

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.09.019

基于显著性差异的变压器绝缘电阻与介损统计分析

赵勇军, 李秀婧, 陈军, 田小航

(云南电力技术有限责任公司, 昆明 650000)

摘要: 绝缘电阻和介损是变压器预防性试验中最基础的试验项目,是判断变压器整体绝缘状态最常规的手段。然而,由于绝缘电阻测试受现场环境和干扰影响较大,测试数据较为分散,难以给出具体合格标准值,介损也存在判断阈值偏大等问题。基于此,文中利用数理统计方法,统计了云南省相同年份各电厂主变压器绝缘电阻和介损测试数据,并利用SPSS对数据进行了分析,探讨了测试数据分布规律,提出了基于显著性差异的绝缘电阻和介损阈值,旨在为变压器整体绝缘状态的准确判断提供借鉴。

关键词: 变压器; 绝缘电阻; 介损; 显著性差异

Statistical Analysis of Insulation Resistance and Dielectric Loss of Transformer Based on Significance Difference

ZHAO Yongjun, LI Xiuqing, CHEN Jun, TIAN Xiaohang

(Yunnan Electric Power Technology Co., Ltd., Kunming 650000, China)

Abstract: The insulation resistance and dielectric loss from transformer preventive test and the conventional parameters for evaluating overall insulation state of the transformer. However, because the insulation resistance test is affected by the field environment and interference, the test data scatter, so it is difficult to give accurate threshold value. And the obtained threshold value of dielectric loss is a bit larger. Therefore, this paper uses mathematical statistics method to calculate the test data of insulation resistance and dielectric loss of the main transformers in all power plants in Yunnan Province, adopts SPSS to analyze these data, and discusses the distribution law of the test data. Consequently, the thresholds of the insulation resistance and dielectric loss based on the significant difference are put forward to provide reference for accurate judgment of the insulation state of a transformer.

Key words: transformer; insulation resistance; dielectric loss; significance difference

0 引言

绝缘电阻和介损是变压器预防性试验中最基础的试验项目,是判断变压器整体绝缘状态最常规的手段。然而,由于绝缘电阻测试受现场环境和干扰影响较大,测试数据较为分散,难以给出具体合格标准值^[1-7]。介损是变压器试验项目中灵敏度相对较高的试验项目,但根据现场经验,现行预防性规程规定的阈值偏大,不利于准确及时的发现变压器潜在绝缘缺陷,或由于出厂试验条件与现场条件的差异,造成数据分析判断上的困难。

基于数理统计方法的电力设备故障预警、阈值探讨已有广泛应用。文[8]以变压器运行高压套管

的 $\tan\delta$ 值及电容量增量现场预试定检数据为基础,综合采用图示法和检验法,确定了运行高压套管 $\tan\delta$ 值及电容量增量的分布属性;文[9]利用显著性差异的分析手段对浙江电网在运的上海 MWB 公司 220 kV COT 型套管的介损数据进行统计分析,验证了该类套管介损符合正态分布规律,并根据统计离群值的要求确定了样本数据的显著性差异条件,提出了在运的该类套管的介损阈值;文[10]则利用数理统计方法,提出了一种变压器油色谱预警阈值的确定方法以及各种气体之间的联合预警策略。但对于判断变压器整体绝缘状况最基础的绝缘电阻和介损试验,尚缺乏对其数据分布规律和阈值方面的探讨与研究。

基于此,笔者统计了云南省同一年份各电厂主变压器绝缘电阻和介损测试数据,并利用SPSS软件对数据进行了统计分析,探讨了测试数据的分布规律,提出了基于显著性差异的绝缘电阻和介损阈值^[11-16]。

