

# 基于模糊综合评判的电力变压器运行状态评估模型

廖瑞金<sup>1</sup>, 王 谦<sup>1,2</sup>, 骆思佳<sup>1</sup>, 廖玉祥<sup>1,2</sup>, 孙才新<sup>1</sup>

(1. 重庆大学高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆市 400044;

2. 重庆市电力公司, 重庆市 400014)

**摘要:** 研究了结合模糊理论对变压器运行状态进行模糊评价的多级评估方法。首先, 以预防性试验为基础, 综合考虑工作环境、运行资料、检修记录和附件情况, 建立层次型评估指标体系。引入了相对劣化度来表征变压器实际状态向故障转化的相对劣化程度; 以相对劣化度为输入, 搭建神经网络确定了色谱状态量的隶属函数; 利用模糊统计试验法和模糊分布法分别建立了定性指标和其余定量指标相对劣化度的隶属函数。在此基础上, 基于模糊综合评判思想建立电力变压器运行状态评估模型, 分别对各层评判因素进行了评估, 并综合得出变压器的运行状态。经实例分析表明, 基于模糊综合评判的电力变压器运行状态评估方法是合理和有效的。

**关键词:** 电力变压器; 状态评估; 模糊综合评判

**中图分类号:** TM41; TM73

## 0 引言

长期以来, 对变压器运行状况的判断都是通过停电预防性试验和定期检修来实现的, 且较多集中在对电气或机械方面的具体参量进行检测和一些宏观的基于单一或少量参量的状态分析<sup>[1-2]</sup>。目前, 国内外研究较多的是通过油色谱分析<sup>[3]</sup>、神经网络<sup>[4]</sup>、专家系统<sup>[5]</sup>、模糊理论<sup>[6]</sup>等寻找故障状态的信息, 即故障诊断。对变压器运行中的状态评估需要根据预防性试验、运行工况、检修记录等纵向和横向的状态信息, 采用各种方法综合多种状态参量对变压器的健康状态做出评价。一些学者引入了证据理论、神经网络、模糊理论等方法对评估模型进行了研究<sup>[7-10]</sup>, 但研究工作如对指标的选取并未深入, 模型的条件概率、初始评分主观性较大, 应用模糊处理技术对关键的隶属度获得缺乏足够证据。

本文在分析变压器状态参量的基础上, 建立了综合大量因素的评估指标体系; 以多级模糊综合评判为基础, 结合神经网络, 构造了变压器运行状态的多层次模糊综合评价模型, 以实现变压器运行状态的定量评估。

## 1 运行状态评判因素的选取

为了尽量使评估指标全面、真实反映变压器的运行状态, 考虑到变压器状态评估的可操作性, 从电气试验、油中溶解气体、绝缘油特性、环境因素、运行

历史、检修记录和附件情况 7 个方面选择状态参量, 建立层次型的变压器状态评判指标体系, 见图 1。

## 2 运行状态模糊综合评判模型的建立

考虑到变压器各种评估因素对结果影响的模糊性, 采用多级模糊综合评判法建立变压器状态评判模型。

### 1) 建立评判对象的因素集

把选定的状态参量作为评判因素, 建立电力变压器运行状态因素分析图(见图 1)。图中为层次型(4 层次)的指标体系, 目标层变压器综合状态可分解成项目层中的 4 个评判项目:  $U_X = (U_{X_1}, U_{X_2}, U_{X_3}, U_{X_4})$ , 然后再继续分解, 把各项目分解为下一级子项目, 子项目分解为最后一级的指标, 如没有子项目层则直接把项目分解为指标。如电气试验项目可分解为 2 个子项目:  $U_{X_1} = (U_{X_{11}}, U_{X_{12}})$ , 其中, 绝缘性能参量子项目分解为 4 个指标:  $U_{X_{11}} = (U_{X_{111}}, U_{X_{112}}, U_{X_{113}}, U_{X_{114}})$ 。

### 2) 建立评语集

将变压器的运行状态划分为“良好”、“一般”、“注意”、“严重”4 种情况, 即评语集为:  $V = \{\text{良好}, \text{一般}, \text{注意}, \text{严重}\} = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ 。

### 3) 建立各层次模糊评判矩阵

设用某子项目下的第  $i$  个指标  $u_i$  对变压器进行评估, 对评语集中的状态  $v_i$  的隶属度为  $r_{ij}$  ( $j = 1, 2, 3, 4$ ), 则可用隶属度集  $R_i = \{r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4}\}$  表示按指标  $u_i$  评估的结果。于是, 该子项目下的所有指标就构成了其模糊评判矩阵。

