

DOI: 10.7667/PSPC171603

基于古林法和层次可拓的变压器状态评估

何怡刚¹, 陈铭¹, 张大波¹, 吴翔², 夏雨¹

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230000;
2. 国网安徽省电力公司检修公司, 安徽 合肥 230061)

摘要: 准确评估电力变压器的状态既是合理制定检修策略的基础, 同时也对智能电网的发展具有重大意义。针对变压器故障机理复杂, 难以客观评估的问题, 提出了基于古林法和层次可拓的变压器状态评估方法, 将变压器多参数综合评估转化为单目标决策。首先建立层次型指标体系, 划分状态等级。利用古林法计算指标权重, 通过层次可拓法确定综合评价等级, 并与模糊层次分析法(FAHP)计算结果进行对比分析。经实例研究, 验证了该方法应用于变压器状态评估的可行性, 为变压器绝缘状态检修提供了一种新评估策略。

关键词: 变压器; 状态评估; 古林法; 层次可拓; 关联度

Transformer condition assessment based on A.J.Klee method and extension hierarchy

HE Yigang¹, CHEN Ming¹, ZHANG Dabo¹, WU Xiang², XIA Yu¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230000, China;
2. State Grid Anhui Electric Power Maintenance Company, Hefei 230061, China)

Abstract: Accurate assessment of the power transformer condition is a basis for reasonable maintenance strategies, and is of great significance for smart grid development. Aiming at the transformer complex fault mechanism and the difficulty of objective assessment, a method of transformer condition assessment based on A.J.Klee method and extension hierarchy is proposed, which transforms transformer multi-parameter synthetic evaluation into single-object decision. First, the hierarchical index system is established, and the condition grade is divided. The weight of the index is calculated by A.J.Klee method. The comprehensive evaluation level is determined by the extension hierarchy, and the results are compared with the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP). The feasibility of the method applied to the evaluation of transformer status is verified by an example, which provides a new assessment strategy for transformer insulation condition maintenance.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577046), State Key Program of National Natural Science Foundation of China (No. 51637004), and National Key Research and Development Plan "Important Scientific Instruments and Equipment Development" (No. 2016YFF0102200).

Key words: transformer; condition assessment; A.J.Klee method; extension hierarchy; correlation degree

0 引言

随着西电东送、南北互供、全国联网的推进, 对于电力系统经济可靠安全的需求日益升高^[1]。变压器作为输变电系统中的关键设备, 其运行状态是否可靠直接影响到整个系统的稳定与安全^[2-4]。目前, 电力公司对变压器实行的是定期检修政策, 除成本

高和工作量大外, 还会存在检修不足与检修过度的问题^[5]。因此, 实现变压器的在线检修具有重要意义, 而准确评估变压器的状态是提高检修效率的关键性前提。

近年来, 在变压器状态评估领域, 国内外学者使用了模糊综合评判^[6-7]、支持向量机法^[8]、故障树法^[9]、粗糙集法^[10]、灰靶理论^[11]、云理论^[12-13]、贝叶斯网络分类器^[14]等方法。然而模糊数学法对于等级划分临界点的选择没有一个统一的标准, 易受人为因素的影响, 客观性不足; 故障树法过于依赖信息的完整, 难以发掘潜在故障; 粗糙集法只能使用

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51577046); 国家自然科学基金重点项目资助(51637004); 国家重点研发计划“重大科学仪器设备开发”项目资助(2016YFF0102200)

离散数据计算; 灰靶理论基于油中溶解气体含量进行分析, 指标过于单一, 不能全面反映变压器状态; 贝叶斯网络分类器可以处理不完备数据, 但当关键属性缺失时准确率降低。

古林法是基于关联矩阵的一种多指标评估方法^[15], 古林法的关键在于确定待评估指标之间的相对重要程度, 即量化指标相对重要度, 进而计算各指标权重值。该方法结合专家打分的主观因素, 既能体现主观经验, 又能保证客观性, 主客观结合从而能更准确客观地评估变压器状态。

