

基于改进理想点解法的电力变压器状态综合评估

程文清, 李新叶

(华北电力大学电子与通信工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 变压器作为电力系统的枢纽设备,其运行状态直接影响系统的安全运行水平。因此,准确判断变压器的运行状态具有重要意义。目前对变压器状态综合评估的研究多是对单台变压器给出了状态评价等级,没有实现对电力企业多台变压器状态的综合排序。对多属性决策理论的理想点解法进行了研究,改进了效益型指标和成本型指标的规范化公式及正负理想解的定义,使之适用于变压器状态综合评估与状态排序,提出了基于理想点解法的变压器状态综合评估模型,为电力企业从整体上掌握多台变压器的状态,从而为变压器的检修决策提供依据。实例分析表明,提出的方法是合理有效的。

关键词: 电力变压器; 状态综合评估; 理想点解法; 家族质量; 多属性决策

中图分类号: TM41

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)06-0120-04

Integrated Condition Assessment of Power Transformer Based on Improved TOPSIS

CHENG Wen-qing, LI Xin-ye

(Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: As the key element in power system, the safe operating of transformer is close correlative with the safety of the power system. So it is important to determine accurately the operation status of running transformer. At present, mostly research of integrated condition assessment of transformer is only present the evaluation grade of a single transformer condition, and not achieve rank many transformers according to their condition. This paper studied of TOPSIS in multiple attribute decision making, improved normalization formulas of income-type index and cost-type index, gave the definition of positive ideal solution and negative ideal solution, making it suitable for Integrated condition assessment and ranking of power transformer. It also gave the integrated condition assessment model of power transformer based on TOPSIS, making power enterprise to grasp many transformer conditions as a whole and to decide to examine transformers. Analysis of real example illustrates that our method is rational and effective.

Key words: power transformer; integrated condition assessment; TOPSIS; family quality; multiple attribute decision making

0 引言

变压器运行状态直接影响系统的安全运行水平,准确评价变压器的运行状态对电网的安全运行具有重要意义。文[1]用信息融合方法对变压器主绝缘状态进行评估;文[2]提出了对设备状态进行评分的解决方案,即综合设备的各类状态信息,对设备的健康状态评分。目前,变压器状态综合评估越来越受到关注,其方法主要是通过模糊理论^[3-5]、灰色理论^[6]、物元理论^[7]等综合分析变压器的状态数据,从而达到状态评估的目的。然而以上方法均是对单台变压器给出状态评价等级,并没有研究对电力企业多台变压器状态的综合排序。

多属性决策(MADM)是多目标决策理论研究的重要内容,主要解决有多个属性指标的有限决策方案的排序问题。多属性决策广泛用于日常生活的决策中,如用于确定战场目标的打击顺序^[8],确定房地产投资项目^[9]。理想点解法亦称为TOPSIS法,是一种有效的多属性决策方法。该方法通过构造评价问题的正理想解和负理想解,计算每个方案到理想方案的相对贴近度来对方案进行排序^[10]。笔者对理想点解法进行了改进,使之适用于变压器状态综合评估与状态排序,使电力企业从整体上掌握多台变压器的状态,从而为变压器的检修决策提供依据。

1 理想点解法的方法和原理

设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 为多属性决策问题的方案

收稿日期:2009-06-08; 修回日期:2009-08-10

作者简介:程文清(1973),女,工程师,主要从事电力通信、状态评估等方面的研究工作。

集, $U=\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 为决策问题的指标集, $W=\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 为决策问题的评价指标的加权向量, 且满足 $0 \leq w_j \leq 1, \sum_{j=1}^n w_j = 1$ 。方案 x_i 对指标 u_j 的评价值记为 a_{ij} , 则由方案集 X 和指标集 U 可以确定一个 $m \times n$ 阶的矩阵 $A=(a_{ij})_{m \times n}$, 称矩阵 A 为决策矩阵。

常见的指标属性类型有效益型、成本型、固定型、区间型和偏离型属性等^[10]。由于各指标间的矛盾性, 为了便于比较, 需对决策矩阵 $A=(a_{ij})_{m \times n}$ 进行规范化处理。对效益型指标的规范化处理采用式(1)

$$b_{ij} = \frac{a_{ij} - a_j^{\min}}{a_j^{\max} - a_j^{\min}} \quad (1)$$

式(1)中, $a_j^{\min} = \min_{1 \leq i \leq m} a_{ij}, a_j^{\max} = \max_{1 \leq i \leq m} a_{ij}$ 。

