

Study on State of Health for Large Power Transformer Oil with Fuzzy Comprehensive Evaluation

Yongchao Xue¹, Rihong Xu²

¹State Grid Pingdingshan Power Supply Company, Pingdingshan Henan

²School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan Hubei

Email: 592276269@qq.com

Received: Sep. 9th, 2017; accepted: Sep. 22nd, 2017; published: Sep. 28th, 2017

Abstract

Rational use of transformer oils is inseparable from the evaluation of the health status of the oil quality. The transformer oil testing information is more, and part of the amount of factors exist uncertain characteristics. In this paper, based on the fuzzy comprehensive evaluation method, the mathematical model is constructed to evaluate the status of health for the transformer oil quality. The factor set and the evaluation set are built on the basis of this model. Then the ridge distribution is used as a membership function to establish the fuzzy relation matrix, and AHP method is used to quantify the weight. This paper presents a fuzzy comprehensive evaluation method to analyze oil qualitative health status, and the method is verified by examples. Examples analyses show that this method is reasonable and effective.

Keywords

Fuzzy Comprehensive Evaluation, State of Health, Power Transformer Oil

基于模糊综合评价的大型变压器油质SOH研究

薛永超¹, 许日红²

¹国网平顶山供电公司, 河南 平顶山

²武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉

Email: 592276269@qq.com

收稿日期: 2017年9月9日; 录用日期: 2017年9月22日; 发布日期: 2017年9月28日

摘要

合理利用变压器油离不开对油质健康状态的评价。针对变压器油质信息较多, 且部分信息量存在不确定性等特点, 本文采用模糊综合评价方法, 构建了用于变压器剩油质健康状况的评价数学模型。结合该模型并从实际出发, 建立了用于变压器油质评价的因素集、评价集, 在此基础上, 采用岭形分布作为隶属函数来确立模糊关系矩阵, 同时利用层次分析方法量化权重, 提出了采用模糊综合评价方法来评价油质健康状态, 并以实例进行了验证, 实例分析表明了该方法的合理性和有效性。

关键词

模糊综合评价, 健康状态, 变压器油

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

变压器油以其优良的电气、物理热工性能广泛应用于变压器类和断路器类等设备中, 变压器油在变压器中起绝缘、冷却散热、灭弧及作为信息载体的作用。相对于要求不高的中小型变压器来说, 处理后的超高压变压器油仍具有较大的再利用价值(梯级利用), 合理利用和正确维护变压器油不仅可以节约能源、降低成本、利于环保, 而且可以促进和巩固能源的可持续化发展, 也是电网安全运行的一个重要保证。因此, 做好油质健康状态(State of Health, SOH)的评价是研究和推广变压器油的梯级利用的前提和基础, 同时对于有效延长变压器油的服役期限、提高资源利用的有效性和合理性具有重要的战略意义[1] [2]。

目前, 油质健康状态的评价鲜有报道。本文结合大型变压器油质监测信息, 运用模糊综合评价方法探索变压器油质的 SOH 评价, 为油质梯级利用奠定基础。

2. 模糊综合评价数学模型

模糊综合评判是运用模糊方法对事物做出综合评判, 它根据模糊数学的隶属度原理把定性评价转化为定量评价。其过程是把评价目标看作由多种因素组成的因素集, 再设定这些因素所能选取的评审等级, 组成评语的评判集, 分别求出每个因素对各个评审等级的模糊矩阵, 然后根据各个因素在评价目标中的权重分配, 通过模糊矩阵合成, 求出评价的定量解值, 能较好地解决模糊的、难以量化的问题[3] [4] [5] [6]。模糊综合评判的数学模型为:

$$B = W \circ R = \{(b_1, b_2, \dots, b_m)\} \quad (1)$$

式中: “ \circ ”表示根据实际问题选取的某种模糊乘积运算; B 为被评对象的最终评价, 其中 m 为评语等级数; W 为评价因素的权重, 即 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 其中, n 为指标项目数, 且满足归一化条件 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$;

R 为模糊关系矩阵, 即 $R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}$, 其中, r_{ij} ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$)表示第 i 个元素对第 j