可拓法基于可拓集合和物元理论综合评估方法, 既能量化待评估对象对状态等级的归属程度, 又能通过关联函数建立各层次状态量对各状态等级的关联程度和数量的有机联系^[16]。层次可拓法对可拓法进行了改进, 以物元为基本单位, 计算各层次关联度, 得出状态等级。该方法利用关联函数的建立, 改进了传统算法的近似性, 减少了人为干扰, 且计算简便, 在设计、评估、诊断等领域前景可观。

本文将古林法和层次可拓法结合, 利用古林法量化主观、增强客观的优点和层次可拓法建模简单、定量规范的特点, 以 220 kV 电力变压器为研究对象, 将其综合状态评估视为多属性决策问题, 在合理选取变压器状态量的基础上, 构建了以目标层、因素层和指标层为基本层级的变压器评估层次型指标体系, 划分状态等级, 提出了一种主客观相结合的基于古林法与层次可拓法的评估模型计算各层级状态量权重, 确定变压器综合状态等级。分别使用本文方法和模糊层次分析法^[17]进行算例分析, FAHP 在确定模糊判断矩阵时存在主观性缺陷, 计算结果表明本文方法降低了评估的主观性, 评估结果更为准确。

1 变压器状态评估指标体系的建立

1.1 建立层次型指标体系

电力变压器作为一种复杂的多参数系统, 指标繁多, 常用的指标有化学试验指标和高压试验指标^[18]。为了更加准确地评估变压器的绝缘状态, 本文参考我国 DL/596—1996《电力设备预防性试验规程》^[19]和 GB/T7252—2001《变压器油中溶解气体分析和判断导则》^[20]建立了如表 1 所示的层次型电力变压器评估指标体系。指标体系分为三层: 目标层为变压器状态; 因素层为 9 种用以评价变压器状态的故障类型; 指标层为各故障类型的具体指标。

1.2 划分状态等级

电力变压器状态等级的划分没有统一的规范, 本文根据国家电网公司制定的《油浸式变压器(电抗

器)状态评价导则(Q/GDW169—2008)》^[21], 将变压器的状态等级划分为正常、注意、异常、严重四种状态。

表 1 变压器评估层次型指标体系

Table 1 Hierarchical indices system of transformer assessment

目标层	因素层	指标层
变压器状态	绕组故障 a_1	H ₂ 含量 a_{11}
		绕组绝缘介损 a_{12}
		绕组电容量初值差 a_{13}
	铁芯故障 a_2	绕组短路阻抗初值差 a_{14}
		铁芯接地电流 a_{21}
		铁芯绝缘电阻 a_{22}
	电弧放电 a_3	C ₂ H ₆ 含量 a_{23}
		C ₂ H ₄ 含量 a_{24}
		绕组直流电阻互差 a_{31}
局部放电 a_4	局部放电量 a_{32}	
	H ₂ 含量 a_{33}	
	C ₂ H ₂ 含量 a_{34}	
油流放电 a_5	局部放电量 a_{41}	
	油中含气量 a_{42}	
	H ₂ 含量 a_{43}	
绝缘受潮 a_6	CH ₄ 含量 a_{44}	
	绕组直流电阻互差 a_{45}	
	油中含水量 a_{46}	
绝缘老化 a_7	中性点油流静电流 a_{51}	
	绝缘油介损 a_{52}	
	体积电阻率 a_{53}	
绝缘油劣化 a_8	油中含气量 a_{54}	
	C ₂ H ₂ 含量 a_{55}	
	绝缘油介损 a_{61}	
电流回路过热 a_9	油中含水量 a_{62}	
	油击穿电压 a_{63}	
	绝缘电阻吸收比 a_{64}	
		极化系数 a_{65}
		体积电阻率 a_{66}
		H ₂ 含量 a_{67}
		铁芯绝缘电阻 a_{68}
		糠醛含量 a_{71}
		绝缘油介损 a_{72}
		油中含气量 a_{73}
		纸板聚合度 a_{74}
		绕组绝缘介损 a_{75}
		体积电阻率 a_{76}
		绝缘油介损 a_{81}
		油中含水量 a_{82}
		油击穿电压 a_{83}
		铁芯绝缘电阻 a_{84}
		油中含气量 a_{85}
		体积电阻 a_{86}
		绕组直流电阻互差 a_{91}
		CO 相对产气速率 a_{92}
		CO ₂ 相对产气速率 a_{93}
		C ₂ H ₄ 含量 a_{94}

