

水轮机调速器的模糊 B 样条基函数神经网络控制

A hydraulic turbine speed governor using fuzzy B-spline function neural networks controller

何江

HE Jiang

(长沙市产商品质量监督检验所, 长沙 410013)

摘要: 水轮机调速器是控制水轮机输出机械功率的关键设备, 是水轮发电机组控制的重要内容。针对非线性复杂时变的水轮机调速器, 本文研究了一种模糊 B 样条基函数神经网络控制器。该智能控制器是一种模糊逻辑与神经网络控制器的结合, 集中了二者的优点和长处。文章分析了该控制器的结构、具体实现以及学习优化。仿真实验表明该智能控制器的实际效果良好。

关键词: 水轮机调速器; 非线性控制; 模糊逻辑; 智能控制

中图分类号: TP273

文献标识码: B

文章编号: 1009-0134(2009)06-0082-04

0 引言

水轮机调节系统是一个集水力、机械、电气为一体的复杂控制对象, 其基本任务是根据系统负荷的不断变化来调节水轮发电机的有功功率输出, 并保持机组频率的稳定^[1-3]。由于水流惯性带来的水锤效应, 水、机、电各环节的非线性和大惯性特点, 还有参数变化、负荷扰动等的影响, 使得水轮发电机的调节较为复杂^[4]。

近年来, 模糊神经网络技术将模糊技术和神经网络技术很好地融合在一起, 采用神经网络来进行模糊信息处理, 使神经网络具备了定性知识的表达能力, 其网络的拓扑结构和连接权值具有了明确的物理意义, 使得网络的初始化变得容易, 避免了网络训练陷入局部最优, 保证了网络的稳定性^[5,6]。本文研究提出了一种基于模糊 B 样条神经网络的水轮机调速器控制方法, 该方法在充分利用了模糊神经网络构造简便、容错性好、定性知识表达能力和自学习能力强的基础上, 还综合了 B 样条基函数优异的局部特性, 进一步提高了控制器的性能。

1 水轮机调速控制数学模型

水轮发电机调节控制系统的结构框图如图 1 所示^[7], 主要包括水力系统、频率测量、频率给定、调速器、驱动装置、导水叶等部分组成。水轮机调节的基本过程是: 当系统负荷发生变化时, 由于电能不能大量的储存, 负荷功率的变化会立即引起频率

的相应变化, 此时通过水轮机调速器相应地改变导水叶开度, 从而改变进入水轮机的水流量, 使变化后的水轮机水力矩与发电机负荷阻力矩达到新的平衡, 以维持电力系统频率在规定的范围内。

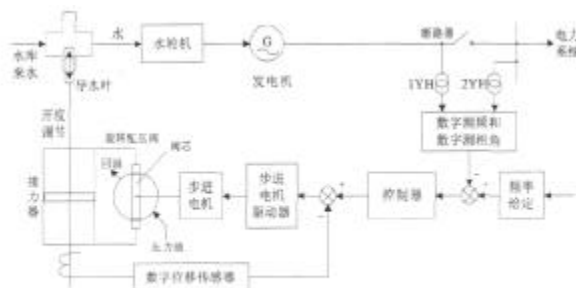


图 1 水轮发电机调节控制系统框图

考虑到水电站与负荷中心的距离一般都比较远, 通过长距离输电线与电力系统相连。因此, 水轮发电机与系统的联系近似于单机 - 无穷大系统。这样就可以采用如下的刚性水击模型来描述^[7]:

$$\delta = (\omega - 1)\omega_0$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{H} [P_m - D(\omega - 1) - \frac{E'_q V_s}{x_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{V_s^2}{2} \frac{x'_{d\Sigma} - x_{q\Sigma}}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \sin 2\delta]$$

$$\dot{P}_m = \frac{2}{T_w} [-P_m + \mu - \frac{T_w}{T_s} (-\mu + \mu_0 + u)]$$

$$\dot{\mu} = \frac{1}{T_s} (-\mu + \mu_0 + u)$$

(1)

式中 d 为发电机转子角度; w 为角速度, 此处

收稿日期: 2009-02-24

作者简介: 何江 (1977 -), 男, 湖南长沙人, 工程师, 主要从事检测技术与标准化工作。

$w_0=2pf_0$; E'_q 为 q 轴暂态电势; P_m 为机械功率; m 为水门开度, m_0 为水门初始开度; H 为发电机转动惯量; D 为发电机阻尼系数; T_w 为水击时间常数; T_s 为伺服马达时间常数; u 为水门开度控制量。

