

基于多时域特征参量的变压器油纸绝缘状态综合评估

陈汉城, 蔡金锭

(福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要: 利用 RVM5461 测试仪的现场测试结果对变压器的回复电压极化谱进行了分析。利用扩展德拜模型对变压器弛豫机构参数进行了分析。对去极化电流能量谱中反映变压器油纸绝缘老化状态的特征量进行了分析。对多台变压器的实测数据进行统计, 建立变压器标准状态参量表。采用主客观相结合的综合赋权法确定各个时域特征量的权重系数, 并融合证据理论和多指标评估方法, 建立变压器油纸绝缘状态综合评价体系。实例分析结果表明了所提方法的有效性。

关键词: 变压器; 油纸绝缘; 回复电压法; 去极化电流法; 标准状态参量表; 证据理论; 状态评估

中图分类号: TM 411; TH 183

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.07.028

0 引言

近年来, 有很大比例的停电事故由变压器油纸绝缘失效引起, 而油纸绝缘老化是引起油纸绝缘失效的关键因素^[1-7]。为了保证变压器的正常稳定运行, 国内外学者利用传统诊断法和介电响应诊断法评估变压器的绝缘状态。其中传统诊断法^[1,7-9]包括油中溶解气体检测、糠醛含量测试、微水含量评估等方法, 但是在现场测试中, 仍存在滤油影响、需要吊芯、采样困难等缺陷。介电响应诊断法可以应用在时域和频域, 时域介电响应诊断法包括回复电压法、去极化电流法, 频域介电响应诊断法包括频域谱法^[10]。时域介电响应诊断法^[2-7]具有抗干扰强、携带信息量大、操作容易、无需吊芯等优点, 近年来备受国内外学者的研究和关注。

时域介电响应谱线含有峰值大小、峰值时间等特征量, 可作为变压器油纸绝缘状态的粗略判据。文献[3]通过在实验室中制备不同微水含量及老化时间的油纸实验样本, 提出时域极化谱可以用于评估变压器油纸绝缘状态; 文献[4]采用扩展德拜模型分析不同变压器的油纸绝缘系统, 并提取弛豫机构参数作为诊断变压器油纸绝缘状态的特征量, 但仅停留在定性分析上; 文献[5]利用回复电压函数的特性研究扩展德拜模型的弛豫拓扑结构, 便于变压器弛豫结构的建模分析, 但未提出判断油纸绝缘老化状态的特征量; 文献[6]应用回复电压解谱法分析油纸绝缘系统的拓扑结构, 并提出通过等效电路的极化支路数可初步诊断油纸绝缘老化状态; 文献[11-12]深入解析变压器油纸绝缘老化机理, 提取去极化能量谱等介电响应谱线上的信息作为评估油纸绝缘系统老化状态的时域特征量, 但仅限单个特征参量与绝缘老

化状态的相关性分析, 很难对变压器的油纸绝缘状态进行全面准确的评估。综上所述, 仍需进一步研究综合时域特征量的变压器油纸绝缘状态评估方法。

针对已有方法的不足, 本文在多台实测变压器数据的基础上, 统计分析并建立包含 8 个评估变压器油纸绝缘状态时域特征量的标准状态参量表, 为现场工作人员的定量分析提供参考。为了进一步提高变压器油纸绝缘状态评估的准确性, 本文选取这 8 个时域特征量作为子证据体, 并采用综合赋权法确定各个子证据体的权重, 融合证据理论多指标评价方法进行变压器油纸绝缘状态综合诊断, 建立变压器油纸绝缘状态评价体系。最后, 通过多台变压器的实测结果验证了本文所提方法的准确性相对单一特征量评估方法有一定的提高。

1 时域特征量分析

1.1 回复电压极化谱特征量

为了进一步研究评估变压器油纸绝缘状态的时域特征量, 本文选取一台变压器在检修前后的不同状态进行具体分析, 检修前变压器的状态已确定为低压侧老化严重, 检修后该变压器继续投运于变电站内。应用回复电压测试仪 RVM5461 现场测试得到待诊变压器的回复电压数据。通过对比变压器在检修前后不同状态下的回复电压测试结果可知, 回复电压极化谱中的特征量可在一定程度上反映变压器油纸绝缘老化状态^[2-5]。

现场回复电压测试中, 设定的充电电压 U_0 为 2000 V, 充放电时间比 $t_c:t_d=2:1$, 测试得到的结果如图 1—3 所示。

由图 1 可以看出, 变压器在检修前处于低压侧严重老化的状态, 此时回复电压峰值时间 t_{peak} 是一条稳定在 $[100, 400]$ s 范围内的波动曲线, 而检修后, t_{peak} 曲线随着充足充电时间 t_c 的增加逐渐增加。故已有研究^[3-5]表明可取 t_{peak} 的均值作为时域特征量诊断

收稿日期: 2017-03-20; 修回日期: 2017-06-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61174117)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61174117)