种评语的隶属度, $0 \leq r_{ij} \leq 1$ 。

3. 油质模糊评价过程

3.1. 评判集、因素集的构成

变压器油质监测指标涉及到物理、化学及电气性能特性, 包括: 粘度、凝点、闪点、酸值、水份、水溶性酸、氧化安定性、界面张力、击穿电压、介损等。超高压变压器油与普通变压器油相比, 超变油除对介质损耗因素、击穿电压等电气性能要求更高外, 还提出了析气性要求。

评判集是对评判对象可能作出的各种总的评判结果所组成的集合, 油质的 SOH 应该按照其特定性能的状况进行划分。本文将油质的状态分为良好、合格、不良、很坏四种状态, 分别对应: 可很好实现其特定性能(有效的绝缘、冷却与保护等); 可实现特定性能但性能有所降低; 不能实现特定性能, 但经处理后可降级使用; 不能实现特定功能, 需更换油。因此组成的评价集 V 为:

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{良好, 可继续使用} \\ \text{合格, 应加强监测} \\ \text{不良, 处理后降级使用} \\ \text{很坏, 应更换} \end{array} \right\}^T \quad (2)$$

正确获得变压器油的信息, 并科学、合理的进行分析, 便可真实的评估当前油质的状况, 为梯级利用分析提供基础。变压器油的监测信息较多, 这些信息可以从不同侧面与不同层次上反映油质的好坏, 但如果全面考虑这些信息, 状态评估采用单一模型将会比较复杂, 难以实现; 如果减少信息量, 又会使评估的准确性、可靠性受到影响。即要充分利油质信息数据, 又要使模型的复杂程度得到有效控制, 为此, 本文参照相关规程[7] [8] [9]选取用于 SOH 评估中的信息由粘度、闪点、酸值、沉淀、击穿电压、介质损耗、界面张力与析气性等 8 个试验信息构成评价因素集 U , 即 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_8\}$ 。

3.2. 评价因素权重的确定

在模糊评判中, 各因素的权重分配对评判结果有很大影响, 本文采用专家对各因素在相应因素集中的重要性打分, 并用 1-9 的比例标度对重要程度进行赋值, 利用层次分析法[10]分析计算权重(因层次分析方法在许多文献中有详细介绍, 这里不再展开)。

3.3. 评价指标劣化度

为了定量评价各试验指标的好坏, 采用劣化度来表示指标偏离正常值的程度, 记为 d_i , 其取值范围为[0,1]。正劣化, 状态量表现为状态量值的增加; 负劣化, 状态量的劣化表现为状态量值的减少; 偏差性劣化, 状态量劣化表现为状态量与初始值之间的不一致。劣化度 d_i 为 1 时, 表明油质的第 i 个指标性能状态很差; 为 0 时, 表明油质第 i 个指标性能处于良好状态。劣化度可按下面方法计算:

$$d(x) = \frac{x_f - x}{x_f - x_z} \quad (3)$$

式中: x_f 指标值, x_z 为注意值, x 为实测值。

3.4. 模糊关系矩阵的确立

模糊评价矩阵 R 是因素集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_{12}\}$ 对评价集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_4\}$ 的关系矩阵, 根据各试验指标的劣化程度, 可求得对应于评价集 V 四种状态空间中各种状态的隶属度。因岭形分布函数具有主值区间宽、过渡带平缓的特点[5], 能较好地反映油质的劣化度和状态空间的模糊关系, 因此可用来计算各指标

的劣化度 d_i 对应各健康状态的隶属度。其计算式为:

$$r(d_i) = \begin{cases} 0 & d_i \leq a \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{b-a} \left[d_i - \frac{a+b}{2} \right] & a < d_i \leq b \\ 1 & b < d_i \leq c \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{d-c} \left[d_i - \frac{c+d}{2} \right] & c < d_i \leq d \\ 0 & d_i > d \end{cases} \quad (4)$$

式中: a 、 b 、 c 、 d 为待估参数, 与各试验指标相关, 实际中可根据相关规程获得。根据各评价指标的参数范围情况, 将各因素的劣化度数值代入式(4), 可计算得出它们相对于评价集的隶属度, 即可构建 R 。