对成本型指标的规范化处理采用公式(2)

$$b_{ij} = \frac{a_j^{\max} - a_{ij}}{a_j^{\max} - a_j^{\min}} \quad (2)$$

规范化后的决策矩阵为 $B=(b_{ij})_{m \times n}$, 决策矩阵 B 经过加权处理后得到矩阵 $C=(c_{ij})_{m \times n}, c_{ij} = w_j b_{ij}$ 。分别采用下面公式计算出正理想解 c_j^+ 和负理想解 c_j^-

$$c_j^+ = \max\{c_{ij} | i=1, 2, \dots, m\} = \max\{w_j b_{ij} | i=1, 2, \dots, m\} = \max\{b_{ij} | i=1, 2, \dots, m\} w_j = b_j^+ w_j, j=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$c_j^- = \min\{c_{ij} | i=1, 2, \dots, m\} = \min\{w_j b_{ij} | i=1, 2, \dots, m\} = \min\{b_{ij} | i=1, 2, \dots, m\} w_j = b_j^- w_j, j=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中, $b_j^- = \min\{b_{ij} | i=1, 2, \dots, m\}, j=1, 2, \dots, n$;

$b_j^+ = \max\{b_{ij} | i=1, 2, \dots, m\}, j=1, 2, \dots, n$ 。

由此构成评价问题的正理想解和负理想解

$$c^+ = (c_1^+, c_2^+, \dots, c_n^+) = (b_1^+ w_1, b_2^+ w_2, \dots, b_n^+ w_n) \quad (5)$$

$$c^- = (c_1^-, c_2^-, \dots, c_n^-) = (b_1^- w_1, b_2^- w_2, \dots, b_n^- w_n) \quad (6)$$

计算到正理想解和负理想解的距离, 用误差平方和表示

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^+)^2 = \sum_{j=1}^n (w_j b_{ij} - w_j b_j^+)^2 = \sum_{j=1}^n w_j^2 (b_{ij} - b_j^+)^2, i=1, 2, \dots, m; \quad (7)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^-)^2 = \sum_{j=1}^n (w_j b_{ij} - w_j b_j^-)^2 = \sum_{j=1}^n w_j^2 (b_{ij} - b_j^-)^2, i=1, 2, \dots, m; \quad (8)$$

计算各方案的贴近度

$$t_i^+ = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (1 \leq i \leq m) \quad (9)$$

贴近度越大, 方案越优, 贴近度越小, 方案越劣。故可根据贴近度的大小对方案进行排序, 从中选出最优方案^[10]。

2 基于理想点解法的变压器状态综合评估模型

2.1 评价指标体系

根据预防性试验规程规定和现场获得的试验项目数据, 把评价指标划分为两个层次。其中一级指标有电气试验、油中溶解气体色谱分析、油质试验及其他因素4个, 每个一级指标下又包含着多个二级指标。选取的指标体系具体如下: 电气试验项目指标 A_1 , 具体包括绝缘电阻 A_{11} , 吸收比 A_{12} , 整体介损 A_{13} , 绕组直流电阻三相不平衡率 A_{14} 等; 油中溶解气体分析 A_2 , 具体包括氢气 A_{21} 、乙炔 A_{22} 、总烃 A_{23} 的气体含量及相对产气速率和绝对产气速率; 油质试验 A_3 , 主要指油介损 A_{33} ; 其他因素 A_4 , 指变压器运行工况(包括变压器遭受过负荷、短路情况, 操作过电压, 运行中的异常噪音)、变压器质量缺陷情况、检修情况等对变压器状态的影响。

2.2 指标规范化处理的改进

传统理想点解法的效益型指标和成本型指标的规范化公式都以各个方案中该指标的最大值和最小值为参考比较, 由此得出的正理想解和负理想解对应所有方案中每项指标的最优值和最劣值。在变压器状态评估中, 每项指标的正理想解对应变压器优质产品出厂时或交接试验测得的值, 每项指标的负理想解对应预防性试验规程中规定的注意值, 由此计算出的各方案(变压器)到正理想解和负理想解的距离就在一定程度上分别表示了变压器目前状态偏离最优状态和注意状态的程度, 与正理想解的距离越小, 而与负理想解的距离越大, 就表示变压器状态越优, 可以根据各变压器到正理想解和负理想解的距离对多台变压器状态进行排序。因此, 在将理想点解法用于变压器状态评估时, 对效益型指标的规范化处理做如下改进, b_{ij}^b 为

$$b_{ij}^b = \frac{a_{ij} - a_j^b}{a_j^a - a_j^b} \quad (10)$$

式(10)中, a_j^b 为预防性试验规程中规定的指标 u_j 的注意值, a_j^a 为变压器优质产品出厂时、交接试验测得的指标 u_j 的值或规程中说明的指标 u_j 的良好值, a_{ij} 为第 i 台变压器指标 u_j 的实测值。