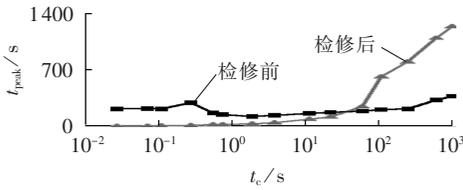


图 1 检修前后峰值时间比较

Fig.1 Comparison of peak time between before and after maintenance

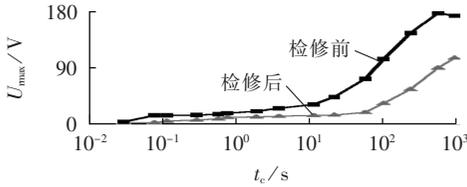


图 2 检修前后峰值大小及主时间常数比较

Fig.2 Comparison of peak value and main time constant between before and after maintenance

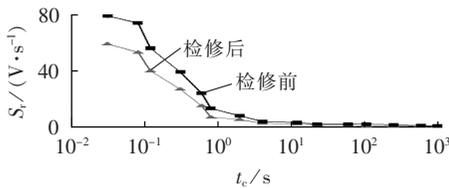


图 3 检修前后初始斜率大小比较

Fig.3 Comparison of initial slope between before and after maintenance

变压器油纸绝缘状态的变化情况。

检修前后回复电压极化谱的峰值大小及主时间常数的比较结果如图 2 所示,由图可见,回复电压极化谱的峰值大小 U_{max} 随着老化程度的加深逐渐增大^[3],而最大峰值所对应的充足充电时间 t_c 在检修前后的变化也较为明显,其被称为主时间常数 t_{cdom} ^[4-6],是时域谱线中重要的特征量之一。

检修前后回复电压极化谱的初始斜率大小的比较如图 3 所示,由图可见,回复电压极化谱的初始斜率 S_r 在变压器检修后的数值始终比检修前小^[4],这是因为变压器绝缘油纸中的老化产物减少,使得电介质的缓慢弛豫过程减弱,快速弛豫过程加强,从而使初始斜率 S_r 减小。所以通过 S_r 也可以初步诊断变压器油纸绝缘的老化状态。

根据以上分析可得出结论:

a. 回复电压峰值时间均值 \bar{t}_{peak} 越小,表征为变压器油纸绝缘老化越严重^[5];

b. 测试中,当充足充电时间 t_c 较长时,回复电压主时间常数 t_{cdom} 越小,回复电压峰值 U_{max} 越大,则变压器的油纸绝缘老化越严重;

c. 回复电压极化谱中的初始斜率 S_r 越大,表征为变压器油纸绝缘老化越严重。

1.2 扩展德拜等效弛豫机构参数特征量

变压器油纸绝缘系统受各种不同老化产物的影

响,这些老化产物的介电常数往往各不相同。现阶段广泛采用扩展德拜模型^[4-6]对变压器的弛豫响应过程进行建模分析,其弛豫机构模型如图 4 所示。

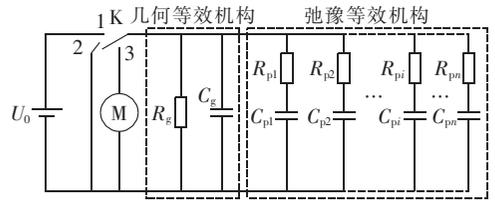


图 4 基于扩展德拜模型的油纸绝缘系统等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of oil-paper insulation system based on extended Debye model

文献[4]的研究表明,几何机构中绝缘电阻 R_g 虽然受系统几何结构制约,但是能比较准确地体现油纸绝缘状态。绝缘电阻 R_g 越大,油纸绝缘状态越好。在弛豫等效机构中,弛豫机构数 N 对油纸绝缘状态具有良好的灵敏性,弛豫机构数 N 增加,表征为变压器油纸绝缘的老化程度加深^[4-8]。

1.3 去极化电流能量谱特征量

现阶段,国内外学者对时域特征量的提取已有一定的研究,但应用去极化电流曲线直接提取的特征量较少,通常采用构造去极化电流时域谱线的方法提取反映变压器油纸绝缘老化状态的特征量。文献[11]的研究表明,去极化电流能量谱可在一定程度上作为诊断变压器油纸绝缘老化状态的特征量。去极化电流能量谱的谱线上具有反映油纸绝缘系统老化状态的信息参量,变压器油纸绝缘老化状态越严重,去极化能量谱峰值 W_{max} 越大,最大峰值时间 t_{max} 越小。

2 多指标综合评估变压器油纸绝缘状态

由上述对单一时域特征量的具体分析可知,不同的单一时域特征量对变压器油纸绝缘状态具有不同程度的灵敏性和不准确性,为了更准确地评估变压器油纸绝缘状态,本文提出融合综合赋权法和证据理论多指标评估法诊断变压器绝缘老化状况。

2.1 评价指标的相对归一化处理

由于各个子证据体的单位不同,故融合计算分析需要对其分别进行相对归一化处理^[13]。

a. 第 1 种情况:参数数值越小则油纸绝缘状态越好型指标,包括回复电压峰值 U_{max} 等。该类型的指标采用式(1)计算相对劣化度。

$$X_{gy} = \begin{cases} 0 & x_{dc} \leq x_0 \\ \frac{x_{dc} - x_0}{x_1 - x_0} & x_0 < x_{dc} \leq x_1 \\ 1 & x_{dc} > x_1 \end{cases} \quad (1)$$

b. 第 2 种情况:参数数值越大则绝缘状态越好型指标,包括绝缘电阻 R_g 和回复电压主时间常数 t_{cdom} 等。该类型的指标采用式(2)计算相对劣化度。

$$X_{gy} = \begin{cases} 1 & x_{dc} \leq x_1 \\ \frac{x_0 - x_{dc}}{x_0 - x_1} & x_1 < x_{dc} \leq x_0 \\ 0 & x_{dc} > x_0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, X_{gy} 为指标进行相对归一化处理后的相对劣化度; x_{dc} 为指标的实际测量值; x_1 和 x_0 为各个指标进行相对归一化处理后的阈值, 其具体数值由下文分析计算可知。

