

8-20-2020

## Condition assessment of power transformer bussing based on moments estimator and fuzzy evidence combination method

Quan WANG

*College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443000, China*

Junwei YAO

*Yichang Electric Company of State Grid Hubei Electric Power Co ,Ltd,Yichang 443000, China*

Li ZHI

*College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443000, China*

Xinglei YANG

*Yichang Electric Company of State Grid Hubei Electric Power Co ,Ltd,Yichang 443000, China*

Hao FU

*College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443000, China*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

---

### Recommended Citation

WANG, Quan; YAO, Junwei; ZHI, Li; YANG, Xinglei; FU, Hao; and FANG, Cheng (2020) "Condition assessment of power transformer bussing based on moments estimator and fuzzy evidence combination method," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 35: Iss. 1, Article 17.

DOI: 10.19781/j.issn.16739140.2020.01.017

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol35/iss1/17>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

---

# Condition assessment of power transformer bussing based on moments estimator and fuzzy evidence combination method

## Authors

Quan WANG, Junwei YAO, Li ZHI, Xinglei YANG, Hao FU, and Cheng FANG

# 基于矩估计法和模糊—证据融合的 电力变压器套管状态评估

王 泉<sup>1</sup>, 姚俊伟<sup>2</sup>, 智 李<sup>1</sup>, 杨星磊<sup>2</sup>, 付 豪<sup>1</sup>, 方 程<sup>3</sup>

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443000; 2. 国网湖北省电力有限公司宜昌供电公司, 湖北 宜昌 443000;  
3. 国网湖北省电力有限公司远安县供电公司, 湖北 远安 444200)

**摘 要:**基于模糊数学和证据理论,提出了一种变压器套管状态评估模型。该模型以套管试验数据为基础并结合巡检项目,从定性与定量角度构建层次评估指标体系;考虑到目前变压器状态评估中单一赋权方法存在的局限性,引入矩估计法建立主客观权重的最小偏差函数从而得到最优组合赋权。同时针对状态参量的模糊性、不确定性,采用模糊评判法获得原始信度分配并对其修正,最后结合改进融合规则对套管状态等级进行评估。实例验证表明,此评估方法准确有效。

**关 键 词:**矩估计法;模糊评估法;证据合成;电力变压器套管;状态评估

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.01.017 中图分类号:TM41 文章编号:1673-9140(2020)01-0130-07

## Condition assessment of power transformer bussing based on moments estimator and fuzzy evidence combination method

WANG Quan<sup>1</sup>, YAO Junwei<sup>2</sup>, ZHI Li<sup>1</sup>, YANG Xinglei<sup>2</sup>, FU Hao<sup>1</sup>, FANG Cheng<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443000, China;  
2. Yichang Electric Company of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd, Yichang 443000, China;  
3. Yuanan Electric Company of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd, Yuanan 444200, China)

**Abstract:** On the basis of the fuzzy mathematics theory and the evidence theory, an assessment model of bushing condition of transformers is proposed in this paper. Firstly, the hierarchical evaluation index system is constructed from the perspectives of qualitative and quantitative, which is based on experimental data and also considering the inspection tour program. Then, considering the shortages of single weighting in transformer condition assessment, this paper introduces a method to obtain the optimal weight. The subjective and objective factors are combined through solving the minimum deviation optimal function. Meanwhile, for the fuzziness and uncertainty of index information, the original reliability allocation of state variables are calculated and updated by adopting the fuzzy evaluation method. And then the modified evidence sources and combination rules are utilized to evaluate the bushing condition level. Finally, the results of case study show that this method is accurate and effective.

