

基于模糊和证据理论的变压器本体绝缘状态评估方法

赵云峰¹, 张永强¹, 聂德鑫², 宋友², 蔡伟²

(1. 山西省电力公司, 山西 太原 030001; 2. 国网电力科学研究院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 对电力设备运行状态进行准确可靠的评估是实施电力系统状态检修的前提和基础。以 500 kV 油浸式变压器为研究对象, 构建了基于模糊和证据理论的变压器本体状态评估模型。选取预防性试验中具有代表性的参数为状态评估的指标, 参考评价指标的出厂值和越限值进行指标归一化, 利用模糊评判方法确定各个指标相对于不同状态评估等级的隶属度。将这些指标分为油中溶解气体、油化试验和电气试验三个子证据体, 利用证据理论对三个子证据体进行信息合成, 进而对变压器本体的运行状态进行评估。通过对某台 500 kV 变压器数据的实例分析验证了该评估模型应用于变压器本体状态评估中的有效性。该评估模型思路清晰, 不需要大量的历史数据, 为变压器状态评估提供了一种新方法。

关键词: 电力变压器; 模糊评判; 证据理论; 状态评估

Application of fuzzy and evidence theory in power transformers condition assessment

ZHAO Yun-feng¹, ZHANG Yong-qiang¹, NIE De-xin², SONG You², CAI Wei²

(1. State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030001, China; 2. State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Power equipment condition assessment is the premise and foundation of power system condition-based maintenance. A power transformer condition assessment method based on fuzzy and evidence theory for 500 kV oil-immersed power transformers is proposed. Some representative parameters in preventive test are chosen as the condition assessment indexes, and all of these indexes are normalized according to ex-factory value and off-limit value. The membership to different condition assessment level of the assessment indexes is determined by fuzzy evaluating method. All the assessment indexes are divided into three sub-evidences, which are DGA, oil test and electrical test. Set information composition of these sub-evidences based on evidence theory, and then the power transformers condition assessment are determined by the information composition results. The effectiveness of the transformer condition assessment model is verified by example analysis of 500 kV power transformer parameters. The assessment model is clear and does't need a lot of historical data, which offers a new way for power transformer condition assessment.

This work is supported by Science and Technology Program of Shanxi Power Corporation (No. KJ [2011] 333) and National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2009CB724507).

Key words: power transformer; fuzzy evaluating; evidence theory; condition assessment

中图分类号: TM41 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)23-0057-06

0 引言

随着我国输变电电压等级和电网容量的不断提升, 电力系统的安全稳定运行工作面临着巨大的挑战。作为输变电系统的核心设备^[1-2], 电力变压器运行状态的优良直接影响着整个电力系统的安全运行水平。对电力变压器的运行状态进行准确可靠的评

估, 发现设备的潜在危险, 降低变压器故障发生的概率, 有助于提高整个电网安全运行水平。

由文献[3]给出的变压器状态评判指标可知, 电力变压器状态信息量众多, 这些状态信息量从不同层面反映了变压器的运行状态。而由于测量的不精确、评判标准的不完善, 造成变压器状态评价存在很大的不确定性。基于此, 国内外众多学者对变压器状态评估方法进行了研究。贝叶斯网络^[4-5]评价法综合考虑变压器的历史、当前和未来状态, 由贝叶斯网络确定变压器的综合状态。但该评价方法需要

基金项目: 山西省电力公司科技项目 (KJ [2011] 333); 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (2009CB724507)

大量的历史数据作为贝叶斯网络的训练样本。支持向量机^[6-8]评估方法具有良好的拟合与泛化能力,能映射高度非线性输入、输出功能,可以很好地逼近状态信息到变压器运行状态的映射。该方法同样需要一定的样本进行训练,且对于评价状态边界的处理过于硬化。灰靶理论^[9]在没有标准故障模式下对变压器状态分级,将灰靶贡献度作为状态量的权值。模糊综合评判法^[10-12]将每个评价指标经模糊评判的规范化处理后,得出隶属度向量,再对所有指标的隶属度向量进行合成运算,得出综合评定结果。此外,还有文献通过物元理论^[13]、云理论^[14]、集对分析^[15]、核向量空间^[16]等方法对变压器的状态进行评估。这些方法的应用极大地促进和发展了变压器状态评估的研究,也在实际应用中发挥了重要作用。

