

非线性励磁控制方法的研究

陈铁¹, 舒乃秋²

(1. 三峡大学电气信息学院, 湖北 宜昌 443002; 2 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 根据发电机励磁控制的任務, 提出了一种简便的非线性励磁控制策略的设计方法。应用该方法设计的非线性励磁控制器不仅可以有效地改进电力系统的稳定性, 还可以满足电压调节的要求, 并通过仿真实验验证了该设计方法的正确性。

关键词: 非线性; 励磁控制; 稳定性; 电压调节

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)19-0028-03

0 引言

目前非线性励磁控制多以发电机功角偏差()为目标, 虽然这种控制策略能极大地提高动态稳定性, 但是在电压控制方面还存在一些问题。当发电机输入功率(P_m)随负荷的变化或调速的需要而变化的时候, 或者当系统遭遇大扰动后, 发电机电压将出现偏移, 并无法自动调回到原给定点上运行。由于发电机端电压只能通过励磁来进行调节, 因而这种调节器无法满足实际的需要。本人正是针对这方面的问题, 提出既能改善电力系统稳定性, 又能改善电压调节精度的简易算法, 并通过 Matlab 予以仿真。

1 非线性励磁控制策略的设计

为提高调节器的电压调节能力, 通常采用的方法是在传统的非线性励磁控制策略的基础上, 增加电压反馈的部分, 这样就带来了新的问题, 即原来的控制策略是最优的, 而在增加了电压的反馈后, 改变了原有的结构, 却没有在此基础上再次进行设计, 不能够发挥出非线性控制的优势所在。另外, 在引入电压反馈后, 还需判断闭环系统的稳定性, 增加了使用中的难度。

非线性控制系统的设计原理方法就是通过坐标变换和引入虚拟反馈把原非线性系统转换为一个完全可控的线性系统, 并针对该线性系统求解。在求解的过程中, 输出函数 $h(x)$ 在坐标变换的过程中起着重要的作用, 它直接影响线性化后的线性状态方程的形式, 从而影响受控系统的动态、静态及暂态特性^[1]。那么通过改变系统的输出函数, 同时在构造线性系统时, 通过坐标变换将机端电压引入线性方程即可满足电压调节的要求。

对于单机无穷大电力系统, 有如下状态方程^[2]

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} &= -\frac{0}{H} (P_m - P_e - P_D) \\ \dot{E}_q &= -\frac{1}{T_{d0}} E_q + \frac{1}{T_{d0}} E_f \end{aligned} \quad (1)$$

式中: E_q , δ , ω 为状态变量, 分别为发电机暂态电势, 转子角速度和功角; E_f 为控制变量, 表示发电机励磁电压; E_q 为空载电势; T_{d0} 代表励磁绕组时间常数。 P_D 为阻尼功率; P_m 为机械功率。

方程 (1) 化为标准形式的仿射非线性系统

$$\dot{X} = f(x) + g(x)u \quad (2)$$

式中:

$$f(x) = \begin{bmatrix} \omega - \omega_0 \\ -\frac{0}{H} (P_m - P_e - P_D) \\ -\frac{1}{T_{d0}} E_q \end{bmatrix} \quad g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_{d0}} \end{bmatrix}$$

输出函数的选取, 需要同时满足以下几个方面的要求。

- 1) 所建立的非线性最优模型要能精确地描述同步电机运行中所有扰动的动态过程。
- 2) 对电机的控制考虑有一定的提前量, 同时考虑在实际系统中状态量的量测。
- 3) 考虑引入电压反馈。

考虑到转速的变化, 总是超前于功角的变化, 将输出函数选为:

$$y = h(x) = \delta - \delta_0 \quad (3)$$

通过计算可知

$$L_g L_f^0 h(x) = 0, \text{ 且 } L_g L_f h(x) \neq 0$$

则 $h(x)$ 对系统的关系度为 2。

由于 $L_g^2 h(x) = L_g(\delta - \delta_0) = 0$, 故可选以下坐标变

换^[3]。

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h(x) \\ L_f h(x) \\ \phi_3(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{0}{H} P_e \\ P_e \end{bmatrix} \quad (4)$$