**Key words:** method of moments estimator; fuzzy evaluation method; evidence combination; power transformer bussing; condition assessment

电力变压器套管是将变压器内部高、低压引线引到油箱外部的出线装置,是电力变压器的重要部件之一,其运行状况的好坏对变压器的运行可靠性有很大影响。实际运行中套管长期通过电流,为变压器故障的多发部位,同时套管缺陷导致变压器故障停运甚至烧毁的事件也并不罕见,因此,加强电力变压器套管的状态评估与检修维护,对提高变压器及电力系统运行的安全可靠具有重要意义。

目前国内外学者主要集中于电力变压器的整体状况评估,近年来先后引入了模糊理论、灰色系统、物元分析、集对分析和证据理论等众多评估方法,而对套管状态的评估研究还不多见。文献[1]针对基于核向量空间模型的评估方法做了很好的尝试,但其基于云推理确定指标权重的方法计算量大、所需训练样本也较大;文献[2]利用区间可拓理论处理指标量化过程中带来的误差,用变权替代常权也更反映实际运行状况,但却忽略了状态参量的不充分性且计算过程仍不够系统清晰;文献[3]基于云重心的评估方法较好地将定性问题量化处理,然其指标权重的确定太过主观。

基于以上所述,该文综合未确知有理数和修改的模糊层次分析法确定指标主客观权重,再利用矩估计理论解得最优组合赋权;同时,结合模糊评判和证据融合方法,基于构造的隶属度函数得到各层指标基本概率分配并对其修正;最后利用改进融合规则评估套管运行状态,并以实例分析验证评估模型的有效性。

## 1 套管评估指标体系的建立

根据电网公司状态评价和检修导则,套管的状态参数可分为试验和巡检两大部分,试验包括油色谱试验和电气试验项目,基本巡视检查项目包括套管外绝缘爬距、外观及污秽情况和油位指示状况等。对于电容型套管,其中电气试验项的主/末屏绝缘电阻、介损变化和电容量偏差可以很好地反映套管绝缘受潮和老化情况;通过油中气体指标也能及时发现套管潜伏或初期的绝缘缺陷。因此,结合相关导则及状态参量分析,建立套管评估指标体系如图 1 所示。

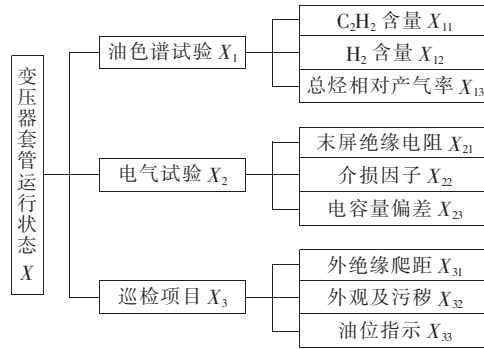


图 1 套管评估指标体系

Figure 1 Power transformer bushing evaluation index system

## 2 评估指标权重的确定

由于各层次指标反映的重要度及可靠度不尽相同,因此指标权重值的确定是否科学合理是影响评估准确性的关键。目前确定指标权重的方法可分为主观赋权法如层次分析法<sup>[4]</sup>、未确知有理数法<sup>[5]</sup>,客观赋权法如灰色关联法、熵值法等<sup>[6]</sup>,其中,主观赋权法依赖专家经验评价权重大小,导致主观性过强;客观赋权法基于原始数据间的联系与变化来确定指标权重,但无法体现决策者的实际经验、知识等主观因素。针对单一赋权方法的局限性,文献[7-8]采用简单的线性加权法,然其加权系数仅凭经验确定,并不合适;文献[9]采用变权模式确定权重,但也存在易忽略指标的不充分性且变权系数取值难以准确衡量的局限性。针对此问题,该文利用矩估计理论建立主客观权重的最小偏差函数,并以其最优解作为主客观权重的最优赋权组合。

### 2.1 主客观权重的计算

在变压器状态评估中,未确知有理数法在很好地保留专家经验的同时能减小人为误差,该文应用文献[5]的未确知有理数法来确定套管指标的主观权重,此处不再赘述;客观权重利用改进的模糊层次分析法来确定,介绍如下。

模糊层次分析法(FAHP)是通过在层次分析法中引入模糊一致矩阵而得到的,但由于该方法在确定模糊判断矩阵时仍存在主观性强的缺陷,当前变压器评估中已较少采用。该文通过利用变压器套管各指标量化得分来构建模糊判断矩阵,有效克服了以往判断矩阵的主观缺陷并能充分反映指标的客观

权重。

根据 FAHP 的分析步骤,首先要建立系统上层级对下级的模糊判断矩阵  $\mathbf{R}$ ,而  $\mathbf{R}$  中的元素一般方法都采用表 1 中的 0.1~0.9 标度法确定。

