

DOI: 10.7667/PSPC160258

基于模糊层次分析法的变压器状态评估

张晶晶¹, 许修乐¹, 丁明¹, 李金忠², 王健一², 吴超²

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 变压器状态评估是一个系统的过程, 选取合适的方法能够快速地对运行状态进行准确的评价。综合变压器的特点提出了一种基于模糊层次分析法的变压器状态评估方法。该方法在合理运用模糊层次分析法的同时克服了主观因素的缺陷, 通过历史统计数据确定模糊判断矩阵, 并通过模糊层次分析法计算权重, 采集现场状态量数据对各层次状态评分加权求和, 最终确定变压器整体健康状态。此方法同时考虑现场实测数据和历史统计数据, 计算结果准确, 过程清晰。代入实际数据后, 计算结果表明该方法能够准确评估变压器运行健康状态, 若变压器处于非正常状态, 则通过各故障类型打分分析判断具体异常原因。所提方法在进行变压器状态评估时具有广阔的应用前景。
关键词: 变压器; 模糊层次分析法; 权重计算; 状态评估; 模糊判断矩阵

A condition assessment method of power transformers based on fuzzy analytic hierarchy process

ZHANG Jingjing¹, XU Xiule¹, DING Ming¹, LI Jinzhong², WANG Jianyi², WU Chao²

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The condition assessment of transformer is a systematic process, the appropriate method can evaluate the running status more accurately. Considering the characteristics of the transformer, a method of transformer condition evaluation based on fuzzy analytic hierarchy process is proposed. This method overcomes the defects of subjective factors when using fuzzy analytic hierarchy process, determines the fuzzy judgment matrix by historical statistics data and calculates weight by fuzzy analytic hierarchy process. After collecting the data of the field condition, it calculates the weighted sum of each layer, and finally determines the overall health status of the transformer. The method considers both the field measured data and historical statistics, the calculation result is accurate and the process is clear. The results calculated by the actual data shows that the method can accurately assess the health state of transformer and if the transformer is in abnormal condition, then the specific causes can be determined by analyzing the score of each fault type. This method shows broad application prospects in state evaluation of transformer.

This work is supported by Natural Science Foundation of Anhui Province (No. 1408085ME100).

Key words: transformer; fuzzy analytic hierarchy process; weight calculation; state evaluation; fuzzy judgment matrix

0 引言

近年来, 国内外电力行业都在稳定快速地发展, 变压器作为核心设备, 其健康状态关系着整个系统的安全稳定运行。变压器的安全运行需要现场对其进行大量的数据采集并进行可靠性评价, 以评价结果为指导对变压器进行合理的调度和检修以期能够最大限度地降低变压器的故障概率。经过多年的努力, 在变压器的可靠性评估方法研究方面,

国内外学者提出了大量的关于变压器可靠性评价和状态评估方法, 在工程实践中取得了较好的效果。其中包括故障模式分析法、故障树分析法^[1-2]和马尔可夫方法^[3]等设备整体分析方法以及基于贝叶斯网络^[4]、支持向量机^[5-7]、灰靶理论^[8]和人工神经网络^[9]等变压器短期状态评估人工智能方法^[10-11]。随着特高压工程的推进, 变压器的状态评估方法越来越受到重视, 其中最可靠也是最常用的方法为按照国家电网规程打分和基于油中溶解气体分析的方法^[12], 除此之外, 文献[13-14]利用贝叶斯网络确定变压器各部件发生故障的概率; 文献[15]通过关

联规则确定权重,对变压器从故障征兆到整体进行运行状态评价;文献[16]对文献[15]进行改进,采用集对分析的方法计算,但权重依然按照关联规则确定。这些方法虽然也能诊断出变压器故障情况,但计算过程仍不够系统清晰,存在可以改进的空间。