水轮机调节系统存在水流惯性时间常数 T_w (一般为 0.5~4.0s) 和机组惯性时间常数 T_s (一般范围为 1.5~12s), 前者反映了水锤效应的主要特征, 它使系统成为一个非最小相位系统; 后者则在水轮机调节系统中引入了一个大时间常数的惯性环节。

用对象输出量 y 表示发电机功角 δ , 由此构成的系统可以称之为“单机无穷大水门控制功角系统”。考虑到方程式(1)中, 对象输出 y 不显含控制输入 u , 我们将方程式(1)表示为:

$$\begin{aligned} \dot{y} &= (\omega - 1)\omega_0 \\ \ddot{y} &= \frac{1}{H} [P_m - D(\omega - 1) - \frac{E'_q V_s}{x_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{V_s^2}{2} \frac{x'_{d\Sigma} - x_{q\Sigma}}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \sin 2\delta] \\ \ddot{y} &= \frac{2}{HT_n} [-P_m + \mu - \frac{T_w}{T_s} (-\mu + \mu_0 + u)] - \frac{D}{H} \dot{\omega} \\ &\quad - \frac{1}{H} \frac{E'_q V_s}{x_{d\Sigma}} \cos \delta - \frac{V_s^2}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} (x'_{d\Sigma} - x_{q\Sigma}) \cos 2\delta \end{aligned} \quad (2)$$

根据方程式(1)和方程式(2), 经过变换后可以得到:

$$\begin{aligned} P_m &= H\ddot{\delta} + D(\dot{\delta} - 1) + \frac{E'_q V_s}{x_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{V_s^2}{2} \frac{x'_{d\Sigma} - x_{q\Sigma}}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \sin 2\delta = P_m(\ddot{\delta}, \dot{\delta}, \delta) \\ \dot{P}_m &= H\ddot{\delta} + D\dot{\delta} + \frac{E'_q V_s}{x_{d\Sigma}} \cos \delta + \frac{V_s^2}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} (x'_{d\Sigma} - x_{q\Sigma}) \cos 2\delta = \dot{P}_m(\ddot{\delta}, \dot{\delta}, \delta, \delta) \\ \mu &= \frac{\frac{T_w T_s}{T_w + T_s} \dot{P}_m + T_s P_m + T_w (\mu_0 + u)}{T_w + T_s} = \mu(\dot{P}_m, P_m, u) = \mu(\ddot{\delta}, \dot{\delta}, \delta, u) \end{aligned} \quad (3)$$

将方程式(3)所述的变量 \dot{P}_m 、 P_m 、 μ 代入方程式(2)中最后一行。这样以来, y 的三阶导数显含输入 u , 且其它变量完全可以由变量 δ 地关系式来描述, 即可以得到如下的由输入输出方程描述的对象模型, 即: $\ddot{y} = \ddot{\delta} = g(\ddot{y}, \dot{y}, y, u) = g(\ddot{\delta}, \dot{\delta}, \delta, u)$ (4)

2 FBFNN 控制器设计

在模糊理论的实际应用中, 隶属函数的结构十

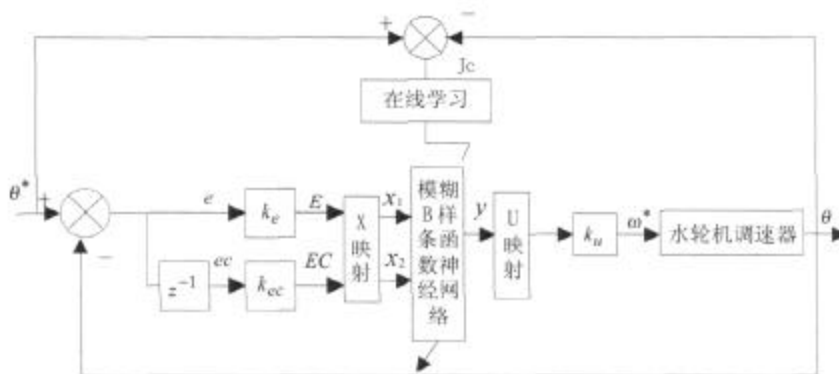


图2 水轮机调速器的模糊 B 样条基函数神经网络控制

分重要, 许多文章对此进行了研究。B 样条基函数由于拥有较好的局部性能而被证明是一种优异的隶属函数。本论文将模糊 B 样条基函数与神经网络相结合, 来设计一种用于水轮机调速器控制的智能控制方法。