对成本型指标的规范化处理见公式(11), 式中每个符号的含义同公式(10)。

$$b_{ij}^b = \frac{a_j^b - a_{ij}}{a_j^b - a_j^a} \quad (11)$$

2.3 变压器状态评估模型

分别对电气试验项目指标、油中溶解气体分析、油质试验中包含的各项二级指标按照公式(10)或

(11)进行规范化处理,再求加权平均和,得到一级指标电气试验项目、油中溶解气体分析、油质试验的规范化值 b_{i1} 、 b_{i2} 、 b_{i3} ,其他因素指标 b_{i4} 的取值根据专家打分,分值在 0~1 之间。

多台变压器 $X=\{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 组成多属性决策问题的方案集,一级指标电气试验项目 (A_1)、油中溶解气体分析 (A_2)、油质试验 (A_3) 及其他因素 (A_4) 组成决策问题的指标集, $W=\{w_1, w_2, w_3, w_4\}$ 为评价指标的权重向量,且满足 $0 \leq w_j \leq 1, \sum_{j=1}^n w_j = 1$ 。变压器 x_i 的一级指标 A_j 的规范化值为 b_{ij} ,则由方案集 X 和指标集 A 确定了一个 $m \times n$ 阶规范后的决策矩阵 $B=(b_{ij})_{m \times n}$,这里 $n=4$ 。

传统的理想点解法中, $b_j^- = \min\{b_{ij} | i=1, 2, \dots, m\}, j=1, 2, \dots, n; b_j^+ = \max\{b_{ij} | i=1, 2, \dots, m\}, j=1, 2, \dots, n$;而在变压器状态评估中,根据公式(10)、(11),应取 $b_j^- = 0, b_j^+ = 1$,然后按照前述方法求正负理想解,再计算各台变压器(方案)到正负理想解的距离,从而求得贴近度,根据贴近度值,确定变压器等级及对多台变压器状态排序。

2.4 指标权值的确定

2.4.1 二级指标权值的确定

基于层次分析法求得的绝缘电阻、吸收比、介损值及绕组直流电阻的权重分配为 $W=(0.1787, 0.1787, 0.4074, 0.2352)$,乙炔、氢气和总烃的权重分配为 $W=(0.333, 0.333, 0.333)$ 。如果乙炔、氢气和

总烃中有一项指标规范化值为 0,则油中溶解气体色谱指标规范化值为 0,不需要对 3 个二级指标求加权平均和。油质试验和其他因素的二级指标只有一项,不需计算权重。

2.4.2 一级指标权值的确定

电气试验、油中溶解气体色谱分析、油质试验和其他因素作为电力变压器状态评估的一级指标,根据其相互之间的相对重要程度,最终得到其权重分配为 $W=(0.2395, 0.4327, 0.2395, 0.0883)$ 。

2.5 变压器状态等级的评定及状态排序

参照文[2],将变压器的状态分为优良状态(延期维修),较好状态(延期/计划维修),一般状态(优先安排),劣化状态(尽快维修),拟故障状态(立即安排维修)。变压器状态等级划分依据见表 1。