证据理论^[17-18]是一种重要的不确定性推理方法,既强调证据的客观性又重视证据估计的主观性。其通过证据的积累,不断地缩小假设集,有效地融合不同的信息,具有较强的决策处理能力。本文以 500 kV 油浸式变压器为研究对象,将变压器状态评估看成一个多属性决策问题,选取预防性试验中具有代表性的参数作为变压器本体状态评估参数,将这些评估参数按照特性分成三个子证据体,建立了基于模糊和证据理论的变压器本体状态评估模型。

1 评价指标的选取

相关行业标准将变压器状态评估分为本体、套管、分接开关、冷却系统以及非电量保护五部分分别进行。本文针对变压器本体绝缘状态进行评估。其他部件状态评估方法可类似参考。

评价指标的选取过程中应该遵循以下原则:(1)高敏感性,即设备状态的微弱变化应该能够引起状态量的较大变化;(2)高度可靠性,评价指标的变化能够准确反映设备状态的变化;(3)实用性,评价指标应便于检测;(4)各评价指标之间应该尽可能相互独立,从不同方面反映变压器的特征。基于此,本文选取变压器本体油中溶解气体、油化试验和电气试验的部分状态量作为本文的评价指标。如表 1 所示。

2 指标的量化及状态的划分

2.1 评价指标归一化

电力变压器本体是一个非常复杂的系统。各评价指标从不同侧面反映了变压器的运行状态,而不同评价指标的单位量度各不相同。在综合利用这些评价指标对变压器本体状态进行评估之前,需要对

表 1 变压器本体状态评价指标

Table 1 Condition assessment indexes of power transformers

变压器本体状态	油中溶解气体	总烃含量
		氢气含量
		乙炔含量
	油化试验	油介损
		油击穿电压
		油中水分
		糠醛
	电气试验	直阻不平衡率
		绕组介损
		极化指数
		铁芯接地电流

评价指标进行归一化处理。本文采用相对裂化度来对评价指标进行归一化。对于指标数值越小越好的评价指标,如油中氢气含量等,采用式(1)进行相对裂化度的计算。

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

对于指标数值越大越好的评价指标,如油击穿电压等,采用式(2)进行相对裂化度的计算。

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

式(1)、式(2)中: x_r 为评价指标 e_r 的实际测量值; x_{nr} 为归一化后的值; x_0 和 x_1 为归一化的阈值, x_1 由预防性试验规程确定^[19-20],表示评价指标实际测量值越过规定值应引起注意。 x_1 为评价指标的出厂值。根据变压器评价导则和现场调研数据,500 kV 变压器本体各评价指标的阈值如表 2 所示。

表 2 状态评价指标归一化阈值

Table 2 Normalized threshold of condition assessment indexes

评价指标	x_0	x_1
总烃含量/(μ L/L)	50	150
氢气含量/(μ L/L)	30	150
乙炔含量/(μ L/L)	0	5
油介损/%	0	2
油击穿电压/kV	70	50
油中水分/(mg/L)	0	15
糠醛/(mg/L)	0	4
直阻不平衡率/%	0	2
绕组介损/%	0	0.6
极化指数	2	1.5
铁芯接地电流/A	0	0.1

2.2 状态等级划分

变压器状态等级通常划分为正常状态 S1、注意状态 S2、异常状态 S3 和严重状态 S4 四种状态等级^[17]。正常状态表示变压器各评价指标处于稳定且在规程规定的警示值、注意值以内, 可以正常运行; 注意状态是指单项或多项评价指标变化趋势朝接近标准限值方向发展, 但未超过标准限值, 可继续运行, 应加强监视; 异常状态是单项评价指标变化较大, 已超过或略微超过标准限值, 应监视运行, 适时安排检修; 严重状态表示单项重要评价指标严重超过标准限值, 需尽快安排停电检修。

