

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.12.027

改进的层次分析法在变压器油纸绝缘状态评估中的应用

王楠¹, 王伟¹, 张鑫¹, 张开放², 张黎², 赵彤², 邹亮²

(1. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300384; 2. 山东大学电气工程学院, 济南 250061)

摘要: 层次分析法是一种进行定量和定性分析相结合的多目标决策分析方法, 广泛应用于多特征量权重计算。文中对层次分析法进行改进, 利用统计学的相关理论, 把系统聚类分析方法和众数理论应用于层次分析法, 结合专家所构造判断矩阵的一致性程度, 通过加权平均算法得到指标的综合权重排序。改进的层次分析法不仅充分保留了原有判断矩阵的信息, 同时全面考虑了专家个体判断结果的准确性和专家组综合意见。将改进的层次分析法应用于2个变压器油纸绝缘状态评估实例, 算例结果表明: 改进的层次分析法所得权重与传统层次分析法相比, 更逼近变压器油纸绝缘状态评估指标的“实际优先次序”。

关键词: 层次分析法; 系统聚类分析; 众数理论; 专家组

Application of Improved Analytic Hierarchy Process in Transformer Oil-paper Insulation State Evaluation

WANG Nan¹, WANG Wei¹, ZHANG Xin¹, ZHANG Kaifang², ZHANG Li²,
ZHAO Tong², ZOU Liang²

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Tianjin Electric Power Corporation, Tianjin 300384, China; 2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: Analytic hierarchy process (AHP) is a multi-objective decision analysis method which combines quantitative and qualitative analysis. It is widely used in multi-feature weight calculation. In this paper, the AHP is improved by applying the systematic cluster analysis method and the mode theory based on the theory of statistics. Combined with the consistency degree of the judgment matrix constructed by experts, the index comprehensive weight order is obtained by weighted average algorithm. The improved AHP fully retains the information of the original judgment matrix. At the same time, the judgement accuracy of individual expert and the comprehensive opinions of expert group are both taken into consideration. The improved AHP is applied to two transformer oil-paper insulation state evaluation cases. The calculation result shows that the weight obtained by the improved AHP is closer to the actual priority of transformer oil-paper insulation evaluation index compared with the traditional AHP.

Key words: analytic hierarchy process (AHP); the systematic cluster analysis; the mode theory; expert group

0 引言

电力变压器是电网中能量转换、传输的核心, 是电网安全第一道防御系统中的关键枢纽设备^[1]。统计数据表明, 变压器绝缘性故障占了变压器总故障量的81.1%^[2]。因此研究变压器绝缘故障, 保证电力变压器的安全稳定运行, 成为研究学者们一直关

注的课题^[2-3]。当前研究学者们通过对绝缘老化特征量进行分析, 研究多特征量与绝缘老化的关联性, 提出了多种基于多特征量的变压器油纸绝缘老化状态评估方法。在使用多特征量评估绝缘状态时, 学者们往往利用层次分析法进行权重计算^[3-6]。

美国运筹学家Thomas L.Satty教授于20世纪70年代初提出了著名的层次分析法(analytic hierarchy

process, AHP)^[7]。Satty 使用 1-9 及其倒数的标度作为比较的标准,定义了两两比较的判断矩阵来计算被比较元素的相对权重。由于判断矩阵两两比较的数量较多,很难做到完全一致。AHP 提出了一致性检验用来测量成对比较的一致性程度^[8-9]。但是由于一致性检验只能确定专家的思维前后一致,而不能确定专家的意见是否符合现实情况^[10]。

因此文中研究传统的 AHP,结合统计学的相关理论对传统的 AHP 进行改进。改进的 AHP 是把系统聚类分析方法和众数理论应用于 AHP,并结合所有专家所构造的判断矩阵的一致性程度,通过加权平均算法得到多专家群组决策的指标权重。文中以确定变压器电气试验指标权重和绝缘油指标权重为例,探讨改进 AHP 的应用。通过分析实际资料和计算结果,表明改进的 AHP 在确定变压器油纸绝缘指标的权重具有优越性。

1 层次分析法的基本原理与量化方法

1.1 基本原理

层次分析法(AHP)将与决策有关的定性和定量指标统一在一个模型中,将模型分为方案层、准则层和目标层等层次,既可以对指标做定量分析,又能进行定性的功能评价^[11]。