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{pmatrix} \quad (1)$$

表 1 模糊标度含义

Table 1 Fuzzy measure meaning

标度	含义
0.5	两元素相比,两者同等重要
0.6	两元素相比,前者比后者稍微重要
0.7	两元素相比,前者比后者明显重要
0.8	两元素相比,前者比后者强烈重要
0.9	两元素相比,前者比后者极端重要
0.1~0.4	反比较

由于要突出元素间的客观权重差异,该文结合指标现场数据和相关标准,基于同层次指标量化得分情况,采用模糊判断矩阵元素,即

$$r_{ij} = \frac{G_i}{G_i + G_j} \quad (2)$$

$$G_{i(j)} = 0.15m_{i(j)}(H_1) + 0.35m_{i(j)}(H_2) + 0.6m_{i(j)}(H_3) + 0.8m_{i(j)}(H_4)$$

式中  $i, j = 1, 2, \dots, n; m_{i(j)}$  为基于 3.1 节分布函数得到的指标  $x_i$  或  $x_j$  的隶属度集合,  $G_i, G_j$  分别为同层次指标  $x_i, x_j$  经反模糊化计算的量化值。

对于一致性判断依据,文献[10]证明若模糊判断矩阵  $\mathbf{R}$  中任意元素  $(i, j, k = 1, 2, \dots, n)$  满足:当  $r_{ij} > 0.5$  时,  $r_{ik} > r_{jk}$ ;  $r_{ij} = 0.5$  时,  $r_{ik} = r_{jk}$ ; 当  $r_{ij} < 0.5$ , 有  $r_{ik} < r_{jk}$ , 则表明  $\mathbf{R}$  满足顺序一致性条件,此时仍可直接进行下一步权重计算。事实上,根据式(2)确定的  $r_{ij}$  总是满足顺序一致性条件的。

为重视不同因素间的客观重要性,此处采用分辨率最高的因素分析法求出各因素权重,即

$$\omega_i = \frac{1}{n} - \frac{1}{2\alpha} + \frac{1}{n\alpha} \sum_{k=1}^n r_{ik} \quad (3)$$

$$\alpha \geq \frac{n-1}{2}, i = 1, 2, \dots, n$$

式中  $\alpha$  取值越小,因素权重差异越大,此处参数  $\alpha$  取边界值。

### 2.2 基于矩估计法的最优组合赋权

设综合评价指数为  $m$ , 分别由  $h$  种主观赋权

法和  $g$  种客观赋权法赋权,且其中每一种赋权法确定的权重都满足归一性和非负性。若分别从主、客观权重总体中分别抽取  $h, g$  个样本,则对任一指标  $x_j (1 \leq j \leq m)$  而言,其权重与  $h + g$  个主客观权重偏差最小时为最优,同时考虑主客观权重的重要度不一,还需确定主、客观权重的重要度系数,分别用  $\alpha_j, \beta_j$  表示,即

$$\min H(\omega_j) = \alpha_j \sum_{a=1}^h (\omega_j - \omega_{aj})^2 + \beta_j \sum_{b=1}^g (\omega_j - \omega_{bj})^2 \quad (4)$$

$$\begin{cases} \alpha_j = \frac{E(\omega_{aj})}{E(\omega_{aj}) + E(\omega_{bj})} \\ \beta_j = \frac{E(\omega_{bj})}{E(\omega_{aj}) + E(\omega_{bj})} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $\omega_{aj}, \omega_{bj}$  分别为第  $a$  种  $(a = 1, 2, \dots, h)$  主观赋权法和第  $b$  种  $(b = 1, 2, \dots, g)$  客观赋权法确定的权重;  $E(\omega_{aj}), E(\omega_{bj})$  分别为主客观权重的期望,即第  $j$  个指标主、客观权重的几何平均值。

根据矩估计思想,最终的主、客观权重重要度系数  $\alpha, \beta$  为

$$\alpha = \frac{\sum_{j=1}^m \alpha_j}{m}, \beta = \frac{\sum_{j=1}^m \beta_j}{m} \quad (6)$$