本文收集了 60 多台变压器油纸绝缘老化近 10 年的现场实测数据, 通过分析计算得到对应的实测时域特征值数据。现列举 10 台变压器的现场实测数据以供参考, 如表 1 所示。根据《电力设备预防性试验规程》的各项指标规定, 变压器油纸绝缘状态可划分为绝缘状态良好 (S_1)、绝缘状态中等 (S_2)、绝缘轻微老化 (S_3)、绝缘严重老化 (S_4) 4 种状态。由表 1 可知, 各个单一时域特征量对变压器油纸绝缘状态的变化虽具有一定敏感性, 但也存在偏差, 若采用单一时域特征量诊断变压器油纸绝缘状态, 准确度难以保障, 故需研究各个时域特征量的综合诊断方法。本文在统计多台变压器实测数据的基础上, 构建了绝缘状态时域标准状态参量表, 如表 2 所示, 其可作为上文中指标相对归一化处理后的阈值 x_1 和 x_0 的参考。

2.2 子证据体的隶属度

为了准确评估变压器油纸绝缘状态, 首先对子证据体在各种状态下的隶属度进行计算。现阶段, 模糊评价的方法广泛应用于研究指标的状态划分, 隶属度可以表示各个指标在变压器油纸绝缘的各类状态下的归属值。为避免隶属度函数中三角隶属度函数确定状态等级较为粗糙以及梯形隶属函数信息容易丢失等缺陷^[13-14], 本文采用半梯-半岭型隶属度函数计

算各类指标归属值, 如式(3)—(6)所示。半梯-半岭型隶属度函数能较为准确地计算变压器绝缘状态的各类等级信息。

$$A_1(X_{gy}) = \begin{cases} 1 & X_{gy} \leq a_1 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \left[\frac{\pi}{a_2 - a_1} \left(X_{gy} - \frac{a_1 + a_2}{2} \right) \right] & a_1 < X_{gy} \leq a_2 \\ 0 & X_{gy} > a_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$A_2(X_{gy}) = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \left[\frac{\pi}{a_2 - a_1} \left(X_{gy} - \frac{a_1 + a_2}{2} \right) \right] & a_1 < X_{gy} \leq a_2 \\ 1 & a_2 < X_{gy} \leq a_3 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \left[\frac{\pi}{a_4 - a_3} \left(X_{gy} - \frac{a_3 + a_4}{2} \right) \right] & a_3 < X_{gy} \leq a_4 \end{cases} \quad (4)$$

$$A_3(X_{gy}) = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \left[\frac{\pi}{a_4 - a_3} \left(X_{gy} - \frac{a_3 + a_4}{2} \right) \right] & a_3 < X_{gy} \leq a_4 \\ 1 & a_4 < X_{gy} \leq a_5 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \left[\frac{\pi}{a_6 - a_5} \left(X_{gy} - \frac{a_5 + a_6}{2} \right) \right] & a_5 < X_{gy} \leq a_6 \end{cases} \quad (5)$$

$$A_4(X_{gy}) = \begin{cases} 0 & X_{gy} \leq a_5 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \left[\frac{\pi}{a_6 - a_5} \left(X_{gy} - \frac{a_5 + a_6}{2} \right) \right] & a_5 < X_{gy} \leq a_6 \\ 1 & X_{gy} > a_6 \end{cases} \quad (6)$$

其中, X_{gy} 为子证据体的归一化数值; $A_1(X_{gy})$ 、 $A_2(X_{gy})$ 、 $A_3(X_{gy})$ 、 $A_4(X_{gy})$ 分别为变压器油纸绝缘在状态 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 下的隶属度; a_1 — a_6 为变压器在各类绝缘状态下的边界值, 通常采用均分处理^[13], 则 a_1 — a_6 的值分别为 0.1、0.3、0.4、0.6、0.7、0.9, 与之相对应的 S_1 — S_4 的范围分别为 [0, 0.3]、[0.1, 0.6]、[0.4, 0.9]、[0.7, 1]。

表 1 变压器现场测试特征量参数及实际绝缘状态的部分统计

Table 1 Site measurements of transformer characteristic parameters and actual insulation state