本文整体分析了变压器状态评估的核心问题,在文献[15-16]的基础上考虑采用模糊层次分析法对变压器进行系统的状态评估。模糊层次分析法提出的时间较早,能够系统有效地分析最终目标和各层次之间的关系,在机械工业、环境科学、自动化技术、电力工业等领域都有着广泛的应用,其中在电力行业中,目前针对干式变压器、油纸绝缘等有过一定的研究^[17-18],但由于该方法在确定模糊判断矩阵时存在专家系统的主观性缺陷,目前油浸式变压器的状态评估较少采用此方法。基于此,本文利用变压器的现场运行数据计算模糊判断矩阵并求解各层元素权重^[19-21],在合理运用模糊层次分析法的同时克服了主观因素的缺陷,为变压器的状态评估提供了新的思路。

1 模糊层次分析法理论基础

1.1 模糊层次分析法基本理论

层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)是由T.L.Saaty在20世纪70年代首次提出,是解决多目标决策问题的定量和定性结合的方法,该方法能够有效地分析目标准则体系层次之间的非序列关系。因其实用性和简洁性,在多个领域都有着越来越广泛的应用。

模糊层次分析法(Fuzzy Analytic Hierarchy Process, FAHP)是为了解决层次分析法中权重的确定问题,在层次分析法的基础上融合模糊理论所提出的,FAHP在使用时的基本步骤如下:

- 1) 整体分析整个系统评价的最终目标和各因素之间的关系,建立系统的分层结构模型。
- 2) 基于某种准则判断同层中的因素对上一层的重要度,建立模糊判断矩阵。
- 3) 用判断公式检验矩阵的一致性,对不一致的矩阵进行调整使其满足一致性条件。
- 4) 按照模糊理论公式计算各元素对上一层的权重系数,以此类推直到得到最终的评价结果。

1.2 模糊判断矩阵的建立和一致性判定

采用模糊层次分析法时,确定系统层次和各层

次元素后需要建立模糊判断矩阵 \mathbf{R} ,设某一层元素集为 $A=\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$,则表示 A_1, A_2, \dots, A_n 两两比较重要程度的模糊判断矩阵为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

一般方法中确定 r_{ij} 采用的模糊标度如表1^[20]所示。

表1 模糊标度及其含义

Table 1 Fuzzy measure and its meaning

标度	含义
0.1	两个元素相比,后者比前者极端重要
0.2	两个元素相比,后者比前者强烈重要
0.3	两个元素相比,后者比前者明显重要
0.4	两个元素相比,后者比前者稍微重要
0.5	两个元素相比,两者具有同等重要性
0.6	两个元素相比,前者比后者稍微重要
0.7	两个元素相比,前者比后者明显重要
0.8	两个元素相比,前者比后者强烈重要
0.9	两个元素相比,前者比后者极端重要

模糊判断矩阵 \mathbf{R} 确定后的一致性判断依据为:

若模糊判断矩阵 $\mathbf{R}=(r_{ij})_{n \times n}$ 满足 $\forall i, j, k = 1, 2, \dots, n$,有

$$r_{ij} = r_{ik} - r_{jk} + 0.5 \quad (2)$$

则称模糊判断矩阵 $\mathbf{R}=(r_{ij})_{n \times n}$ 为模糊一致判断矩阵。

采用此定理验证模糊判断矩阵的一致性,若不满足条件,则对 r_{ij} 进行调整,若满足一致性条件,则可以进行下一步的权重计算。另文献[19]中定义:若 $r_{ij} > 0.5, \forall k$,有 $r_{ik} > r_{jk}$;若 $r_{ij} = 0.5, \forall k$,有 $r_{ik} = r_{jk}$;若 $r_{ij} < 0.5, \forall k$,有 $r_{ik} < r_{jk}$,则称 \mathbf{R} 具有顺序一致性。若 \mathbf{R} 满足顺序一致性条件也可以直接进行权重计算。