1 样本统计数据分析

本次样本来源于云南省在运行的374台110 kV

及以上变压器预防性试验数据,其中110 kV主变88台,220 kV主变101台,500 kV主变185台,基本涵盖了澜沧江流域、李仙江流域、金沙江流域各大水电厂及部分火电厂主变预防性试验数据,且均为相同年度预试数据。按不同电压等级进行了数据统计,其不同电压等级的绝缘电阻分布直方图见图1,不区分电压等级统一考察的绝缘电阻分布直方图见图2。

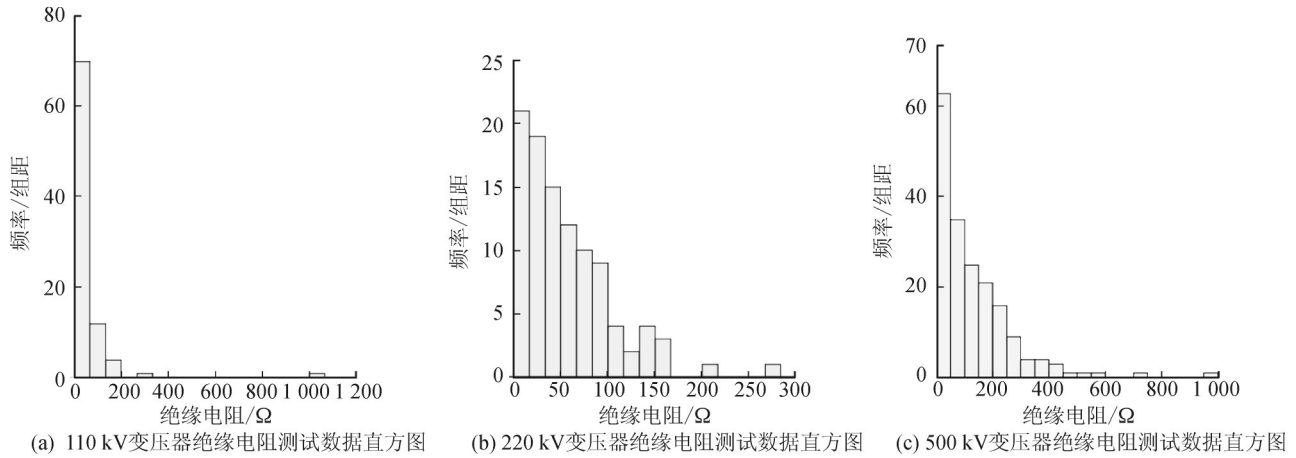


图1 不同电压等级变压器绝缘电阻测试数据直方图

Fig. 1 Transformer insulation resistance of different voltage levels of test data histogram

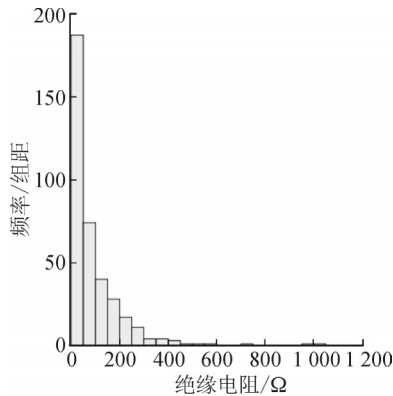


图2 绝缘电阻测试数据分布直方图
Fig. 2 Insulation resistance test data distribution histogram

由图1、图2可知,不同电压等级变压器绝缘电阻的分布规律基本一致。同理,可得到不同电压等级的介损测试数据分布直方图,见图3。由图3可以看出,变压器绝缘电阻与介损试验数据分布规律有明显差异。

2 数据分布的假设检验

2.1 假设检验的基本方法

正态分布是统计分析中最为重要的分布,通常情况下,研究者总希望假设数据分布服从正态分布,进而进行更进一步的研究。而常用的正态分布检验方式有Kolmogorov-Smirnov(K-S检验)单样本检验和P-P图两种方式。

