{iv} = u_f - b(x) \Delta V_t = \frac{-\tilde{f}_1(x) + v}{\tilde{g}_1(x)} \quad (5)$$

$$k_p (\Delta V_t + \frac{1}{T_I} \int_0^t \Delta V_t dt + T_D \frac{d(\Delta V_t)}{dt})$$

参数取 $K_p=40$, $T_I=0.1$, $T_D=2$ 。

带有电压反馈 PID 控制的非线性最优励磁控制器的实现如图 4 所示。

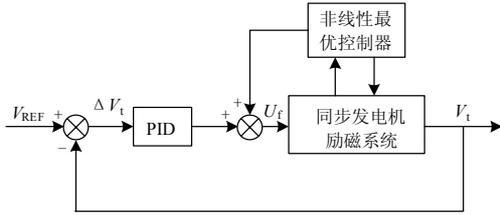


图 4 带有电压反馈的非线性最优励磁控制器实现示意图
Fig.4 Implementation of the non-linear optimal controller with voltage feedback

利用式 (5) 的控制规律在图 1 所示的单机无穷大系统中, 再次进行静态小扰动仿真和动态大扰动仿真, 并分析仿真结果。

(1) 静态小扰动

仿真结果见图 5。通过仿真说明, 增加了电压反馈后, 电压能够在扰动结束后 3 s 时间恢复到原设定值。带电压反馈的非线性最优励磁控制器, 既能够保证发电机机端电压的稳定, 同时也能够使系统在扰动结束后 3~4 s 内稳定下来。

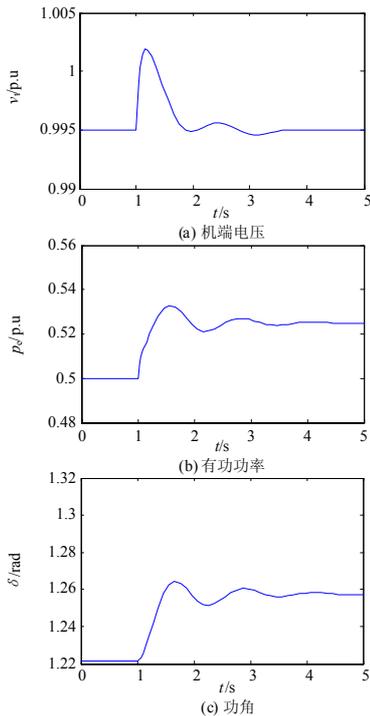


图 5 带电压反馈的静态小扰动仿真
Fig.5 Simulation of static stability of the controller with voltage feedback

(2) 暂态大扰动

仿真结果见图 6。通过仿真说明, 增加了电压反馈后, 非线性最优励磁控制器在大扰动下, 机端

电压、有功功率、功角能够在扰动结束后 4~5 s 内恢复到稳定状态, 增加电压反馈后的电压和有功功率的超调量也明显减少。励磁控制器能够保证发电机机端电压的调节精度, 同时也能够使系统较快稳定下来, 对大干扰有很好的抑制作用。

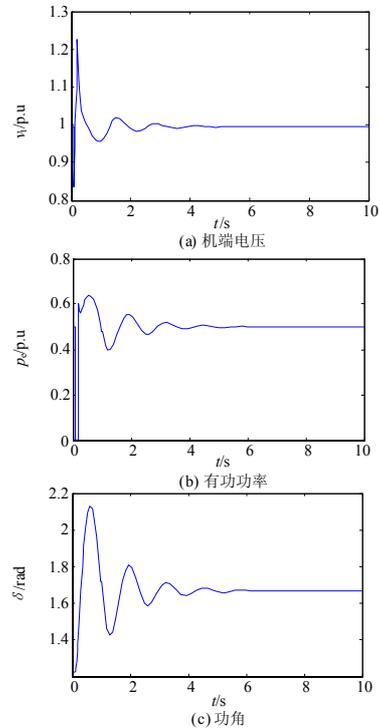


图 6 带电压反馈的暂态大扰动仿真
Fig.6 Simulation of transient stability of the controller with voltage feedback

系统采用带电压反馈的非线性最优励磁控制器后, 能够在大扰动和小扰动情况下控制发电机励磁, 保证机端电压基本恒定, 功角达到稳定状态。虽然功角比扰动前变化较大, 但其能在短时间内达到新的稳定值, 基本满足稳定控制的要求。

3 结论

论文基于状态反馈精确线性化理论和最优控制理论得出了同步发电机的线性化模型, 推导出了相应的励磁控制规律, 设计了一种非线性最优励磁控制器。仿真结果表明, 所用的控制策略获得了较好的控制效果。针对由于机械功率的扰动和系统结构变化而引起的机端电压偏离问题, 对所设计的控制器增加了电压反馈设计, 并进行同样的扰动仿真。结果表明: 所设计的控制器能够明显改善电压控制的精度和稳定度, 同时系统能够在扰动结束后较快地恢复到稳定状态, 较好地解决了由于机械功率增加和系统结构变化而引起的机端电压偏离问题, 对