具体来说,AHP 根据问题的性质和要实现的目标,将复杂的问题分解为各种指标,并通过支配关系把这些指标进行分组,进而形成一个有序递阶的层次结构模型。由专家将同一分组下的所有指标进行两两比较构造出判断矩阵,判断矩阵是一个正互反矩阵,它的互反关系是一种把人的判断进行合理结合的方式^[12-13]。通过这种方式确定当前层次的指标相对其上一层支配指标的权重,然后通过一定算法逐层组合指标权重,最终得到最低层指标相对于最高层的综合权重^[14]。

1.2 量化方法

AHP 解决实际问题时大体可按 4 个步骤进行:

1.2.1 建立问题的层次结构

对解决问题进行条理化、层次化分析,建立问题的层次结构模型。这些层次可分为 3 类:方案层(最底层)、准则层(中间层)和目标层(最高层),确定每一层元素和评价因素集^[15]。

1.2.2 构造判断矩阵

构造出所有层次的优先关系判断矩阵 A : $A=(a_{ij})_{n \times n}$,其中 A 表示目标, i 和 j 表示评判因素。各评判因素在目标衡量中所占的比重不同,使用 a_{ij}

表示因素 i 对因素 j 的相对重要性数值。Satty 教授引用数字 1-9 和它的倒数作为相对重要性衡量标度^[7],见表 1。

表 1 标度的定义

Table 1 Definition of scale

标度	含义
1	因素 i 与因素 j 相比, i 与 j 一样重要
3	因素 i 与因素 j 相比, i 比 j 稍微重要
5	因素 i 与因素 j 相比, i 比 j 明显重要
7	因素 i 与因素 j 相比, i 比 j 强烈重要
9	因素 i 与因素 j 相比, i 比 j 极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	因素 i 与 j 比较得判断 a_{ij} ,则因素 j 与 i 比较得判断 $a_{ji}=1/a_{ij}$

1.2.3 计算权重排序及一致性检验

通过判断矩阵 A 计算权重向量 W ,层次分析法计算权重向量 W 的方法有 4 种:算术平均法、几何平均法、特征向量法和最小二乘法^[11]。

以上方法得到的权重向量 W 是否合理,还需要对判断矩阵进行一致性检验。经过一致性检验后,不符合要求的判断矩阵需要重新修改直至满足一致性检验要求,一致性检验的步骤如下。

1)由判断矩阵特征值计算一致性指标

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

式(1)中: CI 判断矩阵的一般一致性指标; $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的特征值; n 为判断矩阵的阶数。

2)查找判断矩阵的平均随机一致性指标 RI 。 n 阶判断矩阵的平均随机一致性指标见表 2。

表 2 n 阶判断矩阵的平均随机一致性指标

Table 2 The random index of n -order judgment matrix

n	RI	n	RI
1	0.00	6	1.24
2	0.00	7	1.36
3	0.52	8	1.41
4	0.89	9	1.46
5	1.12	10	1.49

3)计算一致性比率

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

式(2)中, CR 为判断矩阵的一致性判断指标。当 $CR < 0.1$ 时,可以认为判断矩阵经一致性检验后是合格的,否则需要对判断矩阵进行调整,重新进行一致性检验。

1.2.4 层次总排序及一致性检验

为确定最佳方案,需要计算方案的各种指标权重,尤其是最低层中的指标对最高层相对重要性的权值。对层次总排序进行一致性检验,计算出每一层指标相对总目标的合成权重^[12]。

2 算法改进

AHP实际应用中,决策者并不是一个,往往是专家组进行综合评价,引入专家群组决策方法。而专家群组决策时,如何分配各专家的权重是一个非常重要的问题。传统的AHP在进行群组决策时要么没有考虑专家权重,要么把所有专家一视同仁即每位专家权重都等于1/m(m代表专家个数),但是这样在实际应用中考虑问题不全面,主观性大,可信度不高^[16]。因此文中对传统的AHP进行改进,具体的算法改进步骤如下:

设参与决策的专家数量为m,当前层次的指标总数为n, $A^{(k)}=(a_{ij})_{n \times n}$ ($k=1,2,\cdots,m$)是专家k给定的判断矩阵,假设m个专家给定的判断矩阵都能通过一致性检验。通过上节介绍传统的AHP步骤,可以计算出m个专家决策出的指标初始权重。

$$W'=(W'_{ij})_{m \times n} \tag{3}$$

式(3)中,矩阵W'的元素W'_{ij}代表第i位专家对第j个指标决策出的权重值。

以专家知识结构、经验、学识等为参考对象,设有p种聚类分析指标^[17],分别对m个专家进行聚类分析,得到专家聚类分析矩阵B

$$B=(b_{ij})_{m \times p} \tag{4}$$

式(4)中,b_{ij}代表第i个专家在第j个聚类指标下的类别值($i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,p$)。

专家评判的准确度很大程度上决定于专家的学识、经验和知识结构等因素,结合专家聚类分析矩阵B^[18],对不同的判断专家,采用强制比较法按其聚类类别赋予不同权重,得到专家类容量权重矩阵C

$$C=(c_{ij})_{m \times p} \tag{5}$$

式(5)中,c_{ij}代表第i个专家在第j个聚类指标下的权重值($i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,p$)。

众数理论具有很好的保类性,对矩阵C的每一行利用众数理论,得到专家意见的重要度矩阵R

$$R=(r_1,r_2,\dots,r_m) \tag{6}$$

式(6)中,r_i代表通过运用众数理论计算出的第i个专家权重值($i=1,2,\cdots,m$)。

由式(1)、(2)可以看出,判断矩阵最大特征值λmax与一致性检验比率CR成正比,而一致性检验

比率CR值越小,代表专家判断意见越统一。所以判断矩阵最大特征值λmax与专家判断意见统一程度成反比。将专家构造的判断矩阵一致性程度与由系统聚类和众数理论表达的信息结合起来,确定专家的综合权重^[19],公式为

$$\alpha'_i=\frac{r_i}{\lambda_i} \quad i=1,2,\dots,m \tag{7}$$

式(7)中,λ_i是第i个专家所构造判断矩阵的最大特征值。将α'_i进行归一化处理,即得到最终专家权重α_i

$$\alpha_i=\frac{\alpha'_i}{\sum_{j=1}^m \alpha'_j} \tag{8}$$

利用加权平均算法得到最终的指标权重。

$$W_j=\sum_{i=1}^m W'_{ij} \alpha_i \tag{9}$$

式(9)中:W'_{ij}代表含义前面叙述已经提过,W_j代表第j个指标的最终权重。

通过上述的改进算法步骤,可以清晰的看到改进的AHP不仅充分保留了原有判断矩阵的信息,还体现出两种原则:尊重个体判断的结果及其准确性原则和重视专家组综合意见原则。

3 应用实例

邀请5位行业专家和技术人员,组成专家决策组。专家组是由国网电力公司变压器运行检修部门的技术核心成员组成。文[20]中对专家基本情况进行的调查见表3,本次实例邀请的5位专家基本情况见表4。

表3 专家基本情况调查表

Table 3 The expert basic situation questionnaire			
职称	工龄/年	学历	年龄/年
教授级高级工程师	30年以上	研究生	50岁以上
高级工程师	20~30	大学本科	40~50
工程师	10~20	大学本科	30~40
助理工程师	5~10	中专或技校	30岁以下

表4 5位专家基本情况

Table 4 Five experts basic situation			
职称	学历	工龄/年	年龄/年
教授级工程师	研究生	30年以上	50岁以上
高级工程师	研究生	20~30	40~50
高级工程师	大学本科	30年以上	40~50
工程师	大学本科	10~20	30~40
助理工程师	大学专科	5~10	30岁以下

由表4分析可知,专家的基本情况如职称、工龄、学历和年龄具有明显的关联性,即专家职称、工龄、学历和年龄具有很强的正相关性。文中以专家的职称、工龄、学历和年龄作为聚类分析的4种指标。为了能较好的区别各类之间等级,同时结合专家基本情况的关联性,在每一种聚类指标下选取4个类别,最终得到五位专家的聚类分析矩阵 B 。为使计算方便,规定聚类类别值1-4对应的职称由助理工程师—教授级高级工程师,以此类推到工龄、学历和年龄。

$$B = \begin{bmatrix} 4 & 4 & 4 & 4 \\ 3 & 4 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 4 & 3 \\ 2 & 3 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