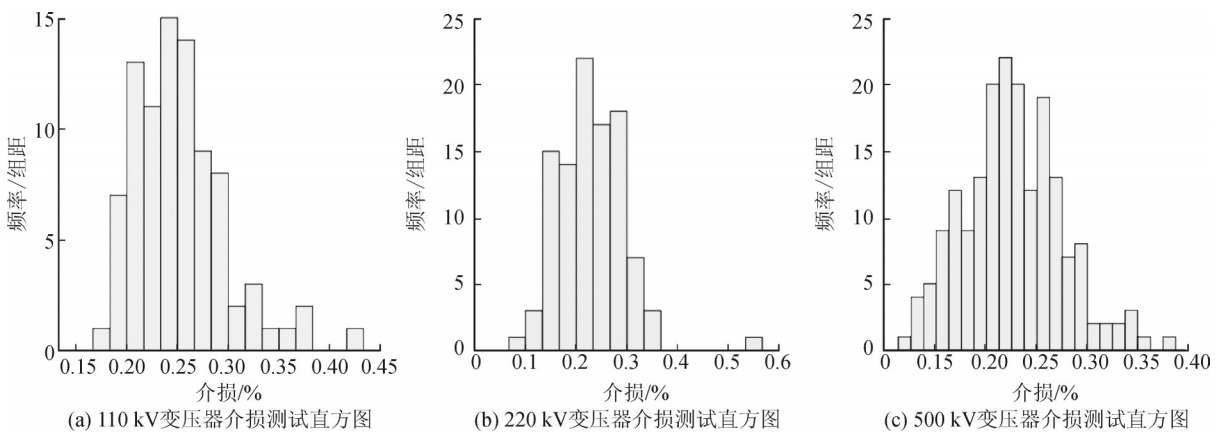


图3 变压器介损测试数据直方图

Fig. 3 Transformer dielectric loss of different voltage levels of test data histogram

K-S 检验是一种分布拟合优度检验。具有分布无关性,适用于任何连续分布,其正态性检验依据为

$$D = \max |F_n(x) - F_0(x)| \quad (1)$$

式(1)中: D 为检验统计量; $F_n(x)$ 为一组随机样本的累计概率函数; $F_0(x)$ 为分布函数。当原假设为真时, D 值应较小;若过大,则怀疑原假设。

P-P 图是在统计图中描绘比较变量的实际累积概率以及所考察分布类型的理论累积概率符合程度,以判断数据是否服从所考察的分布类型。如果变量服从正态分布,则实际累积概率与理论累积概率应该基本一致^[17-20]。

以上两种方式,均可在 SPSS 统计软件中方便实现。

2.2 绝缘电阻测试数据分布检验

参考图 2 的数据分布直方图,利用 SPSS 软件中的 P-P 图可以探索其分布规律。经实践,绝缘电阻测试数据较为符合 Lognormal 分布(对数正态分布)。

Lognormal 分布即表明该随机变量的对数服从正态分布,即若随机变量 X 服从一个位置参数为 μ 、尺度参数为 σ 的对数正态概率分布,则其概率密度分布函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x) - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad x > 0 \quad (2)$$

对绝缘电阻取自然对数,利用 SPSS 中 K-S 检验可以得出其检验结果,见图 4;P-P 图则可较直观的显示出检验结果,见图 5。

假设检验汇总

	原假设	测试	Sig.	决策者
1	绝缘电阻取自然对数的分布为正态分布,平均值为 3.86, 标准差为 1.22	单样本 Kolmogorov-Smirnov 检验	0.492	保留原假设。