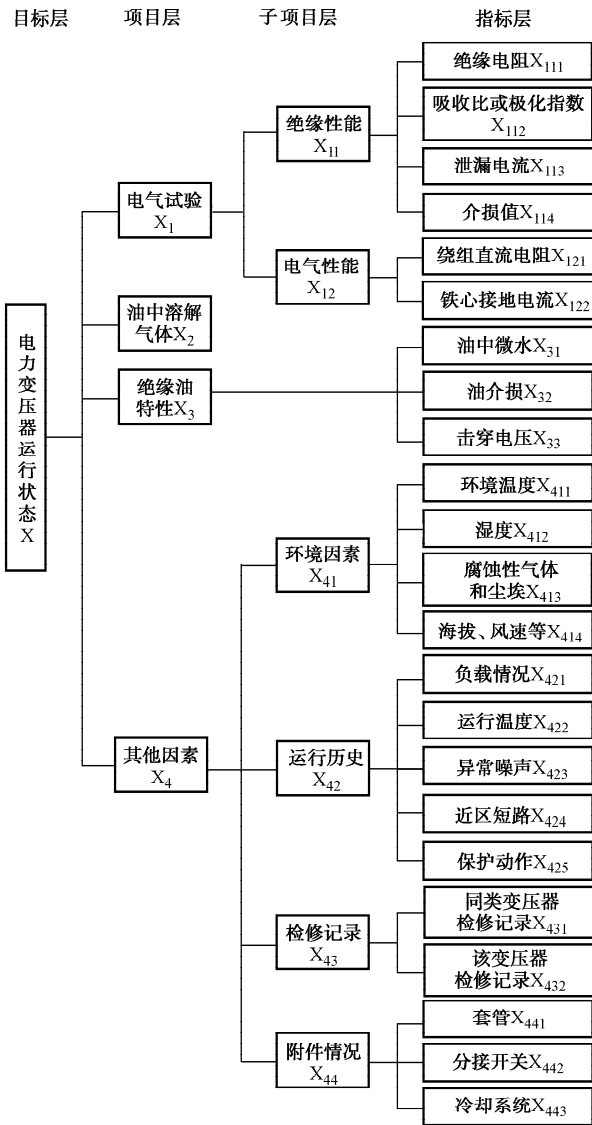


图 1 状态评判指标体系

Fig. 1 Condition evaluation indices system

以绝缘性能参量子项目  $X_{11}$  为例,绝缘性能参量的评判矩阵为:

$$R_{X_{11}} = \begin{bmatrix} R_{X_{111}} \\ R_{X_{112}} \\ R_{X_{113}} \\ R_{X_{114}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \end{bmatrix}$$

同理,通过对指标层的模糊评判可以得到上一层(子项目层)的评判矩阵  $R_{j \times 4}$  ( $j$  是子项目层的项目数),对子项目层所有项目的模糊评判结果又构成了项目层的评判矩阵,最后可得到所有项目层的模糊评判矩阵  $R_{k \times 4}$  ( $k$  是项目层的项目数),如对电气试验项目其评判矩阵为:

$$R_{X_1} = \begin{bmatrix} R_{X_{11}} \\ R_{X_{12}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} & w_{14} \\ w_{21} & w_{22} & w_{23} & w_{24} \end{bmatrix}$$

4)确定各级评判因素的权重

建立指标体系后,需根据层次间、指标间的相对重要性赋予相应的权重。层次分析法(AHP)建立在专家咨询基础上,将复杂系统中各种指标划分为相互联系的有序层次,把多层次、多指标的权重赋值简化为各指标重要性的两两比较,然后进行数学处理,对各层次、各指标赋值,具有可信、灵活和实用的特点。考虑到变压器状态评估尚处在研究的起步阶段,获得大量有明确评估结论的样本存在很大困难,还需借助专家经验,且评估指标体系是分层次的多指标结构,本文采用 AHP 对各指标赋予权重。

邀请 5 位专家按 AHP 要求给出指标间两两比较的相对重要性,数据见表 1(E1~E5 分别表示 5 位专家, $X_1$  等为指标代表符号,具体见图 1)。