3 应用模糊和证据理论的变压器本体状态评估模型

根据第 1 节评价指标选定方法, 将变压器本体评价指标分成三个子证据体, 即: 油中溶解气体(子证据体 1), 油化试验(子证据体 2)和电气试验(子证据体 3)的部分状态量。每个子证据体由若干各评价指标构成(表 1)。基于模糊和证据理论的变压器本体状态评估模型的工作步骤为: 1) 获取各个评价指标的实际值并归一化, 利用模糊理论确定各评价指标对于变压器状态的隶属度; 2) 求出各子证据体对于变压器状态的隶属度; 3) 利用证据理论对各子证据体进行证据推理, 求得变压器本体的评估状态。评估模型的具体工作流程见图 1。

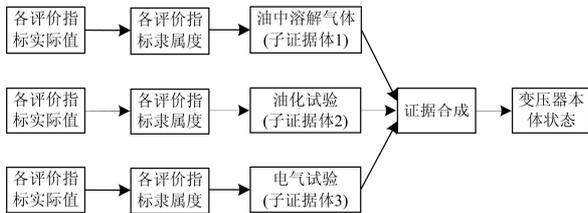


图 1 变压器本体状态评估模型

Fig. 1 Power transformers condition assessment model

3.1 评价指标隶属度

本文利用模糊评判方法来确定各评价指标的状态, 克服其他评判方法对于评价状态边界处理过于硬化的问题。根据模糊数学理论, 评价指标不同状态等级的信息可以用隶属度函数来表示。常用的隶属度函数有三角形隶属函数、梯形隶属函数、半梯与半岭相结合的隶属函数。三角形隶属函数在确定状态等级时比较粗略, 梯形隶属函数容易造成信息丢失。本文选用半梯与半岭相结合的隶属函数来确定各评价指标不同状态等级的信息, 隶属函数定义为

$$\mu_1(x_{nr}) = \begin{cases} 1 & x_{nr} \leq a_1 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin\left[\frac{\pi}{a_2 - a_1} \left(x_{nr} - \frac{a_1 + a_2}{2}\right)\right] & a_1 < x_{nr} \leq a_2 \\ 0 & x_{nr} > a_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_2(x_{nr}) = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin\left[\frac{\pi}{a_2 - a_1} \left(x_{nr} - \frac{a_1 + a_2}{2}\right)\right] & a_1 < x_{nr} \leq a_2 \\ 1 & a_2 < x_{nr} \leq a_3 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin\left[\frac{\pi}{a_4 - a_3} \left(x_{nr} - \frac{a_3 + a_4}{2}\right)\right] & a_3 < x_{nr} \leq a_4 \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_3(x_{nr}) = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin\left[\frac{\pi}{a_4 - a_3} \left(x_{nr} - \frac{a_3 + a_4}{2}\right)\right] & a_3 < x_{nr} \leq a_4 \\ 1 & a_4 < x_{nr} \leq a_5 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin\left[\frac{\pi}{a_6 - a_5} \left(x_{nr} - \frac{a_5 + a_6}{2}\right)\right] & a_5 < x_{nr} \leq a_6 \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_4(x_{nr}) = \begin{cases} 0 & x_{nr} \leq a_5 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin\left[\frac{\pi}{a_6 - a_5} \left(x_{nr} - \frac{a_5 + a_6}{2}\right)\right] & a_5 < x_{nr} \leq a_6 \\ 1 & x_{nr} > a_6 \end{cases} \quad (6)$$