1.3 基于FAHP的元素权重计算

建立模糊一致判断矩阵后文献[20]总结提出了 r_{ij} 和权重的关系为

$$r_{ij} = a(w_i - w_j) + 0.5, \quad a \geq \frac{n-1}{2} \quad (3)$$

文献[21]在文献[20]的基础上运用最小二乘法计算出各因素的权重值表达式为

$$w_i = \frac{1}{n} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{na} \sum_{k=1}^n r_{ik} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$a \geq \frac{n-1}{2} \quad (5)$$

$$|w_i - w_j| \leq \frac{1}{n-1} \quad (6)$$

运用式(4)计算各因素权重后加权求和即可得到上一层评价结果。采用模糊层次分析法对变压器进行状态评估时,通过实际数据计算分析后,为了明显地分辨方案的重要程度,决定参数 a 取边界值。

2 采用模糊层次分析法的变压器状态评估

变压器作为一个有机的整体,对其进行状态评估时可以通过现场采集数据从部分到整体计算确定当前的设备整体运行健康状态。由此,对变压器进行状态评估时考虑采用模糊层次分析法,并利用模糊层次分析法中的数学理论确定多数据计算时的权重问题。

2.1 变压器状态评估层次划分及元素确定

采用模糊层次分析法评价变压器运行状态时将变压器分为3层。状态评估的最终目的是确定变压器的运行状态健康度,故变压器本体为最高层;本体的状态评估结果可以分为不同位置不同类型的故障,令变压器故障类型为中间层;发生故障时不同类型的故障在状态量上会有不同的体现,所以将现场采集的状态量作为最底层。

参考分析国家电网颁布的《油浸式变压器(电抗器)状态评价导则》^[22],将中间层故障类型分为9种,如表2所示,将最底层状态量分为24种,如表3所示^[16]。

表2 变压器故障类型

Table 2 Fault types of power transformer

编号	故障类型	编号	故障类型
1	绕组故障	6	绝缘老化
2	铁心故障	7	绝缘油劣化
3	电流回路过热	8	局部放电
4	绝缘受潮	9	油流放电
5	电弧放电	-	-

现场评价时由于电力变压器的状态信息数据的量纲和数量级差别过大,统一评价时大数据会吞噬小数据,故整合状态量数据时首先对其进行归一化的状态评分计算,表达式为

$$x_n = \frac{z' - z_n}{z' - z_f} \quad (7)$$

其中: x_n 为特征量 n 的状态评分,当 $x_n < 0$ 时,令 $x_n = 0$;当 $x_n > 1$ 时,令 $x_n = 1$; z_n 为本次试验值;考虑特征量的正劣化和负劣化,特征量的警示值 z' 取 $1.3z_a$ (正劣化)

或 $z_a/1.3$ (负劣化), z_a 的值参考标准[22-23]; z_f 为该特征量的初始值,即该设备出厂或交接试验值。

表3 变压器状态量

Table 3 State parameters of power transformer

编号	状态量	编号	状态量
1	绝缘油介损	13	CO相对产气速率
2	油中含水量	14	CO ₂ 相对产气速率
3	油击穿电压	15	绕组短路阻抗初值差
4	绝缘电阻吸收比	16	绕组绝缘介损
5	极化指数	17	绕组电容量初值差
6	体积电阻率	18	C ₂ H ₂ 含量
7	H ₂ 含量	19	局部放电量
8	铁心接地电流	20	油中含气量
9	铁心绝缘电阻	21	CH ₄ 含量
10	C ₂ H ₆ 含量	22	中性点油流静电流
11	C ₂ H ₄ 含量	23	糠醛含量
12	绕组直流电阻互差	24	纸板聚合度

2.2 状态量权重确定及故障类型状态评分计算

记故障类型为 $A_n(n=1, 2, \dots, 9)$,状态量为 $B_n(n=1, 2, \dots, 24)$,状态量异常与故障同时发生即为相关,统计 A_n 发生故障的同时出现数据异常的状态量个数记为 N ,对故障类型 A_n 进行状态评分计算时,相关状态量的模糊判断矩阵 R_B 和矩阵中元素 r_{ij} 为

$$R_B = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1N} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{N1} & r_{N2} & \cdots & r_{NN} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$r_{ij} = \frac{p_i}{p_i + p_j} \quad (9)$$

