

存在气泡缺陷触头盒电场仿真研究

操李节¹, 汪霄飞², 徐勇¹, 张毅磊¹, 邝佳军¹, 罗新¹

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082; 2. 湖南省电力试验研究院, 长沙 410007)

摘要: 利用有限元分析软件Ansys建立三维模型,对高压开关柜母线室中触头盒存在气泡缺陷的情况进行仿真计算,研究了在交流情况下气泡缺陷、不同大小的气泡、不同位置的气泡以及不同电压等级对触头盒气泡缺陷附近电场的影响。结果表明:缺陷的出现使缺陷中电位在气泡上半部分集中;缺陷附近的电场强度出现明显的畸变,缺陷中心电场强度变大;缺陷越大,电场畸变越大;缺陷的位置对电场的畸变并没有太大的影响;电压等级的提高使缺陷中电场的畸变更加明显。

关键词: Ansys; 触头盒; 气泡缺陷; 电场强度

Electric Field Analysis of Bubble Defects in Contact Box

CAO Lijie¹, WANG Xiaofei², XU Yong¹, ZHANG Yilei¹, KUANG Jiajun¹, LUO Xin¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan Electric Power Test and Research Institute, Changsha 410007, China)

Abstract: Using finite element analysis software Ansys to establish a 3D models, the presence of the contact box for high voltage switchgear bus room in bubble defects are simulated. In the exchange situation to study changes in the electric field near the defects, under the case of local defects and defects of different sizes and different locations of the defect. The results show that: the defect resulting in the electric potential concentrate at the upper half of the bubble; electric field intensity near the defect have obvious distortion, the electric field intensity in the center of defect become large; the bigger of defect, the bigger of electric field distortion; the location of the defect does not have much impact on the distortion of the electric field; the increase of the voltage level make the distortion of electric field is more obvious.

Key words: Ansys; the contact box; bubble defect; electric field intensity

0 引言

触头盒(contact box)由有机材料环氧树脂制作而成,由于其质量小、绝缘强度高,广泛应用于高压开关柜中,但目前由于触头盒发生故障而引起的电力事故常有发生。由于制作工艺的原因,触头盒在浇注的过程中有时会不可避免的产生气泡,存在气泡的触头盒为有缺陷的触头盒,若触头盒中存在气泡,在电场作用下,会发生局部放电,产生局部发热、带电粒子撞击、化学活性生成物以及射线等,严重影响触头盒的绝缘性能^[1-3]。

当电场分布极不均匀时会产生局部放电。所以研究触头盒电场的分布能很好地知道气泡的产生

对触头盒的影响,研究触头盒的电场分布可以采用现场电场测量的方法,现场电场测量的方法能够研究触头盒电场分布情况,但探针的引入会引起触头盒附近的电场分布的变化^[4-5],为了弥补实际测量的不足,文中通过有限元软件 Ansys 对存在气泡的触头盒进行仿真分析,研究气泡对触头盒内部的电场分布影响。

利用有限元仿真软件 Ansys 仿真研究触头盒电场分布的好处是能最大程度的节约成本,而且能够进行多次不同的仿真,得到较多的实验数据。利用 Ansys 进行仿真的步骤是:建模、剖分、计算、后处理^[6]。

1 电场数值计算

有限元法是一种以变分原理为基础,把整个求

解域剖分为一系列小单元,再建立各单元内的分片插值函数作为解的近似试探函数,来求解微分方程边值问题的一种数值方法。有限元法非常适合复杂边界条件的物理模型。

所有的电磁问题都可以归结为从麦克斯韦方程组出发,用偏微分方程和定解条件描述的边值问题求解。文中要解决的问题因为频率变化小,可以归结为似稳电场。它可以总结为如下帕松方程和狄利克莱边界条件^[6]

$$\begin{cases} \nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \\ \phi/\Gamma_i = f_0(p) \end{cases} \quad (1)$$

其所对应的等价变分问题为

$$\begin{cases} F(\phi) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} (|\nabla \phi|^2 - \frac{2\rho}{\varepsilon} \phi) d\Omega \\ \phi/\Gamma_i = f_0(p) \end{cases} \quad (2)$$