2 变压器状态评估模型

2.1 综合评估模型

本文以古林法作为权重计算方法,用层次可拓法划分状态等级,具体流程如图1。

1) 根据专家经验及有关规程及标准,选取合适的评估指标,建立电力变压器评估层次型指标体系。

2) 依照国家电网公司相关导则制定状态评估等级划分方案。

3) 采集各指标对应的原始试验数据,经不良数据辨识系统处理后得到各指标的实测值。

4) 请专家对指标进行打分,使用古林法计算出各指标的权重值,运用层次可拓法计算各层次关联度,进而确定变压器状态等级。

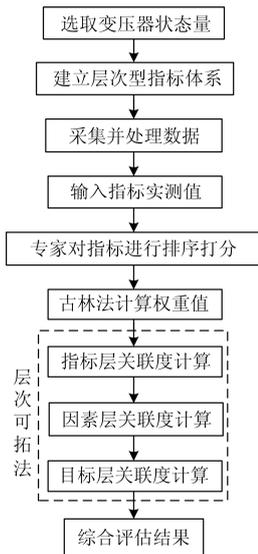


图1 电力变压器状态评估流程图

Fig. 1 Flow chart of power transformer condition assessment

2.2 古林法确定权重

古林法是一种量化主观判断的综合评估方法。当对电力变压器进行状态评估时,使用古林法能降低主观性,使评估结果更为准确。古林法确定权重的步骤如下:

1) 设定 n 个评价指标,将因素层某个因素的所有指标 $\{a_i\}, i=1,2,\dots,n$ 按重要度递减顺序排序得到 $\{\tilde{a}_i\}, i=1,2,\dots,n$ 。

2) 排序后,指标两两比较得出重要度关系,并用数值定量表示。例如指标 a_j 与 a_{j-1} 的相对重要性可以用对应权重 w_j 与 w_{j-1} 表示。则指标的重要度 R_j 为

$$w_{j-1} = R_{j-1} \times w_j, \quad j=1,2,\dots,n \quad (1)$$

3) 基准化处理 R_j 后得到 L_j 。设定最后一个指标 $L_n = 1$ 为基准,向前计算其他指标的数值。公式如式(2)。

$$\begin{cases} L_{j-1} = R_{j-1} \times L_j, & j=1,2,\dots,n \\ L_n = 1 \end{cases} \quad (2)$$

4) 将计算出的所有 $L_j, j=1,2,\dots,n$ 求和,用 L_j 除以求和结果,得出各指标的权重。归一化的权重为

$$W_j = \frac{L_j}{\sum_{j=1}^n L_j}, \quad j=1,2,\dots,n \quad (3)$$

2.3 层次可拓法确定综合评估等级

层次可拓法的逻辑成分是物元,物元是由有序三元组 $\mathbf{R} = (N, A, X) = (\text{事物}, \text{特征}, \text{事物关于该特征的量值})$ 作为描述事物的基本单元。通过层次可拓模型确定综合评价等级的步骤如下。

1) 确定评价对象的经典域、节域和待评价物元评价对象的经典域为

$$\mathbf{R}_j = (N_j, a_i, X_{ij}) = \begin{bmatrix} N_j & a_1 & (x_{1j}, y_{1j}) \\ & a_2 & (x_{2j}, y_{2j}) \\ & \vdots & \vdots \\ & a_n & (x_{nj}, y_{nj}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: \mathbf{R}_j 表示评价对象在状态等级 j 下的物元模型; N_j 为在 j 等级下的评价因素; a_i 为在 j 等级下的评价指标; X_{ij} 为在 j 等级下评价指标 a_i 的值域,即 (x_{ij}, y_{ij}) 。