其中, $p_i(p_j)$ 为 $i(j)$ 对应状态量异常与故障类型 A_n 同时出现的故障次数。由于根据式(9)确定的 r_{ij} 总是满足顺序一致性条件, R_B 可直接用式(3)计算。

代入数据计算得出 R_B 后运用式(4)计算出各特征量权重 w_i 。则故障类型 A_n 的状态评分为

$$X_n = \sum_{i=1}^N w_i x_i \quad (10)$$

2.3 故障类型权重确定及变压器整体状态评分计算

故障类型的模糊判断矩阵 R_A 为

$$R_A = \begin{bmatrix} r'_{11} & r'_{12} & \cdots & r'_{19} \\ r'_{21} & r'_{22} & \cdots & r'_{29} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r'_{91} & r'_{92} & \cdots & r'_{99} \end{bmatrix} \quad (11)$$

确定各故障类型对变压器整体的相对重要度时,由于每个部件都能反映变压器某一方面的健康程度,故将所有故障类型都视为同等重要,但是当变压器某一故障类型出现严重故障时,用此方法计

算对最终变压器整体评价结果影响不大，这显然与实际不符，所以综合考虑后采用变权重方法确定 r'_{ij} ，其计算公式为

$$r'_{ij} = \frac{X_j}{X_i + X_j} \quad (12)$$

同理该模糊判断矩阵 R_A 也总是满足顺序一致性条件，故代入数据后可直接确定模糊判断矩阵，再采用式(4)计算各故障类型权重 w'_i ，得变压器整体状态评分为

$$S = \sum_{i=1}^9 w'_i X_i \quad (13)$$

参考国家电网评价规程，将最终状态评分与表4对比确定变压器整体健康状态所在的区间。若设备处于非正常状态，则通过各故障类型打分确定设备出现异常的原因。

表4 变压器状态评分与健康状态关系

Table 4 Relationship between status score and health condition of transformer

	of transformer			
状态评分	0~0.2	0.2~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0
健康状态	严重	异常	注意	正常

2.4 状态评估步骤

综上所述，采用模糊层次分析法的电力变压器状态评估的流程图如图1，具体步骤如下：

- 1) 对变压器进行层次划分，并确定各层次中元素，即总结状态量和故障类型；
- 2) 采集变压器运行数据，对各状态量进行统一的状态评分计算；
- 3) 确定与某故障类型相关状态量并确定模糊判断矩阵 R_B ，利用式(4)计算权重 w_i ，然后对状态量状态评分 x_n 加权求和，得该故障类型状态评分 X_n ；
- 4) 判断是否考虑所有故障类型，若没有则进行下一个故障类型的计算，返回(2)，若完成则进行下一步；
- 5) 确定故障类型模糊判断矩阵 R_A ，同理利用式(4)计算权重后加权求和得变压器状态评分 S ；
- 6) 分析变压器最终得分，判断其所在的状态区间，若结果为正常则评估结束，若处于非正常状态则参考各故障类型得分确定设备异常原因，输出故障结果，为现场检修调度提供指导。