表 1 专家对各指标的权重分配表  
Table 1 Weights of every index assigned by experts

| 专家<br>编号 | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$         | $X_{11}$ | $X_{12}$ | $X_{31}$ | $X_{32}$ | $X_{33}$ | $X_{41}$ | $X_{42}$ |
|----------|-------|-------|-------|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| E1       | 1     | 1     | 1     | $\frac{1}{3}$ | 2        | 1        | 3        | 2        | 1        | 1        | 3        |
| E2       | 1     | 1     | 1     | $\frac{1}{4}$ | 1        | 1        | 3        | 3        | 1        | 1        | 3        |
| E3       | 1     | 2     | 1     | $\frac{1}{3}$ | 2        | 1        | 3        | 3        | 1        | 1        | 3        |
| E4       | 1     | 1     | 1     | $\frac{1}{3}$ | 3        | 1        | 3        | 2        | 1        | 1        | 3        |
| E5       | 1     | 2     | 2     | $\frac{1}{4}$ | 1        | 1        | 3        | 3        | 1        | 1        | 2        |

| 专家<br>编号 | $X_{43}$ | $X_{44}$ | $X_{111}$ | $X_{112}$ | $X_{113}$ | $X_{114}$ | $X_{121}$ | $X_{122}$ | $X_{411}$ | $X_{412}$ | $X_{413}$ |
|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| E1       | 2        | 3        | 1         | 1         | 2         | 3         | 1         | 1         | 1         | 1         | 5         |
| E2       | 2        | 5        | 1         | 2         | 3         | 2         | 1         | 1         | 1         | 2         | 4         |
| E3       | 2        | 4        | 1         | 1         | 2         | 2         | 1         | 1         | 1         | 1         | 4         |
| E4       | 2        | 5        | 1         | 2         | 3         | 5         | 1         | 1         | 1         | 1         | 5         |
| E5       | 1        | 4        | 1         | 1         | 2         | 3         | 1         | 1         | 1         | 2         | 3         |

| 专家<br>编号 | $X_{414}$     | $X_{421}$ | $X_{422}$ | $X_{423}$     | $X_{424}$ | $X_{425}$ | $X_{431}$ | $X_{432}$ | $X_{441}$ | $X_{442}$ | $X_{443}$ |
|----------|---------------|-----------|-----------|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| E1       | $\frac{1}{2}$ | 1         | 4         | $\frac{1}{4}$ | 3         | 2         | 1         | 2         | 2         | 3         | 1         |
| E2       | 1             | 1         | 1         | $\frac{1}{4}$ | 2         | 2         | 1         | 1         | 2         | 1         | 1         |
| E3       | $\frac{1}{3}$ | 1         | 3         | $\frac{1}{4}$ | 2         | 1         | 1         | 2         | 1         | 2         | 2         |
| E4       | 1             | 1         | 3         | $\frac{1}{5}$ | 3         | 2         | 1         | 1         | 2         | 3         | 1         |
| E5       | $\frac{1}{2}$ | 1         | 5         | $\frac{1}{3}$ | 3         | 3         | 1         | 1         | 1         | 2         | 1         |

用这些数据计算权重,传统的方法是构建评判矩阵,求出矩阵的最大特征值及其对应的特征向量,

此向量即为指标权重。但在实际中,评判矩阵的构建仅凭大致的估计来调整,带有随意性,常需多次调整才能满足一致性检验。可采用改进方法,通过计算最优传递矩阵,使其自然满足一致性要求,直接求出各评判因素的相对权重,计算结果见表 2,具体计算过程见文献[11]。

表 2 评估指标的权重  
Table 2 Weights table of every index

| 指标              | 下层子指标的权重                           | 指标              | 下层子指标的权重                                    |
|-----------------|------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------|
| X               | 0.270 3, 0.335, 0.285 7, 0.109     | X <sub>12</sub> | 0.5, 0.5                                    |
| X <sub>1</sub>  | 0.621 7, 0.378 3                   | X <sub>41</sub> | 0.169 4, 0.206 6, 0.276 2, 0.386 1          |
| X <sub>3</sub>  | 0.420 6, 0.370 3, 0.209 1          | X <sub>42</sub> | 0.123 3, 0.345 9, 0.043 8, 0.267 8, 0.219 1 |
| X <sub>4</sub>  | 0.103 8, 0.287 1, 0.180 7, 0.428 5 | X <sub>43</sub> | 0.472 5, 0.527 7                            |
| X <sub>11</sub> | 0.155, 0.182 6, 0.276 2, 0.386 1   | X <sub>44</sub> | 0.321 7, 0.434 6, 0.243 8                   |

