

## 基于最优权重与雷达图的变压器状态评估

吴翔<sup>1</sup>, 何怡刚<sup>1</sup>, 张大波<sup>1</sup>, 张朝龙<sup>2</sup>, 张宁<sup>3</sup>

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230002; 2. 安庆师范学院物理与电气工程学院, 安徽 安庆 246011; 3. 国网安徽电力公司检修公司, 安徽 合肥 230061)

**摘要:** 实现更加贴近电力变压器实际运行状态的评估, 对于电网合理、经济、科学安排检修具有重要意义。针对主观、客观权重单一评估或者简单将二者拟合造成整体评估片面性的问题, 提出了基于最小方差理论的最优组合赋权方法, 使得权重得到更加合理的分配。将雷达图法的特征量计算方法应用到变压器评估中, 使得评估结果更加直观、简洁, 也避免数据信息在归一化过程中的遗漏。运用该方法对实际变压器数据进行了分析, 验证了方法的可行性和合理性。

**关键词:** 变压器; 最小方差; 组合权重; 改进雷达图; 状态评估

### Transformer condition assessment based on optimal weight and radar map

WU Xiang<sup>1</sup>, HE Yigang<sup>1</sup>, ZHANG Dabo<sup>1</sup>, ZHANG Chaolong<sup>2</sup>, ZHANG Ning<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230002, China;  
2. School of Physics and Electrical Engineering, Anqing Normal University, Anqing 246011, China;  
3. State Grid Anhui Electric Power Maintenance Company, Hefei 230061, China)

**Abstract:** Realizing the assessment closer to real operation condition of power transformer is of great significance for arranging grid maintenance reasonably, economically and scientifically. This paper proposes the optimal combination determining weights method based on the minimum variance, which could solve the problems that the subjective weight or objective weight is assessed separately or the two weights are just simply fitted causing integral assessment one-sidedness, thus makes the weights distribute more reasonably. An eigenvalue calculating algorithm of radar chart method is applied to the transformer condition assessment, which makes the results more directly and simply and also avoids the data information omission in the process of normalization. Finally, the real data of transformer is analyzed by using the proposed method, which verifies the feasibility and reasonability of the method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577046), Ministry of Education Science and Technology Foundation of China (No. 313018), Anhui Provincial Science and Technology Foundation of China (No. 1301022036), National Defense Science and Technology Plan Projects (No. C1120110004 and No. 9140A27020211DZ5102), Natural Science Foundation of Anhui Province (No. 1608085QF157), and Program for Outstanding Young Talents in Colleges and Universities of Anhui Province Project (No. gxyqZD2016207).

**Key words:** transformer; minimum variance; combination weight; improved radar chart; condition assessment

## 0 引言

变压器作为电气设备, 在电力系统中具有重要地位, 其是否可靠运行直接关系到电网的稳定安

全<sup>[1-3]</sup>。长期以来, 电网公司都是采用定期检修的方式, 然而这种方法会导致“检修过度, 检修不足”的问题。依据变压器的状态进行检修, 它可节约大量人力物力, 最大限度地保证电网的安全可靠性<sup>[4-5]</sup>。因此, 对变压器状态进行精确评估就具有重要意义。

对于变压器评估, 国内外学者引入了物元理论、模糊综合评判、贝叶斯网络、灰靶理论、云模型等方法<sup>[6]</sup>。应用模糊理论做出了评估, 较全面地考虑到影响运行的因素, 但它所用的常权模式往往不能客观反映某些异常值<sup>[7]</sup>。用变权替代了常权, 更加

**基金项目:** 国家自然科学基金(51577046); 教育部科学技术研究重大项目(313018); 安徽省科技计划重点项目(1301022036); 国防科技计划项目(C1120110004, 9140A27020211DZ5102); 安徽省自然科学基金(1608085QF157); 安徽省高校优秀青年人才支持计划重点项目(gxyqZD2016207)

贴近了实际运行状况,但却忽略了信息的不充分性。文献[8]运用了层次分析法,但在确定权重时更容易受人为因素的影响。文献[9]将云理论运用到变压器评估中,但过程过于复杂,计算量较大。

权重的确定是状态评估中的关键,由于变压器各因素指标太多且所占重要程度又不尽相同<sup>[10]</sup>,所以给予各指标合理、准确的权重值,才能更加贴近变压器实际运行状态。

由于以往在对变压器的评估中,往往只单一考虑主观、客观权重,或者简单拟合,这样效果不理想,无法最好贴近实际运行状态,本文引出了基于主客观最优组合权重的方法给各指标定权,在基于方差最小的原则下,达到组合权重最优,逼近实际状况。并且将常用于财务分析中的雷达图法运用到变压器设备的评估中,用此法将多元不相关信息进行整合计算进而加以评价,这样使得整个评价过程更加简便,结果更加直观。