式(1)、(2)中: ϕ 为描述电场的标量位函数; F_2 为边界。在有限元法中,整个求解区域 Ω 被剖分为 n 个单元,所以总体泛函数为 $F(\phi) = \sum_{e=1}^n F^e(\phi)$ 。在有限元法中,每个单元拥有多个节点,文中探讨的模型以四面体单元剖分,四面体单元有4个节点: i, j, k, l 。每个节点都有一个对应的形函数,该形函数在该节点上的值为1,而在其他节点上的值为0,形函数是坐标变量 x, y, z 的线性函数,对于“ i ”节点来说,形函数 ψ_i^e 可表示为: $\psi_i^e = \alpha_i + \beta_i x + \gamma_i y + \mu_i z$ 。在这个四面体单元“ e ”上的势函数就由各个节点对应的形函数及电势值叠加而成: $\phi^e(x, y, z) = \psi_i^e \phi_i + \psi_j^e \phi_j + \psi_k^e \phi_k + \psi_l^e \phi_l$ 。利用总体泛函数对每个节点电势求导,并令其为零,得到的方程能写成矩阵形式 $[K][\phi] = [F]$,其中 $[\phi]$ 为求解区域内全部节点电位所形成的电位列阵,由此即可得到各节点的电位值^[7-8]。

2 三维仿真模型建立及计算

利用有限元法进行仿真计算有它的优点,但它的缺点是计算复杂的模型时所需要的计算资源是相当惊人的,为了减少对计算资源的要求,文中只对开关柜母线室进行三维建模仿真,从而减小模型的复杂性,由于开关柜结构的特性,只对母线室进行三维建模仿真对计算结果没有太大影响^[9-11]。触头盒在母线室中的位置见图1。文中进行的仿真就是对图1所示的开关柜母线室进行三维建模仿真,仿真中单个触头盒的模型见图2,并标出了坐标轴,图2中的触头盒位置对应于图1中中间的一个触头盒。图3所示的截面图为图2中触头盒XY平面的截面图,触头盒中各种材料以及仿真所设定的缺

陷位置见图3,仿真计算中所采用的开关柜母线室尺寸为620 mm×730 mm×780 mm,触头盒的尺寸见图3中的标注。计算中需要各种材料的电学性能参数,通过借鉴其他论文与查找资料,找到了计算中所需的各种材料的参数,具体见表1^[9,12]。



图1 触头盒位置示意图

Fig. 1 Diagram of the contact box

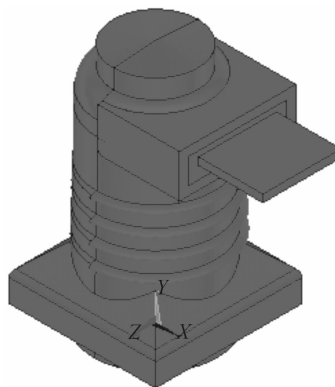


图2 触头盒三维模型

Fig. 2 Contact box three-dimensional model

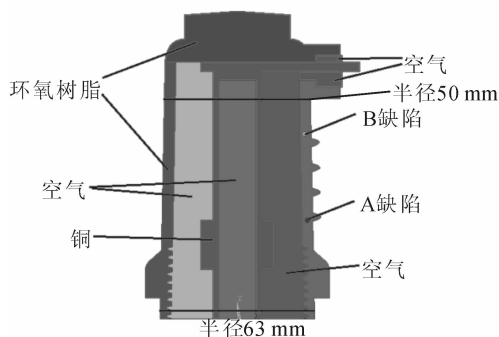


图3 触头盒截面图

Fig. 3 Sectional view of the contact box

表1 仿真中各种材料参数

Table 1 Simulation of various material parameters

材料	铜	环氧树脂	空气
相对介电常数	1×10^{13}	3.9	1.000 6
电阻率	8×10^{-8}	1.0×10^{13}	$5.000 0 \times 10^{13}$

Ansys 针对不同的计算类型设置了一系列的计算单元,文中采用 SOLID122 实体单元进行仿真计算^[6],计算的初始化条件是开关柜母线室中的3个

触头盒分别加载 10 kV 开关柜运行的最高电压 12 kV 的工频余弦三相电压、开关柜柜体电位为零, 上面所说的 12 kV 为线电压, 即三相触头盒分别加载 6 928 V 的相电压, 电压相位相差 120° , 后文所说 12 kV 同样是此意, 不再另行说明。为了了解触头盒内部缺陷的位置与大小对触头盒电场的影响情况, 文中对触头盒的缺陷位置进行了人为设定, 每个触头盒中存在两个球形缺陷, 缺陷球心如图 3 在直角坐标系中的位置为 A(57, 80)、B(55, 150), 单位为毫米。另外再选取不同大小的缺陷进行了 4 次仿真: ①无缺陷, 施加 12 kV 电压; ②半径 1 mm 的球形缺陷, 施加 12 kV 电压; ③半径 2 mm 的球形缺陷, 施加 12 kV 电压; ④半径 3 mm 的球形缺陷, 施加 12 kV 电压。