对于每一个评价指标  $x_j$ , 希望其残差平方和  $H(\omega_j)$  越小越好,可得最优组合权重的优化模型:

$$\begin{aligned} & \{\min H = \{H(\omega_1), H(\omega_2), \dots, H(\omega_n)\} = \\ & \alpha \sum_{j=1}^m \sum_{a=1}^h (\omega_j - \omega_{aj})^2 + \\ & \beta \sum_{j=1}^m \sum_{b=1}^g (\omega_j - \omega_{bj})^2 \quad (7) \\ & \text{s. t. } \sum_{j=1}^m \omega_j = 1 \\ & 0 \leq \omega_j \leq 1, 1 \leq j \leq m \end{aligned}$$

通过求解式(7)即可得到综合评价指数的最优组合赋权。

## 3 模糊—证据融合评估模型

### 3.1 套管的模糊评估模型

1) 评估指标隶属函数的确定。

针对评估指标等级界定模糊的特点,该文运用

模糊分布法定义套管评估指标的隶属度函数,以此构建其模糊评估模型。

对于巡视检查项目的定性指标,此处采取在[0, 1]区间的负方向专家评分法,即得分越低指标越优。由于三角形分布简单实用,文中结合半梯形和三角形分布函数来描述指标的等级区间分布,如图 2 所示。关于套管的 6 个试验指标和巡检定性指标,根据国家电网标准汇编和现场统计数据,可将其评定结果划分为  $H_1 \sim H_4$  4 个等级,分别代表正常、注意、异常、严重等 4 种状态,对应的等级边界如表 2 所示。

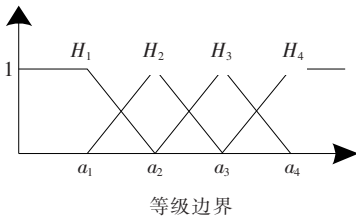


图 2 指标隶属度函数分布

Figure 2 Index membership function distribution

表 2 套管评估指标等级边界

Table 2 Grade boundary of evaluation index in bushing

等级边界 $a$	$X_{11}/(\mu L/L)$	$X_{12}/(\mu L/L)$	$X_{13}/\%$	$X_{21}/M\Omega$	$X_{22}/\%$	$X_{23}/\%$	定性指标
$H_1$	2.0	150	6.5	2 000	0.17	2.8	0.15
$H_2$	3.5	400	10.0	1 000	0.24	4.0	0.35
$H_3$	5.0	600	12.5	900	0.30	5.0	0.60
$H_4$	7.0	700	15.0	700	0.38	7.0	0.80

根据图 2 与表 2,即可分别构造出各个套管评估指标的隶属度函数。

2) 初始基本信度分配的确定。

通过建立的指标隶属度函数  $\mu(x)$ ,可以得出各个指标所属评估等级的隶属度,数学表达式为

$$P_k(H) = \begin{pmatrix} \mu_1(x_{k1}) & \cdots & \mu_4(x_{k1}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_1(x_{kn}) & \cdots & \mu_4(x_{kn}) \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$M_k(H) = \sum_{j=1}^n \omega_{kj} P_k(H) \quad (9)$$

式中  $P_k(H)$  表示因素  $x_k$  所包含全部指标的等级隶属度矩阵,  $\omega_{kj}$  表示指标  $x_{kj}$  的最终权重,  $M_k(H)$  是  $x_k$  的模糊综合评判结果,将作为证据融合模型中第  $k$  个因素的初始基本概率分配。

3.2 证据融合理论

证据理论是一种基于事物不确定性的推理方

法,证据融合是它的核心内容。通过证据融合规则,能有效合成不同方面信息,减小由于模糊性和随机性产生的不确定性因素影响<sup>[11]</sup>。在电力变压器套管的状态评估中,利用证据合成理论对模糊评判结果的不确定因素进行融合,可以得出更为准确的综合评估结果。

证据理论首先定义一个辨识框架  $U$ ,它由一些完备且互斥的元素组成,证据域中的任意命题  $A$  都包含于  $U$  的幂集  $2^U$ 。命题的基本概率分配函数用 mass 表示,它反映对  $A$  的精确信任程度,满足以下映射条件:

$$\begin{cases} m(\varphi) = 0 \\ \sum_{A \subseteq U} m(A) = 1 \end{cases} \quad (10)$$