变压器状态评估的一般流程图如图 1 所示。

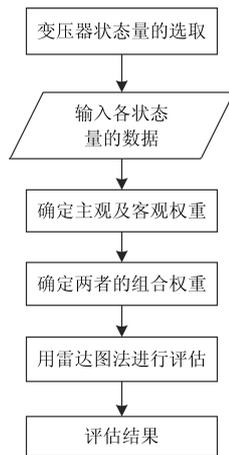


图 1 变压器状态评估流程图  
Fig. 1 Flow chart of transformer state assessment

### 1 变压器运行状态量的选取

可以表征变压器状态的物理量多且繁杂<sup>[11-13]</sup>,每一指标所占有的比重又不同。本文根据我国 DL/596—1996《电力设备预防性试验规程》和 GB/T7252—2001《变压器油中溶解气体分析和判断导则》选取了图 2 中的指标作为评价体系。

### 2 变压器运行状态量最优组合权重的确定方法

为了更加贴近变压器的真实状态,不仅需要主观性的经验,也需要考虑客观的设备本身情况,所以要将主观、客观的两种权重方法进行组合赋权拟

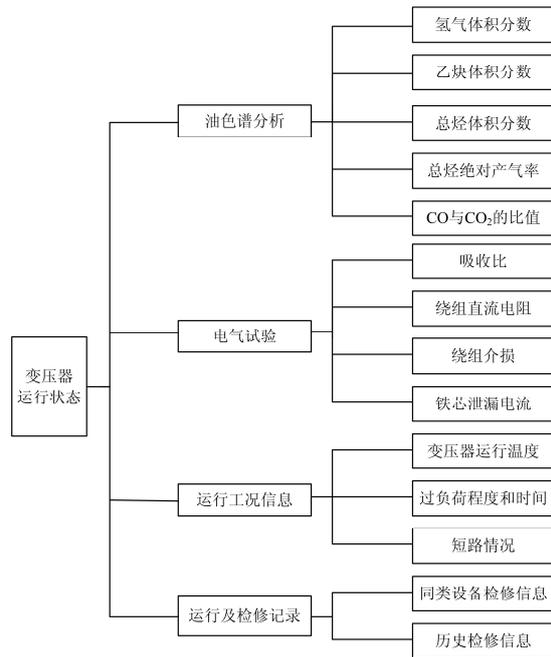


图 2 变压器状态运行评价指标体系

Fig. 2 Transformer condition assessment index system

合。综合各种组合赋权方法,常见的是简单的线性表示:  $\omega = \alpha u + (1 - \alpha)v$ , 其中  $\omega$  为组合权重值,  $u$  为主观权重值,  $v$  为客观权重值,  $\alpha$  为主观权重的系数,然而  $\alpha$  的取值主观性太大,所以不宜采用。本文选取基于最小方差的原则进行组合赋权,既能体现主观经验、又能保证客观实际状况<sup>[14]</sup>。

假设决策者运用了主观<sup>[15]</sup>、客观赋权法<sup>[16-17]</sup>共  $l$  种,给出其权重向量  $\lambda_k$  为

$$\lambda_k = (\lambda_{k1}, \lambda_{k2}, \dots, \lambda_{kn})^T, k = 1, 2, \dots, l \quad (1)$$

其中,  $\sum_{j=1}^n \lambda_{kj} = 1$ 。

在组合赋权中,第  $i$  种赋权方法所给的权重为  $\alpha_k$ , 则不同赋权方法的权重向量为

$$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_l)^T, \sum_{k=1}^l \alpha_k = 1 \quad (2)$$

本文主观赋权法选用的是改进后的层次分析法,其优点是利用最优传递矩阵构造判断矩阵直接求取权重,此过程省去了一致性检验的步骤,简化了计算;利用了三标度法替代九标度法,进一步降低人的主观因素。缺点主观因素比重太大。

客观赋权选用熵值法,对于变压器而言,引入熵值的理论,可以判断各指标的健康状态。熵值越小,包含的信息量越大,则在综合评价中所起的作用越大,相应的权重越大;熵值越大,则刚好相反,是一种比较客观的方法。缺点没有借鉴主观经验。

