

基于关联规则与变权重的变压器状态评估方法

谢荣斌¹, 张登², 林福昌², 李黎², 吴小刚²

(1. 贵阳供电局, 贵阳 550002; 2. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 为了满足经济效益与社会效益的需要,进一步加强变压器运行的安全性与稳定性,笔者提出了一种对变压器进行状态评估的方法。通过分析变压器运行中各状态量参数,引入基于关联规则的权重计算方法,采用综合分析变权重评分制的方法,建立起一个较为完善的变压器状态评估体系,以更为准确地评判变压器运行状态的真实工况。实例分析证明,此方法能够为变压器实施状态检修提供有效的参考意见。

关键词: 关联规则; 状态评估; 综合分析; 变权重; 常权重; 变压器

中图分类号: TM41

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2014)01-0133-06

Transformer Condition Assessment Using Association Rules and Variable Weight

XIE Rongbin¹, ZHANG Deng², LIN Fuchang², LI Li², WU Xiaogang²

(1. Guiyang Electric Power Supply Bureau, Guiyang 550002, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper provides a method for condition assessment of transformer in order to strengthen the security and stability of running transformer and meet the demands of economic benefits and social benefits. Via analyzing the parameters of running transformer and introducing the weight computing method based on association rules, a preferable condition assessment system of transformer with comprehensive analysis and variable weight is established for assessing the real running condition of a transformer. Case analysis verifies that the proposed method may provide a valid reference for condition-based maintenance of transformer.

Key words: association rule; condition assessment; comprehensive analysis; variable weight; constant weight; transformer

0 引言

变压器作为电力系统中最关键的设备之一,其运行状态的良好与否决定着电力系统运行的稳定性与安全性,因此对运行中的变压器进行状态评估是十分必要的^[1]。

目前,中国电力系统中广泛采用定时检修方式(即预防性试验检修)来保证变压器的稳定运行。定时检修是按照规定的周期,定期对变压器停电进行预防性试验,将试验结果与相关标准相比较后对变压器的状态进行判断,如试验结果不合格则对变压器进行维修。随着经济性与安全性的需要提高,这种定时检修的方式暴露出越来越多的缺陷^[2-3]。

1)造成过度检修。变压器在进行预防性试验的过程

中,往往因为人工原因或者频繁拆卸导致新故障隐患的产生。同时,过度检修也导致大量的人力物力财力浪费。

2)并不能杜绝故障发生。变压器的故障大多数都出现在运行过程中,定时检修并不能及时发现故障,并且对于预防性试验结果分合格与不合格这种“一刀切”的方法,很难对变压器的真实状况进行准确的判断。

变压器实行状态检修是设备检修方式发展的必然趋势,而状态评估是状态检修中重要的一个环节,目前提出的主要有证据推理法^[4-5]、灰色聚类决策法^[6]、基于灰靶理论的评估方法^[7]、基于支持向量机的评估方法^[8]、特征指标法^[9-10]等,但这些方法在评估时并没有考虑变压器发生故障时各状态量之间的相互联系,而是将其作为独立的状态量来对待,因此评估结果与设备真实状况是有差距的,不能真实反映设备的健康水平。笔者提出了基于关联规则

与变权重的变压器状态评估方法,首先选取合适的状态量,确定评分方法,然后将关联规则与变权重应用到评估方法中,建立起一个能够准确反映变压器运行状态的评估体系。

1 变压器状态量的选取及综合分析的应用

1.1 状态量的选取

变压器由于其结构复杂,因此其试验项目与监测状态量很多,需要选取最具代表性且能够灵敏反映变压器工况的状态量来进行状态评估。笔者选取表1中试验项目作为该评估体系单项状态量,涵盖大部分变压器的高压试验和化学试验。

表1 单项状态量

Tab. 1 Single parameters

高压试验	化学试验
绝缘油介损	油中含水量
油击穿电压	H ₂
绝缘电阻吸收比	C ₂ H ₆
极化指数	C ₂ H ₄
体积电阻率	CO 相对产气速率
铁心接地电流	CO ₂ 相对产气速率
铁心绝缘电阻	C ₂ H ₂
绕组直流电阻互差	油中含气量
绕组短路阻抗初值差	CH ₄
绕组绝缘介损	糖醛含量
绕组电容量初值差	纸板聚合度
局部放电量	—
中性点油流静电电流	—