注: 显示渐进显著性。显著性水平是 0.05。

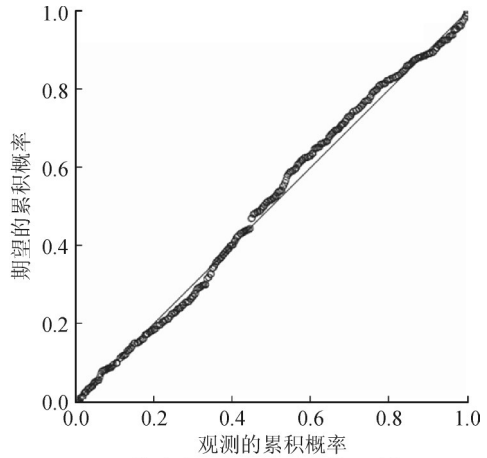
图 4 绝缘电阻测试数据 K-S 检验的结果

Fig. 4 K-S test results for the insulation resistance test data

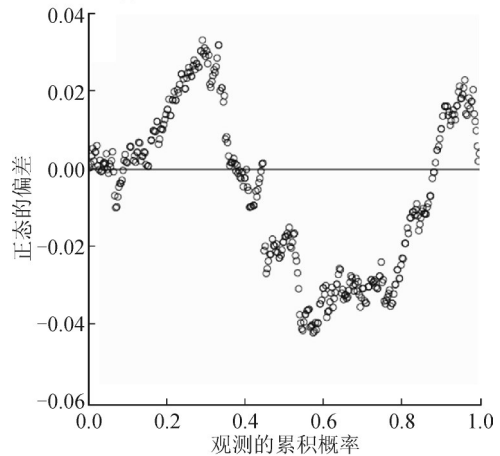
根据 P-P 图的检验规则,如果数据呈正态分布,则图 5(a)中数据点应和理论直线(对角线)基本重合,观察图 5(a),绝缘电阻自然对数值与理论分布差距很小,进一步观察图 5(b),去势 P-P 图反映的是按正态分布计算的理论值和实际值之差的分布情况,即分布的残差图^[17]。如果数据服从正态分布,则数据点应较均匀的分布在 $y=0$ 这条直线上下。图 5(b)中可见残差波动趋势很小,绝对值不超过约 0.04,再结合 K-S 检验结论,认为绝缘电阻自然对数值符合正态分布,即绝缘电阻符合 Lognormal 分布这一基本结论是可信的。

2.3 介损测试数据分布检验

介损试验是变压器高压试验中较灵敏,数据分



(a) 绝缘电阻取自然对数的 P-P 图



(b) 绝缘电阻取自然对数的去势 P-P 图

图 5 绝缘电阻分布检验结果

Fig. 5 Insulation resistance distribution test results

布相对稳定的测试项目,现行预防性试验标准,也是按不同电压等级进行了阈值规定。因此,介损的分布需探讨不同电压等级的数据分布规律。由图 3 数据分布直方图,可初略判断出变压器介损数据为正态分布,即若随机变量 X 服从一个位置参数为 μ 、尺度参数为 σ 的正态概率分布,则概率密度分布函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (3)$$

同理,利用 SPSS 软件中的 K-S 单样本检验(K-S 检验)和 P-P 图,可对数据分布进行假设检验,见图 6-9。

假设检验汇总

	原假设	测试	Sig.	决策者
	介损 110 kV 的分布为正态分布,平均值为 0.25,标准差为 0.05。	单样本 Kolmogorov-Smirnov 检验	0.154	保留原假设。
	介损 220 kV 的分布为正态分布,平均值为 0.23,标准差为 0.07。	单样本 Kolmogorov-Smirnov 检验	0.645	保留原假设。
	介损 500 kV 的分布为正态分布,平均值为 0.23,标准差为 0.05。	单样本 Kolmogorov-Smirnov 检验	0.957	保留原假设。