3 算例分析

为验证本文方法的准确性和实用性，以河南地

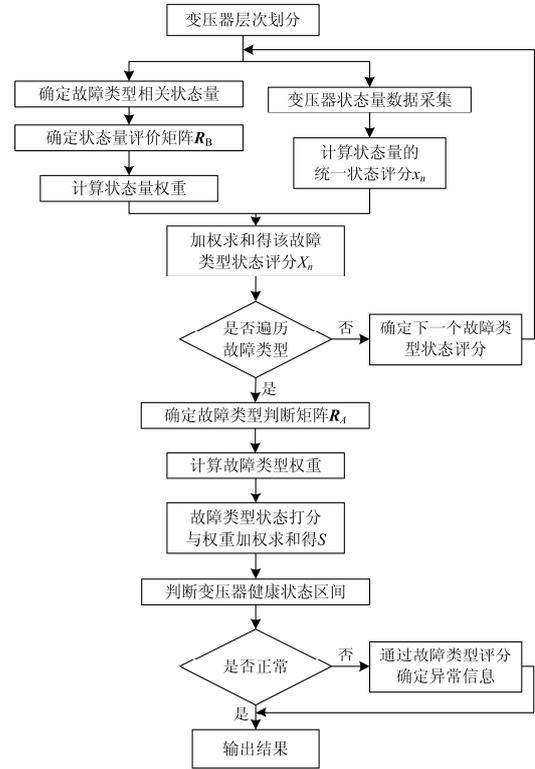


图1 基于模糊层次分析法的变压器状态评估流程图

Fig. 1 Flow chart of the condition assessment method for power transformers based on fuzzy analytic hierarchy process

区某变电站一台220 kV油浸式电力变压器的现场数据进行分析^[16]。24个状态量的相关数据和变压器历史统计数据整理并计算如表5、表6所示。利用表中数据可计算各故障类型的状态评分值，以绕组故障为例，和绕组故障相关的状态量有7个，按照式(9)确定各元素后可得模糊判断矩阵为

$$R_{B1} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.0156 & 0.2 & 0.2222 & 0.0144 & 0.0148 & 0.0145 \\ 0.99844 & 0.5 & 0.9403 & 0.9474 & 0.4791 & 0.4865 & 0.4809 \\ 0.8 & 0.0597 & 0.5 & 0.5333 & 0.0552 & 0.0567 & 0.0556 \\ 0.7778 & 0.0526 & 0.4667 & 0.5 & 0.0486 & 0.05 & 0.049 \\ 0.9856 & 0.5209 & 0.9448 & 0.9514 & 0.5 & 0.5074 & 0.5018 \\ 0.9852 & 0.5135 & 0.9433 & 0.95 & 0.4926 & 0.5 & 0.4944 \\ 0.9855 & 0.5191 & 0.9444 & 0.9510 & 0.4982 & 0.5056 & 0.5 \end{bmatrix}$$

通过模糊判断矩阵 R_{B1} 用式(4)计算各状态量的权重系数，结果为： $w_1 = 0.0229$ ， $w_2 = 0.2056$ ， $w_3 = 0.0743$ ， $w_4 = 0.068$ ， $w_5 = 0.2101$ ， $w_6 = 0.2085$ ， $w_7 = 0.2097$ 。

根据状态量状态评分和权重结果，利用式(10)计算得绕组故障的状态评分 $X_1 = 0.2476$ 。

采用相同方法计算全部9个故障类型后得各故障类型状态评分如表7。

表 5 状态量异常和故障类型同时发生次数

Table 5 Number of abnormal states and fault types occur simultaneously

状态量	绕组故障	铁心故障	电流回路过热	绝缘受潮	电弧放电	绝缘老化	绝缘油劣化	局部放电	油流放电
绝缘油介损	0	0	2	123	6	141	123	10	119
油中含水量	2	0	0	122	0	2	99	104	3
油击穿电压	0	0	0	115	4	0	102	6	0
绝缘电阻吸收比	0	0	0	101	0	5	0	0	0
极化指数	0	0	0	91	2	3	0	3	0
体积电阻率	0	0	0	92	0	139	115	5	125
H ₂ 含量	126	2	4	115	129	2	4	106	1
铁心接地电流	0	147	0	4	0	0	0	3	0
铁心绝缘电阻	0	142	0	102	0	8	115	0	0
C ₂ H ₆ 含量	8	139	42	0	0	1	2	2	5
C ₂ H ₄ 含量	7	122	118	8	4	7	7	20	18
绕组直流电阻互差	0	0	132	0	133	2	2	99	6
CO相对产气速率	0	12	122	0	0	2	3	0	0
CO ₂ 相对产气速率	0	0	125	0	0	7	5	0	0
绕组短路阻抗初值差	137	0	0	0	0	4	0	0	0
绕组绝缘介损	133	0	0	0	0	148	8	0	2
绕组电容量初值差	136	0	0	0	0	3	0	0	0
C ₂ H ₂ 含量	0	8	0	0	146	0	0	8	115
局部放电量	0	0	0	0	132	3	5	119	7
油中含气量	0	0	0	17	2	143	111	109	116
CH ₄ 含量	0	0	0	9	0	4	4	113	0
中性点油流静电电流	0	0	0	2	0	0	1	0	129
糠醛含量	0	0	0	4	0	157	3	0	0
纸板聚合度	0	0	0	3	0	154	0	0	0