2.1 水轮机调速器的 FBFNN 控制

水轮机调速器是一个典型的非线性时变对象, 而且还存在参数变化、外界扰动等因素的影响。而模糊控制器的最大优点是不依赖于被控对象的数学模型, 能够克服非线性等因素的影响, 对调节对象的参数变化具有较强鲁棒性。本文所提出的模糊 B 样条基函数神经网络控制器的结构如图 2 所示。在图 2 中, q^* 用表示发电机功角的期望值, 而 q 表示发电机功角的实际值, 依据误差来调整该智能控制器的输出控制量。

2.2 FBFNN 网络

2.2.1 FBFNN 网络结构

模糊 B 样条基函数神经网络(FBFNN)结构如图 3 所示。在图中, 网络的 1、2 层对应于模糊控制规则的前提“IF-part”部分; 3 层对应模糊推理, 每个节点输出表示一条规则的触发强度; 4 层表示模糊 AND 操作, 这里用“*”乘积操作代替取小运算;

5 层对应于规则的结论“THEN-part”部分, 网络的输入输出关系如下:

第 1 层将输入 x_i 引入网络,

输出节点:

$$O_i^{(1)} = x_i \quad i=1,2 \quad (5)$$

第 2 层采用 $k=3, d=2$ 时的 B 样条函数作为隶属函数对输入进行模糊化处理,

输入节点:

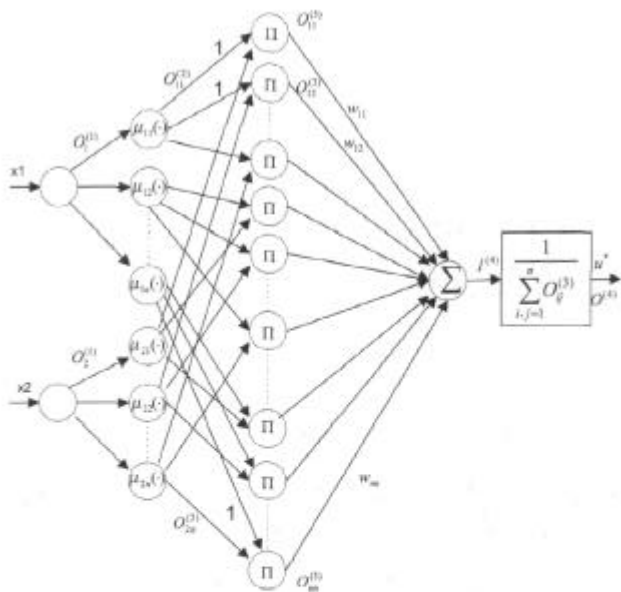


图3 模糊B样条基函数神经网络结构

$$I_{ik}^{(2)} = \frac{4}{3} N_j^3(x_i) = \begin{cases} \frac{4}{3} \frac{(x_i - \lambda_{j-6})^2}{(\lambda_{j-2} - \lambda_{j-6})(\lambda_{j-4} - \lambda_{j-6})}, & x_i \in [\lambda_{j-6}, \lambda_{j-4}) \\ \frac{4}{3} \frac{(x_i - \lambda_{j-6})(\lambda_{j-2} - x_i)}{(\lambda_{j-2} - \lambda_{j-6})(\lambda_{j-2} - \lambda_{j-4})}, & x_i \in [\lambda_{j-4}, \lambda_{j-2}) \\ \frac{4}{3} \frac{(\lambda_j - x_i)^2}{(\lambda_j - \lambda_{j-4})(\lambda_j - \lambda_{j-2})}, & x_i \in [\lambda_{j-2}, \lambda_j) \\ 0, & x_i \notin [\lambda_{j-6}, \lambda_j) \end{cases}$$