在触头盒固封浇注时有可能在绝缘材料内部产生气泡, 其典型尺寸为 mm 级, 所以研究触头盒中存在尺寸为 mm 级的气泡是很有必要的。在每次仿真中触头盒缺陷的位置是保持不变的。通过求解触头盒缺陷附近的电位与电场来分析缺陷对触头盒的影响^[13-18]。

3 仿真结果分析

3.1 局部缺陷对触头盒的影响

由于触头盒制作工艺的原因, 出现缺陷的位置具有一定的随机性, 在触头盒壁内部位置为 A、B 的两处地方各设置一个半径为 1 mm 的球形缺陷, 现研究球形缺陷球心上下各 5 mm 范围内的电位、电场与正常情况时相同位置电位、电场的差异。有缺陷时触头盒截面电位与电场分布云图见图 4、5。

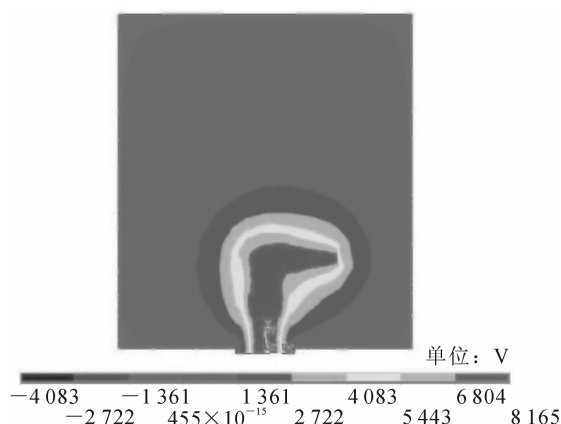


图 4 触头盒截面电位分布云图

Fig. 4 Contact box sectional potential contours

为了更加清楚地研究缺陷的出现对触头盒电场分布的影响, 所以导出缺陷附近的各种参数进行详细对比, 分别见图 6-9, 在图 6-9 中很明显地给出了电位、电场的差别, 由图 6、8 可以看出, 不管缺陷

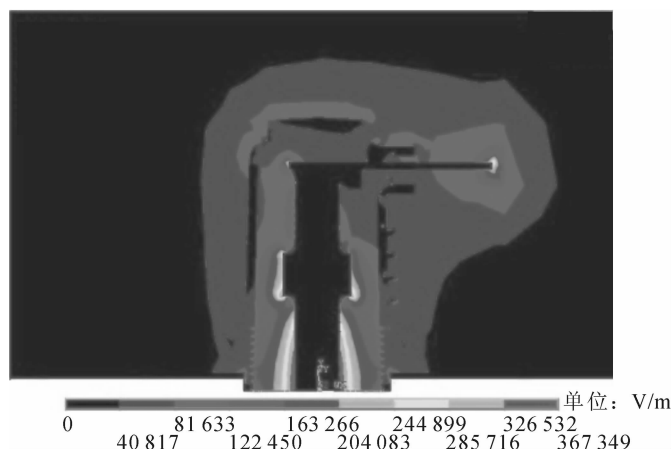


图 5 触头盒截面电场分布云图

Fig. 5 Contact box sectional electric field contours

的高度是多少, 气泡的电位都是上半部分大于下半部分, 且气泡中的电位相对于正常情况时相对集中, 且集中的电位主要集中在气泡的上半部分, 气泡的下半部分电位与正常情况是基本没有什么差别。由于缺陷部位的相对介电常数与电阻率的变化, 对缺陷部位的电场分布造成了较大的影响, 如图 7、9 所示, 相对于正常情况, 在缺陷部位的电场强度发生明显的变化, 在位置 A 的球形缺陷的最大电场强度处于缺陷中心向下偏移 0.2 mm, 大小为 69.864 kV/m, 并向边沿处逐渐减弱, 下边沿电场强度为 55.790 kV/m, 上边沿电场强度为 54.402 kV/m, 下边沿电场强度略高于上边沿电场强度, 下边沿电场强度为最大场强的 79.86%, 上边沿电场强度为中心场强的 77.87%。在位置 B 的球形缺陷的最大电场强度处于缺陷中心向下偏移 0.2 mm, 大小为 53.150 kV/m, 上边沿电场强度为 39.145 kV/m, 下边沿电场强度为 40.569 kV/m, 上边沿电场强度为中心场强的 73.65%, 下边沿电场强度为中心场强的 76.33%。由此可以看出, 缺陷的出现导致了比较大的电场分布差异, 容易引起局部放电, 加速环氧树脂老化。缺陷处的最大电场强度都不是位于缺陷的正中间, 而是位于缺陷中心向下偏一点的位置。