评价对象的节域为

$$\mathbf{R}_p = (N_p, a_p, X_{pi}) = \begin{bmatrix} N_p & a_1 & (x_{p1}, y_{p1}) \\ & a_2 & (x_{p2}, y_{p2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & a_n & (x_{pn}, y_{pn}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: \mathbf{R}_p 表示评价对象在所有状态等级下的物元模型; N_p 表示在所有等级下的评价因素; a_1, a_2, \dots, a_n 为在所有等级下评价指标集合; X_{pi} 为 a_p 在所有等级下的值域。

待评价物元为

$$\mathbf{R}_0 = (N_0, a_i, X_i) = \begin{bmatrix} N_0 & a_1 & X_1 \\ & a_2 & X_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & a_n & X_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: \mathbf{R}_0 是待评价物元; X_1, X_2, \dots, X_n 是指标

a_1, a_2, \dots, a_n 的实测值。

2) 计算关联度

求待评价物元因素层状态量和目标层状态量的关联度, 需先计算指标层状态量和因素层状态量的关联度, 令

$$X_j(x_i) = \frac{\rho(x_i, x_{ji})}{\rho(x_i, x_{pi}) - \rho(x_i, x_{ji})} \quad (7)$$

式中: $X_j(x_i)$ 表示指标层物元 a_i 在 j 等级下的关联度, 值域为整个实数轴, $X_j(x_i)$ 为正表示评价对象处于对应等级, 为负表示评价对象不处于该等级, 实数绝对值大小表示隶属程度。 $\rho(x_i, x_{ji})$, $\rho(x_i, x_{pi})$ 分别为 x_i 与区间 x_{ji} 和 x_{pi} 的距, 计算公式如下

$$\rho(x_i, x_{ji}) = \left| x_i - \frac{a_{ij} + b_{ij}}{2} \right| - \frac{b_{ij} - a_{ij}}{2} \quad (8)$$

$$\rho(x_i, x_{pi}) = \left| x_i - \frac{a_{ip} + b_{ip}}{2} \right| - \frac{b_{ip} - a_{ip}}{2} \quad (9)$$

各因素层物元的关联度为

$$K_j(P) = \sum_{i=1}^n w_i K_j(x_i) \quad (10)$$

式中: w_i 为指标 a_i 的权重值。因素层和目标层的状态量关联度计算方法同上。

3) 确定综合评价等级

当 $K_{j_0}(P) = \max K_j(P)$, $j = (1, 2, \dots, m)$, 可确定待评价物元处于 j_0 等级。若对所有的 j 都有 $K_j(P) \leq 0$, 则判断待评价物元不处于任何一个状态等级。

3 算例分析

为验证本方法的可行性, 选取河南地区某变电站一台 220 kV 油浸式变压器(SFPS9-180000/220)^[22] 为例进行分析。

由于变压器在运行中经常会受到过电压、过负荷及自然环境等异常情况的影响, 且传感器系统也会在数据采集和传输过程中出现不稳定扰动, 都会导致试验采集到不良数据。为了保证评估数据的真实有效, 本文使用基于模糊等价矩阵聚类分析方法的不良数据辨识系统^[23]对采集到的原始数据进行预处理, 以标准差及相邻采样时刻的量测值差值为特征值, 通过寻找最佳阈值进行动态聚类分析, 辨识并剔除不良数据, 处理后的变压器状态量实测值及相关注意值、初始值如表 2 所示。以绕组故障为例, 利用表 2 中数据进行计算。

