

# Application of ANFIS Control for Generating Unit

Dongmin Xi, Linjing Hu

Inner Mongolia University of technology, Hohhot, China, 010080

Email: xadmin1501@sina.com

**Abstract:** Large-scale Generating Unit in heat power plant is a system which is complex, nonlinear, time-variant with long-time delay and difficulty to establish accurate model, and etc. So it is hard to make system gain optimum running effect with conventional control strategy. This article achieves ANFIS control on it, which can repair the limitation said above efficiently. The result of the emulation show the availability of it.

**Keywords:** ANFIS; adaptive network; fuzzy inference system; generating unit

## ANFIS 控制策略在单元机组协调控制中的应用

席东民, 胡琳静

内蒙古工业大学 呼和浩特 中国 010080

Email: xadmin1501@sina.com

**摘要:** 大型火电机组具有控制对象复杂、非线性、大滞后、模型难以建立等特点, 用传统的控制方法很难得到最佳的运行效果。本文在基于自适应网络的模糊推理系统 ANFIS 的基础上, 采用有效控制策略, 弥补上述不足。仿真结果表明了该控制策略的有效性。

**关键词:** ANFIS; 自适应网络; 模糊推理系统; 火电单元机组

### 1 引言

火电厂大型单元机组控制对象具有非线性, 多变量、强耦合、时变、大滞后的特性, 当各种扰动作用时导致控制对象的参数不确定, 模型难以准确建立, 属于复杂难控的大型生产过程。在常规局部控制系统基础上发展起来的协调控制系统是解决这个问题的有效途径。协调控制系统的控制策略的设计直接决定了系统的调试和控制品质。

近几年, 随着神经网络与模糊控制结合的研究, 利用神经网络的学习能力来修改模糊控制规则和隶属函数的基于神经网络的模糊控制器逐渐成为研究的热点, 将它应用于单元机组的调节系统, 期望取得较好效果。

为此, 本文利用基于自适应网络的模糊推理系统 ANFIS 对非线性、大时滞和时变的大型单元机组协调控制系统进行控制, 为大型单元机组协调控制问题的解决提供了一条很好的途径。

### 2 理论研究

基金项目: 内蒙古工业大学科研基金项目 (NO.X200938)

### 2.1 ANFIS 模糊神经网络的结构

基于自适应网络的模糊推理系统 ANFIS (Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System) 是 Takagi-Sugeno 模糊推理系统的神经网络实现<sup>[1-3]</sup>, 它是一个多层前馈神经网络, 如图 1 所示。

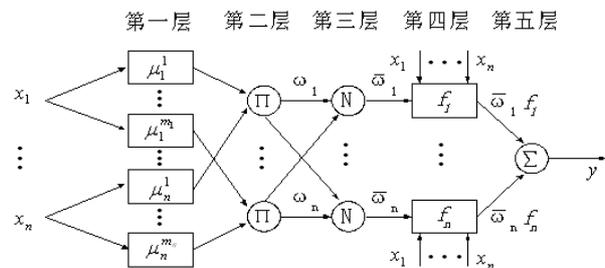


Figure 1. Block diagram of ANFIS  
图 1. ANFIS 结构框图

第一层为模糊化层, 每一个节点代表一个语言变量值, 如 NM, PB 等, 它的作用是计算各输入分量  $x_1, x_2, \dots, x_n$  属于各语言变量值模糊集合 (即模糊子

集)的隶属度,节点函数为:

$$g_i^{(1)} = \mu_i^j(x_i) \quad i=1,2,\dots,n \quad j=1,2,\dots,m_i$$

第二层的节点负责将输入信号相乘,每个节点代表一条模糊规则。这里的“ $\times$ ”可以是任何满足  $T$  范式 ( $T$ -norm) 的  $AND$  算子。这一层的作用是用来匹配模糊规则的前件,计算出每条规则的适用度  $\omega_i$ 。

第三层将所有规则的可信度归一化。

$$\varpi_j = \omega_j / \sum_i \omega_i$$

第四层表示一条规则对应的结果部分,其输出为 Takagi-Sugeno 的规则,其表示如下:

Rule:

IF  $x_1$  is  $A_1^j$  and  $x_2$  is  $A_2^j \dots$  and  $x_n$  is  $A_n^j$ ,  
THEN

$$f_j = p_{j0} + p_{j1}x_1 + \dots + p_{jn}x_n = \sum_{k=0}^n p_{jk}x_k$$

节点输出为:

$$g_j^{(4)} = \varpi_j f_j = \varpi_j (p_{j0} + p_{j1}x_1 + \dots + p_{jn}x_n) = \varpi_j \sum_{k=0}^n p_{jk}x_k$$