为使主观经验与客观实际能够达到统一,则需要求得权重向量

$$\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T \quad (3)$$

能使决策结果与主客观各方法得到的总偏差最小,也就是各方法的加权重偏差取极小值。

建立单目标规划模型:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min Q = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^n (\alpha_k \lambda_{kj} - \alpha_j \lambda_{ij})^2 \quad (4) \\ \sum_{k=1}^l \alpha_k = 1 \quad (5) \end{array} \right.$$

利用拉格朗日常数法,即可求出最优权重向量

$$\alpha_* = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_l)^T \quad (6)$$

### 3 基于改进雷达图法的变压器状态评估

本文将引入改进后的雷达图法对变压器进行评估,较之模糊、物元等方法评估,该方法更加简洁,更加直观;又较之传统的雷达图法,由于选取新的特征量,所以解决了评估过程中指标相对顺序会对评估结果产生影响的问题。

#### 3.1 雷达图法的原理

雷达图分析法是日本企业评估综合实力而采取的财务综合评价法,现已广泛运用到汽车性能评估、电能质量、管理绩效等领域,适用于对多属性体系对象作出全局、整体性评估。

运用雷达图法进行评估时,其评价原则是其面积越大,表示该指标整体优势越大;面积越小,则反之。当面积一定时,周长越小,越类似圆,即表示指标发展越协调。然而,对于同一指标,若排列顺序不同,其面积周长亦不同。对于此问题,本文选取改进后的雷达图法作为解决方法。

#### 3.2 变压器状态评估

基于上述分析,给出变压器状态评估的步骤:

1) 基于层次分析法、熵值法的最优组合权重方法确定各指标权重。

2) 以原点为圆心,垂直向上引出1条射线,长度为1个单位长度OA,将第1个指标的权重转化为角度值 $\theta_1$ ,然后以该条为基础,绘制其余射线,记为OB、OC...

权重转化角度值 $\theta$ 的公式:

$$\theta_i = 360\alpha_i \quad (7)$$

3) 以圆心为起点,对每一扇形作角平分线,将各归一化指标作为角平分线长度,依次连接各点形成雷达图,可根据其面积、周长及边长进行评估。

本文选取总面积 $S_i$ 与边长平方和 $L_i$ 为特征量,将其二者几何平均数作为评估指标,表达式为

$$\eta(S_i, L_i) = \sqrt{S_i L_i} \quad (8)$$

## 4 算例分析

现有某市220 kV变电站1台主变压器,对其进行油色谱分析:  $H_2=1.9$ ,  $CH_4=19.25$ ,  $C_2H_4=5.89$ ,  $C_2H_6=0$ ,  $C_2H_2=4.29$ ,  $CO=712$ ,  $CO_2=5263$ ,总烃为29.43(上述数据单位为 $\mu L/L$ ),总烃绝对产气量=3.7 mL/d;电气试验:吸收比1.53,绕组直流电阻不平衡率为0.58%,绕组介损为0.42%,铁芯泄漏电流为34.2 mA;变压器曾进行过1次大修,现在运行环境良好,空气轻度污染,同类设备5台有两台进行过大修。

#### 4.1 主观权重

首先运用层次分析法针对油色谱各项数据确定其权重,5个物理量:氢气体积分数、乙炔体积分数、总烃体积分数、总烃绝对产气速率和CO与CO<sub>2</sub>的比值。利用三标度法形成判断矩阵A:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 2 & 1 & 2 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

之后再形成判断矩阵 $C_{ij}$ :

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 9 & 5 & 3 & 7 \\ 1/9 & 1 & 1/5 & 1/7 & 1/3 \\ 1/5 & 5 & 1 & 1/3 & 3 \\ 1/3 & 7 & 3 & 1 & 5 \\ 1/7 & 3 & 1/3 & 1/5 & 1 \end{bmatrix}$$

根据判断矩阵及公式,使用Matlab形成拟优一致矩阵并求得油色谱分析下最大特征值对应的特征向量,即为权重值

$$\omega_1 = (0.867, 0.056, 0.177, 0.449, 0.108)^T$$

将其归一化可得

$$\omega_1 = (0.523, 0.034, 0.107, 0.271, 0.065)^T$$

同理易得出在电气试验、运行工况和检修记录下各指标的权重值分别为

$$\omega_2 = (0.087, 0.036, 0.743, 0.134)^T$$

$$\omega_3 = (0.435, 0.262, 0.303)^T$$

$$\omega_4 = (0.692, 0.308)^T$$

#### 4.2 客观权重

设定变压器状态有4种:正常状态、注意状态、异常状态和严重状态<sup>[18-20]</sup>,根据测得的数据确定评

价因素对状态的隶属度关系，形成评价矩阵，再根据此矩阵运用熵值法确定权重。

以油色谱分析的数据为例，形成的评价矩阵  $B$  为

$$B = \begin{bmatrix} 0.9317 & 0.0683 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0.2127 & 0.7873 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9877 & 0.0123 & 0 \end{bmatrix}$$