表 2 变压器状态量实测值

指标	初始值	注意值	实测值
H ₂ 含量/(μ L/L)	6.1	150	140
CH ₄ 含量/(μ L/L)	8.7	100	18.5
C ₂ H ₂ 含量/(μ L/L)	0	5	0
C ₂ H ₄ 含量/(μ L/L)	4.8	50	7.3
C ₂ H ₆ 含量/(μ L/L)	2.3	65	4.7
CO 相对产气速率/(%/月)	0	100	12
CO ₂ 相对产气速率/(%/月)	0	200	31
油中含气量/%	1	3	1.6
油中含水量/(mg/L)	3.5	25	12.1
油击穿电压/kV	58	35	55
铁芯接地电流/A	0.01	0.1	0.02
铁芯绝缘电阻/M Ω	1 000	100	1 000
极化系数	2.5	1.5	2.03
糠醛含量/(mg/L)	0	0.2	0.05
纸板聚合度	1 000	250	900
体积电阻率/(10 ⁹ $\Omega \cdot$ m)	60	5	55
局部放电量/PC	30	500	72
绝缘油介损/%	0.5	4	1.7
绕组绝缘介损/%	0.17	0.8	0.9
绝缘电阻吸收比	2	1.3	1.61
绕组电容量初值差/%	1	5	7.2
绕组直流电阻互差/%	1	4	1.5
绕组短路阻抗初值差/%	1	3	4.7
中性点油流静电电流/ μ A	0.02	1	0.07

3.1 古林法计算权重

首先由 4 位专家组成的专家组打分, 通过古林法对绕组故障的 4 个指标进行计算, 得出其权重, 如表 3 所示。同理可得表 4 中因素层各状态量的权重值。

表 3 古林法绕组故障指标层状态量权重

指标	权重
H ₂ 含量	0.084 1
绕组绝缘介损	0.181 2
绕组电容量初值差	0.372 4
绕组短路阻抗初值差	0.362 3

表 4 古林法因素层状态量权重

类型	权重	类型	权重
绕组故障	0.290 3	绝缘受潮	0.141 9
铁芯故障	0.061 4	绝缘老化	0.129 8
电弧放电	0.073 2	绝缘油劣化	0.072 4
局部放电	0.115 7	电流回路过热	0.060 9
油流放电	0.054 4	—	—

3.2 层次可拓法确定状态等级

绕组故障的待评价物元:

$$R_0 = \begin{bmatrix} a_1 & a_{11} & 140 \\ & a_{12} & 0.9 \\ & a_{13} & 7.2 \\ & a_{14} & 4.7 \end{bmatrix}$$

表 5 给出了用层次可拓法计算绕组故障指标层的关联度。同理算得表 6 中因素层和目标层的关联度。

表 5 层次可拓法绕组故障指标层关联度

Table 5 Correlation degree of winding fault index level with extension hierarchy

指标	正常	注意	异常	严重
H ₂ 含量	-0.696 1	-0.279 3	0.054 6	-0.425 4
绕组绝缘介损	-0.667 5	-0.526 4	-0.187 3	0.142 1
绕组电容量初值差	-0.790 9	-0.634 1	-0.268 2	0.273 9
绕组短路阻抗初值差	-0.829 5	-0.684 0	-0.372 1	0.428 1

表 6 层次可拓法因素层和目标层关联度

Table 6 Correlation degree of factor level and object level with extension hierarchy

类型	正常	注意	异常	严重
绕组故障	-0.681 9	-0.592 6	-0.246 7	0.321 9
铁芯故障	0.368 2	-0.352 7	-0.691 6	-0.794 5
电弧放电	0.158 9	-0.210 4	-0.507 7	-0.641 9
局部放电	0.195 6	-0.244 3	-0.541 6	-0.673 8
油流放电	0.258 3	-0.281 1	-0.608 2	-0.714 6
绝缘受潮	-0.207 3	0.114 9	-0.147 5	-0.482 9
绝缘老化	-0.093 2	0.172 8	-0.184 3	-0.496 2
绝缘油劣化	0.219 4	-0.257 1	-0.558 9	-0.691 6
电流回路过热	0.281 5	-0.307 3	-0.629 1	-0.742 0
变压器状态	-0.483 7	-0.130 1	0.152 9	-0.209 7