注: 显示渐进显著性。显著性水平是 0.05。

图 6 介损测试数据 K-S 检验结果

Fig. 6 K-S test results for the dielectric loss test data

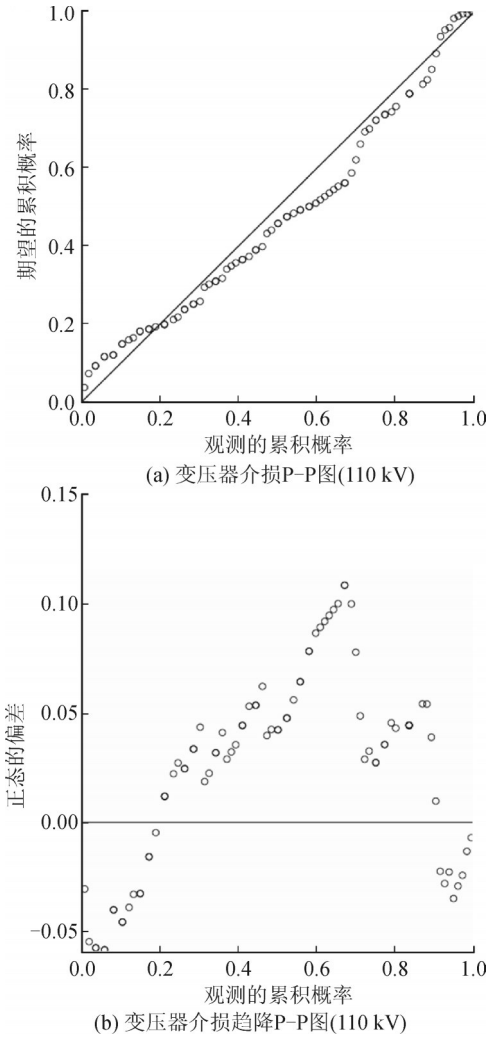


图7 变压器介损分布检验结果(110 kV)

Fig. 7 Transformer dielectric loss distribution test results (110 kV)

结合K-S单样本检验结论和P-P图及去势P-P图,可知变压器介损测试数据符合正态分布规律。

3 绝缘电阻和介损阈值探讨

根据正态分布规律和3σ法则,利用显著性差异条件可对测试数据的阈值进行探讨。变压器整体绝缘劣化,其表征为绝缘电阻降低,介损升高,故探讨绝缘电阻和介损阈值时,绝缘电阻按单边的下限值考查,而介损按单边的上限值进行考查。

根据前文论证,变压器绝缘电阻符合Lognormal分布(对数正态分布)规律,即绝缘电阻的自然对数值符合正态分布。根据统计结果,绝缘电阻的自然对数值的μ值为3.8615,σ为1.2167,取显著性水平α为0.01,则查μ分布表,获取显著性水平α下值为2.58,则其99.74%置信区间为(0.722 4, 7.001),取单边下限值考察,以e为底进行指数运算,可得主变绝缘电阻下限阈值为2.059 GΩ,在现场实践中,可取2 GΩ

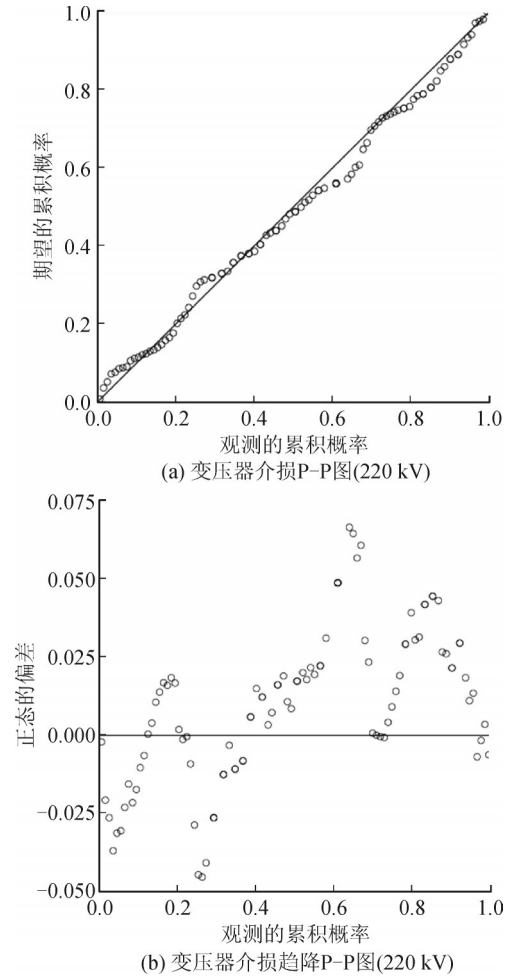


图8 变压器介损分布检验结果(220 kV)