变压器	U_{\max}/V	t_{coln}/s	$S_r/(V \cdot s^{-1})$	\bar{t}_{peak}/s	$R_g/G\Omega$	$N/\text{条}$	W_{rmax}/J	t_{rmax}/s	实际运行状态	
									运行年限/a	绝缘状态, 糠醛含量
D ₁	397.31	895.32	98.56	312.03	9.56	7	0.198	45.6	16	老化严重且受潮
D ₂	190.32	2226.87	40.72	403.42	14.24	4	0.124	168.5	7	高压侧轻微老化, 1.65 mg/L
D ₃	269.35	1135.54	111.35	401.65	5.68	6	0.154	171.1	9	低压侧已有老化, 3.54 mg/L
D ₄	172.92	2436.51	30.57	246.35	20.69	4	0.054	192.6	4	绝缘状态良好
D ₅	387.56	902.56	189.11	651.25	8.79	7	0.197	42.8	15	高、低压侧老化严重
D ₆	257.54	1057.65	98.65	389.41	6.87	5	0.098	124.5	3	低压绕组老化, 2.57 mg/L
D ₇	598.36	849.57	114.32	346.52	8.96	7	0.198	42.2	11	老化较严重且受潮
D ₈	162.58	2578.68	85.44	546.23	20.84	4	0.076	204.3	2	绝缘状态良好, 0.036 mg/L
D ₉	409.65	865.26	169.58	298.68	15.68	7	0.168	42.7	14	绝缘老化严重
D ₁₀	276.49	1242.98	189.57	410.52	20.85	6	0.087	115.6	2	低压侧明显老化, 3.01 mg/L

表 2 变压器的标准状态参量表

Table 2 Standard state parameter table of transformer

变压器油纸绝缘状态	U_{rmax}/V	t_{coln}/s	$S_r/(V \cdot s^{-1})$	\bar{t}_{peak}/s	$R_g/G\Omega$	$N/\text{条}$	W_{rmax}/J	t_{rmax}/s
S_1	142.892	2578.689	30.578	216.314	20.854	4	0.043	204.3
S_2	198.651	2036.458	67.589	458.136	11.395	6	0.082	187.6
S_3	249.658	1586.594	115.896	531.684	9.857	7	0.132	99.8
S_4	598.363	849.573	189.573	682.471	4.568	8	0.198	42.8

3 综合赋权法确定子证据体的权重

3.1 改进层次分析法确定主客观权重

a. 建立专家判断矩阵。变压器油纸绝缘状态评估体系如图 5 所示。按照图中的顺序标记多指标参数,邀请该领域多名专家构造判断矩阵,如式(7)所示。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 3 \\ 1/5 & 1 & 1/3 \\ 1/3 & 3 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 3 & 5 \\ 5 & 1 & 5 & 7 \\ 1/3 & 1/5 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/7 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 \\ 3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 \\ 3 & 1 \end{bmatrix}$$

b. 计算单层指标权重。采用式(8)对矩阵的每一列进行规范化处理,则最大特征值对应的特征向量元素可采用式(9)计算,特征向量即为每层单排序指标的权重分配。

$$\bar{B}_{ij} = B_{ij} / \sum_{k=1}^m B_{ik} \quad (8)$$

$$W_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \bar{B}_{ij} \quad (9)$$

其中, B_{ij} 为判断矩阵的特征元素; \bar{B}_{ij} 为规范化后的矩阵特征元素; W_i 为最大特征值元素,即层次单排序的权重系数; m 为每个层次的指标数目。

最终结果如式(10)所示。

$$W_0 = \begin{bmatrix} 0.6370 \\ 0.1047 \\ 0.2583 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$W_1 = \begin{bmatrix} 0.2195 \\ 0.6194 \\ 0.1090 \\ 0.0521 \end{bmatrix}, \quad W_2 = \begin{bmatrix} 0.25 \\ 0.75 \end{bmatrix}, \quad W_3 = \begin{bmatrix} 0.25 \\ 0.75 \end{bmatrix}$$

c. 根据 $Q_1 = W_0 * [W_1, W_2, W_3]$ (W_0 中 3 个元素分别与 W_1, W_2, W_3 相乘), 计算得到各个子证据体的主观权重系数如式(11)所示。

$$Q_1 = [0.1398 \quad 0.3946 \quad 0.0694 \quad 0.0332 \quad 0.0262 \quad 0.0785 \quad 0.0646 \quad 0.1973] \quad (11)$$

3.2 熵权分析法确定客观权重

熵权分析法是常用的一种客观赋权方法。对于

一个综合指标评价体系,具有 n 个对象、 m 个评价指标,初始数据矩阵 $A = [a_{ij}]$ ($a_{ij} \geq 0$, 其中 $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$), 由于初始数据量纲不同,并且熵中变量的要求取值范围为 $[0, 1]$, 因此,需对初始数据进行无量纲标准化处理。对某个系统中某个指标,其信息熵关系式如式(12)所示。

$$\begin{cases} p_{ij} = a_{ij} / \sum_{j=1}^m a_{ij} \\ S_j = -1 / \left[\ln n \times \sum_{i=1}^n (p_{ij} \ln p_{ij}) \right] \end{cases} \quad (12)$$

其中, p_{ij} 为第 j 个指标下第 i 个评价对象的比重; S_j 为第 j 个指标的信息熵。 S_j 的熵权权重 Q_{2j} 表示为:

$$Q_{2j} = (1 - S_j) / \left(m - \sum_{j=1}^m S_j \right) \quad (13)$$

以表 1 实测的 10 组数据为例,熵权分析客观权重的计算过程为:利用 10 组变压器特征量构建的决策矩阵 A , 并根据表 3 的标准状态参量统计表进行标准化处理,如式(14)所示。