1.2 综合分析的应用

由于变压器发生故障时,往往不仅仅只引起一个状态量的变化。综合分析是指结合理论分析与实际生产情况,按照变压器的故障类型选取不同故障状态下的单项状态量,然后将这些单项状态量分类整合起来以综合状态量的形式来进行变压器的状态评估。

根据变压器相关故障机理可以将变压器综合状态量按表2所示来表征。

2 确定常权重系数的关联规则方法

状态量权重系数的确定一直都是变压器状态评估的一个难点,目前提出的方法主要有灰色关联法^[1]、未确知有理数法^[2]和层次分析法^[3]等。灰色关联法可以避免专家意见不统一造成的权重分配错误,但该方法分辨系数难以确定;未确知有理数法可以有效减小专家主观性对权重量化结果的影响,但其以职称、工龄、学历来确定专家权重的强制比较法值得商榷。层次分析法是通过两两比较的方式确定层次中各因素的相对重要性,然后综合专家的

表2 变压器综合状态量

Tab. 2 Comprehensive parameters of transformer

综合状态量	单项状态量
绝缘受潮	绝缘油介损
	油中含水量
	油击穿电压
	绝缘电阻吸收比
	极化指数
	体积电阻率
铁心故障	H ₂
	铁心绝缘电阻
	铁心接地电流
	铁心绝缘电阻
	C ₂ H ₆
	C ₂ H ₄
电流回路故障	绕组直流电阻互差
	CO 相对产气速率
	CO ₂ 相对产气速率
	C ₂ H ₄
	绕组短路阻抗初值差
	绕组绝缘介损
绕组故障	绕组电容量初值差
	H ₂
	C ₂ H ₂
	局部放电量
	油中含气量
	H ₂
局部放电	CH ₄
	绕组直流电阻
	油中含水量
	中性点油流静电电流
	绝缘油介损
	体积电阻率
油流放电	油中含气量
	C ₂ H ₂
	绕组直流电阻互差
	局部放电量
	H ₂
	C ₂ H ₂
电弧放电	糖醛含量
	绝缘油介损
	油中含气量
	纸板聚合度
	绕组绝缘介损
	体积电阻率
绝缘老化	绝缘油介损
	油中含水量
	油击穿电压
	铁心绝缘电阻
	油中含气量
	体积电阻率
绝缘油劣化	绝缘油介损
	油中含水量
	油击穿电压
	铁心绝缘电阻
	油中含气量
	体积电阻率

判断,以决定各因素的权重系数,但其权重的赋予主要依靠专家的主观意见。为了能够以客观事实为基础,避免专家意见的主观性缺陷,笔者提出一种基于关联规则的权重确定方法。

关联规则是寻找同一个事件中出现的不同项之间的相关性,即找出事件中频繁发生的项或属性的所有子集以及它们之间的相互关联性。其相关概念描述如下^[4]:

定义1 关联规则。关联规则是形如 $A \rightarrow B$ 的蕴含式,其中 $A \subset I, B \subset I$, 并且 $A \cap B = \Phi$ 。 A, B 分别成为关联规则 $A \rightarrow B$ 的前提和结论。

定义2 关联规则的支持度与置信度。关联规则 $A \rightarrow B$ 的支持度是数据库 D 中包含 $A \cup B$ 的百分比,记为 $\text{support}(A \rightarrow B)$ 。

$$\text{support}(A \rightarrow B) = P(A \cup B) \quad (1)$$

关联规则 $A \rightarrow B$ 的置信度是数据库 D 中包含 A 的事务同时也包含 B 的百分比,即条件概率 $P(B|A)$,记为 $\text{confidence}(A \rightarrow B)$ 。

$$C = \text{confidence}(A \rightarrow B) = \frac{P(A \cup B)}{P(A)} \times 100\% = P(B|A) \quad (2)$$

笔者收集大量变压器典型故障数据,通过式(2)计算各综合状态量中单项状态量的置信度,再对同一综合状态量中的各单项状态量的置信度进行比较,根据其置信度的大小来确定各单项状态量的常权重系数。其计算式为