3.5. 模糊综合评价

模糊综合评价中“ \circ ”算子有多种方式[3], 实际中最常用的方法是最大隶属度原则, 但在某些情况下使用会有些很勉强, 损失信息很多, 甚至得出不合理的评价结果。本文采用加权平均作为模糊综合评价算子, 该算子可表示为:

$$b_j = \sum_{i=1}^n (w_i \cdot r_{ij}), \quad j=1, 2, \dots, m \quad (5)$$

该模型考虑了油质参与构建因素集中所有因素的影响, 而且保留了单因素评价的全部信息, 运算中 w_i 和 r_{ij} ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$) 无上限限制, 但须对 w_i 归一化, 该模型在工程评价中应用效果良好。

4. 油质 SOH 评估示例

以星城变电站#4 主变 C 相为例, 该变压器电压等级为 500 kV, 2012 年 5 月例行试验数据如表 1 中所示。

采用层次分析方法计算出各因素的权重, 并以实测值算出其对应的劣化度, 用模糊综合评价方法对其进行评价, 鉴于上述整个评判过程工作量较大, 采用编制程序的方式进行综合分析, 其界面如图 1 所示。分析结果表明油质不合格, 可进行再生处理后降为下一等级的变压器油使用, 这与多个指标超标或处于临界状态是一致的。

又如, 某 500 kV 变压器油质近期分析如表 2 所示。

同理分析可得该变压器油质很差, 设备需更换油。从酸值、界面张力及沉淀物测试值也反映了这一点, 现场实际也是更换了变压器油。

Table 1. Test data

表 1. 测试数据

名称	粘度 (mm ² /s)	闪点 (闭口, °C)	酸值 (mgKOH/g)	沉淀物 (%)	界面张力 (mN/m)	击穿电压 (kV)	介质损耗 (90°C)	析气性 (μL/min)
值	12.5	138	0.46	0.18	42	56	0.018	5.2

Table 2. Test data

表 2. 测试数据

名称	粘度 (mm ² /s)	闪点 (闭口, °C)	酸值 (mgKOH/g)	沉淀物 (%)	界面张力 (mN/m)	击穿电压 (kV)	介质损耗 (90°C)	析气性 (μL/min)
值	15	130	0.51	0.47	19	43	0.028	5.8