根据上式可以得出其权重为

$$\omega_1 = (0.1864, 0.2273, 0.1425, 0.2273, 0.2165)^T$$

同样可以得出其他各项的权重分别  
电气试验的权重

$$\omega_2 = (0.3275, 0.1155, 0.2974, 0.2596)^T$$

运行工况信息权重

$$\omega_3 = (0.3825, 0.2734, 0.3441)^T$$

运行及检修记录的权重

$$\omega_4 = (0.6322, 0.3678)^T$$

#### 4.3 最优权重的确定

依据最优组合权重的确定方法及式(1)~式(6)，可以得出各项指标的权重为

油色谱权重

$$\omega_1 = (0.5055, 0.0441, 0.1088, 0.2687, 0.0729)^T$$

电气试验权重

$$\omega_2 = (0.0966, 0.0392, 0.7252, 0.1390)^T$$

运行工况权重

$$\omega_3 = (0.4206, 0.2651, 0.3143)^T$$

运行及检修记录权重

$$\omega_4 = (0.6676, 0.3324)^T$$

油色谱、电气试验、运行工况和运行检修记录这4大项的权重值为

$$\omega = (0.2736, 0.2464, 0.200, 0.2800)^T$$

#### 4.4 基于雷达图的变压器评估

以油色谱分析数据为例，其雷达图如图3所示，说明雷达图法在变压器评估中的应用。

根据式(7)、式(8)可计算出该雷达图的面积为  $S_1=0.3959$ ， $L_1=7.2173$ ，得到油色谱的综合评估值为  $\eta_1 = \sqrt{S_1 L_1} = 1.6904$ ，同样可以得出其他几项的评估值为

$$\eta_2 = 1.7026, \quad \eta_3 = 1.7561, \quad \eta_4 = 1.4426。$$

则对于整个变压器的评估值为

$$\eta = (\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4) \cdot \omega = 1.6372$$

通过对变压器4种状态：正常状态、注意状态、

异常状态和严重状态的历史数据用雷达图法进行计算分析得到表1。

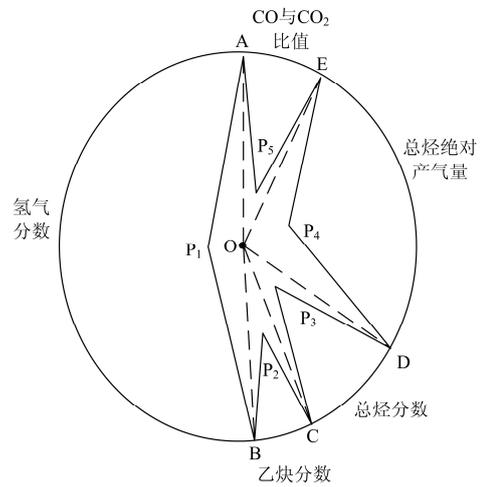


图3 变压器评估的雷达图

Fig. 3 Radar chart of transformer assessment

表1 变压器状态评分区间表

Table 1 Rating scale of transformer condition assessment

变压器状态	正常	注意	异常	严重
评分区间	0~1.5	1.5~2.0	2.0~2.5	2.5以上

根据表1可以评判该变压器正处于注意状态，有迹象向严重状态发展，应提前考虑安排检修计划。

## 5 结论

由上述分析可以得出以下结论。

(1) 以现有的变压器评估体系中指标作为评价对象，分别赋以主观和客观权重，再基于最小方差的理论将两者进行组合，达到权重上的最优。

(2) 运用改进后的雷达图法对变压器进行整体评估，避免数据在归一过程中丢失，也使得结果更加直观清楚。

(3) 实际案例进行分析，验证了该方法的合理性，贴近变压器真实运行状况。

(4) 由于现有技术不足、变压器所处环境变化大、造价高、寿命长等客观原因，无法做到精准化变压器老化寿命评估。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 薛浩然, 张珂珩, 李斌, 等. 基于布谷鸟算法和支持向量机的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 1-5.