式(3)~式(6)中: x_{nr} 为评价指标 e_r 归一化后的值; $\mu_1(x_{nr}) \sim \mu_4(x_{nr})$ 为评价指标 e_r 关于四种不同状态等级 S1~S4 的隶属度; $a_1 \sim a_6$ 为不同状态等级间的边界值。由于没有先验知识, 因此本文对于不同状态的隶属度边界采用均分化处理, 即状态 s1~s4 的范围分别为 0~0.3, 0.1~0.6, 0.4~0.9, 0.7~1, 则 $a_1 \sim a_6$ 取值分别为 1/10、3/10、4/10、6/10、7/10 和 9/10, 如图 2 所示。

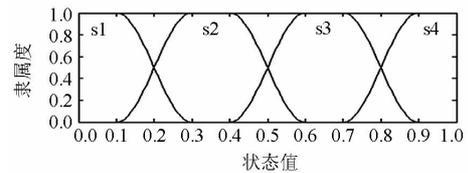


图 2 评价指标隶属度取值

Fig. 2 Membership to different condition assessment

3.2 子证据体隶属度

由式(3)~式(6)可确定评价指标 e_r 对于四种不同状态等级的隶属度 $\mu_1(x_{nr}) \sim \mu_4(x_{nr})$ 。子证据体隶属度的数学表达式为

$$\mu_i(E_j) = \sum_{r=1}^m \mu_r(x_{nr}) \omega(x_r) \quad (7)$$

式中: $\mu_i(E_j)$ 为子证据体 j 关于状态等级 i 的隶属度; $\mu_r(x_{nr})$ 为子证据体 j 中评价指标 e_r 关于状态等级 i 的隶属度; $\omega(x_r)$ 为指标 e_r 的权重。各指标的权重采用专家决策法确定。本文中变压器状态划分为四个等级, 因此 i 的取值为 1、2、3、4。评估模型中共有 3 个子证据体, 则 j 的取值为 1、2、3。 m 为子证据

体中评价指标的数量, 由表 1 可得评估模型中各子证据体中评价指标数量分别为 3、4、4。各子证据体内评价指标的权重通过专家系统打分得出。分别聘请 10 个变压器状态评价方面的专家对各子证据体内的指标进行权重打分, 再通过专家系统对权重进行归一化处理。各子证据体中评价指标 e_r 的权重为

- 油中溶解气体: {0.2697, 0.1780, 0.5223}
- 油化试验: {0.1710, 0.1964, 0.1964, 0.4362}
- 电气试验: {0.2828, 0.1720, 0.1720, 0.3732}

3.3 证据合成理论

证据合成理论又称 DS 理论, 是一种不确定性推理和处理方法。证据合成理论的基础是证据的合并和信任函数的更新, 其对不确定性的描述通过识别框架、基本信任分配函数、信任函数、似真度、信度区间等概念来描述^[21]。

3.3.1 基本定义

证据合成理论的基本定义如下:

定义 1: 设 Θ 为识别框架, 基本信任分配函数 m 是一个从集合 $2^\Theta \rightarrow [0,1]$ 的映射, $A \subseteq \Theta$ 。若满足 ① $m(\emptyset) = 0$; ② $\sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1$, 则称 $m(A)$ 为事件 A 的基本信任分配函数, 它表示证据对于 A 的信任程度。满足 $m(A) > 0$ 的所有集合称为焦点, 框架 Θ 中所有焦点的并集称为内核。

定义 2: 称由 $\forall A \subseteq \Theta$, $Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B)$ 所定义的函数 $Bel: 2^\Theta \rightarrow [0,1]$ 为 Θ 上的信度函数, 表示对 A 为真的信任程度。

定义 3: 设 $Bel: 2^\Theta \rightarrow [0,1]$ 为 Θ 上的信度函数, 对 $\forall A \subseteq \Theta$; 称由 $Pls(A) = 1 - Bel(\bar{A})$ 所定义的函数 $Pls: 2^\Theta \rightarrow [0,1]$ 为 Bel 的似真度函数。