根据表 6 计算结果分析, 变压器绕组故障处于严重状态, 绝缘受潮和绝缘老化处于注意状态, 其余故障类型均处于正常状态。进而得出变压器为异常状态且绕组出现故障。

3.3 模糊层次分析法评估变压器状态

电力变压器各状态等级对应评分区间如表 7 所示。

表 7 变压器状态评分区间表

Table 7 Rating scale of transformer condition assessment

状态	严重	异常	注意	正常
评分	0~0.2	0.2~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0

以绕组故障为例, 采用模糊层次分析法计算出各指标的权重, 如表 8 所示。同理得出表 9 中的因素层状态量的权重与评分。

表 8 模糊层次分析法绕组故障指标层状态量权重

Table 8 Weight of winding fault index level status

parameters by fuzzy AHP	
指标	权重
H ₂ 含量	0.205 6
绕组绝缘介损	0.208 5
绕组电容量初值差	0.209 7
绕组短路阻抗初值差	0.210 1

表 9 模糊层次分析法因素层计算结果

Table 9 Results of factor level by fuzzy AHP

类型	权重	评分
绕组故障	0.143 2	0.246 7
铁芯故障	0.096 3	0.948 2
电弧放电	0.108 7	0.791 2
局部放电	0.104 6	0.799 8
油流放电	0.102 5	0.853 4
绝缘受潮	0.108 1	0.763 2
绝缘老化	0.127 6	0.708 4
绝缘油劣化	0.110 4	0.808 9
电流回路过热	0.098 6	0.881 2

进而, 利用表 9 结果计算得到目标层状态量评分, 即电力变压器状态综合评价分数为 0.719 1。根据表 7 判断该变压器为注意状态, 绕组处于异常状态, 其余故障类型均处于注意和正常状态。

3.4 评估结果对比

模糊层次分析法在权重的确定上过于依赖专家打分, 主观性太强, 弱化了实际数据的变化, 而本文方法通过量化主观判断, 主客观结合, 进一步降低主观影响。在对该变压器进行停电检测后发现, 绕组中部分线饼受到挤压, 另一部分受到拉伸, 导致饼间距离改变, 进而发生变形, 即绕组部分发生故障。相较于模糊层次分析法, 本文方法评估结果与变压器实际故障情况更为吻合, 说明本文方法更能准确评估变压器的状态, 进而为变压器检修提供了更为合理的决策。