Fig. 8 Transformer dielectric loss distribution test results (220 kV)

作为阈值进行分析判断。

介损测试数据符合正态分布,110 kV电压等级变压器μ值为0.252 9,σ为0.046 05,220 kV电压等级变压器μ值为0.229 0,σ为0.065 91,500 kV电压等级变压器μ值为0.226 2,σ为0.049 06,同样,取显著性水平α为0.01,则其99.74%置信区间介损上限阈值,110 kV电压等级变压器为0.37%,220 kV电压等级变压器为0.40%,500 kV电压等级变压器为0.35%。阈值差异较小,在现场实践中,也可统一取0.40%作为介损阈值进行数据的快速判断。

4 案例分析

基于上述阈值探讨的结论,以变压器介损测试数据为例,对本次变压器预防性试验数据再次进行筛查,发现某水电厂110 kV主变2013年介损测试数据存在“异常”,其低压绕组对高压绕组及地的测试数据为0.430%,已大于本次探讨中提出的110 kV主变介损不大于0.37%的阈值要求。基于此,重点关

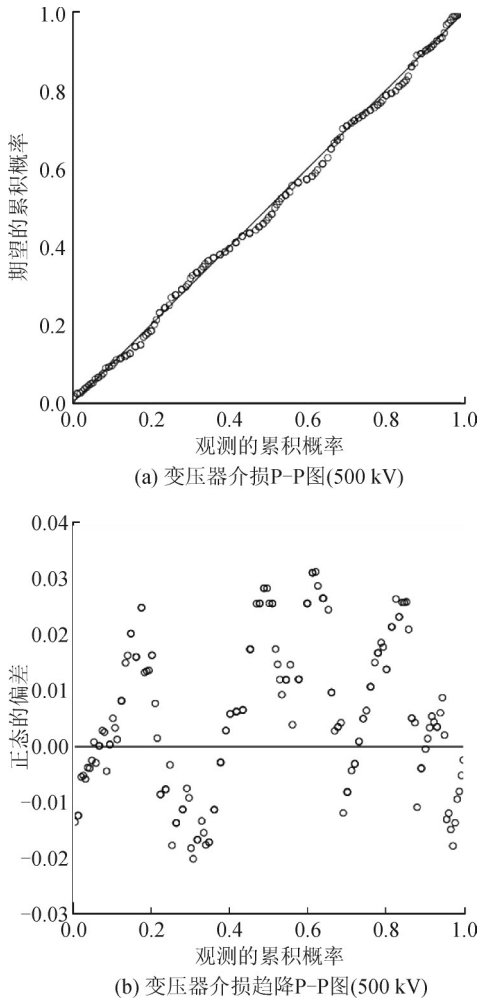


图9 变压器介损分布检验结果(500 kV)

Fig. 9 Transformer dielectric loss distribution test results (500 kV)

注该变压器介损数据,进一步分析其数据变化规律,见表1。

表1 主变低压侧介损测试数据

Table 1 Main transformer low voltage winding dielectric loss test data

测试时间/年	2013	2014	2016
介损/%	0.430	0.238	0.239

由表1可知,在随后2014、2016两年的预防性试验中,其介损测试数据未发生明显变化,且均小于本次探讨中提出的判断阈值,其余高压试验数据也均满足规程要求,未见异常。可知,该变压器整体绝缘情况良好,其低压绕组对高压绕组及地的介损测试数据“异常”原因不是绝缘问题所导致。