定义 4: 对于 $\forall A \subseteq \Theta$, 称区间 $[Bel(A), pls(A)]$ 为 A 的信度区间。

3.3.2 证据合成

考虑不同子证据体的相对重要性不同, 引入置信度系数 α 来修正证据合成前的信度分配。

$$\begin{cases} m'(A) = \alpha m(A) \\ m'(\Theta) = 1 - \alpha \end{cases} \quad (8)$$

式中: $m'(A)$ 为修正后的信度函数值; $m'(\Theta)$ 为不确定证据的信度分配。

给定同一个识别框架内不同证据体的信度函数, 利用合成法则可以计算出合成后的信度函数。基本合成法则为

$$(m_1 \oplus \dots \oplus m_n)(A) = \frac{\sum_{A_1 \cap \dots \cap A_n = A} m_1(A_1) \times \dots \times m_n(A_n)}{1 - \sum_{A_1 \cap \dots \cap A_n = \emptyset} m_1(A_1) \times \dots \times m_n(A_n)} \quad (9)$$

确定不同子证据体合成后的信度函数后, 利用相应的推理规则进行评估目标判定, 基本推理规则为

$$\begin{cases} m(F_i) - m(F_j) > \varepsilon_1 \\ m(\Theta) < \varepsilon_2 \\ m(F_i) > m(\Theta) \end{cases} \quad (10)$$

式中: F_i 为评估得到的状态等级; $m(F_i)$ 为评估结果的信度函数值; $m(F_j)$ 为其他状态的信度函数值; $m(\Theta)$ 为不确定信度函数值。 ε_1 和 ε_2 为根据专家经验和技术标准预先设定的阈值。本文 ε_1 和 ε_2 取值分别为 0.5 和 0.1。

4 实例分析

评估对象为湖北省电力公司某变电站型号为 ODFPS-250000/500 的变压器, 选取其在 2010 年 5 月的预防性试验数据对变压器本体的状态进行评估。其油中溶解气体, 油化试验和电气试验各项指标的实际值如表 3 所示。

表 3 变压器预防性试验数据

子证据体	评价指标	测量值
油中溶解气体	总烃含量/(μ L/L)	70.1
	氢气含量/(μ L/L)	60.5
	乙炔含量/(μ L/L)	3.6
油化试验	油介损/%	0.5
	油击穿电压/kV	67.1
	油中水分/(mg/L)	9
	糠醛/(mg/L)	3.01
电气试验	直阻不平衡率/%	1
	绕组介损/%	0.53
	极化指数	1.9
	铁芯接地电流/A	0.065

利用第 2 节中的相对裂化度计算公式和各评价指标的阈值进行指标测量值归一化。再基于模糊评判方法求出每个评价指标对于各状态等级的隶属度, 进而求出每个子证据体对于各状态等级的隶属度, 表 4、表 5 分别为修正前后的各子证据体信度函数值。

表 4 修正前的子证据体信度函数值

Table 4 Belief function values of sub-evidences before modified

证据体	$m(A)$			
	S1	S2	S3	S4
1	0.154 8	0.292 9	0.509 5	0.012 8
2	0.197 9	0.169 5	0.562 5	0.070 1
3	0.086 0	0.227 4	0.517 5	0.169 1

表 5 修正后的子证据体信度函数值

Table 5 Belief function values of sub-evidences after modified

子证据体	$m(\Theta)$	$m(A)$			
		S1	S2	S3	S4
1	0.100 0	0.139 3	0.263 6	0.458 6	0.011 5
2	0.465 3	0.105 8	0.090 6	0.300 8	0.037 5
3	0.170 0	0.071 4	0.188 7	0.429 6	0.140 3

根据式(10)的推理规则, 子证据体 1 最大信度函数值为 0.458 6, 与其他信度函数值之差均小于 ε_1 , 因此通过子证据体 1 的信息无法单独确定变压器本体的运行状态。同理子证据体 2 和 3 均无法单独确定变压器本体的运行状态。对三个子证据体进行证据合成, 得到信度函数值如表 6 所示。