$$w_i = \frac{C_i}{\sum_{k=1}^m C_k} \quad (3)$$

式(3)中: w_i 为某综合状态量中第 i 项单项状态量的常权重系数; C_i 为第 i 项单项状态量的置信度; m 为此综合状态量中包含的单项状态量个数。

以铁心故障为例,它包括4个单项状态量:铁心接地电流、铁心绝缘电阻、 C_2H_6 、 C_2H_4 。记铁心故障数据库为 D ,铁心接地电流、铁心绝缘电阻、 C_2H_6 、 C_2H_4 分别为 A_1, A_2, A_3, A_4 ,发生铁心故障为 B ,假设总数据库中有900组数据,其中铁心故障有112例,在这112例故障中,铁心接地电流、铁心绝缘电阻、 C_2H_6 、 C_2H_4 超标次数分别为105、102、99、87例,而铁心接地电流、铁心绝缘电阻、 C_2H_6 、 C_2H_4 超标总次数分别为109、262、142、222例,根据式(2)可分别计算铁心接地电流、铁心绝缘电阻、 C_2H_6 、 C_2H_4 的置信度为

$$C_1 = \text{confidence}(A_1 \rightarrow B) = \frac{P(A_1 \cup B)}{P(A_1)} \times 100\% = \frac{105/900}{109/900} \times 100\% = 96.33\%;$$

$$C_2 = 38.93\%; C_3 = 69.72\%; C_4 = 39.19\%。$$

那么,在综合状态量铁心故障中,铁心接地电流、铁心绝缘电阻、 C_2H_6 、 C_2H_4 的常权重系数根据式(3)计算为

$$w_1 = 0.3945; w_2 = 0.1595;$$

$$w_3 = 0.2855; w_4 = 0.1605。$$

同理可对其他综合状态量中各单项状态量的常权重系数进行计算,能够得到各单项状态量较为客观准确的常权重系数。

3 变权重系数的应用

基于关联规则的权重确定方法能够在一定程度上改善以往权重系数的确定过度依赖于主观意识和经验的情况,但根据此方法所确定的权重系数属于常权重系数,而常权重系数不会因状态量的变化而发生改变。当变压器状态评估采用常权重系数时,会出现其固有的缺陷,即当某一状态量数值严重偏离正常值时,往往代表着变压器某一方面性能已严重下降,但是根据常权重系数来进行评估时,由于其权重占整体比例并不大,变压器整体评价可能还是正常水平,因而不能准确反映变压器真实的运行状态。

变权重理论是因素空间理论的重要建模原理之一,它反映了综合评价中各要素状态的均衡性^[5]。笔者提出了采用变权重系数来对变压器状态评分进行计算,文[16]给出了变权公式为

$$w_i(x_1, \dots, x_m) = \frac{w_i^{(0)}}{x_i} / \sum_{i=1}^m \frac{w_i^{(0)}}{x_i} \quad (4)$$

式(4)中: w_i 为第 i 个综合状态量的变权重; x_i 为第 i 个综合状态量的评分值; m 为综合状态量的个数; $w_i^{(0)}$ 为第 i 个综合状态量的常权重系数。

文[17]在文[16]的基础上,将均衡函数引入了变权综合,其变权公式为

$$w_i(x_1, \dots, x_m) = w_i^{(0)} x_i^{\alpha-1} / \sum_{k=1}^m w_k^{(0)} x_k^{\alpha-1} \quad (5)$$

当各综合状态量的均衡问题考虑的不多时,取 $\alpha > 0.5$; 当不能容忍某些综合状态量的严重缺陷时,取 $\alpha < 0.5$; 当 $\alpha = 1$ 时,等同于常权重模式。

变权重理论的优点在于:当各个状态量均可以表征变压器某一方面的运行状态时,若某一状态量评分明显较其他状态量偏低,能够根据式(4)或式(5)自动调整此状态量的权重系数,评分越低则表示故障越严重,其变权重系数就越大。当评分为0时,由式(4)或式(5)可知其变权重系数为极大值1,即其所占权重达到100%,因此变压器整体状态评分也为0;而当评分为100时,其变权重系数为极小值,具体数值则取决于其他状态量的评分,此时此状态量为

正常状态,其对变压器整体状态的影响也最小。

4 变压器状态评估体系的建立

4.1 状态评估步骤

根据综合分析 with 变权重系数的方法可以建立相应的变压器状态评估体系,评估过程由下列步骤构成:

1)进行数据采集工作,获取与变压器运行状态相关的单项状态量信息。

2)根据综合分析与实际运行中变压器的故障情况,对变压器的单项状态量进行分类整理,建立变压器综合状态量集合。

3)依据关联规则的计算方法确定每个单项状态量的常权重系数,考虑到综合状态量能够较为准确地表征变压器某一方面的运行状态,其常权重系数取平均值,即均取为 1/9。

4)分别计算各单项状态量的得分。其具体计算方法为^[18]

$$G_1 = G_{11}(x) = \frac{x' - x_1}{x' - x_f} \times 100. \quad (6)$$

式(6)中: G_1 为单项状态量得分(当 $G_1 < 0$, 令 $G_1 = 0$; 当 $G_1 > 100$ 时, 令 $G_1 = 100$); x' 为单项状态量的警示值(若状态量给出注意值 x_2 , 则 $x' = 1.3x_2$ (正劣化)或 $x' = x_2/1.3$ (负劣化)); x_f 为该状态量在同类新设备中的平均值(若没有此值, 以该设备出厂或交接试验值代之); x_1 为该次试验值。

5)根据各单项状态量的得分与常权重系数计算各综合状态量的得分。其具体计算方法为

$$T_1 = \sum_{i=1}^{m_1} G_i W_i. \quad (7)$$

式(7)中: T_1 为综合状态量得分; m_1 为此综合状态量中包含的单项状态量个数; G_i 为第 i 个单项状态量的得分; W_i 为第 i 个单项状态量的常权重系数。

6)根据各综合状态量的得分情况,计算各综合状态量的变权重系数。其具体计算方法为

$$w_i(x_1, \dots, x_m) = w_i^{(0)} x_i^{\alpha-1} / \sum_{j=1}^m w_j^{(0)} x_j^{\alpha-1}. \quad (8)$$

式(8)中: w_i 为第 i 种综合状态量的变权重系数; x_i 为第 i 个综合状态量的得分; m 为变压器综合状态量体系中综合状态量的个数; $w_i^{(0)}$ 为第 i 种综合状态量的常权重系数; $w_j^{(0)}$ 为第 j 种综合状态量的常权重系数; α 为均衡函数,其取值大小取决于各综合状态量的相对重要程度。由于综合状态量反映的变压器缺陷往往比较真实和严重,故笔者综合状态量取 $\alpha=0$, 即式(4)与式(5)等同。

7)根据各综合状态量的得分与变权重系数计算

变压器最终得分。其具体计算方法为

$$T_2 = \sum_{i=1}^m T_i W_i. \quad (9)$$

式(9)中: T_2 为变压器最终得分; m 为变压器综合状态量体系中综合状态量的个数; T_i 为第 i 个综合状态量的得分; W_i 为第 i 个综合状态量的变权重系数。

8)根据变压器最终得分情况判断变压器运行状态,并确定相应的检修策略。变压器运行状态与最终得分关系见表 3。

表 3 变压器运行状态与最终得分关系

Tab. 3 Relation of transformer running condition and final score

最终得分	80~100	60~80	20~60	0~20
运行状态	正常	注意	异常	严重

4.2 实例分析

以某局某变电站运行年限为 10 年的 220 kV 主变(SFPS9-150000/220)为例,2011 年试验数据见表 4 (分 A、B、C 三相的数据取其中最严重的一相数据)。

表 4 试验数据

Tab. 4 Test data

单项状态量	实测值	注意值	初始值
绝缘油介损/%	3.6	4.0	0.5
油中含水量/(mg·L ⁻¹)	8.9	25.0	3.5
油击穿电压/kV	55.0	35.0	58.0
绝缘电阻吸收比	1.9	1.3	2.0
极化指数	2.2	1.5	2.5
体积电阻率/(Ω·m)	6×10 ⁹	3×10 ⁹	60×10 ⁹
H ₂ /(μL·L ⁻¹)	16.6	150.0	6.1
铁心接地电流/A	0.02	0.10	0.01
铁心绝缘电阻/MΩ	1 000	100	1 000
C ₂ H ₆ /(μL·L ⁻¹)	4.7	65.0	2.3
C ₂ H ₄ /(μL·L ⁻¹)	7.3	50.0	4.8
绕组直流电阻互差/%	1.5	4.0	1.0
CO相对产气速率/(%·月 ⁻¹)	12.0	100.0	0
CO ₂ 相对产气速率/(%·月 ⁻¹)	31.0	200.0	0
绕组短路阻抗初值差/%	1.2	3.0	1.0
绕组绝缘介损/%	0.76	0.80	0.17
绕组电容量初值差/%	1.4	5.0	1.0
C ₂ H ₂ /(μL·L ⁻¹)	0	5	0
局部放电量/pC	72	500	30
油中含气量/%	3.2	3.0	1.0
CH ₄ /(μL·L ⁻¹)	18.5	100.0	8.7
中性点油流静电电流/μA	0.07	1.00	0.02
糖醛质量分数/(mg·L ⁻¹)	0.21	0.20	0
纸板聚合度	265	250	1 000

