

基于自组织模糊神经网络电力系统稳定器的设计

叶其革

(广州电力工业局·广州, 510600)

王晨皓

吴捷

(广东省邮电学校·广州, 510630) (华南理工大学电力学院·广州, 510640)

摘要: 采用一种自组织模糊神经网络设计电力系统稳定器, 该稳定器能通过结构和参数的学习, 克服传统模糊控制器设计过程中存在的盲目性及拮抗性, 避免模糊控制器中模糊逻辑规则的冗余或缺。仿真表明该电力系统稳定器具有良好控制性能。

关键词: 自组织模糊神经网络; 电力系统稳定器; 模糊控制器

Design of Self-Organizing Power System Stabilizer Based on Fuzzy Neural Network

Ye Qige

(Guangzhou Electric Power System Industry Bureau · Guangzhou, 510600, P. R. China)

Wang Chenhao

(Guangdong Post and Telecommunication Polytechnic School · Guangzhou, 510630, P. R. China)

Wu Jie

(Electric Power College, South China University of Technology · Guangzhou, 510640, P. R. China)

Abstract: A kind of self-organizing fuzzy neural network is applied to design power system stabilizer in the paper. With structure and parameter learning of neural networks, this power system stabilizer could overcome the blindness and exploration existing in designing traditional fuzzy power system stabilizer, avoid surplus and deficiency of fuzzy logic rule in fuzzy controller. The simulation example shows that this power system stabilizer has good control performance.

Key words: self-organizing fuzzy neural networks; power system stabilizer; fuzzy controller

1 引言 (Introduction)

由于一般的模糊神经网络电力系统稳定器在输入量的论域、模糊子集、节点数及节点函数的选取有过分依赖于先验知识之嫌, 另外, 一经设计完毕后, 模糊神经网络的结构是固定不变的, 不便于模糊逻辑规则及节点的增减, 有可能造成模糊逻辑规则的冗余或缺, 为了克服以上的缺点, 可采用一种自组织模糊神经网络作为电力系统稳定器。

2 模糊神经网络的结构调整 (The adjustment of the structure of fuzzy neural networks)

2.1 模糊神经网络的基本结构 (The basic structure of fuzzy neural network)

模糊神经网络由输入层、模糊化层、模糊逻辑层、模糊归一层、输出层组成, 其结构如图 1 所示, 圆圈及实线代表已存在的节点及连接, 方框及虚线代表将增加的节点及连接, 设 $a_i^{(j)}, b_i^{(j)}, N(j)$ 分别为第 j 层的输入变量、输出变量、节点数, 每层节点函

数描述如下:

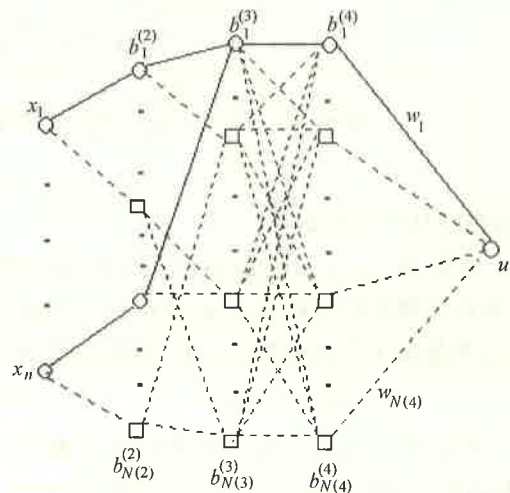


图 1 模糊神经网络结构图

Fig. 1 The structure of fuzzy neural network

输入层: 节点只起数值传输的作用, 无计算功能, 即:

$$b_i^{(1)} = a_i^{(1)} = x_i, \quad i = 1, \dots, N. \quad (1)$$

模糊化层:该层每个节点对应于一个语言变量,其节点函数为三角形隶属函数,即:

$$b_{i,j}^{(2)} = \begin{cases} 0, & b_i^{(1)} < Ta_{i,j}, \\ \frac{b_i^{(1)} - Ta_{i,i}}{Tb_{i,j} - Ta_{i,j}}, & Ta_{i,j} \leq b_i^{(1)} < Tb_{i,j}, \\ \frac{b_i^{(1)} - Tc_{i,i}}{Tb_{i,j} - Tc_{i,j}}, & Tb_{i,j} \leq b_i^{(1)} < Tc_{i,j}, \\ 0, & Tc_{i,j} \leq b_i^{(1)}. \end{cases} \quad (2)$$

