

文章编号: 1000 5013(2010) 05- 0511- 04

神经网络逆系统非线性励磁控制器的设计

杨冠鲁, 胡欣

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 利用逆系统方法, 设计出同步发电机非线性励磁控制律, 并加入系统中. 把控制与过程状态样本作为非线性导师信号, 以训练神经网络控制器, 设计一种基于 BP 神经网络的非线性励磁控制器. 仿真结果表明, 对于小干扰, 神经网络控制器和逆系统控制显示出相同的控制效果; 而对于大干扰, 两种控制方式的暂态响应曲线也基本相同. 逆系统控制与其训练出的神经网络控制器控制, 都显示出基本相同的暂态和稳态性能, 但神经网络控制比逆系统控制具有控制规律简单, 以及实时性、可靠性和鲁棒性好的特点.

关键词: 励磁控制; 神经网络; 逆系统; 非线性; 同步发电机

中图分类号: TM 343.012; TM 31; TP 183

文献标识码: A

励磁控制策略一直是世界范围内的热门课题^[1-2]. 20 世纪 90 年代以来, 在非线性励磁方面具有代表性的控制策略主要有: 根据微分几何理论提出的非线性励磁控制、直接反馈线性化励磁控制, 基于李雅普诺夫稳定性理论的非线性励磁控制、自适应励磁控制, 以及基于智能控制理论的励磁控制等^[3-4]. 作为直接反馈线性化方法的一个主要分支, 逆系统方法^[5-6]具有物理概念清晰, 易于理解和分析的特点. 根据它设计出的发电机励磁控制律, 能够显著地改善电力系统暂态过程的动态响应, 较大程度地提高静态稳定极限, 但其实现要求被控系统模型精确已知. 这对于结构复杂和运行状态经常变化的非线性电力系统是难以做到的. 即使能够建立, 其逆系统的解析表达式也非常复杂, 在实际应用中, 其实时性、准确性、可靠性都难以保证. 由于神经网络具有自适应能力、并行处理和高度鲁棒性的特点, 采用神经网络方法设计的控制系统将具有更快的速度(实时性)、更强的适应能力和鲁棒性^[7-8]. 本文利用逆系统方法设计出的同步发电机非线性励磁控制律加入系统, 把控制与过程状态样本作为非线性导师信号用以训练神经网络控制器, 从而设计出一种基于反向传播(BP) 神经网络的控制器.

1 数学模型

图 1 为单机无穷大系统. 当忽略励磁机的动态过程时, 发电机励磁控制的三阶数学模型可建立为

$$\Sigma: \begin{cases} \dot{x} = f(x, u), \\ y = h(x, u). \end{cases}$$

其中: $x(t_0) = x_0; x = (\delta, \omega, E'_q)' \in R^3$, 控制输入 $u = E_f$, 输出 $y = h(x, u) = \delta$ 而

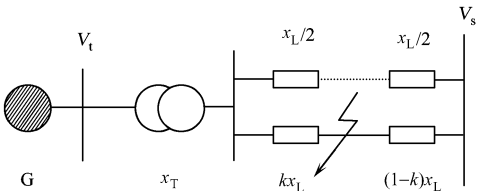


图 1 单机无穷大系统

Fig. 1 One generator and one infinite power system

$$f(x, u) = \begin{bmatrix} \omega - \omega_0 \\ \frac{\omega_0}{H} P_{m,0} - \frac{\omega_0}{H} \left(\frac{E'_q V_s}{X'_{d,\Sigma}} \sin \delta + \frac{V_s^2}{2} \frac{X'_{d,\Sigma} - X_{q,\Sigma}}{X'_{d,\Sigma} X_{q,\Sigma}} \sin 2\delta \right) - \frac{D}{H} (\omega - \omega_0) \\ \frac{1}{T'_{d,0}} E'_q + \frac{1}{T'_{d,0}} \frac{X_{d,\Sigma} - X'_{d,\Sigma}}{X'_{d,\Sigma}} V_s \cos \delta + \frac{1}{T'_{d,0}} E_f \end{bmatrix}.$$

收稿日期: 2009- 05- 23

通信作者: 杨冠鲁(1960-), 男, 教授, 主要从事智能信息处理与控制技术的研究. E-mail: glyang@ hqu. edu. cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(E0510021); 国务院侨办科研基金资助项目(04QZR04)

式中: δ 为发电机转子运行角; ω 为发电机转速; H 为转动惯量; D 为阻尼系数; $P_{m,0}$ 为机械功率; E'_q 为发电机 q 轴暂态电势; x_d 为 d 轴定子绕组自感抗; x'_d 为直轴暂态电抗; x_q 为发电机 q 轴同步电抗; V_s 为无穷大系统母线电压. $X_{d,\Sigma} = x_d + x_T + x_L$, $X_{q,\Sigma} = x_q + x_T + x_L$, $X_{q,\Sigma} = x_d + x_T + x_L$, 其中: x_T 为变压器电抗; x_L 为输电线路电抗; $T_{d,0}$ 为励磁绕组时间常数; $T'_{d,0}$ 为定子闭路时励磁绕组的时间常数.