- 2015, 43(8): 8-13.
- XUE Haoran, ZHANG Keheng, LI Bin, et al. Fault diagnosis of transformer based on the cuckoo search and support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 8-13.
- [3] 李涛, 陈巍家. 基于符号动力学的变压器内部故障检测[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 57-64.
- LI Tao, CHEN Weijia. Transformer internal fault detection based on symbolic dynamic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 57-64.
- [4] 姚致清, 刘涛, 张爱玲, 等. 直流融冰技术的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 57-62.
- YAO Zhiqing, LIU Tao, ZHANG Ailing, et al. Research & application on DC de-icing technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 57-62.
- [5] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-126.
- YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-126.
- [6] 赵峰, 李硕. 基于 DGA 和改进型灰关联度模型的牵引变压器故障诊断[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 41-45.
- ZHAO Feng, LI Shuo. Fault diagnosis for traction transformer based on DGA and improved grey correlation analysis model[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 41-45.
- [7] 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, 2008, 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, 2008, 33(8): 106-110.
- [8] 俞乾, 李卫国, 罗日成. 基于模糊神经网络的大型电力变压器风险评估方法研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, 39(5): 59-64.
- 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 Sciences), 2012, 39(5): 59-64.
- [9] 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 Yiyi, LIAO Ruijin, YANG Lijun, 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.
- [10] 严英杰, 盛戈皞, 陈玉峰, 等. 基于关联规则和主成分分析的输电线路状态评价关键参数体系构建[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2308-2314.
- YAN Yingjie, SHENG Gehao, CHEN Yufeng, et al. Establishment of key parameter system for condition evaluation of transmission line based on association rules and principal component analysis[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2308-2314.
- [11] 吴奕, 朱海兵, 周志成, 等. 基于熵权模糊物元和主元分析的变压器状态评价[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 1-7.
- WU Yi, ZHU Haibing, ZHOU Zhicheng, et al. Transformer condition assessment based on entropy fuzzy matter-element and principal component analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 1-7.
- [12] 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.
- [13] 廖瑞金, 刘捷丰, 吕彦冬, 等. 变压器油纸绝缘含水量定量评估的频域介电特征参量研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 204-211.
- LIAO Ruijin, LIU Jiefeng, LÜ Yandong, et al. Frequency domain dielectric characteristic parameters for quantitative assessment of moisture content of oil-paper insulation in power transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 204-211.
- [14] 刘德海, 于倩, 马晓南, 等. 基于最小偏差组合权重的突发事件应急能力评价模型[J]. 中国管理科学, 2014, 22(11): 81-88.
- LIU Dehai, YU Qian, MA Xiaonan, et al. Combination weight model of emergency ability evaluation with minimum deviation[J]. Chinese Journal of Management Science, 2014, 22(11): 81-88.
- [15] 段若晨, 王丰华, 顾承昱, 等. 采用改进层次分析法综合评估 500 kV 输电线路防雷改造效果[J]. 高电压技术, 2014, 40(1): 136-142.
- DUAN Ruochen, WANG Fenghua, GU Chenyu, et al. Comprehensive evaluation of 500 kV transmission line

- lightning protection effect based on improved analytic hierarchy process[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 136-142.
- [16] 程崧, 王宇, 余轩, 等. 电力变压器运行状态综合评判指标的权重确定[J]. 中国电力, 2011, 44(4): 26-30.  
CHENG Yin, WANG Yu, YU Xuan, et al. Study on index weighting methods for transformer condition evaluation[J]. Electric Power, 2011, 44(4): 26-30.
- [17] 阳东升, 范帅, 刘子兴, 等. 基于熵值赋权法的配电变压器状态评估方法研究[J]. 南方电网技术, 2014, 8(4): 116-121.  
YANG Dongsheng, FAN Shuai, LIU Zixing, et al. Study on condition assessment method of distribution transformer based on entropy weight method[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(4): 116-121.
- [18] 余文辉, 王洁, 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.
- [19] 冯丽苹, 肖秀媛, 刘晓莹. 电力用油酸值测定标准修正[J]. 热力发电, 2014, 43(4): 116-118.  
FENG Liping, XIAO Xiuyuan, LIU Xiaoying. Modification of acid value measuring standard for oil used in electric power industry[J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(4): 116-118.
- [20] 张迈, 霍琪, 吕哲, 等. 750 kV 主变压器通风控制柜温度高的原因分析及处理[J]. 陕西电力, 2015, 43(11): 94-96.  
ZHANG Mai, HUO Qi, LÜ Zhe, et al. Cause analysis and treatment of ventilation control cabinet with high temperature for 750 kV main transformer[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(11): 94-96.

---

收稿日期: 2016-01-18; 修回日期: 2016-02-26

作者简介:

吴翔(1991-), 男, 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: 18326675991@163.com

何怡刚(1966-), 男, 教授、博士生导师, 国家杰出青年科学基金获得者, 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。

(编辑 葛艳娜)