表 1 变压器状态等级划分依据

贴近度	0~0.2	0.21~0.4	0.41~0.6	0.61~0.85	0.86~1
状态等级	拟故障状态	劣化状态	一般状态	较好状态	优良状态

最后,根据贴近度的大小对方案进行排序,贴近度越大,方案越优,贴近度越小,方案越劣。

3 实例分析

表 2 列出了 4 台变压器的试验数据,前 3 台变压器电压等级为 220 kV,第 4 台变压器电压等级为 35 kV。

根据文[4]和预防性试验规程规定的各项电气

表 2 4 台变压器的试验数据

T	油中气体组分含量/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)			电气试验			油质试验		其他因素
	C_2H_2	H_2	总烃	绝缘电阻/M Ω	吸收比	绕组介损值/%	绕组直流电阻不平衡系数/%	油介损(90 $^\circ\text{C}$)/%	
T ₁	0	18.0	61.8	8 000(32 $^\circ\text{C}$)	1.50	0.33(32 $^\circ\text{C}$)	0.90	0.02	运行工况良好,没有遭受操作过电压作用,有一次不是很严重的缺陷记录,无家族质量缺陷史。
T ₂	0	10.2	10.33	5 500(41 $^\circ\text{C}$)	1.31	0.32(41 $^\circ\text{C}$)	0.85	0.749	运行工况良好,没有遭受操作过电压作用,没有缺陷记录;无家族质量缺陷史。
T ₃	0	22.455 9	7.959 2	7 200(38 $^\circ\text{C}$)	1.41	0.30(38 $^\circ\text{C}$)	0.43	0.281 5	运行工况良好,没有遭受操作过电压作用,没有缺陷记录;无家族质量缺陷史。
T ₄	74.64	81.68	164.41	1 800(32 $^\circ\text{C}$)	1.41	0.467 2(32 $^\circ\text{C}$)	1.19	2.750	该台变压器没有遭受操作过电压作用。该局共有同类型变压器 8 台,其中有 2 台有不是很重要的缺陷记录;一年来,该变压器共记录有 5 项缺陷。

试验项目的注意值和最优值,分别对效益型指标绝缘电阻、吸收比按照公式(10)进行规范化处理,对成本型指标整体介损、绕组直流电阻不平衡系数按照公式(11)进行规范化处理,求出的 4 台变压器绝缘电阻的规范化值分别为:1、1、1、1;吸收比的规范化值分别为:0.5、0.31、0.41、0.41;介损 $\tan \delta$ 的规范化值

分别为:0.7、0.769 5、0.677 5、0.772 7;绕组直流电阻不平衡系数的规范化值分别为:0.55、0.575、0.785、0.405。根据 2.4 节求出的权重 $W=(0.1787, 0.1787, 0.4074, 0.2352)$,对这 4 项二级指标求加权和,得到 4 台变压器电气试验项目的规范化值分别为 0.682 7、0.682 8、0.712 6、0.662。

根据预防性试验规程规定,运行时氢气、总烃含量均应小于 150 $\mu\text{L/L}$, 35~220 kV 变压器乙炔含量应小于 5 $\mu\text{L/L}$, 按公式(11)求出的 4 台变压器氢气、乙炔和总烃的规范化值如下

$$\begin{matrix} & \text{氢气} & \text{乙炔} & \text{总烃} \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.88 & 1 & 0.588 \\ 0.932 & 1 & 0.931 \\ 0.85 & 1 & 0.9469 \\ 0.455 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (12)$$

对前 3 台变压器以上 3 项指标求平均值, 得到 3 台变压器油色谱试验项目的规范化值分别为 0.823、0.954、0.932。变压器 4 由于乙炔和总烃的规范化值都为 0, 油色谱试验项目的规范化值取 0。

4 台变压器油介损的规范化值分别为 0.5、0.813、0.929 6、0.312 5。

4 台变压器其他因素的分值分别为: 0.9、1、1、0.5。

由方案集 X 和一级指标集确定的规范化后的决策矩阵 $B=(b_{ij})_{4 \times 4}$ 如下

$$B = \begin{bmatrix} 0.683 & 0.823 & 0.5 & 0.9 \\ 0.683 & 0.954 & 0.813 & 1 \\ 0.713 & 0.932 & 0.93 & 1 \\ 0.662 & 0 & 0.313 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (13)$$

一级指标的权重分配为 $W=(0.239 5, 0.432 7, 0.239 5, 0.088 3)$ 。由此构成评价问题的正理想解和负理想解为: $c^+=(c_1^+, c_2^+, c_3^+, c_4^+)=(b_1^+w_1, b_2^+w_2, b_3^+w_3, b_4^+w_4)=(w_1, w_2, w_3, w_4)=(0.239 5, 0.432 7, 0.239 5, 0.088 3)$; $c^-(c_1^-, c_2^-, c_3^-, c_4^-)=(0, 0, 0, 0)$ 。