抑制系统的扰动有优良的控制效果。

参考文献

- [1] 王锡淮,郑天府,肖健梅. 带电压调节的非线性鲁棒励磁控制策略研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(8): 38-42.
WANG Xi-huai, ZHENG Tian-fu, XIAO Jian-mei. Nonlinear robust excitation control strategy with voltage regulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(8): 38-42.
- [2] 马燕峰, 赵书强, 常鲜戎. Lyapunov 和最优控制理论相结合的非线性励磁控制器设计及仿真[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(7): 58-60.
MA Yan-feng, ZHAO Shu-qiang, CHANG Xian-rong. Design and simulation of excitation controller based on Lyapunov theory and optimal control theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(7): 58-60.
- [3] 陈铁, 舒乃秋. 基于直接反馈线性化的非线性励磁控制策略的研究[J]. 电力科学与工程, 2005, 12(5): 30-32.
CHEN Tie, SHU Nai-qiu. Study of nonlinear excitation control based on direct feedback linearization[J]. Electric Power Science and Engineering, 2005, 12(5): 30-32.
- [4] 李啸骢,程时杰,韦化,等. 一种高性能的非线性励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 37-42.
LI Xiao-cong, CHENG Shi-jie, WEI Hua, et al. A high performance nonlinear excitation control for generator unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 37-42.
- [5] LU Qiang, SUN Yuan-zhang, XU Zhen. Decentralized nonlinear optimal excitation control[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 1957-1962.
- [6] 王志芳,孙元章,张广恕,等. 非线性励磁控制器改善华中电网稳定性的仿真分析[J]. 电网技术, 1998, 22(3): 11-13.
WANG Zhi-fang, SUN Yuan-zhang, ZHANG Guang-shu, et al. Simulation analysis of nonlinear optimal excitation controllers improving stability of central China power system[J]. Power System Technology, 1998, 22(3): 11-13.
- [7] 孙元章, 黎雄, 戴和平,等. 同时改善稳定性和电压精度的非线性励磁控制器[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(5): 332-336.
SUN Yuan-zhang, LI Xiong, DAI He-ping, et al. A nonlinear excitation controller to improve both power system stability & voltage regulation accuracy[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(5): 332-336.
- [8] 朱方, 刘增煌, 高光华. 电力系统稳定器对三峡电力系统暂态稳定的影响[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 20-22.
ZHU Fang, LIU Zeng-huang, GAO Guang-hua. The influence of PSS upon transient stability of the Three Gorges electric power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 20-22.
- [9] 杨汉如,阎伟,王涛,等. 电力系统稳定器(PSS)设计的一种新思路[J]. 西北水力发电, 2004, 20(4): 13-16.
YANG Han-ru, YAN Wei, WANG Tao, et al. A new idea for power system stabilizer (PSS) design[J]. Journal of Northwest Hydroelectric Power, 2004, 20(4): 13-16.
- [10] 胡兆庆,毛承雄,陆继明. 基于输入对状态反馈线性化的非线性励磁控制[J]. 继电器, 2004, 32(5): 32-35.
HU Zhao-qing, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming. Nonlinear excitation controller based on input-state linearization[J]. Relay, 2004, 32(5): 32-35.
- [11] 李殿璞. 电力系统励磁控制问题精确线性化方法研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2006, 27(1): 80-83.
LI Dian-pu. Study of exact linearization method for power system excitation control problem[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2006, 27(1): 80-83.
- [12] 梅生伟, 黎雄, 卢强, 等. 基于反馈线性化方法的励磁系统非线性 H^∞ 控制研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(4): 1-7.
MEI Sheng-wei, LI Xiong, LU Qiang, et al. Nonlinear H^∞ control for excitation systems via feedback linearization method[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1999, 11(4): 1-7.
- [13] 李华, 张宝霖, 周荣光. 用直接大范围线性化方法设计发电机的励磁控制器[J]. 中国电机工程学报, 1992, 12(2): 29-41.
LI Hua, ZHANG Bao-lin, ZHOU Rong-guang. The design of excitation controller for generator by means of the method of direct linearization over wide range[J]. Proceedings of the CSEE, 1992, 12(2): 29-41.
- [14] 孙元章, 焦晓红, 申铁龙. 电力系统非线性鲁棒控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [15] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 1993.

收稿日期: 2009-08-18; 修回日期: 2009-12-07

作者简介:

杨伟(1965-), 男, 副教授, 硕士, 研究方向为电力系统分析、运行与控制; E-mail: yangwei807@126.com

李仁东(1971-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制。