矩阵 B 的元素 b_{ij} 代表第 i 个专家在第 j 个聚类指标下的类别值。采用强制比较法按其聚类类别值对矩阵 B 的每一列赋予不同权重,得到专家类容量权重矩阵 C

$$C = \begin{bmatrix} 4 & 4 & 4 & 4 \\ 3 & 4 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 4 & 3 \\ 2 & 3 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

对矩阵 C 的每一行利用众数理论,得到专家意见的重要度矩阵 R : $R = [4 \ 3 \ 3 \ 2 \ 1]$ 。

3.1 电气试验指标权重的确定

绝缘电阻、极化指数、吸收比和泄漏电流等指标参数的测量是运行部门重要的常规电气试验项目^[21]。5位专家分别给出这4个指标特征量的判断矩阵。

$$A^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} \\ 1 & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} \\ 2 & 2 & 1 & \frac{1}{2} \\ 3 & 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}; A^{(2)} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} \\ 2 & 1 & 1 & \frac{1}{2} \\ 3 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 1 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A^{(3)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} \\ 1 & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} \\ 2 & 2 & 1 & \frac{1}{2} \\ 3 & 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}; A^{(4)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 1 & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 2 & 2 & 1 & \frac{1}{2} \\ 2 & 2 & 2 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A^{(5)} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} \\ 2 & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 3 & 2 & 1 & \frac{1}{2} \\ 2 & 2 & 2 & 1 \end{bmatrix}。$$

由几何平均法计算出指标的初始权重 W' 见表5。

表5 指标初始权重

Table 5 The initial index weight

绝缘电阻	极化指数	吸收比	泄漏电流	$\lambda_{\max}$	CR
0.141 1	0.141 1	0.262 7	0.455 0	4.010 4	0.003 9
0.125 9	0.234 3	0.308 4	0.331 4	4.081 3	0.030 4
0.141 1	0.141 1	0.262 7	0.455 0	4.010 4	0.003 9
0.165 0	0.165 0	0.277 5	0.392 5	4.060 6	0.022 7
0.122 8	0.192 2	0.300 7	0.384 3	4.143 1	0.053 6

由表5可知5位专家给出的判断矩阵都通过了一致性检验。

由式(7)计算得: $\alpha'_1=0.997\ 4$; $\alpha'_2=0.735\ 1$; $\alpha'_3=0.748\ 1$; $\alpha'_4=0.492\ 5$; $\alpha'_5=0.241\ 4$ 。

将 α'_i 归一化,由式(8)得到最终专家权重。 $\alpha_1=0.310\ 3$; $\alpha_2=0.228\ 7$; $\alpha_3=0.232\ 7$; $\alpha_4=0.153\ 2$; $\alpha_5=0.075\ 1$

由式(9)计算出4个指标的最终权重为

$$W = [0.143\ 1 \ 0.167\ 9 \ 0.276\ 5 \ 0.412\ 5]$$

传统的AHP对4个指标进行权重计算时,专家权重进行了等权平分。对表5的所有指标权重进行算术平均运算,得到的就是使用传统的AHP计算的指标权重向量 W'' 。

$$W'' = [0.147\ 6 \ 0.169\ 3 \ 0.277\ 8 \ 0.405\ 3]$$

为了更清晰的比较改进的AHP和传统的AHP,两种算法计算的专家权重结果见表6,两种算法的计算指标权重结果见表7。

表6 电气试验的专家权重比较

Table 6 Expert weights comparison of electrical test

方法	专家1	专家2	专家3	专家4	专家5
传统AHP	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
改进AHP	0.310 3	0.228 7	0.232 7	0.153 2	0.075 1

表7 电气试验的指标权重比较

Table 7 Index weights comparison of electrical test

方法	绝缘电阻	极化指数	吸收比	泄漏电流
传统AHP	0.147 6	0.169 3	0.277 8	0.405 3
改进AHP	0.143 1	0.167 9	0.276 5	0.412 5

3.2 变压器油指标权重的确定

油中微水含量、油介损、击穿电压、界面张力和油中酸值与变压器油的绝缘性能密切相关^[22]。因此将变压器油特性评估分为3个方面:油中微水含量、油介损和其他因素(击穿电压、界面张力、酸值等),5位专家构造权重判断矩阵如下。

$$A^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ \frac{1}{2} & 1 & 3 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix}; A^{(2)} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ \frac{1}{2} & 1 & 3 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix}; A^{(3)} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 \\ \frac{1}{2} & 1 & 2 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix};$$
$$A^{(4)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 3 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}; A^{(5)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix}。$$