表 6 证据合成后的信度函数值

Table 6 Belief function values after evidence combination

变压器本体	$m(\Theta)$	$m(A)$			
		S1	S2	S3	S4
1&2&3	0.022 2	0.070 5	0.181 6	0.699 0	0.026 7

表 6 是三个子证据体进行证据合成后的信度分配。可以看出, 状态 S3 的信度函数值为 0.699 0, 与其他状态的信度函数值之差均大于 ε_1 , 不确定证据的信度函数值为 0.022 2 小于 ε_2 , 且状态 S3 的信度函数值大于不确定证据的信度值。因此根据推理规则可以得出变压器处于 S3 状态, 即异常状态。实际情况为该变压器线圈附近有高温过热的痕迹, 之前存在过电弧放电现象, 因此该变压器应监视运行, 并适时安排检修, 验证了本文评估方法的正确性。

对湖北省 2009 年至 2011 年间电压等级 110 kV 以上的变压器部分预防性试验数据利用本文提供的方法进行分析, 对比分析证据合成前后变压器本体绝缘状态评价的结果。特别需要指出的是, 证据体合成前的变压器本体绝缘状态由三个子证据体的评价结果确定, 若三个子证据体的评价结果为同一状态 s , 则变压器的评价状态即为 s ; 若三个子证据体的评价结果不相同, 则变压器本体绝缘状态为不确定。表 7 为统计结果显示。

表 7 证据融合前后评价结果统计

Table 7 Statistical of evaluation results pre-and post evidence composition

评价状态	S1	S2	S3	S4	不确定
证据融合前(次)	9	5	4	0	16
证据融合后(次)	19	8	5	0	2

统计结果显示, 在进行证据融合前, 不确定的评价次数为 16, 而进行证据融合后, 不确定的评价次数为 2, 因此证据融合能够提升变压器本体绝缘状态评估的准确性, 降低评估的不确定度。

5 结论

本文选取变压器预防性试验中具有代表性的参数作为状态评估的评价指标, 将这些指标分成 3 个不同的子证据体, 利用模糊和证据理论评估模型对变压器本体的运行状态进行评估。经过本文的研究可以得出: 1) 利用模糊评判方法处理不确定性问题时能够克服其他评价方法对于评价状态处理过于硬化的问题; 2) 证据理论可以克服某方面证据体的片面性, 对各个证据体进行有效的信息融合, 使状态评估的结果更加明确, 并且大大降低评估的不确定性; 3) 基于模糊和证据理论的变压器本体状态评估模型原理清晰、评价指标易于得到, 不需要大量的先验数据, 能准确地对变压器本体运行状态进行评估。该评估模型对变压器其他部件或其他电力设备均适用。

参考文献

- [1] 庞尔军, 唐贵基, 于虹, 等. 变压器信任度与安全指数的对比研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 139-145.
PANG Er-jun, TANG Gui-ji, YU Hong, et al. A comparative study between the transformer trust degree and the security index[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 139-145.
- [2] 孙鹏, 陈绍辉, 张彩庆. 基于 Marquardt 法参数估计的变电设备寿命周期故障率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 85-90.
SUN Peng, CHEN Shao-hui, ZHANG Cai-qing. Assessment of failure rate for substation equipment life cycle based on Marquardt parameter estimation method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 85-90.
- [3] 国家电网公司生产技术部. 设备状态检修规章制度和技术标准汇编[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
Production Technology Department of China State Grid. Compilation of equipment condition maintenance regulations and technical standards[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [4] 赵文清, 朱永利, 姜波, 等. 基于贝叶斯网络的电力变压器状态评估[J]. 高电压技术, 2008, 34(5): 1032-1039.
ZHAO Wen-qing, ZHU Yong-li, JIANG Bo, et al. Condition assessment for power transformers by Bayes networks[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5): 1032-1039.
- [5] 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.

WU Li-zeng. Assessing approach of transformer condition[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2005.