计算 x_1, x_2, x_3, x_4 到正理想解和负理想解的距离分别为

$$\begin{aligned} d_1^+ &= 0.025 9, d_2^+ = 0.016 3, d_3^+ = 0.005 86, d_4^+ = 0.222 7 \\ d_1^- &= 0.174 2, d_2^- = 0.242 8, d_3^- = 0.249 2, d_4^- = 0.032 7 \end{aligned}$$

由公式

$$t_i^+ = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (1 \leq i \leq m) \quad (14)$$

得 x_1, x_2, x_3, x_4 的贴近度分别为

$$t_1^+ = 0.871, t_2^+ = 0.937, t_3^+ = 0.977, t_4^+ = 0.128。$$

根据表 1 可知, 变压器 1、变压器 2 和变压器 3 的状态属于优良, 可延期安排检修, 而变压器 4 的状态属于拟故障状态, 应立即安排检修。根据贴近度大小, 排序得到 x_1, x_2, x_3, x_4 的优劣顺序为 $x_4 < x_1 < x_2 < x_3$ 。对于变压器 4, 从色谱数据可看出, 总烃值达到 164.41, 超过预试规程中的注意值 150, 而且 C_2H_2 已远远超过注意值, 经诊断为高能量放电故障。实际结果是对该变压器进行吊罩检查, 发现有载调压开关有一点烧灼痕迹, 即有高能量放电故障发生。

4 改进后的理想点解法与传统理想点解法的比较

现对改进的理想点解法与传统理想点解法用于变压器状态评估时的不同进行比较。

对第 3 节中给出的变压器 1、变压器 2 和变压器 3, 应用笔者提出的方法得到

$$d_1^+ = 0.025 9, d_2^+ = 0.016 3, d_3^+ = 0.005 86$$

$$d_1^- = 0.174 2, d_2^- = 0.242 8, d_3^- = 0.249 2$$

$$t_1^+ = 0.871, t_2^+ = 0.937, t_3^+ = 0.977$$

得出变压器 1、变压器 2 和变压器 3 的状态属于优良, 可延期安排检修, x_1, x_2, x_3 的状态优劣顺序为 $x_1 < x_2 < x_3$ 。

现用传统理想点解法对这 3 台变压器重新评估, 得规范化后的决策矩阵 $B=(b_{ij})_{3 \times 4}$ 为

$$B = \begin{bmatrix} 0.680 9 & 0.848 6 & 0.303 8 & 0.9 \\ 0.660 8 & 0.994 9 & 0.810 6 & 1 \\ 0.859 5 & 0.942 8 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

计算 x_1, x_2, x_3 到正理想解和负理想解的距离和贴近度分别为

$$d_1^+ = 0.033 6, d_2^+ = 0.004 31, d_3^+ = 0.000 5$$

$$d_1^- = 0.001 15, d_2^- = 0.018 8, d_3^- = 0.031 8$$

$$t_1^+ = 0.03, t_2^+ = 0.814, t_3^+ = 0.985$$

虽然仍能得到 x_1, x_2, x_3 的优劣顺序为 $x_1 < x_2 < x_3$, 但是由于传统理想点解法是以多个方案中的最优值和最劣值作比较, 尽管 x_1 的各项指标远离规程中规定的注意值, 但它比其他两台变压器的相应指标值差, 因此, $t_1^+ = 0.03$, 比其他两台小很多, 但并不能说该变压器当前状态不好, 即由传统方法的贴近度不能确定变压器的状态等级。而笔者提出的方法却可以做到这一点。

5 结语

多属性决策中的理想点解法通过构造评价问题的正理想解和负理想解, 并用靠近正理想解和远离负理想解的程度, 通过计算每个方案到理想方案的相对贴近度来对方案进行排序。通过对理想点解法的改进, 使之适用于变压器状态综合评估与状态排序, 提出了基于理想点解法的变压器状态综合评估模型。实例分析表明, 经过改进的理想点解法用于变压器状态综合评估与状态排序是合理有效的。

参考文献:

- [1] 谢红玲, 律方成. 基于信息融合的变压器状态评估方法研究[J]. 华北电力大学学报, 2006, 33(2): 8-11.
- [2] 刘有为, 李光范, 高克利, 等. 制订《电气设备状态维修导则》的原则框架[J]. 电网技术, 2003, 27(6): 64-67, 76.