模糊逻辑层:该层完成模糊逻辑规则的前提条件匹配运算,输出为匹配度(点火强度)

$$\begin{cases} b_i^{(3)} = b_{1,k}^{(2)} b_{2,l}^{(2)} \dots b_{n,m}^{(2)}, \quad i = 1, \dots, N(3), \\ k = 1, \dots, N_1(2), \quad l = 1, \dots, N_2(2), \dots, \\ m = 1, \dots, N_n(2). \end{cases} \quad (3)$$

模糊归一层:该层实现上层节点的点火强度归一化运算,即:

$$b_i^{(4)} = b_i^{(3)} / \sum_{k=1}^{N(3)} b_k^{(3)}, \quad i = 1, 2, \dots, N(4). \quad (4)$$

连续输出层:完成加归一化后的点火强度与连接权 w_k 线性和的运算,求准确输出值:

$$|A \cap B| = \begin{cases} 0, & Tc_B < Ta_A, \\ \frac{(Tc_B + Ta_A)^2}{2(Tb_A - Ta_A - Tb_B + Tc_B)}, & Ta_B \leq Ta_A < Tc_B < Tc_A, \\ \frac{(Ta_A - Ta_B)^2}{2(Tb_B - Ta_B - Tb_A + Ta_A)} + \frac{(Ta_A - Tc_B)^2}{2(Tc_B - Tb_B + Tb_A - Ta_A)}, & Ta_A < Ta_B \text{ 且 } Tc_B < Tc_A, \\ \frac{(Ta_A - Tc_B)^2}{2(Tc_B - Tb_B + Tb_A - Ta_A)} + \frac{(Tc_A - Tc_B)^2}{2(Tb_B - Tc_B - Tb_A + Tc_A)}, & Ta_B < Ta_A \text{ 且 } Tc_A < Tc_B. \end{cases} \quad (9)$$

结构调整的具体过程如下:

1) 如果 $M^J > \alpha$, 跳过结构的调整, 转入第六步, 否则在模糊化层中对每个 x_i 各增加一个相对应的节点, 并各赋予节点函数, x_i 对应的节点数为:

$$N_i^{k+1}(2) = N_i^k(2) + 1. \quad (10)$$

2) 根据节点函数相似度差别是否正确产生节点及其函数, 如果 $\text{deg}(i, k) > \beta$, 则删去刚产生的且不正确的节点及函数, 否则保留新节点及其函数, 再回到第二步直至判别完毕.

3) 增加模糊逻辑层新节点, 新增加点数为:

$$\Delta N(3) = \prod_{i=1}^N N_i^{k+1}(2) - \prod_{i=1}^N N_i^k(2). \quad (11)$$

$$u = \sum_{k=1}^{N(4)} b_k^{(4)} w_k. \quad (5)$$

2.2 结构的调整(The adjustment of the structure)

结构的调整是通过模糊逻辑层的点火强度的最大值是否小于某一阈值及模糊化层的节点函数的相似度是否小于某一参数来决定的, 其中:

点火强度最大值:

$$M^J = \max_{1 \leq j \leq N(3)} b_j^{(3)}. \quad (6)$$

相似度:

$$\text{deg}(i, k) = \max_{1 \leq j \leq N_1(2)} S(f(Ta_{i-\text{new}}, Tb_{i-\text{new}}, Tc_{i-\text{new}}), f(Ta_{i,j}, Tb_{i,j}, Tc_{i,j})), \quad (7)$$

$f(Ta_{i-\text{new}}, Tb_{i-\text{new}}, Tc_{i-\text{new}})$ 为新增加的节点函数, 而函数

$$S(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} = \frac{|A \cap B|}{\frac{1}{2}(Tc_A - Ta_A) + \frac{1}{2}(Tc_B - Ta_B) - |A \cap B|}. \quad (8)$$

在 $Tb_B \leq Tb_A$ 时, 有(公式的推导见文献[7]):

4) 增加归一化层中与模糊逻辑层新节点对应的新节点, 增加节点数:

$$\Delta N(4) = \Delta N(3). \quad (12)$$

5) 按照神经网络的连接方式联接各层新、旧节点, 并连接权设为某一初始值.