使用改进的 AHP 法计算变压器油指标权重的步骤与 3.1 节类似, 由于篇幅限制, 只给出计算结果, 见表 8、9。

表 8 变压器油的专家权重比较

Table 8 Expert weights comparison of transformer oil					
方法	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5
传统 AHP	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
改进 AHP	0.306 9	0.230 1	0.230 1	0.155 3	0.077 6

表 9 变压器油的指标权重比较

Table 9 Index weights comparison of transformer oil			
方法	油中微水含量	油介损	其他因素
传统 AHP	0.476 0	0.361 3	0.162 7
改进 AHP	0.496 0	0.344 6	0.159 4

3.3 实例分析

由表 6 和表 8 分析可知, 传统的 AHP 仅使用等权平均的方法计算专家组权重。而改进的 AHP 计算专家组权重时, 充分考虑了专家的基本情况和其构造判断矩阵的一致性程度, 这样的权重分配更加真实客观。

由表 7 和表 9 分析可知, 与传统的 AHP 求得权重相比, 改进的 AHP 没有改变指标权重排序: 泄漏电流>吸收比>极化指数>绝缘电阻和油中微水含量>油介损>其他因素。但在 3.1 节实例中, 提高了泄漏电流的权重值, 削弱了其他 3 项指标的权重值; 在 3.2 节实例中, 提高了油中微水含量的权重值, 削弱了其他两项指标的权重值, 使整个权重比例分配更加合理客观。因为绕组泄漏电流和油中微水含量, 反映变压器绝缘有很高的灵敏度, 能更有效的发现一些其它试验项目所不能发现的变压器绝缘缺陷^[23]。泄漏电流试验项目已经被列为预防性试验必须进行的项目之一, 油中微水含量也严重影响变压器绝缘状况^[24-26]。因此提高泄漏电流和油中微水含量指标权重是很有必要。

4 结语

文中通过对 AHP 的研究提出改进, 将聚类分析和众数理论运用到 AHP 中。相比传统 AHP 采用平

均专家组权重方法, 改进的 AHP 综合考虑了专家基本情况, 并结合了专家所构造的判断矩阵的一致性程度, 给出更加合理科学的专家组权重分配。改进的 AHP 充分考虑到专家个体判断结果的准确性和专家组综合意见。实例计算分析表明: 改进的 AHP 用于量化变压器绝缘状态评估指标权重更加真实客观, 可操作性强, 可为变压器绝缘状态评估提供理论依据。

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] 马志钦. 变压器油纸绝缘的频域介电响应特性与绝缘状态评估方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
MA Zhiqin. Frequency domain dielectric response characteristics and condition evaluation method of transformer oil-paper insulation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.

[3] 廖瑞金, 黄飞龙, 杨丽君, 等. 多信息量融合的电力变压器状态评估模型[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1455-1460.
LIAO Ruijin, HUANG Feilong, YANG Lijun, et al. Condition assessment of power transformer using information fusion[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1455-1460.

[4] 王有元, 陈璧君. 基于层次分析结构的变压器健康状态与综合寿命评估模型[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2845-2850.
WANG Youyuan, CHEN Bijun. An integrated life estimation model of power transformer based on hierarchical architecture and health index[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2845-2850.

[5] 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.

[6] 俞 乾, 李卫国, 罗日成. 基于层次分析法的大型变压器状态评价量化方法研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2011, 38(10): 56-60.
YU Qian, LI Weiguo, LUO Richeng. Research on quantitative method of power transformation condition assessment using analytic hierarchy process[J]. Journal of Hunan University(Natural Science Edition), 2011, 38(10): 56-60.

[7] 汪应洛. 系统工程[M]. 第 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1995.
WANG Yingluo. Systems engineering[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 1995.