4 结论

1) 建立了层次型的变压器评价指标体系, 将繁杂的状态量进行合理有序的层次分类, 将多参数评估转化为单目标决策, 有利于准确评估变压器的状态。

2) 在算法上, 使用主客观结合的古林法进行权重计算, 降低主观性, 利用层次可拓法构造关联函数确定变压器状态等级。

3) 通过实例分析并与模糊层次分析法进行对比表明, 基于古林法和层次可拓法的评估策略可以为变压器状态评估提供参考。

参考文献

- [1] 郑含博. 电力变压器状态评估及故障诊断方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
ZHENG Hanbo. Study on condition assessment and fault diagnosis approaches for power transformers[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [2] JAHROMI A, PIERCY R, CRESS S, et al. An approach to power transformer asset management using health index[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2009, 25(2): 20-34.
- [3] 石鑫, 朱永利, 萨初日拉, 等. 基于深度信念网络的电力变压器故障分类建模[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 71-76.
SHI Xin, ZHU Yongli, SA Churila, et al. Power transformer fault classifying model based on deep belief network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 71-76.
- [4] 杨杰明, 董玉坤, 曲朝阳, 等. 基于区间权重和改进云模型的变压器状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 102-109.
YANG Jieming, DONG Yukun, QU Zhaoyang, et al. Condition assessment for transformer based on interval weight and improved cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 102-109.
- [5] 吴翔, 何怡刚, 张大波, 等. 基于最优权重与雷达图的变压器状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 55-60.
WU Xiang, HE Yigang, ZHANG Dabo, et al. Transformer condition assessment based on optimal weight and radar map[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 55-60.
- [6] 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 Ruijin, WANG Qian, LUO Sijia, 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.
- [7] 顾煜炯, 徐婧, 李倩倩, 等. 燃煤发电机组调峰能力模糊综合评估方法[J]. 热力发电, 2017, 46(2): 15-21.
GU Yujiong, XU Jing, LI Qianqian, et al. Fuzzy comprehensive evaluation method for peak shaving capability of coal-fired power units[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(2): 15-21.
- [8] CUI Yi, MA Hui, SAHA T K. Power transformer condition assessment using support vector machine with heuristic optimization[C] // 2013 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), September 29-October 3, 2013, Hobart, Australia: 1-6.
- [9] 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): 1507-1513.
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): 1507-1513.
- [10] 武中利, 杨建, 朱永利, 等. 基于粗糙集理论和支持向量机的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 80-83.
WU Zhongli, YANG Jian, ZHU Yongli, et al. Transformer fault diagnosis based on rough set theory and support vector machines[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 80-83.
- [11] 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.
- [12] WANG Jiyu, LIAO Ruijin, ZHANG Yiyi. Multi-fault diagnosis method for insulation condition of power transformer based upon cloud model[C] // 2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), July 19-22, 2015, Sydney, Australia: 564-567.
- [13] 田松峰, 胥佳瑞, 王美俊, 等. 基于 EEMD 云模型与 SVM 的汽轮机转子故障诊断方法[J]. 热力发电, 2017, 46(4): 111-114.
TIAN Songfeng, XU Jiarui, WANG Meijun, et al. A rotor fault diagnosis method based on EEMD cloud model and SVM[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(4): 111-114.
- [14] 余文辉, 王沾, 曾祥君, 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.
- [15] 谢宁. 基于古林法的新船市场景气指数构建及其预警作用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
XIE Ning. The ship market boom index architecture and alert application study based on A.J.Klee method[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,

2011.

[16] 杜林, 袁蕾, 熊浩, 等. 电力变压器运行状态可拓层次评估[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 897-903.
DU Lin, YUAN Lei, XIONG Hao, et al. Extension hierarchy assessment for operating condition of power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 897-903.

[17] SUN Lingjie, MA Zhao, SHANG Yuwei, et al. Research on multi-attribute decision-making in condition evaluation for power transformer using fuzzy AHP and modified weighted averaging combination[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(15): 3855-3864.

[18] 李黎, 张登, 谢龙君, 等. 采用关联规则综合分析和变权重系数的电力变压器状态评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 152-159.
LI Li, ZHANG Deng, XIE Longjun, et al. A condition assessment method of power transformers based on association rules and variable weight coefficients[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 152-159.

[19] 中国电力工业部. 电力设备预防性试验规程: DL/T 596—1996[S]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
Power Industry Ministry of China. Preventive test code for electric power equipment: DL/T 596—1996[S]. Beijing: China Electric Power Press, 1996.

[20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 变压器油中溶解气体分析和判断导则: GB/T7252—2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Guide to the analysis and the diagnosis of gases dissolved in transformer oil: GB/T7252—2001[S]. Beijing: Standards Press of China, 2001.

[21] 国家电网公司. 油浸式变压器(电抗器)状态评价导则: Q/GDW 169—2008[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
State Grid Corporation of China. Guide for condition evaluation of oil-immersed power transformers (reactors): Q/GDW 169—2008[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.

[22] 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.

[23] 蒋德珑. 采用模糊聚类方法进行电力系统不良数据辨识[D]. 郑州: 郑州大学, 2011.
JIANG Delong. Bad-data detection and identification of power systems using fuzzy clustering methods[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2011.

收稿日期: 2017-10-30; 修回日期: 2018-08-25

作者简介:

何怡刚(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为测试与故障诊断、智能电网技术、射频识别技术等;

陈铭(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统状态监测与寿命评估. E-mail: charmingbig@qq.com

(编辑 葛艳娜)