可以验证 $J_\phi(x) = \frac{\partial Z}{\partial x} = 0$ 。

将原非线性系统化为线性系统(5),参见文献[3]。

$$\begin{aligned} \dot{z} &= -\frac{0}{H} P_e \\ \dot{P}_e &= -\frac{H}{0} v \\ \dot{v} &= \end{aligned} \quad (5)$$

为保证机端电压的调节精度,考虑将机端电压偏差 U_t 引入反馈。由状态方程状态置换公式可知,若状态方程为

$$\dot{X} = A_x X + B_x U \quad (6)$$

如果 $X = CZ$

则式(9)可化为:

$$\dot{Z} = A_z Z + B_z U \quad (7)$$

其中: $A_z = C^{-1} A_x C$, $B_z = C^{-1} B_x$ 。

由于电压精度是在运行点附近的小范围内进行讨论,按照小范围线性化的推导,存在以下关系^[4],即

$$= \frac{1}{S_v} P_e - \frac{R_v}{S_v} V_t \quad (8)$$

可将线性方程(7)化为如下形式

$$\begin{aligned} \dot{z} &= -\frac{0}{H} P_e \\ \dot{P}_e &= -\frac{H}{0} v \\ \dot{V}_t &= -\frac{S_v}{R_v} + \frac{H}{0 R_v} v \end{aligned} \quad (9)$$

验证方程(12)完全可控,可得控制策略为:

$$E_t = E_q - T_{d0} \frac{I_q}{I_q} E_q - \frac{H}{0} T_{d0} \frac{1}{I_q} v \quad (10)$$

式中: $v = -k_1 - k_2 P_e - k_3 V_t$, k_1, k_2, k_3 为黎卡梯方程的解。

在线性方程(9)中可以看到,构成状态空间方程的状态变量由转速、功率、电压构成,其中输出函数设为转速以达到提前控制的作用,功率用以增加系统的阻尼,而电压可以确保电压的调节能力,同时并没有改变原有系统的结构,可见本控制策略能够

充分发挥非线性控制的优势所在,可以同时满足动态稳定性和电压调节能力两方面的要求。

2 数字仿真

为验证式(13)的控制效果,针对电力系统某一实际运行中的单机无穷大系统模型进行了仿真实验。系统参数设置分别为发电机电抗 $X_d = 1.5$,发电机暂态电抗 $X_d' = 0.5$,变压器电抗 $X_t = 0.4$,线路电抗 $X_l = 0.2$,阻尼系数 $D = 2$,转动惯量 $H = 50$,发电机输入功率 $P_m = 0.8$ 。