$A =$

$$\begin{bmatrix} 0.45 & 0.02 & 0.57 & 0.79 & 0.30 & 0.25 & 0 & 0.01 \\ 0.90 & 0.79 & 0.93 & 0.59 & 0.59 & 1.00 & 0.47 & 0.77 \\ 0.73 & 0.16 & 0.49 & 0.60 & 0.06 & 0.50 & 0.28 & 0.79 \\ 0.93 & 0.91 & 1.00 & 0.93 & 0.98 & 1.00 & 0.92 & 0.92 \\ 0.46 & 0.03 & 0 & 0.06 & 0.25 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0.74 & 0.12 & 0.57 & 0.62 & 0.14 & 0.75 & 0.64 & 0.50 \\ 0 & 0 & 0.47 & 0.72 & 0.26 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0.95 & 1.00 & 0.65 & 0.29 & 1.00 & 1.00 & 0.78 & 1.00 \\ 0.41 & 0.01 & 0.12 & 0.82 & 0.68 & 0.25 & 0.19 & 0 \\ 0.70 & 0.22 & 0 & 0.58 & 1.00 & 0.50 & 0.71 & 0.45 \end{bmatrix} \quad (14)$$

利用式(12)计算各评价对象的信息熵。各评价对象第 j 个指标的熵值 $S = \{0.9355, 0.6974, 0.8574, 0.9527, 0.8940, 0.9330, 0.7997, 0.7663\}$ 。

根据式(13)计算客观权重分布,可得熵权分析法结果 $Q_2 = [0.0554 \quad 0.2600 \quad 0.1225 \quad 0.0407 \quad 0.0911 \quad 0.0575 \quad 0.1720 \quad 0.2007]$ 。

3.3 最优综合赋权法

考虑到主、客观赋权法确定权重的优缺点,本文采用一种基于离差平方和的最优综合赋权法,其将熵权法与改进的层次分析法进行有效结合,充分利用了 2 种赋权法的优点并弥补了它们的不足^[13-14],现假设



图 5 变压器油纸绝缘状态评估体系

Fig.5 Insulation state evaluation system of transformer oil-paper

某个多属性决策问题有 m 种赋权方法对其赋值, 则权向量为:

$$\mathbf{W}_m = [w_1 \ w_2 \ \cdots \ w_m]^T \quad (15)$$

其中, $w_j \geq 0, \sum_{j=1}^m w_j = 1$ 。

综合各种赋权法可得权重:

$$\mathbf{W}_c = \theta_1 w_1 + \theta_2 w_2 + \cdots + \theta_m w_m \quad (16)$$

其中, \mathbf{W}_c 为综合赋权向量; $w_i (i=1, 2, \dots, m)$ 为第 i 种方法确定的权重系数; $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$ 为组合系数。设 $v_i(\mathbf{W}_c)$ 表示第 i 个决策方案与其他决策方案评价值的离差平方和^[15], 如式(17)所示。

$$v_i(\mathbf{W}_c) = \sum_{i=1}^m \left[\sum_{j=1}^n (b_{ij} - b_{ij}) w_{cj} \right]^2 \quad (17)$$

其中, $i=1, 2, \dots, m; b_{ij}$ 为第 i 个方案对第 j 个属性的规范化属性值; w_{cj} 为上述综合赋权向量矩阵 \mathbf{W}_c 的第 j 个元素。根据多属性决策理论可知, 多属性指标越离散, 则离差平方和越大, 综合评价赋权的效果越

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m \sum_{i_1=1}^m (b_{i1} - b_{i_11})(b_{i1} - b_{i_11}) & \sum_{i=1}^m \sum_{i_1=1}^m (b_{i1} - b_{i_11})(b_{i2} - b_{i_12}) & \cdots & \sum_{i=1}^m \sum_{i_1=1}^m (b_{i1} - b_{i_11})(b_{in} - b_{i_1n}) \\ \sum_{i=1}^m \sum_{i_1=1}^m (b_{i2} - b_{i_12})(b_{i1} - b_{i_11}) & \sum_{i=1}^m \sum_{i_1=1}^m (b_{i2} - b_{i_12})(b_{i2} - b_{i_12}) & \cdots & \sum_{i=1}^m \sum_{i_1=1}^m (b_{i2} - b_{i_12})(b_{in} - b_{i_1n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^m \sum_{i_1=1}^m (b_{in} - b_{i_1n})(b_{i1} - b_{i_11}) & \sum_{i=1}^m \sum_{i_1=1}^m (b_{in} - b_{i_1n})(b_{i2} - b_{i_12}) & \cdots & \sum_{i=1}^m \sum_{i_1=1}^m (b_{in} - b_{i_1n})(b_{in} - b_{i_1n}) \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 15.9762 & 16.9956 & 9.2020 & -1.3700 & 9.4116 & 15.4950 & 15.4154 & 19.6184 \\ 16.9956 & 29.5848 & 17.7860 & -0.5960 & 18.1968 & 22.4100 & 19.3492 & 25.6732 \\ 9.2020 & 17.7860 & 22.1720 & 6.4340 & 2.7580 & 15.6500 & 9.4740 & 16.6540 \\ -1.3700 & -0.5960 & 6.4340 & 11.9280 & 1.8620 & 0.2500 & 1.9500 & -0.2240 \\ 9.4116 & 18.1968 & 2.7580 & 1.8620 & 24.9488 & 11.0600 & 16.1152 & 11.8172 \\ 15.4950 & 22.4100 & 15.6500 & 0.2500 & 11.0600 & 20.1250 & 17.9650 & 22.6900 \\ 15.4154 & 19.3492 & 9.4740 & 1.9500 & 16.1152 & 17.9650 & 22.2378 & 21.5488 \\ 19.6184 & 25.6732 & 16.6540 & -0.2240 & 11.8172 & 22.6900 & 21.5488 & 30.8928 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\mathbf{W} = [\mathbf{Q}_1 \ \mathbf{Q}_2]^T = \begin{bmatrix} 0.1398 & 0.3946 & 0.0694 & 0.0332 & 0.0262 & 0.0785 & 0.0646 & 0.1973 \\ 0.0554 & 0.2600 & 0.1225 & 0.0407 & 0.0911 & 0.0575 & 0.1720 & 0.2007 \end{bmatrix}^T \quad (21)$$