5)模糊算子和评判指标处理  
模糊综合评判表达式为 $B=A\otimes R$ ,其中 $\otimes$ 是广义模糊算子,其选择方式很多,本文选择加权平均型的综合评判,用 $M(+,\cdot)$ 表示,即 $b_j=\sum_{i=1}^ma_ir_{ij}$  ( $j=1,2,\cdots,n$ )。使用这种算法既考虑了主要因素对变压器状态的影响,又保留了单个因素的全部信息,较符合实际情况。

经过模糊综合评判得到评估值 $b_j$  ( $j=1,2,3,4$ )后,必须对评估结果进行处理,以得到最终的评判结果。可采用最大隶属度法,取与最大评估值 $b_{\max}=\max\{b_j|j=1,2,3,4\}$ 相对应的评判集元素 $v_k$ 作为评估结果;也可采用模糊分布法,直接把 $b_j$ 看做评判结果,以使评价者对待评估变压器状态有一个全面的了解。

从模糊综合评判模型建立的过程中容易发现,指标层中指标的隶属函数(或隶属度)与各层评判因素的权重的确定是评判的关键,它们直接决定着评判结论的合理性与准确性。下面主要对指标层中评判因素的隶属函数确定方法进行探讨。

3 指标层隶属函数及隶属度的确定

3.1 相对劣化度

引入相对劣化度<sup>[12]</sup>的概念来表征变压器当前实际状态与故障状态相比的相对劣化的程度,它是一个定量指标,取值范围为 $[0,1]$ 。根据不同取值反映指标状态劣化的程度。

对越小越优型指标如介损等,计算如下:  
$$l_i=\left(\frac{C_i-C_0}{C_{\max}-C_0}\right)^k$$
 (1)  
对越大越优型指标如吸收比等,计算如下:

$$l_i=\left(\frac{C_i-C_{\min}}{C_0-C_{\min}}\right)^k$$
 (2)

式中: $l_i$ 为第 $i$ 个状态指标的相对劣化度; $C_0$ 为该指标允许值(良好值); $C_{\max}$ 或 $C_{\min}$ 为该指标极限值,其值的确定参考《电力设备预防性试验规程》和《电力变压器运行规程》; $C_i$ 为指标实测值; $k$ 为参数变化对设备状态的影响程度,文中取为 1。

例如绝缘电阻,根据规程,220 kV 及以下的变压器其绝缘电阻在 20 ℃时不小于 800 MΩ,根据文献[13]和实际经验,绝缘电阻大于 1 600 MΩ 表示变压器状态良好,所以可将相对劣化度函数定义为:

$$f(x)=\frac{x-800}{800}$$
 (3)

式中: $x$ 为实际测量阻值。

3.2 定量指标隶属函数的确定

3.2.1 电气与绝缘油试验指标隶属函数的确定  
对电气与绝缘油试验,各指标的定量数据采用模糊分布法。由于三角形隶属函数形状简单,并且与其他较复杂的隶属函数得出的结果差别较小<sup>[12]</sup>,因此,本文利用三角形和半梯形组合的分布函数,建立各指标对应于不同状态等级的隶属函数,见图 2。

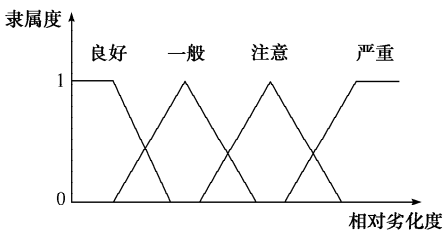


图 2 半梯形和三角形隶属函数分布图  
Fig. 2 Distribution map of half-ladder-shaped and triangular membership function

隶属函数确定的具体方法是:按照相对劣化度的计算式(1)或式(2),对原始数据进行劣化度计算,然后根据有关规程或专家经验,确定图 2 中三角形和半梯形相结合的分函数的相对劣化度对于 4 种状态等级的模糊分界区间,最后建立相对劣化度对于各状态等级的隶属函数。例如,对于绝缘电阻这个评判因素,其对应于状态 $v_1\sim v_4$ 的隶属函数 $\mu(x)$ 可分别确定为:

$$\mu_{v_1}(x)=\begin{cases}1 & x\geqslant 0.8 \\ 5x-3 & 0.6< x< 0.8 \\ 0 & x\leqslant 0.6\end{cases}$$