2 非线性控制律设计

2.1 逆系统及 α 阶积分逆系统

取无穷大系统母线电压为参考量, 在输出 $y = h(x, u) = \delta$ 的情况下, 从原系统的方程推导出

$$\dot{y} = \dot{\delta} = h_1(x, u) = \omega - \omega_0, \quad (1a)$$

$$\ddot{y} = \ddot{\delta} = \dot{\omega} = h_2(x, u) = \frac{\omega_0}{H} \left[P_m - \frac{E'_q}{X'_{d,\Sigma}} \sin \delta - \frac{1}{2} \frac{x'_{d,\Sigma} - x_{d,\Sigma}}{x'_{d,\Sigma} x_{d,\Sigma}} \sin 2\delta - \frac{D}{\omega_0} (\omega - \omega_0) \right], \quad (1b)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y} = \ddot{\delta} = h_3(x, u) = & -\frac{\omega_0}{H} \left[\frac{E'_q V_s \cos \delta}{X'_{d,\Sigma}} + \frac{V_s^2 (x'_{d,\Sigma} - x_{q,\Sigma}) \cos 2\delta}{x'_{d,\Sigma} x_{q,\Sigma}} \right] \dot{\delta} - \frac{D}{H} \omega + \\ & \frac{\omega_0}{H} \frac{V_s \cos \delta}{X'_{d,\Sigma}} \left[\frac{E'_q}{T'_d} - \frac{(x_{d,\Sigma} - x'_{d,\Sigma}) V_s \cos \delta}{x'_{d,\Sigma} T_{d,0}} - \frac{1}{T_{d,0}} E_f \right]. \end{aligned} \quad (1c)$$

系统的相对阶数为 3, 等于其状态变量的个数, 所以系统是可逆的^[6]. 由式(1c)可以解出控制量为

$$\begin{aligned} u = E_f = & -T_d(\omega - \omega_0) E'_q \cot \delta - \frac{T_d(x'_{d,\Sigma} - x_{q,\Sigma}) \cos 2\delta}{x_{d,\Sigma} \sin \delta} (\omega - \omega_0) + \\ & \frac{x_{d,\Sigma}}{x'_{d,\Sigma}} E'_q - \frac{x_d - x'_d}{x'_{d,\Sigma}} \cos \delta - \frac{DT_d x'_{d,\Sigma}}{\omega_0 \sin \delta} (\ddot{y} + \ddot{y}). \end{aligned} \quad (2)$$

即 $u = h_3^{-1}[x, \ddot{y}]$. 于是, 原系统的逆系统为

$$\Sigma: \begin{cases} \dot{z} = f\{z, h_3^{-1}[z, \ddot{y}]\} \\ w = h_3^{-1}[z, \ddot{y}] \end{cases}.$$

其中: y 为输入; w 为输出; z 为状态变量. 令 $\varphi = \ddot{y}$ 并作为输入, 即可得到系统的 α 阶积分逆系统.

2.2 伪线性系统及非线性励磁控制律

按照逆系统方法, 将 α 阶积分逆系统与原系统串联, 令 $u = w$, 即构成伪线性系统, 并满足方程 $\ddot{y} = \ddot{\delta} = \varphi$ 其中: φ 为输入; y 为输出.

令 $\bar{x}_1 = y = \delta$, $\bar{x}_2 = y' = \dot{\delta} = \omega$, $\bar{x}_3 = y'' = \ddot{\delta} = \dot{\omega}$, $\bar{x} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3)'$, 则伪线性系统的状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \bar{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \varphi, \\ y = [1 \ 0 \ 0] \bar{x}. \end{cases}$$

按二次型目标函数对伪线性系统进行最优控制律设计, 可得到控制律为

$$\varphi = K_1 \int_0^t \omega dt + K_2 \omega + K_3 \dot{\omega}. \quad (3)$$

将伪线性系统的最优控制律式(3)代入式(2), 就得到了原系统的非线性励磁控制律. 为便于实现励磁控制律, 要把难于量测的量如 δ , E'_q 用容易量测的量表示.