6) 模糊逻辑规则的产生及合成.

3 模糊逻辑规则的产生(The generation of fuzzy logic rule)

采用简易的模糊逻辑规则及推理方法, 该模糊逻辑规则的前提变量仍为模糊集, 而结论变量为某一参数, 具体描述见文献[2].

当模糊逻辑规则层点火强度的最大值小于某一

阈值,模糊化层将增加新节点,新节点的隶属函数随之产生,具体过程如下:

1) 如果是刚开始,则产生隶属函数,其参数为:

$$\begin{aligned} Tb_{i,j} &= x_{i\text{-init}}, \quad Ta_{i,j} = Ta_{i\text{-init}}, \\ Tc_{i,j} &= Tc_{i\text{-init}}. \end{aligned} \quad (13)$$

2) 如果没产生节点,跳过隶属函数的产生过程,转入第四步,否则产生新隶属函数,隶属函数的个数与模糊化层对应的节点数相同,新隶属函数的参数分别为:

$$\begin{aligned} Tb_{i\text{-new}} &= x_i, \quad Ta_{i\text{-new}} = x_i - \gamma \ln(M^J), \\ Tc_{i\text{-new}} &= x_i + \gamma \ln(M^J). \end{aligned} \quad (14)$$

3) 根据式(7)~(9),如果 $\text{deg}(i,k) > \beta$,则删去刚产生的隶属函数.否则采用新隶属函数,并进入模糊逻辑规则的合成.

4) 产生控制量.

由于模糊神经网络是动态变化,节点及其连接将随之发生变化,对应的隶属函数、模糊逻辑规则将产生变化,模糊逻辑规则的变化表现在模糊逻辑规则合成的变化,即:

$$Ta_{i,j}(k+1) = \begin{cases} Ta_{i,j}(k) + \lambda_1 \Delta\omega(k) \text{sgn}\left(\frac{\partial\omega(k)}{\partial u}\right) \sum_l \frac{W_l - u}{\sum_m b_m^{(3)}} \frac{b_{i,j}^{(2)} - 1}{b_{i,j}^{(2)}} Tb_{i,j} - Ta_{i,j}, & \text{模糊化层节点 } i \text{ 与模糊逻辑层节点 } l \text{ 相连且 } Ta_{i,j} \leq x_i \leq Tb_{i,j}; \\ Ta_{i,j}(k), & \text{模糊化层节点 } i \text{ 与模糊逻辑层节点 } l \text{ 不相连或其它.} \end{cases} \quad (16)$$

$$Tb_{i,j}(k+1) = \begin{cases} Tb_{i,j}(k) + \lambda_2 \Delta\omega(k) \text{sgn}\left(\frac{\partial\omega(k)}{\partial u}\right) \sum_l \frac{W_l - u}{\sum_m b_m^{(3)}} \frac{b_{i,j}^{(2)} - 1}{Tb_{i,j} - Ta_{i,j}}, & \text{模糊化层节点 } i \text{ 与模糊逻辑层节点 } l \text{ 相连且 } Ta_{i,j} \leq x_i \leq Tb_{i,j}; \\ Tb_{i,j}(k), & \text{模糊化层节点 } i \text{ 与模糊逻辑层节点 } l \text{ 不相连或其它.} \end{cases} \quad (17)$$

$$Tc_{i,j}(k+1) = \begin{cases} Tc_{i,j}(k) + \lambda_3 \Delta\omega(k) \text{sgn}\left(\frac{\partial\omega(k)}{\partial u}\right) \sum_l \frac{w_l - u}{\sum_m b_m^{(3)}} \frac{b_{i,j}^{(2)} - 1}{Tb_{i,j} - Tc_{i,j}}, & \text{模糊化层节点 } i \text{ 与模糊逻辑层节点 } l \text{ 相连且 } Ta_{i,j} \leq x_i \leq Tb_{i,j}; \\ Tc_{i,j}(k), & \text{模糊化层节点 } i \text{ 与模糊逻辑层节点 } l \text{ 不相连或其它.} \end{cases} \quad (18)$$