对于任意  $A$  属于  $U$ ,同一辨识框架  $U$  上的 2 个 mass 函数  $m_1, m_2$ ,其合成规则为

$$m(A) = \begin{cases} 0, A \neq \varphi \\ \frac{\sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i) m_2(B_j)}{1 - K}, A \neq \varphi \end{cases} \quad (11)$$

$$K = \sum_{A_i \cap B_j = \varphi} m_1(A_i) m_2(B_j)$$

式中  $K$  为表示证据之间冲突信息的因子,  $1/(1-K)$  为归一化因子。

从式(11)中可看出,当  $K$  接近或等于 1 时,证据合成结果可能将有悖常理而无法令人满意。针对这种冲突信息处理,目前已有较多研究方案,归纳起来主要为从修改证据源和证据组合规则 2 个方面进行改进,在文献[11]基础上,该文结合 2 种方案的优点,采取在修正冲突证据源的同时改进融合规则的方案。

3.3 证据融合理论的改进

1) 初始证据源的修正分配。

在修改证据合成规则前应先对初始证据源进行预处理。假设  $M_{kj}(H)$  是因素  $x_{kj}$  的初始基本概率分配,考虑到因素间的重要度不尽相同,引入置信度系数  $\alpha_{kj}$  对原始证据进行修正,以减少冲突性证据为证据合成提供的信息量。若指标  $\{x_{k1}, \dots, x_{kn}\}$  的权重分别为  $\{\omega_{k1}, \dots, \omega_{kn}\}$ ,且  $\omega_{km}$  为其中的最大值,则置信度系数  $\alpha_{kj}$  与修正的基本概率分配  $m_{kj}(H)$  为

$$m_{kj}(H) = \alpha_{kj} M_{kj}(H)$$

$$\alpha_{kj} = \omega_{kj} / \omega_{km} \quad (12)$$

2) 证据融合规则的改进。

设辨识框架  $U$  有  $H_1 \sim H_4$  5 个证据命题, 对应  $m_{kj}(H)$  的评语集为  $\{H_1, H_2, H_3, H_4\} = \{\text{正常, 注意, 异常, 严重}\}$ ,  $m_{kj}(U)$  为命题的不确定度, 则定义第  $k$  层指标下焦元  $A_{k1}, A_{k2}$  的基本概率分布函数合成规则为

$$m_{k(2)}(H_j) = \sum_{A_{k1} \cap A_{k2} = H_j} m_{k1}(A_{k1})m_{k2}(A_{k2}) + K'_{k(2)}\lambda_{k(2)}, j = 1, 2, 3, 4 \quad (13)$$

$$m_{k(2)}(U) = 1 - \sum_{j=1}^4 m_{k(2)}(H_j) = m_{k1}(U)m_{k2}(U) + K'_{k(2)}\lambda_{k(2)} \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{aligned} K'_{k(2)} &= \sum_{\cap H_j = \varphi} \prod_{1 \leq i \leq 2} m_{ki}(H_j) \\ \lambda_{k(2)} &= \sum_{j=1}^2 \omega_{kj} m_{kj}(H_j) \end{aligned} \right. \quad (15)$$

式中  $m_{k(2)}(H_j)$  为第  $k$  层指标两两融合后的概率分布函数,  $K'$  为修正后的冲突因子,  $\lambda_k$  为不确定集的冲突分配比例。

根据以上合成规则, 在对底层指标的初始概率分配修正后, 结合最终权重自下而上融合后最终可得到目标层关于评语集的基本概率分配, 从而确定套管状态等级。

### 4 实例分析

对湖北某地区某台 120 MVA、220 KV 电力变压器套管进行状态评估, 其 A 相套管的连续 3 组试验数据如表 3 所示。

表 3 套管评估指标数据

Table 3 Power transformer bushing evaluation index data

套管 样本	$X_{11}/$ ( $\mu\text{L/L}$ )	$X_{12}/$ ( $\mu\text{L/L}$ )	$X_{13}/$ %	$X_{21}/$ M $\Omega$	$X_{22}/$ %	$X_{23}/$ %	$X_{31}, X_{32},$ $X_{33}$
样本 1	—	—	—	3 000	0.21	1.2	0.15, 0.15, 0.15
样本 2	3.2	208.8	10.5	3 000	0.26	4.2	0.15, 0.3, 0.15
样本 3	3.8	347	13.65	3 000	0.324	6.7	0.15, 0.3, 0.15