3 神经网络控制器的原理及设计

神经网络控制器控制模式除了能够学会一些难以用数值描述的控制规律外, 还可以简化控制器的设计和运算. 即将复杂的非线性运算转化成神经网络中的某种特定的非线性运算. 这将大大加快控制器的运算速度, 而无需任何编程. 有导师神经网络控制器(SNC)的系统结构, 如图 2 所示. 除受控系统以外, 它还包括一个与导师(基于逆系统方法的非线性控制器)并联运行的神经网络控制器和一个选择器. 神经网络控制器可选用的神经网络, 一般包括多层前向网络或带局部反馈的回归网络等.

神经网络控制器的训练包括离线训练和在线训练两种形式, 但无论哪种形式, 其训练过程都是相同

的. 即在其他控制器工作时, 与其并联的神经网络控制器收集作用于系统的控制信号和过程的各种状态量, 作为训练所需要的样本.

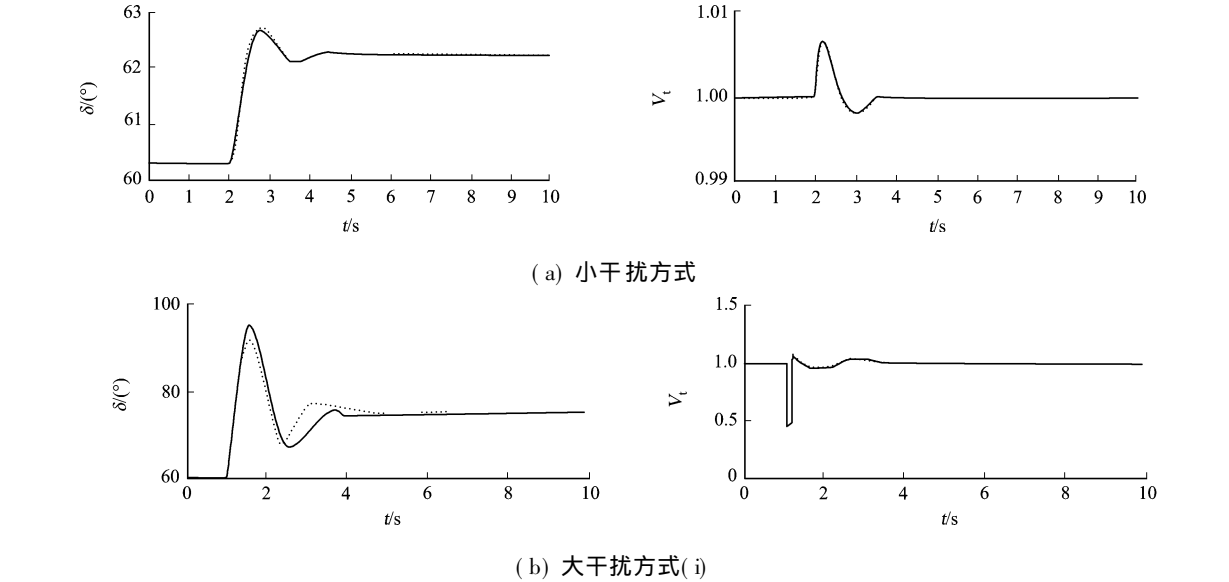
在训练过程中, 神经网络控制器将采集到的过程状态和以往时刻的控制信号作为网络的输入, 将当前时刻的控制信号作为网络的期望输出. 在成功地完成训练后, 网络就实现了输入到输出的映射, 也就是说, 可以根据网络的输入(当前的过程状态量), 产生与导师信号相同的正确控制.

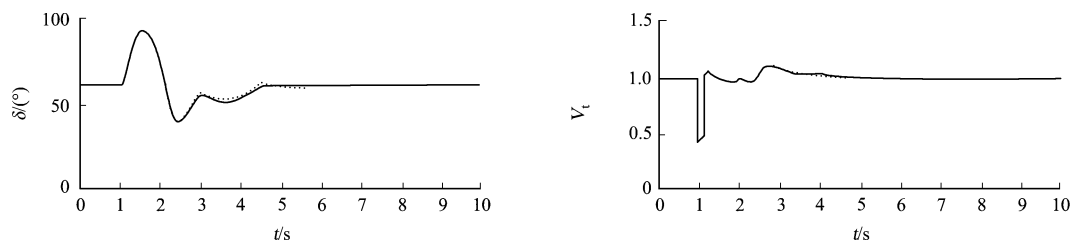
在训练中, 可以采用其他的控制器与神经网络控制分时切换的方式, 直到神经网络能够应付各种情况. 对于电力系统这样的动态过程比较快的系统, 对控制的有效性、准确性和可靠性有很高的要求, 不允许出现任何不正确的控制. 神经网络控制器在未训练好之前, 控制往往是不完善的. 同时, 对于快速系统来说, 目前神经网络网络采用的算法难以满足在线训练的要求. 因此, 在投入运行之前, 需要对神经网络控制器进行必要的离线训练. 采用离线训练并和数字仿真相结合, 可以检验神经网络的自身结构、输入集合等的设计是否合理, 并为改进提供参考.