1) 扰动试验

发电机正常运行,15 s经历20%的扰动,0.2 s后扰动消失,仿真结果如图1~3所示。

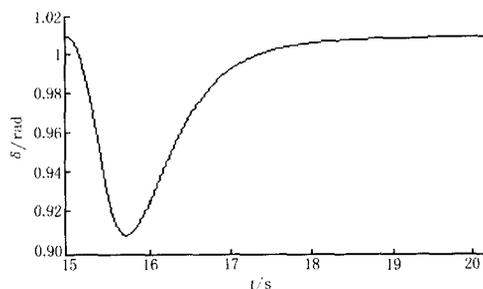


图1 扰动前后功角的变化曲线

Fig 1 Simulation result of pre/post disturbance

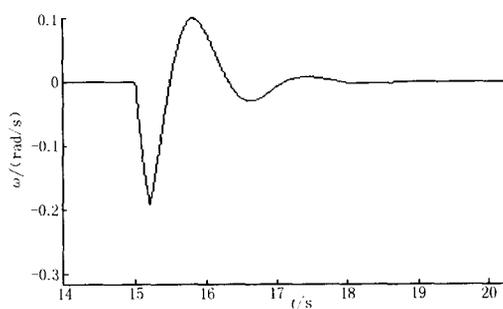


图2 扰动前后转速的变化曲线

Fig 2 Simulation result of pre/post disturbance

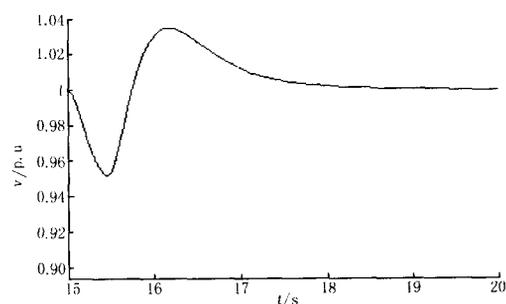


图3 扰动前后机端电压 V_t 的变化曲线

Fig 3 Simulation result of V_t pre/post disturbance

由仿真结果可以看出,电压反馈的引入,并没有

影响系统的动态稳定性,而且在扰动结束后,机端电压能够维持在额定水平。系统在经历扰动后能很快地重新进入稳态,显示了良好的动态性能。

2) 短路试验

假设发电机在出口处发生三相短路,0.2 s后恢复。仿真结果分别如图4~图6所示。

图4、图5分别表示短路前后发电机转速和功角的变化情况,图6表示短路前后发电机机端电压的变化情况。由仿真结果可以看出,由于系统的输出以转速为目标,发电机转速和功角均能很好地保持。由于电压反馈的引入,发电机机端电压在短路结束,系统恢复正常后能维持在额定水平,表现了良好的暂态稳定性。

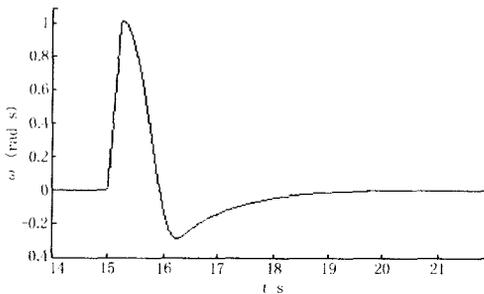


图4 短路前后转速的变化曲线

Fig 4 Simulation result of pre/post three-phase short circuit

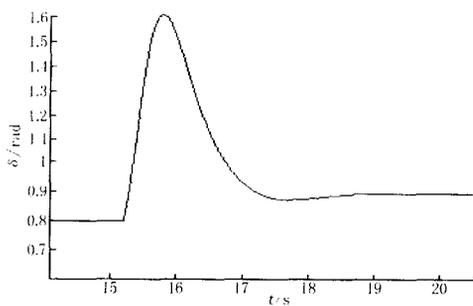


图5 短路前后功角的变化曲线

Fig 5 Simulation result of pre/post three phase short circuit

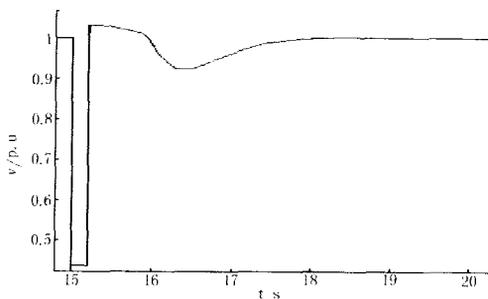


图6 短路前后机端电压 V_1 的变化曲线

Fig 6 Simulation result of V_1 to pre/post three phase short circuit

3 结论

1)提出了一种新型的非线性励磁设计方案。即构造出含有机端电压偏差 V_1 的伪线性系统,将机端电压偏差 V_1 引入反馈,提高了电压调节能力。

2)Matlab仿真结果表明,根据本文提出的非线性励磁控制方法具有良好的暂态性能和电压调节能力,而且设计方法简单明了,是一种比较适用于工业实践的设计方法。

参考文献:

- [1] 李啸骢,程时杰,韦化.非线性励磁控制中输出函数对系统性能的影响[J].电力系统自动化,2003,27(5):6-10.
LI Xiao-cong, CHENG Shi-jie, WEI Hua Influences of the Output Function on the System Performance in Non-linear Excitation Control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(5): 6-10.
- [2] 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 Yuan-zhang Nonlinear Control of Power System[M]. Beijing: Science Press, 1993.
- [3] 胡跃明.非线性控制系统理论与应用[M].北京:国防工业出版社,2002.
HU Yue-ming Nonlinear Control Theory and Its Application[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002.
- [4] 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 Zhong-hong, HAN Ying-duo Optimal Control of Transmission System[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [5] 孙元章,黎雄,戴和平.同时改善稳定性和电压调节精度的非线性励磁控制器[J].中国电机工程学报,1996,16(5):332-335.
SUN Yuan-zhang, LI Xiong, DAI He-ping A Nonlinear Excitation Controller to Improve both Power System Stability & Voltage Regulation Accuracy[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(5): 332-335.