其中  $j=1,2,\dots,m$ ,  $m = \prod_{i=1}^n m_i$ ,  $A_i^j$  是  $x_i$  的第  $j$  个语言变量值。

第五层为解模糊层,作用是计算模糊系统输出值,即每条规则输出量的加权平均。节点函数如下:

$$g^{(5)} = \sum_{j=1}^m \varpi_j f_j = \frac{\sum_j \omega_j f_j}{\sum_i \omega_i}$$

## 2.2 学习算法

本文采用多层前馈网络的误差反向传播 (BP-Back propagation) 学习算法,简称 BP 算法。

选定 ANFIS 模糊神经网络中第  $q$  层第  $j$  个节点的输入为:

$$f^{(q)}(x_1^{(q-1)}, x_2^{(q-1)}, \dots, x_{n_{q-1}}^{(q-1)}; \omega_{j1}^{(q)}, \omega_{j2}^{(q)}, \dots, \omega_{jn_{q-1}}^{(q)}),$$

节点的输出为:

$$= x_j^{(q)} = g^{(q)}(f^{(q)})$$

对于其神经元节点,有:

$$f^{(q)} = \sum_{i=1}^{n_{q-1}} \omega_{ji}^{(q)} x_i^{(q-1)}$$

$$x_j^{(q)} = g^{(q)}(f^{(q)}) = \frac{1}{1 + e^{-f^{(q)}}}$$

设取误差代价函数为

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^r (y_{di} - y_i)^2$$

其中  $y_{di}$  和  $y_i$  分别表示期望输出和实际输出,  $r$  意义同上,对于 MISO 系统  $r=1$ 。为具有普遍性,下面给出的学习算法是针对 MIMO 系统的。首先是对参数  $p_{ji}^k$  的学习。

$$\frac{\partial E}{\partial p_{ij}^k} = \frac{\partial E}{\partial y_k} \frac{\partial y_k}{\partial f_{kj}} \frac{\partial f_{kj}}{\partial p_{ij}^k} = -(y_{dk} - y_k) \varpi_j x_i$$

$$p_{ji}^k(l+1) = p_{ji}^k(l) - \beta \frac{\partial E}{\partial p_{ij}^k} = p_{ji}^k(l) + \beta (y_{dk} - y_k) \varpi_j x_i$$

$$j=1,2,\dots,m; i=0,1,2,\dots,n, k=1,2,\dots,r$$

讨论  $c_{ij}$  及  $\sigma_{ij}$  的学习问题时,可将参数  $p_{ji}^k$  固定。首先计算

$$\delta_i^{(5)} = -\frac{\partial E}{\partial f_i^{(5)}} = -\frac{\partial E}{\partial y_i} = y_{di} - y_i \quad i=0,1,2,\dots,n$$

进而求得

$$\frac{\partial E}{\partial p_{jk}} = \frac{\partial E}{\partial f_i^{(5)}} \frac{\partial f_i^{(5)}}{\partial p_{jk}} = -\delta_i^{(5)} x_j^{(4)} = -(y_{di} - y_i) \varpi_j$$

再计算

$$\delta_j^{(4)} = \frac{\partial E}{\partial f_j^{(4)}} = -\sum_{i=1}^m \frac{\partial E}{\partial f_i^{(5)}} \frac{\partial f_i^{(5)}}{\partial g_j^{(4)}} \frac{\partial g_j^{(4)}}{\partial f_j^{(4)}} = \sum_{i=1}^r \delta_i^{(5)} p_{ij} \quad j=1,2,\dots,m$$

$$\delta_j^{(3)} = \frac{\partial E}{\partial f_j^{(3)}} = -\sum_{k=1}^m \frac{\partial E}{\partial f_k^{(4)}} \frac{\partial f_k^{(4)}}{\partial g_j^{(3)}} \frac{\partial g_j^{(3)}}{\partial f_j^{(3)}} = \frac{1}{(\sum_{i=1}^m \omega_i)^2} (\delta_j^{(4)} \sum_{i=1}^m \omega_i - \sum_{k=1}^m \delta_k^{(4)} \omega_k)$$