训练数据包括系统状态量和导师加入系统后控制信号的采样值. 常规的线性控制律神经网络控制器, 只能保证在 origin 附近将系统从初始状态控制到原点, 对于电力系统中大的故障和干扰则难以满足控制要求. 因此, 选用基于逆系统方法得到的非线性控制律作为其非线性导师. 在获得样本的过程中, 给定系统多种常见的故障, 加入导师控制后使其回到稳定状态, 记录这一动态过程的全部信息. 把样本对网络进行离线训练, 并把训练好的网络作为控制器连入系统进行仿真, 观察其稳态和暂态性能.

4 仿真分析

仿真采用图 1 所示的单机无穷大系统, 其参数 $d_d = x_q = 2.543, x'_d = 0.318, T_d = 10\text{ s}, H = 8\text{ s}, D = 5, x_T = 0.1, x_{L1} = x_{L2} = 1.46$. 仿真中模拟了如下 3 种扰动. (1) 小干扰方式, 仿真结果如图 3(a) 所示. 结果表明, 在 2 s 时机械功率突然增加 5%. (2) 大干扰方式(i), 仿真结果如图 3(b) 所示. 结果表明, 在 $t = 0$ 时, 系统双回线稳态运行; 在 $t = 1\text{ s}$ 时, 在一回线 0.1 分点处发生三相短路; 经过 0.15 s, 故障线路被切除, 系统单回线运行. (3) 大干扰方式(ii), 仿真结果如图 3(c) 所示. 结果表明, 在 $t = 0$ 时, 系统双回线稳态运行; 在 $t = 1\text{ s}$ 时, 在一回线 0.1 分点处发生三相短路; 经过 0.15 s, 故障线路被切除, 系统单回线运行; 0.75 s 后重合闸成功, 系统恢复正常运行. 为进行对比, 同时给出了基于逆系统方法的励磁控制响应曲线, 图 3 中实线对应于神经网络控制器控制, 虚线对应于逆系统控制.





(c) 大干扰方式(ii)

图 3 系统响应的仿真结果

Fig. 3 Simulation results of the system response

从仿真结果看, 对于小干扰, 神经网络控制器和逆系统控制显示出相同的控制效果; 大干扰方式下, 两种控制方式的暂态响应曲线也基本相同. 这表明, 逆系统控制与其训练出的神经网络控制器控制, 显示出了基本相同的暂态和稳态性能, 即神经网络控制器能够从非线性导师那里学到稳定的控制律.

5 结束语

神经网络控制器非线性励磁控制系统, 无论在大干扰还是小干扰的方式下, 其响应曲线都和基于逆系统方法控制律的响应曲线基本一致. 也就是说, 非线性励磁控制系统和逆系统控制具有基本相同优良的控制性能, 可以取代逆系统励磁控制器.

参考文献:

- [1] 彭咏龙, 王仁洲, 柳焯. 同步发电机励磁控制研究综述[J]. 电力情报, 1996, 11(4): 1-5.
- [2] 韩英铎, 谢小荣, 崔文进. 同步发电机励磁控制研究的现状与走向[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2001, 41(4/5): 142-146.
- [3] 吴青华, 蒋林. 非线性控制理论在电力系统中应用综述[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(3): 1-10.
- [4] 吴捷, 柳明. 非线性控制在电力系统中的应用[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(1): 15-22.
- [5] 李春文, 冯元琨. 多变量非线性控制的逆系统方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
- [6] 刘广生, 刘泮石, 王文杰. 同步发电机非线性励磁控制的逆系统方法[J]. 控制与决策, 1993, 8(6): 456-460.
- [7] 王永骥, 涂健. 神经网络控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [8] 杨冠鲁, 李元杰. 神经网络 SNC 无刷柴油发电机励磁控制器[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2001, 22(3): 317-320

Design of Nonlinear Excitation Controller in Neural Network Inverse System

YANG Guan-lu, HU Xin

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: In the paper, the inverse system method are used to design the nonlinear excitation control law and put it in the power system. Then the signal of control and states are used to teach the supervisory and learning controller as the nonlinear teacher signals. A type of nonlinear excitation controller based on back propagation neural network (SNC) is designed. The simulation results show that the inverse system control and the SNC control have nearly controlling performance in the transient state and the steady state for the small disturbance. Furthermore, both of them have similar transient and steady state for larger disturbance. But in practice the SNC controller have better character than the inverse system method.

Keywords: excitation control; neural network; inverse system; nonlinear; synchronous generator

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 吴逢铁)