[8] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社,

1986.
XU Shubai. Principle of analytic hierarchy process[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1995.
- [9] SATTY T L. The analytic hierarchy process[M]. New York: McGraw - Hill, 1980.
- [10] 朱建军. 层次分析法的若干问题研究及应用[D]. 沈阳: 东北大学, 2005.
ZHU Jianjun. Research on some problems of the analytic hierarchy process and its application[D]. Shenyang: Northeastern University, 2005.
- [11] 邓 雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
DENG Xue, LI Jiaming, ZENG Haojian, et al. Research on computation methods of AHP weight vector and its applications[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(7): 93-100.
- [12] 刘 江. 基于层次分析法的企业运输方式的选择[D]. 北京: 对外经济贸易大学, 2006.
LIU Jiang. The choice of enterprise transportation mode based on analytic hierarchy process[D]. Beijing: University of International Business and Economics, 2006.
- [13] 苏为华. 多指标综合评价理论与方法问题研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2000.
SU Weihua. Research on the theory and method of multi-index comprehensive evaluation[D]. Xiamen: Xiamen University, 2000.
- [14] 付可欣, 彭 澎, 孔 静, 等. 基于层次分析法的输电网能效评估方法研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(3): 23-26.
FU Kexin, PENG Peng, KONG Jing, et al. Study on the method of transmission efficiency evaluation based on AHP [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53 (3): 23-26.
- [15] 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, 2014.
CAO Jianjun. The integrated evaluation of statement of transformer oil-paper insulation based on fuzzy analytic hierarchy process[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [16] 夏 萍, 汪 凯, 李宁秀, 等. 层次分析法中求权重的一种改进[J]. 中国卫生统计, 2011, 28(2): 151-154.
XIA Ping, WANG Kai, LI Ningxiu, et al. Improvement of index weight in analytic hierarchy process[J]. Chinese Journal of Health Statistics, 2011, 28(2): 151-154.
- [17] 白雪梅, 赵松山. 多种综合评价方法的优劣判断研究[J]. 统计研究, 2000(7): 45-48.
BAI Xuemei, ZHAO Songshan. Study on the advantages and disadvantages of various comprehensive evaluation methods [J]. Statistical Research, 2000(7): 45-48.
- [18] 孙义豪, 李秋燕, 丁 岩, 等. 基于主成分分析及系统聚类的县域电网综合评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 30-36.
SUN Yihao, LI Qiuyan, DING Yan, et al. County power grid evaluation system based on principal component analysis and hierarchical cluster analysis[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 30-36.
- [19] 耿秀丽, 肖子涵, 孙绍荣. 基于双层专家权重确定的风险型大群体决策[J]. 控制与决策, 2017, 32(5): 885-891.
GENG Xiuli, XIAO Zihan, SUN Shaorong. Risky large group decision - making based on two - lawyer expert weight determination[J]. Control and Decision, 2017, 32(5): 885-891.
- [20] 廖玉祥. 一种电力变压器运行状态综合评估模型的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
LIAO Yuxiang. Study on comprehensive assessment model of transformer operation condition[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [21] 张懿议, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 综合考虑可靠性与经济性的电力变压器检修方案优选[J]. 电工技术学报, 2014, 29 (11): 191-200.
ZHANG Yiyi, LIAO Ruijin, YANG Lijun, et al. Maintenance decision making of power transformer by integrated considering reliability and economy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(11): 191-200.
- [22] 廖瑞金, 杨丽君, 郑含博, 等. 电力变压器油纸绝缘热老化研究综述[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 1-12.
LIAO Ruijin, YANG Lijun, ZHENG Hanbo, et al. Reviews on oil-paper insulation thermal aging in power transformers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 1-12.
- [23] 王 谦. 基于模糊理论的电力变压器运行状态综合评估方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
WANG Qian. Study of the comprehensive assessment method for the power transformer condition in service with fuzzy theory[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.
- [24] 许 渊, 刘有为, 王文焕, 等. 大型电力变压器油纸绝缘含水量的介质响应诊断技术[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(33): 133-140.
XU Yuan, LIU Youwei, WANG Wenhuan, et al. Moisture content analysis of oil - paper insulation for large power transformers using dielectric response methods[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2012, 32(33): 133-140.
- [25] 连鸿松. 油中气体含量对电容型设备绝缘性能的影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(5): 96-101.
LIAN Hongsong. Study on the influence of gas contents in the oil on the insulation performance of capacitive equipment[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(5): 96-101.
- [26] 油浸式变压器绝缘老化判断导则: DL/T 984—2005[S]. 2005.
Guide for the diagnosis of insulation aging in oil-immersed power transformer: DL/T 984—2005[S]. 2005.
- 王 楠(1983—), 男, 高工, 博士, 主要从事高电压技术方面。
张开放(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向高电压与绝缘技术(通讯作者)。