$$\delta_{ij}^{(2)} = \frac{\partial E}{\partial f_{ij}^{(2)}} = -\sum_{k=1}^m \frac{\partial E}{\partial f_k^{(3)}} \frac{\partial f_k^{(3)}}{\partial g_{ij}^{(2)}} \frac{\partial g_{ij}^{(2)}}{\partial f_{ij}^{(2)}} = \sum_{k=1}^m \delta_k^{(3)} S_{ij} e^{-\frac{(x_i - c_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2}}$$

$$j=1,2,\dots,m; i=0,1,2,\dots,n$$

当  $f^{(3)}$  采取小运算时, 则当  $g_{ij}^{(2)} = \mu_i^j$  是第  $k$  个规则节点输入的最小值时

$$S_{ij} = \frac{\partial f_k^{(3)}}{\partial g_{ij}^{(2)}} = \frac{f_k^{(3)}}{\partial \mu_i^j} = 1$$

否则

$$S_{ij} = \frac{\partial f_k^{(3)}}{\partial g_{ij}^{(2)}} = \frac{f_k^{(3)}}{\partial \mu_i^j} = 0$$

当  $f^{(3)}$  采用相乘运算时, 则当  $g_{ij}^{(2)} = \mu_i^j$  是第  $k$  个规则节点的一个输入时

$$S_{ij} = \frac{\partial f_k^{(3)}}{\partial g_{ij}^{(2)}} = \frac{f_k^{(3)}}{\partial \mu_i^j} = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \mu_i^j$$

否则

$$S_{ij} = \frac{\partial f_k^{(3)}}{\partial g_{ij}^{(2)}} = \frac{f_k^{(3)}}{\partial \mu_i^j} = 0$$

从而可以求得一阶梯度为:

$$\frac{\partial E}{\partial c_{ij}} = -\delta_{ij}^{(2)} \frac{2(x_i - c_{ij})}{\sigma_{ij}^2}$$

$$\frac{\partial E}{\partial \sigma_{ij}} = -\delta_{ij}^{(2)} \frac{2(x_i - c_{ij})^2}{\sigma_{ij}^3}$$

最后可得到参数  $c_{ij}, \sigma_{ij}$  调整的学习算法:

$$c_{ij}(k+1) = c_{ij}(k) - \beta \frac{\partial E}{\partial c_{ij}}$$

$$\sigma_{ij}(k+1) = \sigma_{ij}(k) - \beta \frac{\partial E}{\partial \sigma_{ij}}$$

其中  $\beta > 0$  为学习率,

$$j = 1, 2, \dots, m_i; i = 0, 1, 2, \dots, n$$

### 3 ANFIS 的构造

基于上述 ANFIS 的结构, 其构造的主要内容是输入输出量论域的确定和模糊空间的划分。按照单元机组的简化模型, ANFIS 控制器输入量是主蒸汽压力  $P_T$  和实发功率  $N_E$  与相应定值的偏差  $E_1, E_2$  及其变化率  $CE_1, CE_2$ , 输出量为汽机调门开度  $\mu_T$  和给煤量  $\mu_B$ 。

按照一般工业过程模糊控制惯例和单元机组特点,  $P_T, N_E, \mu_T, \mu_B$  的论域均定义为  $[-6, 6]$ , 模糊子集的划分为  $\{PB, PM, PS, ZE, NS, NM, NB\} = \{“正大”, “正中”, “正小”, “零”, “负小”, “负中”, “负大”\}$ , 隶属度函数取铃形函数, 各中心值分别为  $\{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\}$ 。两个输入量偏差的变化率  $CE_1, CE_2$  的论域定义为  $[-4, 4]$ , 模糊子集的划分为  $\{PB, PS, ZE, NS, NB\} = \{“正大”, “正小”, “零”, “负小”, “负大”\}$ , 隶属度函数取铃形函数, 各中心值分别为  $\{-4, -1, 0, 1, 4\}$ 。

按照以上结构, ANFIS 为四输入两输出系统。为减少系统开销, 按照表格查询方法进行规则提取。通过对训练样本典型数据的操作, 提取实际控制规则 120 条, 规则分类划分如下:

1. 控制器定值作阶跃变化类, 此类规则共计

32 条, 分为汽压定值  $P_0$  和功率定值  $N_0$  分别作阶跃变化, 规则范例如下:

R1: IF  $E_1$  is ZE AND  $E_2$  is PB AND  $CE_1$  is PB

AND  $CE_2$  is NB THEN  $\mu_T$  is PB AND  $\mu_B$  is PB

R2: IF  $E_1$  is PM AND  $E_2$  is PM AND  $CE_1$  is PM

AND  $CE_2$  is NS THEN  $\mu_T$  is PM AND  $\mu_B$  is PM

2. 单元机组输出具有扰动类, 此类规则共计 32

条, 又分为汽压输出  $P_T$  和功率输出  $N_E$  分别作阶跃变化, 规则范例如下:

R1: IF  $E_1$  is PM AND  $E_2$  is PB AND  $CE_1$  is NB

AND  $CE_2$  is PB THEN  $\mu_T$  is NB AND  $\mu_B$  is NB

R2: IF  $E_1$  is PB AND  $E_2$  is PM AND  $CE_1$  is PS

AND  $CE_2$  is ZE THEN  $\mu_T$  is PS AND  $\mu_B$  is NM

3. 机组正常工作类, 此类规则共计 56 条, 主要是针对单元机组正常工作时进行控制指标的小量调节和受到微小扰动情况, 规则范例不再赘述。

通过以上三类模糊控制规则的提取, 有效减少了

ANFIS 的模糊规则数, 简化了 ANFIS 的网络结构, 从而有效地减少了离线训练时间。

### 3 仿真研究

火电厂锅炉、汽机协调控制系统经过合理简化, 可以看作双输入双输出系统。它的两个输入量为: 汽轮机调节阀开度指令  $\mu_T$ , 锅炉燃烧率指令  $\mu_B$ 。两个输出量为: 主蒸汽压力  $P_T$  和机组实发功率  $N_E$ 。某火电厂 300MW 单元机组在 70% 负荷时传递函数分别表示如下:

$$\begin{bmatrix} N_E \\ P_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{NT}(s) & W_{NB}(s) \\ W_{PT}(s) & W_{PB}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_T \\ \mu_B \end{bmatrix}$$

式中:

$$W_{NT}(s) = \frac{33.14s}{764.5s^2 + 107.4s + 1}$$

$$W_{NB}(s) = \frac{1.5028}{14749s^2 + 336.3s + 1}$$

$$W_{PT}(s) = \frac{-4.62s - 0.43}{515s^2 + 120s + 1}$$

$$W_{PB}(s) = \frac{3.84}{10837s^2 + 265s + 1}$$

在研究过程当中, 首先根据单元机组响应特性完成模糊控制规则库, 按照表格查询方法进行规则提取。通过对训练样本典型数据的操作, 提取实际控制规则 120 条, 并根据某火电厂采样数据进行网络训练, 完成 ANFIS 的构造。用 ANFIS 控制策略对其进行计算机仿真试验如下:

在机组实发功率给定值发生阶跃扰动时, 机组实发功率相应速度较快, 主蒸汽压力波动很小, 峰值不到 2%, 锅炉燃烧率指令变化、汽轮机调门指令变化均较小。

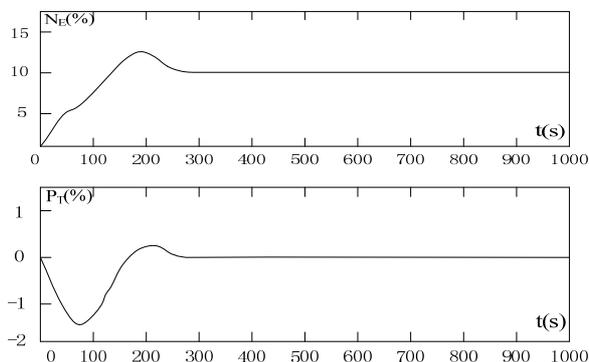


Figure 2. Curve: system result of samulation  
图 2. 系统仿真结果曲线

### 4 结论

本文针对大型单元机组协调控制运行中普遍存在的问题, 提出了一种新型的协调控制系统的设计方法, 即采用 ANFIS 的控制策略, 该算法能有效的简化控制规则, 快速完成网络训练, 并能够完成对单元机组的有效控制。仿真结果表明, 该方法能保证功率、主蒸汽压力快速平稳地跟踪其设定值且具有较好的抗干扰性能。

### References (参考文献)

- [1] SUN Zengqi, ZHANG Zhaixing, DONG Zhidong. Intelligent Control Theory and Technology [M] Beijing: Tsinghua University Press  
孙增圻, 张再兴, 邓志东. 智能控制理论与技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [2] Jang, J.-S.R. Adaptive Net-Based Fuzzy Inference System[J]. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, 1993, 23(3): 665-685.
- [3] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control[J]. IEEE Transaction 1985 SMC1:116-132.
- [4] ZHU Jing Fuzzy Control Theory and Application [M] Beijing: Machine Industry Press, 1995.  
诸静. 模糊控制原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.