整理收集到的 1 000 组故障数据信息,选取其中 100 组作为待验证的样本数据,其余 900 组故障数据采用关联规则的方法根据式(2)、(3)来计算各单项状态量的常权重系数,见表 5。

表5 状态量的常权重系数

Tab. 5 Constant weights of parameters

综合状态量	单项状态量	单项状态量的常权重系数
绝缘受潮	绝缘油介损	0.064 0
	油中含水量	0.099 7
	油击穿电压	0.137 6
	绝缘电阻吸收比	0.257 5
	极化指数	0.248 8
	体积电阻率	0.052 8
铁心故障	H ₂	0.063 9
	铁心绝缘电阻	0.075 7
	铁心接地电流	0.394 5
	铁心绝缘电阻	0.159 5
	C ₂ H ₆	0.285 5
	C ₂ H ₄	0.160 5
电流回路故障	绕组直流电阻互差	0.139 9
	CO 相对产气速率	0.349 1
	CO ₂ 相对产气速率	0.360 8
	C ₂ H ₄	0.150 2
	绕组短路阻抗初值差	0.325 4
	绕组绝缘介损	0.153 2
绕组故障	绕组电容量初值差	0.328 6
	H ₂	0.086 5
	C ₂ H ₂	0.106 3
	局部放电量	0.191 7
	油中含气量	0.093 9
	H ₂	0.093 3
局部放电	CH ₄	0.373 3
	绕组直流电阻互差	0.114 0
	油中含水量	0.133 8
	中性点油流静电电流	0.493 4
	绝缘油介损	0.114 6
	体积电阻率	0.132 0
油流放电	油中含气量	0.117 5
	C ₂ H ₂	0.142 5
	绕组直流电阻互差	0.241 6
	局部放电量	0.335 9
	H ₂	0.179 0
	C ₂ H ₂	0.243 5
电弧放电	糖醛质量分数	0.290 4
	绝缘油介损	0.081 9
	油中含气量	0.086 9
	纸板聚合度	0.297 9
	绕组绝缘介损	0.154 6
	体积电阻率	0.088 3
绝缘老化	绝缘油介损	0.133 6
	油中含水量	0.170 1
	油击穿电压	0.255 8
	铁心绝缘电阻	0.177 7
	油中含气量	0.126 0
	体积电阻率	0.136 8

将表 4、5 中数据代入式(6)和式(8), 计算可得综合状态量得分及变权重系数见表 6。

表 6 综合状态量得分与变权重系数

Tab. 6 Scores and variable weights of comprehensive parameters

综合状态量	得分	变权重系数
绝缘受潮	79.18	0.082 9
铁心故障	95.21	0.068 9
电流回路故障	90.19	0.072 8
绕组故障	84.50	0.077 7
局部放电	84.19	0.078 0
油流放电	69.25	0.094 8
电弧放电	93.85	0.069 9
绝缘老化	18.69	0.351 2
绝缘油劣化	63.18	0.103 9

将表 6 中数据代入式(9)计算可得变压器最终得分 $T_2=59.07$ 。对比表 3 可知变压器运行状态为异常状态, 而绝缘老化得分明显较其他状态量偏低, 因此初步判断变压器绝缘存在非正常老化的迹象。通过对变压器进行停电进一步试验与详细论证, 确定变压器是由于夏天运行环境温度过高以及用电高峰期负荷过重导致绝缘的非正常老化。

按照上述评估方法将预留的 100 组样本数据代入文中状态评估体系, 其得分见表 7。

表 7 样本数据得分

Tab. 7 Score of the sample data

数据 类型	数据 组数	得分				
		严重 0~20	异常 20~60	注意 60~70	注意 70~80	正常 80~100
故障数据	54	11	36	7	0	0
正常数据	46	0	0	0	4	42

从表 7 可以看出, 54 组故障数据中有 11 组评估为严重状态、36 组为异常状态、7 组为注意状态, 但得分接近 60, 偏异常; 而 46 组正常数据中有 42 组评估为正常状态、4 组为注意状态, 但得分接近 80, 偏正常。评估结果与实际情况是相吻合的, 这说明文中所述方法能够较为准确地反映变压器的运行状态。