表 6 变压器状态量数据及状态评分

Table 6 Data and status score of state parameter of power transformer

状态量编号	实测值Z _n	注意值Z _a	初始值Z _r	状态评分
1	1.7	4	0.5	0.7447
2	12.1	25	3.5	0.7034
3	55	35	58	0.9035
4	1.61	1.3	2	0.6100
5	2.03	1.5	2.5	0.6509
6	55	5	60	0.9110
7	140	150	6.1	0.2912
8	0.02	0.1	0.01	0.9167
9	1000	100	1000	1
10	4.7	65	2.3	0.9708
11	7.3	50	4.8	0.9585
12	1.5	4	1	0.8810
13	12	100	0	0.9077
14	31	200	0	0.8808
15	4.7	3	1	0
16	0.9	0.8	0.17	0.1609
17	7.2	5	1	0
18	0	5	0	1
19	72	500	30	0.9323
20	1.6	3	1	0.7931
21	18.5	100	8.7	0.9192
22	0.07	1	0.02	0.9609
23	0.05	0.2	0	0.8077
24	900	250	1000	0.8762

表 7 故障类型状态评分

Table 7 Status score of fault type

故障类型	状态评分	故障类型	状态评分
绕组故障	0.2476	绝缘老化	0.7084
铁心故障	0.9467	绝缘油劣化	0.8053
电流回路过热	0.8863	局部放电	0.7996
绝缘受潮	0.7615	油流放电	0.8573
电弧放电	0.7904	—	—

按照故障类型状态评分结果确定故障类型模糊判断矩阵为

$$R_n = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.7927 & 0.7816 & 0.7546 & 0.7614 & 0.7410 & 0.7648 & 0.7635 & 0.7759 \\ 0.2073 & 0.5 & 0.4835 & 0.4458 & 0.455 & 0.428 & 0.497 & 0.4579 & 0.4752 \\ 0.2184 & 0.5165 & 0.5 & 0.4621 & 0.4714 & 0.4442 & 0.4761 & 0.4743 & 0.4917 \\ 0.2454 & 0.5542 & 0.5379 & 0.5 & 0.5093 & 0.4819 & 0.514 & 0.5122 & 0.5296 \\ 0.2386 & 0.545 & 0.5286 & 0.4907 & 0.5 & 0.4726 & 0.5047 & 0.5029 & 0.5203 \\ 0.259 & 0.572 & 0.5558 & 0.5181 & 0.5274 & 0.5 & 0.532 & 0.5302 & 0.5475 \\ 0.2352 & 0.5403 & 0.5239 & 0.486 & 0.4953 & 0.468 & 0.5 & 0.4982 & 0.5156 \\ 0.2365 & 0.5421 & 0.5257 & 0.4878 & 0.4971 & 0.4698 & 0.5018 & 0.5 & 0.5174 \\ 0.2241 & 0.5248 & 0.5083 & 0.4704 & 0.4797 & 0.4525 & 0.4844 & 0.4826 & 0.5 \end{bmatrix}$$

通过模糊判断矩阵用式(4)计算各状态量的权重系数, 结果为: $w'_1 = 0.1407$, $w'_2 = 0.0948$, $w'_3 = 0.0987$, $w'_4 = 0.1079$, $w'_5 = 0.1056$, $w'_6 = 0.1123$, $w'_7 = 0.1045$, $w'_8 = 0.1049$, $w'_9 = 0.1007$ 。将计算结果代入式(13)计算得变压器整体状态评分结果为 0.7191。