连接权的调整:

$$W_i(k+1) = w_i(k) + \lambda_4 \Delta\omega \text{sgn}\left(\frac{\partial\omega(k)}{\partial u}\right) b_i^{(4)}. \quad (19)$$

SOFNN-PSS 具体实现过程为:1) 初始化;2) 判别 $M^J > \alpha$? 如果 $M^J > \alpha$ 则跳过神经网络结构的调整及模糊逻辑规则的调整,如果 $M^J \leq \alpha$ 则进入结构的调整及模糊逻辑规则的调整;3) 产生控制量,直接对被控对象进行控制;4) 根据系统误差及其变化率调整隶属函数的参数及模糊逻辑规则的结论变

$$\begin{cases} b_i^{(3)} = b_{1,k}^{(2)} b_{2,l}^{(2)} \cdots b_{n,m}^{(2)}, \\ i = 1, \cdots, N_{\text{new}}(3), k = 1, \cdots, N_{1\text{-new}}(2), \\ l = 1, \cdots, N_{2\text{-new}}(2), \cdots, m = 1, \cdots, N_{n\text{-new}}(2). \end{cases} \quad (15)$$

4 自组织模糊神经网络电力系统稳定器(SOFNN-PSS)的设计(The design of self-organizing fuzzy neural networks-power system stabilizer)

采用自组织模糊神经网络实现电力系统稳定器,SOFNN-PSS 的输入量为单机无穷大系统发电机的转速偏差 $\Delta\omega(k)$ 及其变化率 $\Delta\omega(k) - \Delta\omega(k-1)$,输出信号为 $\Delta u_{\text{pss}}(k) = u_{\text{pss}}(k) - u_{\text{pss}}(k-1)$,转速偏差及其变化率的论域、模糊子集、节点数、节点函数和模糊逻辑规则由自组织模糊神经网络产生选取,SOFNN-PSS 的训练算法取梯度下降法,目标函数取 $J = [\Delta W(k)]^2$,训练算法(具体推导见参考文献[1,4,7])如下:

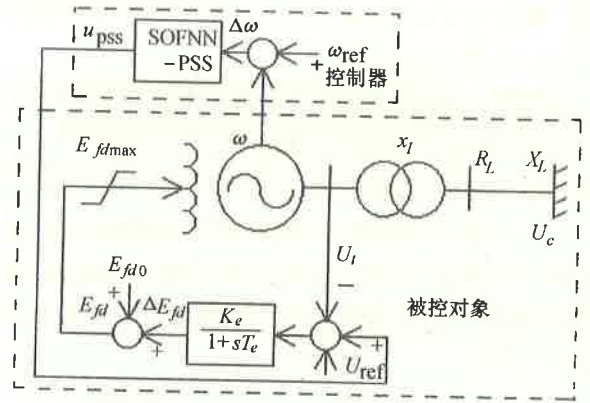
隶属函数的参数调整:

量;5) 判断是否结束,如果符合条件,则结束;否则跳到第二步.

5 仿真研究(Simulation)

单机无穷大系统中系统的数学模型见文献[5],其参数如图2所示.仿真过程中,假定原动机出力 P_m 有5%的阶跃扰动时,给出 SOFNN-PSS 控制系统的电功角偏差 $\Delta\delta$ 、角速度偏差 $\Delta\omega$ 、电磁功率偏差 ΔP_e 和端电压偏差 ΔU_i 等响应曲线,并与 PI-PSS ($K_p = 6, T_i = 20$) 的响应曲线比较.其中采样时间

$T_c = 20\text{ms}$, SOFNN-PSS 的参数 $\sigma_0 = 0.0002$, $m = 0$, $\alpha = 0.04$, $\beta = 0.9$, $\gamma = 0.005$, 学习系数 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0.001$, $\lambda_4 = 10$, 经过 5 次训练(每次从阶跃扰动起到暂态过程稳定时止). 从图 3,4 可看出: 单机无穷大系统在运行状态 $\delta = 70^\circ(60^\circ)$ 和原动机出力有 5% 的阶跃扰动时, PI-PSS 控制系统至 8 秒(4 秒) 时仍有微小的振荡; SOFNN-PSS 控制系统至 3 秒(1.8 秒) 时已趋于稳定; 与 PI-PSS 控制系统相比, SOFNN-PSS 控制系统发电机的端电压有振幅偏大的现象, 但不明显. 很明显 SOFNN-PSS 控制系统的动态特性优于 PI-PSS 控制系统的动态特性.