电力变压器套管评估流程为:

① 应用 3.1 节模糊评估法的式(8)~(9)分别

求出套管中间层指标下各单项状态量的等级隶属度分布, 作为证据源的初始概率分配;

② 通过式(1)~(3)依次求得各指标的主客观权重, 再利用式(4)~(7)的矩估计法解得全部指标的最优组合赋权;

③ 基于改进证据融合规则, 利用式(12)修正基本概率分配, 再通过式(13)~(15)自下而上依次对同层次指标两两融合可得到套管的最终状态概率分配。

1) 对于样本 1, 由于此时该套管的电气试验数据对照操作规程规定值表现正常, 检修人员未对其安排进行取油化验试验, 之后的现场情况表明套管运行正常。对样本 1 进行评估。

首先由步骤①~③可得套管电气试验项状态量的主观权重  $W_{2a} = (0.192, 0.460, 0.348)$ , 客观权重  $W_{2b} = (0.2874, 0.4251, 0.2874)$ , 从而解得最优权重为  $W_2 = (0.241, 0.442, 0.317)$ , 最小偏差 0.0035, 得到的修正后基本概率分配为

$$m_2(H) = \begin{pmatrix} 0.545 & 0 & 0 & 0 & 0.455 \\ 0.429 & 0.571 & 0 & 0 & 0 \\ 0.717 & 0 & 0 & 0 & 0.283 \end{pmatrix}$$

同时定性指标巡视项目  $X_3$  无扣分情况, 重复步骤②、③ 2 次融合后得到套管最终状态概率分配  $m(H)$  为

$$m(H) = (0.9664, 0.0336, 0, 0, 0)$$

此时, 按照最大信度原则评估结果为  $H_1$  “正常”, 不确定度  $m(U) = 0$ , 由此可判断该套管运行状态正常, 显然与实际结果相符。

2) 对于样本 2, 根据步骤①~③可得到目标层下  $X_1, X_2, X_3$  3 个指标量的指标权重  $W$ 、置信度系数  $a$  和修正后的基本概率分配  $m_k(H)$  ( $k = 1, 2, 3$ ), 分别如表 4、5 所示。

通过表 4、5, 重复步骤③可得套管运行状态最终概率分配为

$$m(H) = (0.1238, 0.6292, 0.0640, 0, 0.1830)$$

从中可知该变压器电气试验和油中气体部分均为注意状态, 巡检部分正常, 套管整体运行状态属于等级  $H_2$  “注意”状态。分析试验数据发现, 电容量与介损比以前已明显有所增大, 总烃相对产气率已达到规程注意值。在状态评估后, 运维人员加强了套管油中气体部分监视, 而实际上套管仍保持了很长一段时间的正常运行。

表 4 各指标权重及其置信度系数

**Table 4** Index weight and its confidence coefficient

评估指标	主观权重	客观权重	最终权重	置信度系数
$X$	$W_a$	$W_b$	$W$	$\alpha$
$X_{11}$	0.567	0.350	0.449	1.000
$X_{12}$	0.107	0.239	0.179	0.399
$X_{13}$	0.326	0.411	0.372	0.829
$X_{21}$	0.192	0.177	0.184	0.417
$X_{22}$	0.460	0.421	0.441	1.000
$X_{23}$	0.348	0.402	0.375	0.850
$X_{31}$	0.424	0.278	0.282	0.659
$X_{32}$	0.302	0.444	0.428	1.000
$X_{33}$	0.274	0.278	0.289	0.675
$X_1$	0.424	0.356	0.390	1.000
$X_2$	0.302	0.389	0.345	0.885
$X_3$	0.274	0.255	0.265	0.679