d. 计算得到 $\mathbf{W}^T \mathbf{B} \mathbf{W} = \begin{bmatrix} 20.3633 & 19.1492 \\ 19.1492 & 18.1945 \end{bmatrix}$, 可

得特征根 $\lambda_{\max} = 38.4588$, 它所对应的单位化向量为 $\xi^* = [0.7268 \ 0.6868]^T$ 。

根据 $\mathbf{W}_c^* = \mathbf{W} \xi^*$ 计算最优组合赋权系数:

$$\mathbf{W}_c^* = 0.7268 \mathbf{Q}_1 + 0.6868 \mathbf{Q}_2 = [0.1397 \ 0.4647 \ 0.1346 \ 0.0521 \ 0.0816 \ 0.0965 \ 0.1651 \ 0.2812]$$

进行归一化处理得最后的最优组合赋权系数:

$$\mathbf{W}_c^* = [0.0986 \ 0.3285 \ 0.0950 \ 0.0367 \ 0.0576 \ 0.0682 \ 0.1166 \ 0.1986]$$

4 融合综合赋权法和证据理论的评价体系

在上述特征量提取及综合分析权重系数的基础上, 引入证据理论用于评估变压器油纸绝缘状态。证据理论是一种动态的综合评估方法, 融合多维信息以得到准确的诊断结果。具体评估系统流程见图 6。

好。故可将多种决策方法综合赋权系数分配问题转化为如下目标函数的最优化问题:

$$\max(f(\xi)) = \xi^T \mathbf{W}^T \mathbf{B} \mathbf{W} \xi \quad (18)$$

其中, $\xi = [\theta_1 \ \theta_2 \ \cdots \ \theta_m]^T$; $\mathbf{W} = (w_{ij})_{n \times m}$; \mathbf{B} 为多属性决策的非负定矩阵, 其计算如式(19)所示。

根据矩阵理论, 只需要求得 $\mathbf{W}^T \mathbf{B} \mathbf{W}$ 的最大特征根 λ_{\max} , 即可以得到最大特征根所对应的单位化特征向量 ξ^* 为最优解, 经过归一化处理可以得到赋权系数。

以表 2 实测数据及 3.1、3.2 节的结果为例, 计算综合赋权权重系数, 步骤如下。

a. 利用 10 台变压器原始数据得到决策矩阵 \mathbf{A} , 如式(14)所示。

b. 根据式(19)计算多属性决策矩阵的非负定方阵 \mathbf{B} , 计算结果如式(20)所示。

c. 由 3.1 和 3.2 节的主客观权重计算结果, 构建权系数向量 \mathbf{W} 如式(21)所示。

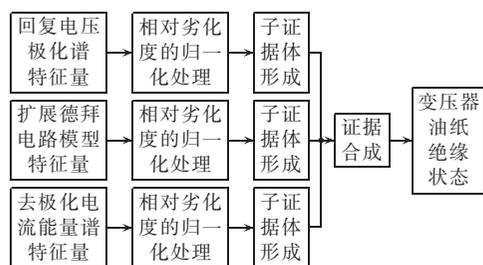


图 6 变压器油纸绝缘评估系统

Fig.6 Transformer oil-paper insulation evaluation system

假设现有一个模糊的问题待解决, 设 Θ 为识别框架, 诊断结果所涉及到的命题均为该集合的子集。假设集函数 $y: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$, 当这个集函数满足 $y(B) = 0, m(B) = 1$ 时, 认为完成识别框架 Θ 的子集构建, 而每个元素均满足 $\forall B \subset \Theta, m(B)$, 则称为集合 B 的基本信度值。子证据体的融合可按照式(22)进行合成^[13]。

$$(m_1 \oplus \dots \oplus m_n)(B) = \left(\sum_{B_1 \cap \dots \cap B_n = B} m_1(B_1) \times \dots \times m_n(B_n) \right) \div \left(1 - \sum_{B_1 \cap \dots \cap B_n = \emptyset} m_1(B_1) \times \dots \times m_n(B_n) \right) \quad (22)$$