收稿日期: 2005-01-06; 修回日期: 2005-05-19

作者简介:

陈铁(1975-),男,讲师,主要从事非线性励磁控制方面的研究; Email: chnt_1975@tom.com

舒乃秋(1954-),男,教授,主要从事传感器及检测仪表技术方面的研究。

(下转第35页 continued on page 35)

- [2] 朱文东,刘广一,于尔铿,等. 电力网络局部拓扑的快速算法 [J]. 电网技术, 1996, 20(3): 30-33.
ZHU Wen-dong, LIU Guang-yi, YU Er-keng, et al. The Fast Calculation Method of Local Power Network Topology [J]. Power System Technology, 1996, 20(3): 30-33.
- [3] 陈星莺,孙恕坚,钱锋. 一种基于追踪技术的快速电力网拓扑分析方法 [J]. 电网技术, 2004, 28(5): 22-24, 34.
CHEN Xing-ying, SUN Shu-jian, QIAN Feng. A Fast Power System Network Topology Based on Tracking Technology [J]. Power System Technology, 2004, 28(5): 22-24, 34.
- [4] 吴文传,张伯明. 基于图形数据库的网络拓扑及其应用 [J]. 电网技术, 2002, 26(2): 14-18.
WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming. A Graphic Database Based Network Topology and Its Application [J]. Power System Technology, 2002, 26(2): 14-18.
- [5] 王湘中,黎晓兰. 基于关联矩阵的电网拓扑辨识 [J]. 电网技术, 2001, 25(2): 10-12, 16.
WANG Xiang-zhong, LI Xiao-lan. Topology Identification of Power Network Based on Incidence Matrix [J]. Power System Technology, 2001, 25(2): 10-12, 16.
- [6] 张宏,郭宗仁. 配电网拓扑结构等效解耦的方法 [J]. 电网技术, 2004, 28(15): 88-91.
ZHANG Hong, GUO Zong-ren. Methods for Topology Equivalent Uncoupling of Distribution System [J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 88-91.

收稿日期: 2005-03-22; 修回日期: 2005-04-30

作者简介:

姚玉斌 (1965 -), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统分析和控制; E-mail: yaoyubin@mail.china.com

晋文转 (1968 -), 女, 工程师, 主要研究方向为机电一体化;

靳力 (1976 -), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统自动化的研究和开发工作。

Fast network topology method for a distribution network

YAO Yu-bin¹, JIN Wen-zhuan², JIN Li¹

(1. Yantai Dongfang Electronic Information Industry Co., Ltd, Yantai 264001, China;

2. Xuchang Relay Research Institute, Xuchang 461000, China)

Abstract: The most effective way to speed up network topology is to reduce searching range. Topological analysis for a transmission network can reduce searching range by the method of searching within a station, but this method is not adaptive to a distribution network. Data sorting is another good method to reduce searching range, but data sorting is a time-consuming task. So it is proposed that overall network topology be divided into static network topology and dynamic network topology. Static network topology only deals with data sorting and works in advance, and dynamic network topology realizes topology actually. By using of sorted data, the speed of network topology is greatly increased. And it is also proposed to form islands by node-branch list which can be sorted in static network topology. This method can speed up network topology for further for a distribution network. The results of some practical examples prove the effectiveness of the two proposed method.

Key words: distribution network; network topology; overall network topology; static network topology; dynamic network topology

(上接第 30 页 continued from page 30)

Research of the nonlinear excitation based on the direct feedback linearization

CHEN Tie¹, SHU Nai-qiu²

(1. College of Electric Engineering & Information Technology, China Three-Gorges University, Yichang 443002, China;

2. College of Electric Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Design plan is proposed in this paper for nonlinear excitation control. Simulation results show that both power station stability and the generator terminal voltage are better improved. The generator terminal voltage is not disturbed when the mechanical power of turbine is changed. The proposed controller is valuable for industrial application.

Key words: nonlinear; excitation control; stability; voltage regulation