如本案例所示,超出判断阈值的“异常”数据,其原因可能是变压器本体绝缘问题,也可能是由于现场干扰或试验接线等因素导致,但由于现行预防性规程规定的阈值偏大,往往导致现场试验人员忽视此类“异常”数据。而利用数理统计规律得出的判断阈值,则可较灵敏的筛查出此类“异常”情况,

有效指导现场试验数据判断和后续跟踪处理,从而对变压器整体绝缘状态提供更精确和有针对性的判断与分析。

5 结论

变压器绝缘电阻和介损是变压器预试定检和故障分析处理环节中判断整体绝缘状态基础的试验项目。文中通过对云南省110 kV及以上变压器绝缘电阻、介损测试数据的统计分析,利用SPSS进行数据分析处理,对分布规律和阈值等问题进行了探讨,认为:

1)变压器绝缘电阻(R_{60s})测试数据服从Lognormal分布(对数正态分布),建议以2 GΩ作为云南省110 kV以上电力变压器绝缘电阻(R_{60s})的阈值进行数据的分析判断。

2)变压器介损测试数据服从正态分布,建议云南省区域内,110 kV电压等级变压器以0.37%,220 kV电压等级变压器以0.40%,500 kV电压等级变压器以0.35%作为阈值进行数据分析与判断。在现场实践中,介损阈值也可统一以0.40%进行数据的快速判断。

3)对变压器制造厂家差异、运行环境等影响测试数据的因素未进行进一步探讨,测试数据与运行时间的相关性、不同制造厂家介损测试值是否存在明显差异等问题尚需进一步探究。

4)绝缘电阻、介损的样本来源为云南省各中大型水电站预防性试验数据,样本容量相对偏小,仅能对云南省内电力变压器绝缘电阻、介损的数据判断提供参考与借鉴,有条件情况下,应广泛收集全国范围内的测试数据,保证结论的普适性,进而对电力变压器绝缘电阻、介损乃至其他测试数据的分析与判断提供更精确的指导。

参考文献:

[1] 徐康健,赵寿生. 110 kV 变压器安装后绝缘电阻下降的原因及处理[J]. 变压器,2013,50(7):66-69.
XU Kangjian, ZHAO Shousheng. Reason and treatment of 110 kV transformer insulation resistance reduction after installation[J]. Transformer, 2013, 50(7): 66-69.

[2] 刘宏亮,刘海峰,胡涛,等. 110 kV 变压器绕组介损异常分析及处理[J]. 变压器,2010,47(8s):32-34.
LIU Hongliang, LIU Haifeng, HU Tao, et al. Analysis and treatment of abnormal dielectric power factor of 110 kV transformer winding[J]. Transformer, 2010, 47(8s): 32-34.

[3] 柳尚一. 变压器介损试验中接线方式对缺陷检出灵敏度的影响[J]. 变压器,2007,44(8):27-28.