$i=1,2 \quad k=1,2,\dots,7 \quad j=2k-1$

输出节点: $O_{ik}^{(2)} = I_{ik}^{(2)}$

III层 进行模糊 AND 操作,

输入节点:

$$I_{ij}^{(3)} = O_{1i}^{(2)} \cdot O_{2j}^{(2)} \quad i, j = 1, 2, \dots, 7 \quad (8)$$

$$O_{ij}^{(3)} = I_{ij}^{(3)} \quad (9)$$

IV层 进行去模糊化操作,

输入节点:

$$I^{(4)} = \sum_{i,j=1}^7 O_{ij}^{(3)} \cdot w_{ij} \quad (10)$$

输出节点:

$$O^{(4)} = u = \frac{I^{(4)}}{\sum_{i,j=1}^7 O_{ij}^{(3)}} \quad (11)$$

其中 x_i 表示网络的输入, 由 E、EC 经归一化处理而得, w_{ij} 表示网络的连接权值, u 表示网络的输出, u 经过去归一化处理得到 U 。

2.2.2 学习算法

网络学习采用 BP 算法, 目标函数:

$$J_c = \frac{1}{2} (u_d - u)^2 \quad (12)$$

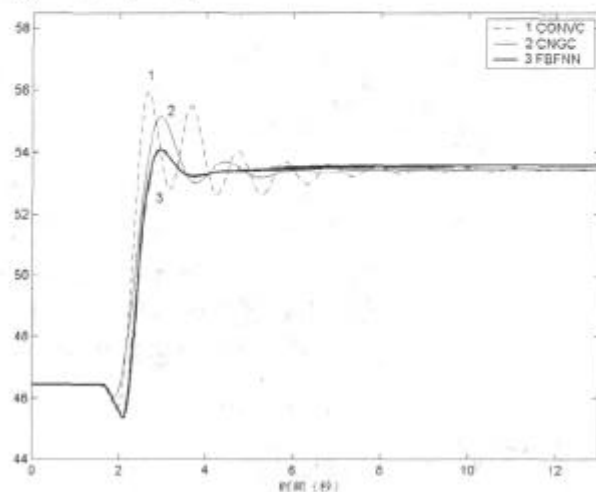
式中 u_d 为期望输出, u 为网络实际输出。

$$\begin{aligned} \frac{\partial J_c}{\partial w_{ij}} &= \frac{\partial J_c}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial w_{ij}} \\ &= \frac{\partial J_c}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial I^{(4)}} \cdot \frac{\partial I^{(4)}}{\partial w_{ij}} \\ &= -(u_d - u) \cdot \frac{1}{\sum_{i,j=1}^7 O_{ij}^{(3)}} \cdot O_{ij}^{(3)} \end{aligned} \quad (13)$$

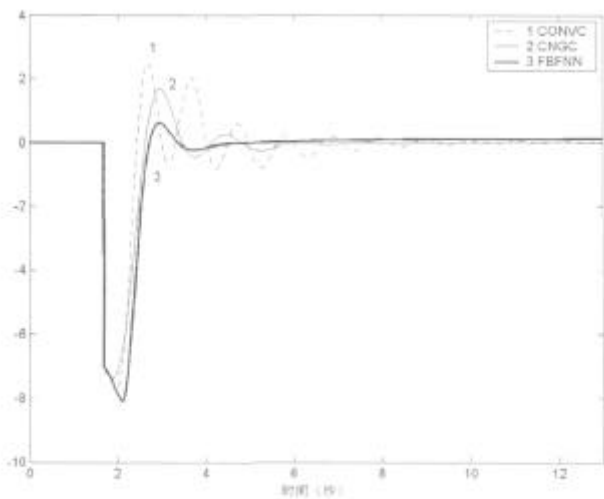
$$\begin{aligned} w_{ij}(t+1) &= w_{ij}(t) - \eta \cdot \frac{\partial J_c}{\partial w_{ij}} \\ &= w_{ij}(t) + \eta \cdot (u_d - u) \cdot \frac{O_{ij}^{(3)}}{\sum_{i,j=1}^7 O_{ij}^{(3)}} \end{aligned} \quad (14)$$

3 仿真分析

这里, 我们将对所研究的水轮发电机调速系统的模糊B样条基函数神经网络控制进行仿真研究。采用单机无穷大系统来进行仿真研究, 仿真中发电机和线路参数为: $H=12, D=0.15, V_f=1.0, E_{q0}'=0.936, \delta_0=46.5^\circ, x_d=0.8258, x_d'=0.1045, x_r=0.0292, x_r'=0.0266, T_w=1.0, T_r=2.0$ 。



(a) 功角



(b) 功角偏差

图4 功角给定值扰动时的动态响应曲线

阶跃响应是比较典型的调控状态, 很能反映控制系统的调控性能和效果。这里的仿真条件为: 在 $t=1.6s$ 时, 功角给定值上扰7的阶跃响应。这里对比分析了几种不同的水轮机调节控制器的性能, 一种是传统的PID控制器(CONVC), 一种是文献[8]中的综合非线性调速器控制器(CNGC), 另外一种为本论文的模糊B样条基函数神经网络控制器(FBFNN)。