表 5 各指标基本概率分配

**Table 5** Basic probability assignment of each index

指标 $X$	基本概率分配 $m_k(H)$	
	$(H_1, H_2, H_3, H_4)$	不确定度 $U$
$X_{11}$	(0.198 6, 0.801 4, 0, 0)	0
$X_{12}$	(0.304 9, 0.093 8, 0, 0)	0.601 3
$X_{13}$	(0, 0.662 8, 0.165 7, 0)	0.171 5
$X_{21}$	(0.417 2, 0, 0, 0)	0.582 8
$X_{22}$	(0, 0.666 6, 0.333 4, 0)	0
$X_{23}$	(0, 0.680 3, 0.170 1, 0)	0.149 7
$X_1$	(0.093 2, 0.766 5, 0.061 7, 0)	0.078 7
$X_2$	(0.011 6, 0.698 6, 0.207 3, 0)	0.082 5
$X_3$	(0.593 6, 0.248 3, 0, 0)	0.158 0

3)在样本 3 中,同样重复以上步骤,可得到油色谱与电气试验部分的最优权重值分别为  $W_1=(0.428, 0.183, 0.389)$ 、 $W_2=(0.156, 0.444, 0.401)$ ,中间层最优权重值  $W=(0.403, 0.367, 0.231)$ ,最小偏差 0.007;修正后的套管油色谱部分基本概率分配  $m_1(H)=(0.002 5, 0.230 2, 0.500 6, 0.161 5)$ ,不确定度为 0.105 2,电气部分概率分配为  $m_2(H)=(0.005 6, 0, 0.276 7, 0.524 9)$ ,不确定度为 0.192 8,由此可融合得到套管试验部分的基本概率分配为

$$m(H)=(0.003 3, 0.111 4, 0.441 2, 0.335 4, 0.108 7)$$

从试验部分已可看出此时套管的绝缘状态为  $H_3$ “异常”状态且已接近“严重”等级。分析数据发现与上次相比介损和电容量变化均已超过注意值,

且油中气体增长趋势明显,应继续对其状态发展保持密切监视,尽早安排检修工作。实际上在后期的维修过程中,现场人员发现套管的将军帽密封性不严实导致底部螺母与接触面间存在油间隙,从而使介损、电容值和油中析出气体变化明显,这表明评估结果与实际运行情况吻合。

为进一步验证该文所提评估方法的有效性,分别采用文献[2、12-13]的方法对此例 3 个样本进行评估对比,如表 6 所示;同时运用该文方法对某地区变电站另外 3 台不同型号的主变 220 kV 侧套管进行状态评估,结果如表 7 所示。综合表 6、7 可知,变压器套管的评估结果与实际相符,充分表明了该文方法的有效性。

表 6 基于不同评估方法的结果对比

**Table 6** Comparison of results based on different methods

套管样本	物元分析 <sup>[2]</sup>	模糊综合评判 <sup>[12]</sup>	熵权 TOPSIS <sup>[13]</sup>	该文方法
样本 1	正常	正常	正常	正常
样本 2	注意	注意	注意	注意
样本 3	异常	异常	严重	异常

表 7 变压器套管评估结果与实际情况对比

**Table 7** Comparison of power transformer bussing evaluation results and the actual situation

型号	评估结果	实际情况
SFSZ10—150/220	异常	套管 C 相油色谱数据异常, $C_2H_2$ 气体严重超标,经更换解体分析为分接抽头引线和油隙存在闪络放电现象
ODFPS—250/500	注意	套管电容量偏差变化明显,检测发现末屏接地线松动,末屏接地不良导致悬浮放电
SZ11—100/220	正常	该变压器套管为不久前新更换,电容量及介损等各项测量值均在正常范围,运行状态良好

## 5 结语

准确评估电力变压器套管的运行状态,是提高变压器及电力系统运行的安全可靠性的有效手段。该文将矩估计理论运用到套管评估指标权重的确定过程中,通过寻找主、客观权重的最优组合以最大限度保留主、客观因素,从而有效降低了以往指标确定的不合理性。在此基础上,将模糊理论与证据融合



方法相结合,以各指标对等级的模糊分布作为初始概率分配并引入置信度系数修正,再利用改进的融合规则融合得出套管的评估等级,有效减小了证据间的冲突程度,并在一定程度上克服了评估指标的模糊性及不确定性。实例表明,此评估模型准确有效,可用于指导变压器套管的状态检修工作。