$$\mu_{v_2}(x) = \begin{cases} 4-5x & 0.6 \leq x < 0.8 \\ 5x-2 & 0.4 < x < 0.6 \\ 0 & x \geq 0.8 \text{ 或 } x \leq 0.4 \end{cases}$$

$$\mu_{v_3}(x) = \begin{cases} 3-5x & 0.4 \leq x < 0.6 \\ 5x-1 & 0.2 < x < 0.4 \\ 0 & x \geq 0.6 \text{ 或 } x \leq 0.2 \end{cases}$$

$$\mu_{v_4}(x) = \begin{cases} 2-5x & 0.2 < x < 0.4 \\ 1 & x \leq 0.2 \\ 0 & x \geq 0.4 \end{cases}$$

式中:  $\mu_{v_i}(x) \sim \mu_{v_j}(x)$  分别表示绝缘电阻相对劣化度为  $x$  时对应于状态  $v_1 \sim v_4$  的隶属函数。

同理,可以得到所有评判因素(指标层)的隶属函数,在此不一一叙述。

### 3.2.2 油中溶解气体指标隶属函数的确定

采用神经网络来处理油中溶解气体指标隶属函数问题。

#### 1) 网络结构的确定

本文采用 3 层 BP 网络。以  $H_2, CH_4, C_2H_2, C_2H_4, C_2H_6$  共 5 种气体为网络的输入特征向量,用相对劣化度作为网络的输出,然后采用图 2 的分布函数来计算劣化度对 4 种状态的隶属度。经训练尝试,隐层数为 9 时网络性能比较好,故网络结构为  $5 \times 9 \times 1$ 。

#### 2) 网络训练及结果

本文采用 186 组有效的变压器油中溶解气体检测记录和相应的实际故障结果(样本),其中 118 个样本用于训练,其余 68 个样本用于检验。考虑到网络训练的收敛性,对油中溶解气体原始数据进行归一化处理,使输入特征量的取值在 0~1 之间。检验结果有 57 个样本判断正确,准确率达到 83.8%,网络性能达到要求。

### 3.3 定性指标隶属度的确定

对环境因素、运行资料、检修记录和附件情况等定性描述的数据采用模糊统计试验法。通过专家调查的形式,即给出评判对象和评价指标根据,制作调查表,分发给各位专家,以此确定各个因素的隶属度,从而得到单因素评判矩阵,表达式为:

$$\text{隶属度} = \frac{\text{认为因素 } i \text{ 属于第 } j \text{ 评语的人数}}{\text{参加评定的专家总人数}} \quad (4)$$

## 4 实例分析

某变压器型号为 SFSZ9-31500/110,运行中试验记录:油中气体体积比:  $H_2$  为  $166 \mu\text{L/L}$ ,  $CH_4$  为  $28 \mu\text{L/L}$ ,  $C_2H_4$  为  $11.3 \mu\text{L/L}$ ,  $C_2H_6$  为  $9 \mu\text{L/L}$ ,  $C_2H_2$  为 0,总烃为  $47.9 \mu\text{L/L}$ ;油中微水质量比为  $21 \text{ mg/L}$ ,油介损为 2.75%,油击穿电压为

50.1 kV;在  $32^\circ\text{C}$  时加压 15 s 和 60 s 时测得的绝缘电阻分别为  $R_{15''}=780 \text{ M}\Omega$  和  $R_{60''}=1100 \text{ M}\Omega$ ,泄漏电流为  $32 \mu\text{A}$ ,吸收比为 1.41,  $\tan \delta=0.341\%$ ,绕组直流电阻不平衡系数为 1.19%,铁心接地电流为 37.4 mA。

首先,按照上文介绍的隶属函数确定的方法,分别确定图 1 中各评判因素对应于 4 种状态的隶属函数,再以实际参数代入隶属函数,分别求得各因素相应的隶属度,即可得到评判矩阵。例如,对于绝缘电阻,将  $R_{60''}$  由  $32^\circ\text{C}$  时折算到  $20^\circ\text{C}$  后为  $1789.4 \text{ M}\Omega$ ,大于良好值  $1600 \text{ M}\Omega$ ,可直接认为其相对劣化度为 1,代入隶属函数公式计算得到绝缘电阻的模糊评判结果,  $R_{X_{11}}=[1 \ 0 \ 0 \ 0]$ ,其他类似。