$$X_d=2.543, X_q=2.543, X'_d=0.318, X_T=0.1, X_L=0.73$$

$$R_L=0.01, D=4, H=3, K_e=50, U_{f0}=1, T_{do}=10.0, T=0.1$$

图 2 电力系统稳定器

Fig. 2 The electric power system stabilizer

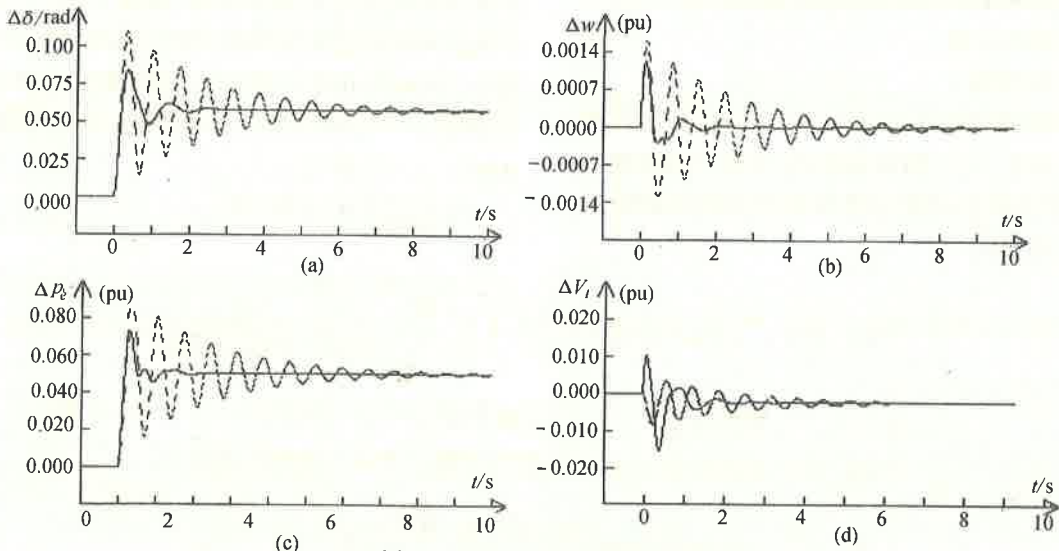


图 3 两种稳定器负载扰动响应的对比
 Fig. 3 Comparison of PI-PSS and SOFNN-PSS in a load disturbance response ($\delta=70^\circ$) — PI-PSS - - - - - SOFNN-PSS