其中, $m_1(B)$ 、 \dots 、 $m_n(B)$ 代表识别框架 Θ 的 n 个基本概率分配函数。

据此,可以归纳出应用该方法诊断变压器油纸绝缘状态的具体步骤如下。

a. 利用回复电压法现场测试待诊变压器得到各个子证据体的实测数据,并统计分析建立的 4 种标准状态参量表,定量分析且进行相对归一化处理,实现无量纲化。

b. 咨询多名该领域专家,根据第 3 节步骤采用综合赋权法分析计算各个子证据体的权重系数。

c. 分别按照上述隶属度公式计算得到待诊变压器各个油纸绝缘状态的置信度分布值,并依据第 3 节所述的权重系数进行加权处理。

d. 根据式(21)进行证据合成,得到各个状态区间的置信度值。置信度越大,代表该待诊变压器处于此绝缘状态的可能性越大,由此可融合多指标准确评估待诊断变压器的绝缘状态。

5 实例分析

根据表 2 给出的 10 台变压器的实测数据分析可知,油纸绝缘系统老化对每个特征量的敏感性不同,单一特征量给出的结果可能与其他特征量的诊断结果相悖。倘若采用单一特征量的评估结果,则准确性较难保证。为了验证本文提出的综合诊断方法的准确性,对第 2 节中的变压器 $D_1 \sim D_4$ 进行详细的分析计算并进一步对比单一特征量诊断和综合诊断的准确性差异,结果如表 3 所示。由表 3 可知,对油纸绝缘变压器 D_1 进行老化诊断,其中 U_{rmax} 、 t_{cdom} 、 N 、 W_{rmax} 及 t_{rmax} 的诊断结果为“绝缘老化严重”; S_r 、 R_g 及 \bar{t}_{peak} 的诊断结果为“绝缘状态中等”。此时,根据单一特征量无法准确辨识油纸绝缘系统的绝缘状况。

现采用综合赋权法和证据理论融合的综合诊断方法评估 4 台变压器的油纸绝缘老化状态。4 台变压器的现场实测特征量参数已由表 2 给出,现对 4 台待诊变压器的子证据体,按照式(1)和式(2)计算相对劣化度,进行归一化处理后,按照式(3)~(6)计算各自独立子证据体对应各个变压器绝缘状态的隶属度,再应用综合赋权法确定并计算权重系数,融合子

表 3 变压器 D_1 应用各个单一特征量的诊断结果

Table 3 Diagnostic results by single characteristic parameter for transformer D_1

单一特征量	诊断结果	单一特征量	诊断结果
U_{rmax}	绝缘老化严重	t_{cdom}	绝缘老化严重
S_r	绝缘状态中等	\bar{t}_{peak}	绝缘状态中等
R_g	绝缘状态中等	N	绝缘老化严重
W_{rmax}	绝缘老化严重	t_{rmax}	绝缘老化严重

证据体隶属度数据,综合分析得到 4 台待诊变压器的各个绝缘状态隶属度置信度,如表 4 所示。

表 4 4 台变压器的综合置信度

Table 4 Comprehensive confidence levels of four transformers

变压器	置信度				$m(\Theta)$	诊断结果
	S_1	S_2	S_3	S_4		
D_1	0.0365	0.0107	0.1288	0.7912	0.0328	绝缘老化严重
D_2	0.0109	0.1470	0.7357	0.0928	0.0136	绝缘轻微老化
D_3	0.0162	0.7583	0.1813	0.0151	0.0291	绝缘状态中等
D_4	0.6375	0.1984	0.0964	0.0418	0.0259	绝缘状态良好

4 台待诊变压器综合分析的诊断结果与表 1 中变压器的实际绝缘状态相符。以变压器 D_1 为例,经过加权计算得到各个绝缘状态的置信度分别为 0.0365、0.0107、0.1288、0.7912,不确定度为 0.0328。绝缘老化严重(S_4)所对应的置信度最大,且最大值为 0.7912,与其他老化状态的置信度差值都在 0.5 以上,且不确定度小于 0.1,诊断结果可信度较高。

6 结论

现阶段,国内外学者对单一时域特征量的提取已有一定研究,但仍存在数据库较少、定量分析困难、评估诊断特征量单一等缺陷。本文提出一种新的变压器油纸绝缘老化状态综合评估方法,该方法有如下优点:

a. 根据 60 多台变压器油纸绝缘老化实际检测数据所建立的包含 8 个时域特征量的标准状态参量表,能够为待诊变压器油纸绝缘老化试验数据的定量分析提供参考依据;

b. 结合变压器现场检测数据,提出应用综合赋权法确定时域特征量的综合权重评估系数,充分利用 2 种主客观赋权法的优点,并且弥补了 2 种赋权法存在的不足;

c. 提出融合综合赋权法和证据理论的变压器油纸绝缘状态综合评估体系,相比单一特征量诊断,其准确性有一定程度的提高,可为今后变压器油纸绝缘老化诊断研究提供新的思路。

参考文献:

[1] 陈伟根,谢波,龙震泽,等. 基于小波包能量熵的油纸绝缘气隙放电阶段识别[J]. 中国电机工程学报,2016,36(2):563-569.
CHEN Weigen,XIE Bo, LONG Zhenze, et al. Stage identification in air-gap discharge of oil-impregnated paper insulation based on wavelet packet energy entropy[J]. Proceedings of the CSEE, 2016,36(2):563-569.

[2] DEY D, CHATTERJEE B, CHAKRAVORTI S, et al. Importance of denosing in dielectric response measurements of transformer insulation; an uncertainty analysis based approach[J]. Measurement, 2010,43:54-66.