### 参考文献:

- [1] 周淙,徐智,廖瑞金,等. 基于云理论和核向量空间模型的电力变压器套管绝缘状态评估[J]. 高电压技术, 2013,39(5):1101-1106.  
ZHOU Quan, XU Zhi, LIAO Ruijin, et al. Insulation condition assessment of power transformer bushing based on cloud model and kernel vector space mode[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1101-1106.
- [2] 骆思佳,刘昕鹤,吕启深,等. 基于物元分析法的电力变压器套管健康状态评估[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 177-184.  
LUO Sijia, LIU Xinhe, LV Qishen, et al. Condition assessment for power transformer bushings based on matter element analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 177-184.
- [3] 顾蓉,苑津莎,吕菲. 基于采用云重心评估法的变压器套管状态评估研究[J]. 陕西电力, 2013, 41(7): 65-67.  
GU Rong, YUAN Jinsha, LV Fei, et al. State assessment study on transformer bussing based on cloud gravity center assessment method, 2013, 41(7): 65-67.
- [4] 徐贵林,罗斌,马瑞. 基于模糊综合评判的火电厂节能状态评估[J]. 电力科学与技术学报, 2012, 27(1): 86-90.  
XU Guilin, LUO Bin, MA Rui. Fuzzy comprehensive evaluation based energy saving condition assessment of thermal power plants[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2012, 27(1): 86-90.
- [5] 廖瑞金,黄飞龙,杨丽君,等. 变压器状态评估指标权重计算的未确知有理数法[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2219-2224.  
LIAO Ruijin, HUANG Feilong, YANG Lijun, et al. Calculation method of power transformer condition assessment index weight using unascertained theory[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2219-2224.
- [6] 阳东升,范帅,刘子兴,等. 基于熵值赋权法的配电变压器状态评估方法研究[J]. 南方电网技术, 2014, 8(4): 116-121.  
YANG Dongsheng, FAN Shuai, LIU Zixing, et al. Study on condition assessment method of distribution transformer based on entropy weight method[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(4): 116-121.
- [7] 苗飞,任建文,汤国庆,等. 基于灰色聚类与证据合成的变压器状态评估[J]. 高压电器, 2016, 52(3): 50-55.  
MIAO Fei, REN Jianwen, TANG Guoqing, et al. Transformer state assessment based on gray clustering and evidence synthesis[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(3): 51-54.
- [8] 祝顺才,蔡金锭. 基于模糊-灰色聚类的油纸绝缘状态综合诊断[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(3): 718-725.  
ZHU Shunca, CAI Jinding. Comprehensive diagnosis of oil-paper insulation status based on fuzzy gray clustering[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(3): 718-725.
- [9] 宋人杰,刘瑞英,王林,等. 灰色定权聚类 and 变权模式在变压器状态评估中的应用研究[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(3): 75-80.  
SONG Renjie, LIU Ruiying, WANG Lin, et al. Application of grey fixed weight clustering and variable weight model in transformer condition evaluation[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(3): 76-79.
- [10] 王艳梅,赵希男,郭梅,等. 一种调整模糊判断矩阵一致性的方法[J]. 模糊系统与数学, 2006, 20(3): 89-94.  
WANG Yanmei, ZHAO Xinan, GUO Mei, et al. A method for adjusting the consistency of fuzzy judgement matrix[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2006, 20(3): 89-94.
- [11] 雷兴列,盛戈峰,严英杰,等. 基于组合赋权与D-S证据理论的变压器状态评估[J]. 华东电力, 2013, 41(10): 2023-2027.  
LEI Xinglie, SHENG Gehao, YAN Xingjie, et al. Condition evaluation of transformer based on combined weight and D-S evidence theory[J]. East China Electric Power, 2013, 41(10): 2023-2027.
- [12] 唐俊熙,何迪,郭创新. 基于模糊综合评估的电网人因可靠性分析[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(3): 63-68.  
TANG Junxi, HE Di, GUO Chuangxin. Analysis of human reliability in power grid based on fuzzy synthetic evaluation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(3): 63-68.
- [13] 陈金强,李群湛. 基于熵权TOPSIS的变压器套管绝缘状态评估[J]. 绝缘材料, 2014, 47(4): 89-92.  
CHEN Jinqiang, LI Qunzhan. Insulation condition assessment of transformer bushing based on TOPSIS method with entropy weight[J]. Insulating Materials, 2014, 47(4): 89-92.