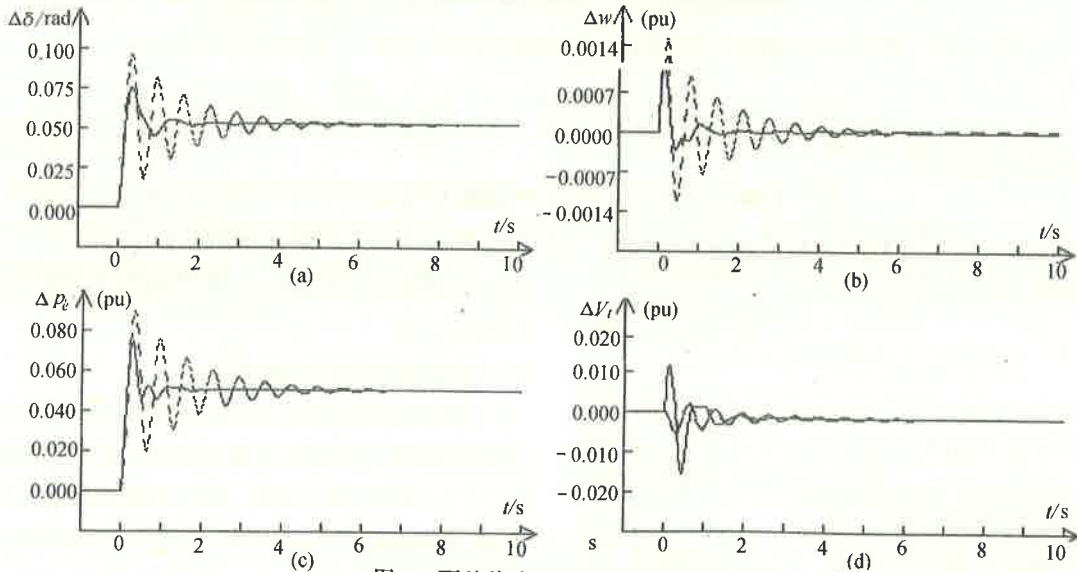


图 4 两种稳定器负载扰动响应的对比
 Fig. 4 Comparison of PI-PSS and SOFNN-PSS in a load disturbance response ($\delta=60^\circ$) — PI-PSS - - - - - SOFNN-PSS

(下转第 695 页)

参考文献 (References)

- 1 Park K and Bongiorno J J. Wiener-Hopf design of servo-regulator-type multivariable control systems including feedforward compensation. *Int. J. Control*, 1990, 52(5): 1189-1216
- 2 Park K and Youla D C. Numerical calculation of the optimal three-degree-of-freedom Wiener-Hopf controller. *Int. J. Control*, 1992, 56(1): 227-244

(上接第 690 页)

6 结论 (Conclusion)

SOFNN-PSS 电力系统稳定器具有如下特点: 1) 设计过程中无需依赖精确数学模型, 只要求设计人员知道被控对象的系统方向, 即 $(\text{sgn}(\partial \omega / \partial u))$; 2) 充分利用神经网络的学习能力, 减少对经验的过分依赖, 也减少选取控制器参数所带来的麻烦; 3) 能有效增强电力系统的阻尼, 提高电力系统的微动态稳定水平; 4) 对电力系统的参数变化不敏感, 适用范围广, 鲁棒性强; 5) 具有并行处理能力, 更适用于快速变化电力系统的控制; 6) 能有效克服控制器中模糊逻辑规则和节点数的冗余或缺的缺点。

参考文献 (References)

- 1 Cai X Z and Shin K G. Direct control and coordination using neural networks. *IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics*, 1993, 23(3): 686-697

本文作者简介

李冬梅 1973 年生. 现为哈尔滨工业大学控制工程系博士生. 主要研究方向为最优控制, 飞行器控制.

刘俊强 1973 年生. 现为哈尔滨工业大学控制工程系博士生. 主要研究方向为模糊建模与控制, 最优控制.

胡恒章 1932 年生. 1955 年毕业于哈尔滨工业大学电机系. 现任哈尔滨工业大学控制工程系教授, 博士生导师. 发表论文 100 余篇. 目前研究领域为飞行器控制与制导, 随机控制, 智能控制.

- 2 邓志东, 孙增圻, 张再兴. 一种模糊 CMAC 神经网络. *自动化学报*, 1995, 21(3): 288-293
- 3 Juang C F and Lin C T. A self-organizing neural fuzzy inference network for identification and control. *Journal of Control Systems and Technology*, 1996, 4(4): 269-280.
- 4 叶其革, 吴捷. 一种自适应模糊 CMAC 控制器. *电脑应用技术*, 1997, 40: 5-9
- 5 沈善德. 电力系统辨识. 北京: 清华大学出版社, 1993
- 6 高峰, 秦冀鸿. 基于模糊神经网络的模糊控制综合优化设计: II 模糊电力系统稳定器. *电力系统自动化*, 1996, 20(12): 6-9
- 7 叶其革. 模糊 CMAC 控制器及其在电力系统应用的研究: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 1998

本文作者简介

叶其革 1969 年生. 助工, 硕士. 主要研究方向: 电力系统稳定器, 自适应控制, 管理信息系统.

王晨皓 女. 1971 年生. 助教, 学士. 从事高频开关电源的教学工作.

吴捷 见本刊 1999 年第 2 期第 308 页.