[3] 廖瑞金,孙会刚,袁泉,等. 采用回复电压法分析油纸绝缘老化特征量[J]. 高电压技术,2011,37(1):136-142.
LIAO Ruijin, SUN Huigang, YUAN Quan, et al. Analysis of oil-

- paper insulation aging characteristics using recovery voltage method[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(1):136-142.
- [4] 邹阳, 蔡金锭. 油纸绝缘变压器时域极化谱特性实验分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12):307-313.
- ZOU Yang, CAI Jinding. Experimental analysis on time-domain polarization spectrum of oil-paper insulation transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12):307-313.
- [5] 江修波, 黄彦婕, 赖祥生. 改进蚁群算法及其在变压器绝缘介质响应电路参数计算中的应用[J]. 高电压技术, 2011, 37(8):1982-1988.
- JIANG Xiubo, HUAN Yanjie, LAI Xiangsheng. Improved ant colony algorithm and its application in parameter identification for dielectric response equivalent circuit of transformer[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(8):1982-1988.
- [6] 黄云程, 蔡金锭. 油纸绝缘系统回复电压函数建模及拓扑结构辨识[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3):149-153.
- HUANG Yuncheng, CAI Jinding. Return voltage function modeling and topology recognition of oil-paper insulation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3):149-153.
- [7] 刘捷丰, 廖镭金, 吕彦冬, 等. 电力变压器油纸绝缘含水量定量评估的时域介电特征量[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1):212-219.
- LIU Jiefeng, LIAO Ruijin, LÜ Yandong, et al. Time domain dielectric characteristics for quantitative assessment of moisture content in transformer oil-paper insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1):212-219.
- [8] 王晓剑, 吴广宁, 李先浪, 等. 酸值对变压器油纸绝缘系统回复电压参数影响规律研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12):133-139.
- WANG Xiaojian, WU Guangning, LI Xianlang, et al. Influence of acid value on recovery voltage parameters of transformer oil-paper insulation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12):133-139.
- [9] 齐波, 魏振, 高怡, 等. 不同比例交直流复合电场作用下油纸绝缘内部气隙放电的特征[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12):3161-3169.
- QI Bo, WEI Zhen, GAO Yi, et al. Discharge characteristics of internal gas-gap defect in oil-paper insulation under different proportion of AC and DC combined voltages[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12):3161-3169.
- [10] 王有元, 高竣, 刘捷丰, 等. 变压器油纸绝缘老化与水分含量评估频域介电特征量[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22):215-221.
- WANG Youyuan, GAO Jun, LIU Jiefeng, et al. Aging and moisture evaluation characteristic parameters for oil-paper insulation of transformer using frequency dielectric spectroscopy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22):215-221.
- [11] 黄云程, 蔡金锭. 应用去极化能量谱评估变压器绝缘老化受潮状态[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(1):53-59.
- HUANG Yuncheng, CAI Jinding. Diagnosis of insulation condition of transformers by using depolarization energy spectrum[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(1):53-59.
- [12] LELEKAKIS N, GUO Wenyu, MARTIN D, et al. A field study of aging in paper-oil insulation systems[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2012, 28(1):12-19.
- [13] 贾清泉, 石磊磊, 王宁, 等. 基于证据理论和信息熵的消弧线圈接地电网融合选线方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6):191-197.
- JIA Qingquan, SHI Leilei, WANG Ning, et al. A fusion method for ground fault line detection in compensated power networks based on evidence theory and information entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6):191-197.
- [14] 李冰, 朱田, 张玉廷, 等. 基于层次分析法的船舶舵机等效性分析[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2):434-440.
- LI Bing, ZHU Tian, ZHANG Yuting, et al. The equivalence analysis of ship rudder based on analytic hierarchy process[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(2):434-440.
- [15] 张勇昌, 杨永国, 罗金辉. 基于优化组合赋权的煤层气开发潜能评价[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(2):102-108.
- ZHANG Yongchang, YANG Yongguo, LUO Jinhui, et al. Evaluation on coal bed methane development potential based on optimized combined weighting[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(2):102-108.

作者简介:



陈汉城

陈汉城(1992—),男,福建永春人,硕士研究生,主要研究方向为电气设备绝缘故障诊断(E-mail:530795611@qq.com);

蔡金锭(1954—),男,福建晋江人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统故障诊断(E-mail:1282112940@qq.com)。

Synthetic insulation state evaluation based on multiple time-domain characteristic parameters for transformer oil-paper

CHEN Hancheng, CAI Jinding

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The return voltage polarization spectrum is analyzed based on the results of field test by RVM5461 tester, the parameters of transformer relaxation mechanism are analyzed based on the extended Debye model, the characteristic variables of depolarization current energy spectrum, which reflect the aging condition of transformer oil-paper insulation, are analyzed, and a standard state parameter table is established based on the measured data of multiple transformers. A comprehensive weighting method combining subjective weighting and objective weighting is adopted to determine the weights of different time-domain characteristic parameters and a comprehensive evaluation system combining multi-index evaluation method and evidence theory is established for assessing the insulation state of transformer oil-paper. The results of case test show the effectiveness of the proposed method.

Key words: power transformers; oil-paper insulation; recovery voltage method; depolarization current method; standard state parameter table; evidence theory; state evaluation