#### 1) 电气试验评判矩阵

$$R_{X_{11}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.440 & 0.633 & 0 \\ 0 & 0.700 & 0.275 & 0 \\ 0 & 0.256 & 0.742 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{X_{12}} = \begin{bmatrix} 0 & 0.025 & 0.975 & 0 \\ 0 & 0.820 & 0.175 & 0 \end{bmatrix}$$

结合权重分配,可求得:

$$B_{X_1} = A_{X_1} \circ R_{X_1} = [0.0964, 0.3914, 0.5144, 0]$$

#### 2) 油中气体状态量评判矩阵

神经网络对色谱状态量评估,可得:

$$R_{X_2} = [0.2977, 0.6965, 0.3163, 0]$$

#### 3) 绝缘油特性评判矩阵

$$R_{X_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0.4 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0.468 & 0.532 & 0 \\ 0.2 & 0.8 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

结合权重分配,可得:

$$B_{X_3} = A_{X_3} \circ R_{X_3} = [0.0418, 0.4461, 0.5121, 0]$$

#### 4) 其他因素中的几个评判矩阵

根据统计调查表,用模糊统计试验方法得到其他因素的评判矩阵如下:

$$R_{X_{41}} = \begin{bmatrix} 0.15 & 0.6 & 0.25 & 0 \\ 0.1 & 0.65 & 0.25 & 0 \\ 0.3 & 0.6 & 0.1 & 0 \\ 0.4 & 0.5 & 0.1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{X_{42}} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.60 & 0.20 & 0 \\ 0.15 & 0.7 & 0.15 & 0 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 \\ 0.1 & 0.5 & 0.4 & 0 \\ 0.1 & 0.65 & 0.25 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{X_{43}} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.5 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0.4 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{X_{44}} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.65 & 0.25 & 0 \\ 0.2 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.7 & 0.1 & 0 \end{bmatrix}$$

所以：

$$B_{X_4} = A_{X_4} \circ R_{X_4} = A_{X_4} \circ \begin{bmatrix} A_{X_{41}} \circ R_{X_{41}} \\ A_{X_{42}} \circ R_{X_{42}} \\ A_{X_{43}} \circ R_{X_{43}} \\ A_{X_{44}} \circ R_{X_{44}} \end{bmatrix} = [0.164\ 0, 0.662\ 8, 0.177\ 2, 0]$$

综合以上结果,得到状态评判矩阵:

$$R_X = \begin{bmatrix} 0.082\ 7 & 0.404\ 6 & 0.514\ 0 & 0 \\ 0.297\ 7 & 0.696\ 5 & 0.316\ 3 & 0 \\ 0.039\ 2 & 0.501\ 7 & 0.459\ 1 & 0 \\ 0.149\ 0 & 0.653\ 2 & 0.197\ 9 & 0 \end{bmatrix}$$

结合权重分配,可得:

$$B_X = A_X \cdot R_X = [0.155\ 6, 0.538\ 8, 0.410\ 6, 0]$$

从评判结果可以看出,状态“一般”的隶属度最大,但与“注意”的隶属度相差不大,若用最大隶属度原则判断变压器总体处于“一般”状态有些勉强,损失的状态信息较多,这种情况下可用模糊分布法判断。从整体性能的隶属度看,“一般”与“注意”的隶属度分别为 0.538 8 和 0.410 6,而“良好”与“严重”的隶属度分别只有 0.155 6 和 0,由此推断,变压器的状态大致处于“一般”与“注意”之间。从实际数据中不难发现,预防性试验中部分数据已偏离出厂值或最优值,有劣化倾向,但均未接近注意值;而油色谱数据中 H<sub>2</sub> 含量较高,需引起注意。总的来看,变压器整体可靠性在下降,内部存在劣化迹象,需跟踪观察,可继续运行。实际情况是:变压器继续运行了较长时间,在跟踪观察过程中发现试验数据只是稍有下降,H<sub>2</sub> 含量稳定,整体分析属于正常劣化现象。

5 结语

初步实例分析表明,文中所建立的模糊评判模型可对变压器状态作出准确、客观的量化评估,并具有较强的可操作性,可为变压器实施状态检修提供参考依据。当然,本文建立的模型还需更多实例检验。

参考文献

[1] WANG M, VANDERMAAR A J, SRIVASTAVA K D. Review of condition assessment of power transformers in service. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(6): 12-25.