由表4判断该设备为注意状态, 查看各故障类型状态评分结果, 绕组故障分值较低, 可能存在异

常, 实际运行中对该台变压器进行停电检修后发现绕组中部分线饼挤压导致局部变形, 与评价结果吻合, 证明了该方法的准确性。

4 结论

采用模糊层次分析法的变压器状态评估方法一方面基于国家电网状态打分规程, 另一方面克服了规程中的各状态量权重的主观性的缺点, 通过不同层次的评价结果加权汇总得到的变压器整体状态评估结果准确可信。同时该方法在现有方法的权重计算上进行了改进, 计算过程清晰明确, 且当数据量增加或需要对其进行改进时可以通过计算机程序简单快速地完成。

本文提出的变压器状态评估方法可以在利用模糊层次分析法的优势的同时克服其可能存在的缺陷, 这也可以为更高电压等级变压器或其他电力设备(如电抗器等)在状态评估时提供新的思路。

参考文献

- [1] CHEN S K, HO T K, MAO B H. Reliability evaluations of railway power supplies by fault-tree analysis[J]. IET Electric Power, 2007, 2(1): 161-172.
- [2] 谷凯凯, 郭江. 紧致融合模糊集和故障树的变压器故障诊断[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 233-239.
GU Kaikai, GUO Jiang. Transformer fault diagnosis method based on compact fusion of fuzzy set and fault tree[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5): 233-239.
- [3] 廖瑞金, 肖中男, 巩晶, 等. 应用马尔科夫模型评估电力变压器可靠性[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 322-328.
LIAO Ruijin, XIAO Zhongnan, GONG Jing, et al. Markov model for reliability assessment of power transformers[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 322-328.
- [4] 余文辉, 王沾, 曾祥军, 等. 基于贝叶斯网络的多状态变压器可靠性跟踪分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 78-85.
YU Wenhui, WANG Zhan, ZENG Xiangjun, et al. Reliability tracing analysis for multi-state power transformers using Bayesian network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 78-85.
- [5] NIU Wu, XU Liangfa, WU Jilin. Fault diagnosis and system development of power transformer based on support vector machine[J]. IEEE Computer Science and Information Technology, 2009, 2(10): 578-581.
- [6] 贾立敬, 张建文, 王传林, 等. 基于 DGA 的差分进化支持向量机电力变压器故障诊断[J]. 高压电器, 2015, 51(4): 13-18.
JIA Lijing, ZHANG Jianwen, WANG Chuanlin, et al. Fault diagnosis of power transformer based on DGA of algorithm for SVM[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4): 13-18.
- [7] 薛浩然, 张珂珩, 李斌, 等. 基于布谷鸟算法和支持向量机的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 8-13.
XUE Haoran, ZHANG Keheng, LI Bin, et al. Fault diagnosis of transformer based on the cuckoo search and support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 8-13.
- [8] 郑蕊蕊, 赵继印, 吴宝春, 等. 基于加权灰靶理论的电力变压器绝缘状态分级评估方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(8): 60-66.
ZHENG Ruirui, ZHAO Jiyin, WU Baochun, et al. Method for insulative condition classification evaluation of power transformer based on weight coefficient grey target theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(8): 60-66.
- [9] 阮羚, 谢齐家, 高胜友, 等. 人工神经网络和信息融合技术在变压器状态评估中的应用[J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 822-828.
RUAN Ling, XIE Qijia, GAO Shengyou, et al. Application of artificial neural network and information fusion technology in power transformer condition assessment[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3): 822-828.
- [10] 吴奕, 朱海兵, 周志成, 等. 基于熵权模糊物元和主元分析的变压器状态评价[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 1-7.
WU Yi, ZHU Haibing, ZHOU Zhicheng, et al. Transformer condition assessment based on entropy fuzzy matter-element and principal component analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 1-7.
- [11] 张彪, 王渝红, 李兴源, 等. 基于 DHGF 算法的换流变压器状态评价研究[J]. 高压电器, 2015, 51(9): 60-65.
ZHANG Biao, WANG Yuhong, LI Xingyuan, et al. Condition evaluation of converter transformer based on DHGF algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(9): 60-65.
- [12] SU Q, MI C, LAI L, et al. A fuzzy dissolved gas analysis method for the diagnosis of multiple faults in a transformer[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 593-598.
- [13] RIDWAN M I, TALIB M A, GHAZALI Y Z Y. Application of Weibull-Bayesian for the reliability analysis of distribution transformers[C] // Power Engineering and