- LIU Shangyi. Influence of connection mode to defect detecting sensitivity in dielectric test of transformer[J]. Transformer, 2007, 44(8): 27-28.
- [4] 魏建林, 王世强, 吴凤娇, 等. 变压器绝缘老化引起预试电气绝缘参数变化的仿真研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1618-1622.
WEI Jianlin, WANG Shiqiang, WU Fengjiao, et al. Simulation on variation of electrical insulation parameters in predictive test caused by insulation aging of power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1618-1622.
- [5] 王献敏, 马勇飞, 窦鹏. 变压器油老化对介损的影响及其绝缘寿命试验的研究[J]. 变压器, 2011, 48(4): 41-44.
WANG Xianmin, MA Yongfei, DOU Peng. Influence of aging transformer oil to dielectric loss factor and research on insulation life test[J]. Transformer, 2011, 48(4): 41-44.
- [6] 陈天翔, 王寅仲, 海世杰. 绝缘电阻试验判断变压器绝缘的判据探讨[J]. 高电压技术, 2004, 30(10): 21-23.
CHEN Tianxiang, WANG Yinzhong, HAI Shijie. Study on transformer insulation condition estimation with insulation-resistance measurement[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 30(10): 21-23.
- [7] 松浦虔士. 电力设备运行中绝缘诊断技术[R]. 日本: 日本电气学会技术报告, 1992.
MATSUURA K. The operation of power equipment insulation diagnosis technology[R]. Japan: Japan Electric Association Technical Report, 1992.
- [8] 熊俊. 高压套管介损及电容现场测量值分布特性[J]. 高压电器, 2016, 52(6): 69-77.
XIONG Jun. Distribution characteristics of dielectric loss and capacity increment measurements of transformer bushings[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(6): 69-77.
- [9] 孙翔, 何文林, 姚晖, 等. 基于显著性差异的变压器套管介损统计分析[J]. 高压电器, 2015, 51(4): 157-160.
SUN Xiang, HE Wenlin, YAO Hui, et al. Statistical analysis of dielectric loss of transformer bushing based on significance difference[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4): 157-160.
- [10] 章彬, 李穆, 吕启深, 等. 基于数理统计的变压器油色谱联合预警策略[J]. 高压电器, 2016, 52(5): 186-190.
ZHANG Bin, LI Mu, LYU Qishen, et al. Joint early-warning strategies of transformer oil chromatogram based on mathematical statistic[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(5): 186-190.
- [11] 王秉钧, 谈克雄. 数理统计在高电压技术中的应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
WANG Bingjun, TAN Kexiong. Application of mathematical statistics in high voltage technology[M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1990.
- [12] 郭亮, 郑重, 王珣. 基于在线监测数据挖掘的状态评价优化研究[J]. 华北电力技术, 2015(1): 19-24.
GUO Liang, ZHENG Zhong, WANG Xun. Study on state evaluation optimization based on on-line monitoring data mining[J]. North China Electric Power, 2015(1): 19-24.
- [13] 卢小艳, 陆山. 基于威布尔分布k故障试验的寿命可靠性评估[J]. 机械设计与研究, 2005, 21(6): 10-12.
LU Xiaoyan, LU Shan. Reliability assessment based on the k th ordered experiment life of Weibull distribution[J]. Machine Design and Research, 2005, 21(6): 10-12.
- [14] 程焕超. 电力变压器油纸绝缘单因子热老化特性及其统计分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
CHENG Huanchao. Research on power transformer oil-paper insulation thermal aging characteristics and statistic analysis[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [15] 王晓莺. 变压器故障与监测[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
WANG Xiaoying. Transformer fault and monitoring[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [16] 宋安琪. 基于现场油色谱数据的变压器诊断阈值的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013: 3-22.
SONG Anqi. Diagnostic threshold of transformers: A study base on on-site dissolved gases[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013: 3-22.
- [17] 张文彤, 闫洁. SPSS统计分析基础教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 235.
ZHANG Wentong, YAN Jie. SPSS statistical analysis of the basic tutorial[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 235.
- [18] 杨虎, 刘琼荪, 钟波. 数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
YANG Hu, LIU Qionsun, ZHONG Bo. Mathematical statistics[M]. Beijing, China: Higher Education Press, 2004.
- [19] 葛余博. 概率论与数理统计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 159-169.
GE Yubo. Probability and statistics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 159-169.
- [20] 宗序平, 姚玉兰. 利用Q-Q图与P-P图快速检验数据的统计分布[J]. 统计与决策, 2010(20): 151-152.
ZONG Xuping, YAO Yulan. Use of Q-Q map and P-P map quick test the statistical distribution of the data[J]. Statistics and Decision, 2010(20): 151-152.
- 赵勇军(1987—), 男, 工程师, 现从事电气设备高压试验及故障诊断工作。
- 李秀婧(1989—), 女, 硕士, 助理工程师, 从事高电压与绝缘技术方面研究工作。
- 陈军(1990—), 男, 助理工程师, 从事电气设备高压预防性试验。
- 田小航(1987—), 男, 助理工程师, 从事电气设备高压试验工作。