[2] YANG H T, LIAO C C, CHOU J H. Fuzzy learning vector quantization networks for power transformer condition assessment. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(1): 143-149.

[3] 梁小冰,王耀龙,黄萍,等. 基于 DGA 的变压器故障诊断多专家

融合策略. 电力系统自动化, 2005, 29(18): 80-84.

LIANG Xiaobing, WANG Yaolong, HUANG Ping, et al. Synthetic multi-expert in transformer fault diagnosis based on DGA. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(18): 80-84.

[4] 李永丽,顾福海,刘志华,等. 神经网络理论在变压器故障诊断中的应用. 电力系统自动化, 1999, 23(24): 20-22, 27.

LI Yongli, GU Fuhai, LIU Zhihua, et al. The application of neural network in the fault identification of transformer. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(24): 20-22, 27.

[5] 何定,唐国庆,陈珩. 电力变压器故障诊断专家系统 TFDES. 电力系统自动化, 1993, 17(7): 32-35, 43.

HE Ding, TANG Guoqing, CHEN Heng. TFDES, an expert system for power transformer faults diagnosis. Automation of Electric Power Systems, 1993, 17(7): 32-35, 43.

[6] 王平. 基于模糊综合评判的变压器故障模糊诊断法. 电力系统自动化, 1996, 20(12): 30-33.

WANG Ping. Transformer fault fuzzy diagnosis based on the fuzzy synthetic judgement. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(12): 30-33.

[7] TANG W H, SPURGEOR K, WU Q H, et al. An evidential reasoning approach to transformer condition assessments. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(4): 1696-1703.

[8] HAN Y, SONG Y H. Condition monitoring techniques for electrical equipment—a literature survey. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(4): 1214-1223.

[9] 吴立增. 变压器状态评估方法的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2005.

[10] 符杨, 乔飞. 基于智能技术的电力变压器状态综合分析方法. 上海电力学院学报, 2004, 20(3): 1-6.

FU Yang, QIAO Fei. Comprehensive method detecting the status of the transformer based on artificial intelligence. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2004, 20(3): 1-6.

[11] 邹志勇. 工程机械维修现状及对策研究[D]. 西安: 长安大学, 2002.

[12] 卢绪祥, 李录平. 基于模糊综合评判的凝汽器运行状态评价. 汽轮机技术, 2001, 43(5): 301-303.

LU Xuxiang, LI Luping. Estimation for operating state of condenser based on fuzzy synthesis judgement. Turbine Technology, 2001, 43(5): 301-303.

[13] 程志华, 章剑光. 状态检修技术及其辅助分析系统的应用. 电网技术, 2003, 27(7): 16-24.

CHENG Zhihua, ZHANG Jianguang. Application of condition based maintenance technology and its computer aided analysis system. Power System Technology, 2003, 27(7): 16-24.

廖瑞金(1963—),男,教授,博士生导师,主要研究方向: 电气设备绝缘在线监测与故障诊断及高电压测试技术。  
E-mail: lruijin1@vip.sina.com

王 谦(1979—),男,硕士,主要研究方向: 电气设备绝缘在线监测与故障诊断。

骆思佳(1980—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向: 电气设备绝缘在线监测与故障诊断。

## Condition Assessment Model for Power Transformer in Service Based on Fuzzy Synthetic Evaluation

*LIAO Ruijin<sup>1</sup>, WANG Qian<sup>1,2</sup>, LUO Sijia<sup>1</sup>, LIAO Yuxiang<sup>1,2</sup>, SUN Caixin<sup>1</sup>*

(1. Key Laboratory of Ministry of Education on High Voltage Engineering of Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 400014, China)

**Abstract:** A multi-grade fuzzy evaluation method for power transformer using fuzzy theory is proposed. Firstly, a layered evaluation index system on the base of preventive experiments, including working surroundings, operation history, maintenance records, accessories section and so on is built. Then, the relative impairment degree is introduced to describe the relative grade of transformers changing from actual conditions to faults. Taking the relative impairment grade as inputs, a neural network is applied to compute the member function of dissolved gases. The member functions for qualitative indices and the quantitative indices are respectively determined with helps of a fuzzy statistic method and a fuzzy distribution method. An operation condition evaluation model for power transformer, which evaluates the state of every grade and gives a comprehensive assessment of transformer, is established on the base of the fuzzy synthetic judgment. Example analysis shows the condition assessment model proposed is sound and effective.

**Key words:** power transformer; condition assessment; fuzzy synthetic evaluation