- Optimization Conference (PEOCO), 2014 IEEE 8th International. IEEE, 2014: 297-302.
- [14] 白翠粉, 高文胜, 金雷, 等. 基于3层贝叶斯网络的变压器综合故障诊断[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 330-335.
BAI Cuifen, GAO Wensheng, JIN Lei, et al. Integrated diagnosis of transformer faults based on three-layer Bayesian network[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 330-335.
- [15] LI L, XIE L J, DENG Z, et al. Condition assessment of power transformers using a synthetic analysis method based on association rule and variable weight coefficients[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(6): 2052-2060.
- [16] 谢龙君, 李黎, 程勇, 等. 融合集对分析和关联规则的变压器故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 277-286.
XIE Longjun, LI Li, CHENG Yong, et al. A fault diagnosis method of power transformers by integrated set pair analysis and association rules[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 277-286.
- [17] 曹建军. 基于模糊层次分析法的变压器油纸绝缘状态的综合评估[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
CAO Jianjun. The integrated evaluation of statement of transformer oil-paper insulation based on fuzzy analytic hierarchy process[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [18] 赵艳龙, 熊兰, 徐敏捷, 等. 基于模糊层次分析法的干式变压器运行状态综合评估[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2013, 27(4): 60-67.
ZHAO Yanlong, XIONG Lan, XU Minjie, et al. Synthetic evaluation for dry-type transformers' running condition based on FAHP[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2013, 27(4): 60-67.
- [19] 王艳梅, 赵希男, 郭梅. 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. A method for adjusting the consistency of fuzzy judgement matrix[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2006, 20(3): 89-94.
- [20] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算分析及应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
DENG Xue, LI Jiaming, ZENG Haojian, et al. Research on the priorities of fuzzy analytical hierarchy process[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(7): 93-100.
- [21] 兰继斌, 徐扬, 霍良安, 等. 模糊层次分析法权重研究[J]. 系统工程理论与实践, 2006(9): 107-112.
LAN Jibin, XU Yang, HUO Liangan, et al. Research on the priorities of fuzzy analytical hierarchy process[J]. System Engineering-Theory & Practice, 2006(9): 107-112.
- [22] 国家电网公司. Q/GDW 169—2008 油浸式变压器(电抗器)状态评价导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
State Grid Corporation of China. Q/GDW 169—2008 guide for condition evaluation of oil-immersed power transformers (reactors)[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [23] 中国电力工业部. DL/T 596—1996 电力设备预防性试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
Power Industry Ministry of China. DL/T 596—1996 preventive test code for electric power equipment[S]. Beijing: China Electric Power Press, 1996.

收稿日期: 2016-03-02; 修回日期: 2016-04-15

作者简介:

张晶晶(1977-), 女, 副教授, 主要研究方向为电力系统规划及可靠性、电力系统继电保护; E-mail: dragonzjj@126.com

许修乐(1992-), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为高压输变电设备可靠性评价; E-mail: 568050370@qq.com

丁明(1956-), 男, 教授, 博导, 研究方向为电力系统规划及可靠性、新能源及其利用、柔性输电系统的仿真控制。E-mail: mingding56@126.com

(编辑 葛艳娜)