图4描述了这3种调速控制器的性能, 由仿真结果可以看出, 模糊B样条基函数神经网络控制器能够在更短的时间内调控到稳定状态, 而且超调量小、振荡次数少、振荡幅度小, 调控性能更佳。

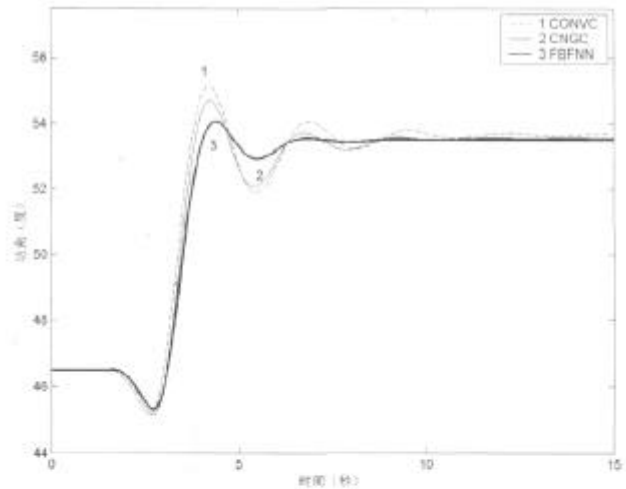
这里还研究了参数 $T_s=3.0$ 时的水轮机调节系统动态响应特性, 其它变量参数不变, 仍然为功角给定值扰动的情况, 对应的仿真结果如图5所示。图5描述了参数值变化后的仿真效果, 各个控制器的效果均有所变化。然而, 与其它控制器相比, 模糊B样条基函数神经网络(FBFNN)的性能仍然更优一些。

4 总结

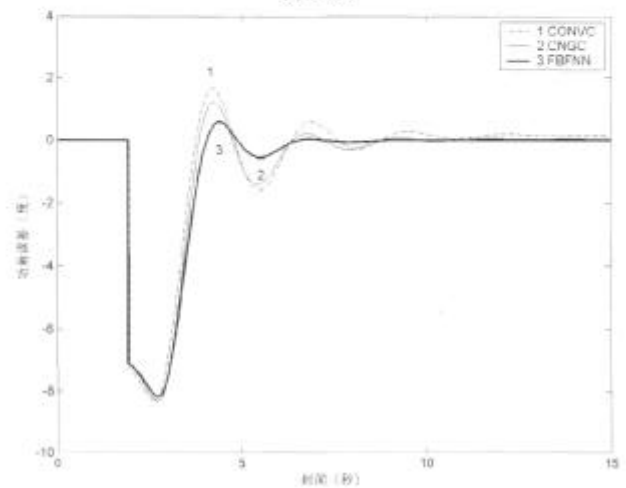
本文针对水轮机调速器控制, 提出了模糊B样条基函数神经网络控制器。该智能控制器是一种模糊逻辑与神经网络控制器的结合, 集中了二者的优点和长处。文章分析了该控制器的结构、具体实现以及学习优化。仿真实验表明该智能控制器的实际效果良好。

参考文献:

[1] 刘乐星,毛宗源.水轮机的GA-PID 控制器研究[J].电力系统自动化,1997,21(12):41-43.



(a) 功角



(b) 功角偏差

图5 功角给定值扰动时的动态响应曲线

[2] Natarajan K. Robust PID controller design for hydroturbines. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(3): 661-667.

[3] Eker Ilyas. Hydro turbine speed control using robust cascade governor controllers. European Transactions on Electrical Power, 2004, 14(5): 293-310.

[4] 桂小阳,梅生伟,刘锋,卢强.水轮机调速系统的非线性自适应控制[J].中国电机工程学报,2006,26(8):66-71.

[5] Lee Fu-Shin, Wang Jhen-Cheng, Chien Chiang-Ju. B-spline network-based iterative learning control for trajectory tracking of a piezoelectric actuator. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(2): 523-538.

[6] Deng Heng, Oruganti Ramesh, Srinivasan Dipti. Neural controller for UPS inverters based on B-spline network. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(2): 899-909.

[7] 商国才. 电力系统自动化[M]. 天津: 天津大学出版社, 1999, 35-46.

[8] 桂小阳,胡伟,刘锋,梅生伟.基于水轮发电机综合非线性模糊型的调速器控制[J].电力系统自动化,2005,29(15):18-22.