[6] 张哲, 赵文清, 朱永利, 等. 基于支持向量回归的电力变压器状态评估[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(4): 81-84.
ZHANG Zhe, ZHAO Wen-qing, ZHU Yong-li, et al. Power transformer condition evaluation based on support vector regression[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(4): 81-84.

[7] 肖燕彩. 支持向量在变压器状态评估中的应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
XIAO Yan-cai. Application study of support vector machine in transformer condition assessment[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.

[8] ASHKEZARI A D, MA H, SAHA T K, et al. Application of fuzzy support vector machine for determining the health index of the insulation system of in-service power transformers[J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(3): 965-973.

[9] 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 Rui-rui, ZHAO Ji-yin, WU Bao-chun, et al. Method for insulation condition classification evaluation of power transformer based on weight coefficient grey target theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(8): 60-66.

[10] 廖瑞金, 王谦, 骆思佳, 等. 基于模糊综合评判的电力变压器运行状态评估模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 70-75.
LIAO Rui-jin, WANG Qian, LUO Si-jia, et al. Condition assessment model for power transformer in service based on fuzzy synthetic evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 70-75.

[11] 骆思佳, 廖瑞金, 王有元, 等. 带变权的电力变压器状态模糊综合评判[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 106-110.
LUO Si-jia, LIAO Rui-jin, WANG You-yuan, et al. Fuzzy synthetic evaluation of power transformer condition with variable weights[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8): 106-110.

[12] FLORES W C, MOMBELLO E E, JARDINI J A, et al. Expert system for the assessment of power transformer insulation condition based on type-2 fuzzy logic systems[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(7): 8119-8127.

[13] 杨丽徙, 于发威, 包毅. 基于物元理论的变压器绝缘状态分级评估[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(6): 55-59.
YANG Li-xi, YU Fa-wei, BAO Yi. Classification evaluation of transformer insulation condition based on matter-element theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(6): 55-59.

[14] 张懿议, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 基于云理论的电力变压器绝缘状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 13-20.
ZHANG Yi-yi, LIAO Rui-jin, YANG Li-jun, et al. An assessment method for insulation condition of power transformer based upon cloud model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 13-20.

[15] 廖瑞金, 郑含博, 杨丽君, 等. 基于集对分析方法的电力变压器绝缘状态评估策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(21): 55-60.
LIAO Rui-jin, ZHENG Han-bo, YANG Li-jun, et al. A power transformer insulation condition assessment method based on set pair analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(21): 55-60.

[16] 周淦, 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 Rui-jin, et al. Insulation condition assessment of power transformer bushing based on cloud model and kernel vector space model[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1101-1106.

[17] 张钧, 何正友, 臧天磊. 一种基于 DS 证据理论和稳态量的配电网故障选相方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 49-55.
ZHANG Jun, HE You-zheng, ZANG Tian-lei. A fault phase selection approach in neutral noneffectively grounded system based on D-S evidence theory and stationary component[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 49-55.

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

[19] 中华人民共和国电力工业部. DL/T 596—1996 中华人民共和国电力行业标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.

[20] 中国南方电网责任有限公司. Q/CSG 11001-2010 110 kV~500 kV 油浸式电力变压器(电抗器)状态评价导则(试行)[S]. 广州: 中国南方电网责任有限公司企业, 2010.

[21] 杨风暴, 王肖霞. D-S 证据理论的冲突证据合成方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
YANG Feng-bao, WANG Xiao-xia. Combination method of conflictive evidences in D-S evidence theory[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.

收稿日期: 2014-03-05; 修回日期: 2014-05-23

作者简介:

赵云峰(1964-), 男, 本科, 高级工程师, 长期从事输电变电运维检修研究与管理工

作; 张永强(1978-), 男, 工程师, 主要从事电力系统及自动化研究工作;

聂德鑫(1964-), 男, 硕士, 高工, 研究方向为高压电器的故障检测与诊断技术。E-mail: niedexin@sgepri.sgcc.com.cn