5 结论

1) 以预防性试验数据为基础, 采用综合分析的方法, 按照故障类型划分综合状态量, 根据故障产生机理来划分单项状态量, 有利于准确地进行状态评估。

2) 采用关联规则的方法可以有效避免人为主观

因素在权重确定中的缺陷,建立了以客观实际为基础的权重确定方法。

3)引入综合状态量与变权重系数相结合的应用,能够降低单项状态量因偶尔因素导致数据异常所造成的评分结果失真概率,并且避免了使用变权重系数在整体评估中所存在的固有缺陷。

参考文献:

- [1] 胡文平,尹项根,张哲. 电气设备在线监测技术的研究与发展[J]. 华北电力技术,2003(2):23-26.
HU Wenping, YIN Xianggen, ZHANG Zhe. Research and development of on-line monitoring technique for electric equipments[J]. North China Electric Power, 2003(2):23-26.
- [2] 成永红. 电力设备绝缘在线监测与诊断[M]. 北京:中国电力出版社,2001.
- [3] 严璋. 电气绝缘在线监测技术[M]. 北京:中国电力出版社,1995.
- [4] TANG W H, SPURGEON K, WU Q H, et al. An evidential reasoning approach to transformer condition assessments[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4): 1696-1703.
- [5] 吴莉琳. 变压器状态评估与信息管理系统的研究[D]. 北京:华北电力大学,2004.
WU Lilin. Study on transformer condition evaluation and information management system[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2004.
- [6] 袁志坚. 电力变压器状态维修决策方法的研究[D]. 重庆:重庆大学,2004.
YUAN Zhijian. Study on method to decision-making of condition-based maintenance for power transformer[D]. Chongqing:Chongqing University, 2004.
- [7] 李建坡,赵继印,郑蕊蕊,等. 基于灰靶理论的电力变压器状态评估新方法[J]. 吉林大学学报:工学版,2008,31(1):201-205.
LI Jianpo, ZHAO Jiyin, ZHENG Ruirui, et al. A grey target theory based method for state assessment of power transformer[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2008, 31(1):201-205.
- [8] 朱永利,申涛,李强. 基于支持向量机和DGA的变压器状态评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2008,24(6):111-115.
ZHU Yongli, SHEN Tao, LI Qiang. Power transformer condition evaluation based on support vector machine and DGA[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 24(6): 111-115.
- [9] SUMMARYADI Y T, GUMILANG H. Thermal condition assessment for power transformers operated in tropical condition[C]//International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, CMD 2008. [S.l.]:IEEE, 2008: 559-561.
- [10] SMIT J J, GULSKI E. Condition assessment of transmission network infrastructure[C]//Power Tech, 2007 IEEE Lausanne. Lausanne:IEEE, 2007:2189-2194.
- [11] 熊浩,孙才新,张昀,等. 电力变压器运行状态的灰色层次评估模型[J]. 电力系统自动化,2007,31(7):55-60.
XIONG Hao, SUN Caixin, ZHANG Yun, et al. A hierarchical grey evaluation model for operation condition of power transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7):55-60.
- [12] 廖瑞金,黄飞龙,杨丽君,等. 变压器状态评估指标权重计算的未确知有理数法[J]. 高电压技术,2010,36(9):2219-2224.
LIAO Ruijin, HUANG Feilong, YANG Lijun, et al. Calculation method of power transformer condition assessment index weight using unascertained theory[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9):2219-2224.
- [13] 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.
- [14] 丁茜. 基于关联规则的变压器故障诊断研究[D]. 北京:华北电力大学,2009.
DING Qian. Study on diagnosis for power transformer faults based on association rule mining[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2009.
- [15] 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 Sijia, LIAO Ruijin, WANG Youyuan, et al. Fuzzy synthetic evaluation of power transformer condition with variable weights[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8): 106-110.
- [16] 汪陪庄,李洪兴. 知识表示的数学理论[M]. 天津:天津科学技术出版社,1994.
- [17] 刘文奇. 均衡函数及其在变权综合中的应用[J]. 系统工程理论与实践,1997,17(4):59-65.
LIU Wenqi. Balanced function and its application for variable weight synthesizing[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 1997, 17(4): 59-65.
- [18] 输变电设备状态检修试验规程[S].
Regulations of condition-based maintenance & test for electric equipment[S].

谢荣斌(1970—),男,工程硕士,工程师,从事高电压技术研究与管理工作。
林福昌(1969—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事高电压技术、脉冲功率技术和电磁兼容研究。