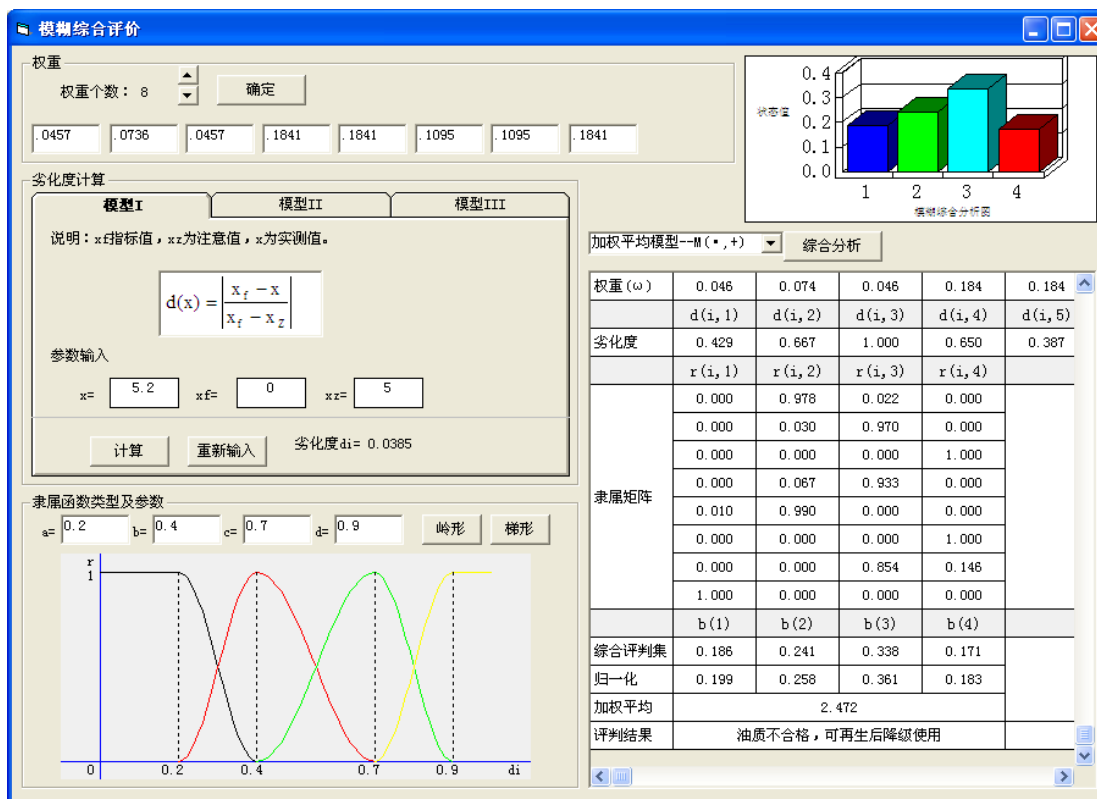


Figure 1. The transformer oil SOH evaluation interface
图 1. 变压器油质 SOH 评价界面

5. 结论

影响变压器油质 SOH 的因素很多, 同时各因素相互之间构成了非常复杂的非线性关系, 如果将这些因素用一个统一数据模型实现对变压器油质状态的评价是相当困难的。模糊理论技术在处理非线性关系上具有巨大优势, 可以综合考虑多种因素对油质 SOH 的影响, 能较好实现油质评价。本文依据变压器油的多种信息量, 结合模糊综合评价方法, 建立了变压器油质 SOH 评价模型, 并运用层次分析法确定模型中各评判因素的权重, 并以实例应用该模型进行了分析, 分析表明了该方法的有效性、实用性和可行性, 为合理利用和正确维护变压器油并促进和巩固能源的可持续化发展提供了一种方法或思路。文中只对变压器油质参数进行了初步的提取, 提取的全面性和精确性还有待进一步提高。

参考文献 (References)

- [1] Phadungthin, R., Chaidee, E., Haema, J., *et al.* (2010) Analysis of Insulating Oil to Evaluate the Condition of Power Transformer. *7th Annual International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2010*, Chiang Mai, 19-21 May 2010, 108-111.
- [2] Da Silva, I.N., De Souza, A.N., Hossri, R.M.C., *et al.* (2000) Intelligent System Applied in Diagnosis of Transformer Oil. *The 8th International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications*, Edinburgh, 17-21 September 2000, 330-334. <https://doi.org/10.1049/cp:20000528>
- [3] 王平洋, 胡兆光. 模糊数学在电力系统中的应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [4] 马凤才, 李雾坤, 张群. 基于三角形模糊数的 DEA 模型[J]. 数学的实践与认识, 2007, 37(11): 174-179.
- [5] Jia, Z.Y., Wang, C.M., Huang, Z.W., *et al.* (2011) Evaluation Research of Regional Power Grid Companies' Operation Capacity Based on Entropy Weight Fuzzy Comprehensive Model. *Procedia Engineering*, **15**, 4626-4630. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.869>

-
- [6] Cui, X., Liu, H.J., Ying, L.M. and Liao, Q.F. (2006) Multi-Level Fuzzy Comprehensive Evaluation of Power Supply Service Quality. *International Conference on Power System Technology, POWERCON2006*, Chongqing, 22-26 October 2006, 1-6.
- [7] Okubo, H., Kobayashi, S., Aoshima, Y., Takagi, H., *et al.* (1999) Electrical Insulation Diagnostic Method and Maintenance Criteria for Oil-Immersed Power Transformers. *IEEE International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, ICDL*, Nara, 372-377.
- [8] IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment. IEEE Std C57.106-2006, IEEE Transformers Committee, 2006.
- [9] Mohamed, A., Wahab, A., Hamada, M.M. and Mohamed, A. (2011) Artificial Neural Network and Non-Linear Models for Prediction of Transformer Oil Residual Operating Time. *Electric Power Systems Research*, **81**, 219-227. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2010.08.010>
- [10] 王莲芬, 许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1992.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: tdet@hanspub.org