(下转第 127 页)

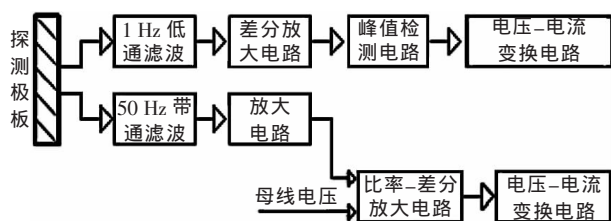


图6 低频信号通道框图

低频信号处理分为2路:一路通过1 Hz低通滤波电路分离出直流分量,经过差分放大、峰值检测和电压-电流变换后,转化为输出信号;另一路可通过50 Hz带通滤波电路分离出工频交流分量,经过放大后,与母线电压取比率-差分,然后经电压-电流变换,转换为输出信号。

由电路框图可以看到,对真空灭弧室屏蔽罩电位信号的处理分别是针对屏蔽罩的直流和交流电位。如前所述,这两者都可以作为真空度的标定信号。但对于交流信号,将之与母线电压取比率-差分,通过这种方式可有效消除母线电压波动和谐波的干扰,防止出现误报现象。

4 结语

当真空压强接近0.01 Pa(国家标准要求的极限真空度)时,虽然正常状态屏蔽罩上电位无明显变化,但带载操作时,在电弧作用下,短时真空压强要升高一个数量级以上,屏蔽罩上电位出现明显变化并且伴有放电。

(上接第123页)

[3] 纪航,朱永利,郭伟.基于模糊综合评价的变压器状态评分方法研究[J].继电器,2006,34(5):29-33.
 [4] 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].重庆大学,2005.
 [5] 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.
 [6] 袁志坚,孙才新,袁张渝,等.变压器健康状态评估的灰色聚类决策方法[J].重庆:重庆大学学报(自然科学版),2005,28(3):22-25.

经过试验及现场环境应用,证明精心设计的比例差分双通道电场探头可有效消除各种电场干扰,并能抵消掉母线电压波动造成的影响。该方法可有力推动真空度在线监测的实用化。

参考文献:

[1] 赵子玉,李兆治,陈雾,等.用旋转式电场探头在线检测灭弧室真空度[J].高压电技术,2003,29(10):29-31.
 [2] 段雄鹰,赵子玉,邹积岩.真空灭弧室真空度在线检测的试验研究[J].高压电技术,2000,38(4):30-32.
 [3] 邹积岩,何俊佳,程礼椿.真空灭弧室的真空度测试与在线监测[J].高压电技术,1993,29(3):13-17.
 [4] 潘有顺.10 kV真空开关在线真空监测装置:中国,00210754.6[P].2000-12-06.
 [5] 李卫国,邓本再,罗日成,等.真空灭弧室内部气体压力的在线诊断系统[J].高压电技术,2004,40(3):213,214,217.
 [6] 李卫国,罗日成.真空开关真空度在线检测系统的开发[J].真空,2005,41(4):52-55.
 [7] 薛增泉,吴全德.电子发射与电子能谱[M].北京:北京大学出版社,1993:193-201.
 [8] THOMAS D E, WIGGINS E M, SALAS T M, et al. Induced Transients in Substation Cables: Measurements and Models[J]. IEEE Transactions on P.D, 1994, 9(6):78-81.
 [9] VAN DEURSEN A P J, VAN HORCK F B M, VAN HELVOORT, et al. Transfer Impedance of Nonmagnetic Conduits of Various Shapes [J]. IEEE Transactions on EMC, 2001, 43(1):293-296.
 [10] NUCCI C A, RACHIDI F. On the Contribution of the Electromagnetic Field Components in Field-to-transmission Line Interaction[J]. IEEE Transactions on EMC, 1995, 37(4):184-189.

[7] 熊浩,孙才新,杜鹏,等.基于物元理论的电力变压器状态综合评估[J].重庆大学学报(自然科学版),2006,29(10):24-28.
 [8] 曲在滨,李全龙,徐晓飞.战场目标打击顺序的多属性决策方法[J].计算机工程与设计,2007,28(13):3 025-3 026,3 122.
 [9] 岳意定,王雄.房地产投资的多属性模糊贝叶斯决策[J].统计与决策,2007,(4):42-44.
 [10] 董媛媛,赵明霞.多属性决策的理想解法及其应用[J].武汉:统计与决策,2006,(11):19-20.

检验报告查询 请浏览中国高压电器网
 (www.chinahva.com)