3.2 缺陷的大小对电场强度的影响

为了考察缺陷大小对电场强度的影响, 与半径为 1 mm 时类似, 分别取缺陷的半径为 2 mm 与 3 mm 再进行两次仿真, 由仿真结果知, 气泡的大小对气泡处的电位具有一定的影响, 见图 10, 从图 10 中可以看出, 气泡越大, 气泡中的电位变化越大。不同缺陷半径电场强度也有一定的差别, 见图 11, 考察位置 A 的缺陷, 无缺陷时, 球心附近的最大电场强度处于球心上面 0.2 mm 处, 大小为 57.568 kV/m, 缺

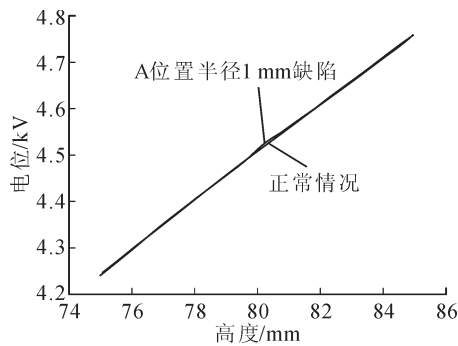


图6 A位置处缺陷电位与正常情况对比

Fig. 6 Defects electric potential comparison with the normal electric potential at position A

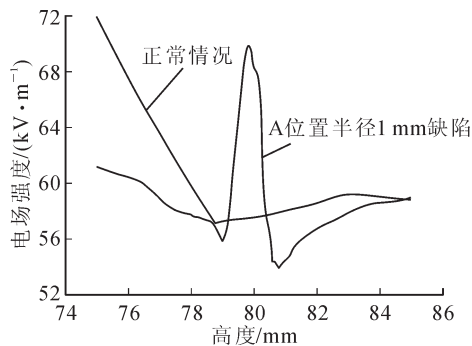


图7 A位置处缺陷电场强度与正常情况对比

Fig. 7 Defects electric field strength comparison with the normal electric field strength at position A

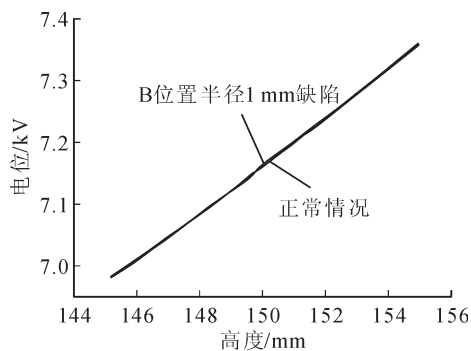


图8 B位置处缺陷电位与正常情况对比

Fig. 8 Defects electric potential comparison with the normal electric potential at position B

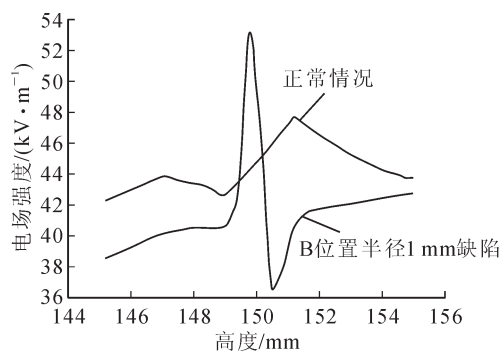


图9 B位置处缺陷电场强度与正常情况对比

Fig. 9 Defects electric field strength comparison with the normal electric field strength at position B

陷半径为 1 mm 时, 缺陷处最大电场强度位移缺陷中心向下偏移 0.2 mm, 最大值为 69.864 kV/m, 缺陷半径为 2 mm 时, 缺陷处最大电场强度位移缺陷中心向下偏移 0.3 mm, 最大值为 71.975 kV/m, 缺陷半径为 3 mm 时, 缺陷处最大电场强度位于缺陷中心向下偏移 0.4 mm, 最大值为 72.779 kV/m。各种情况下缺陷处电场强度最大值相对正常情况都有一个较大的变化, 但缺陷半径的变化对缺陷附近最大电场强度并没有太大的影响, 但总体来讲, 随着缺陷半径的增加, 缺陷附近最大电场强度缓慢增加, 电场最大值的位置越向下偏移。

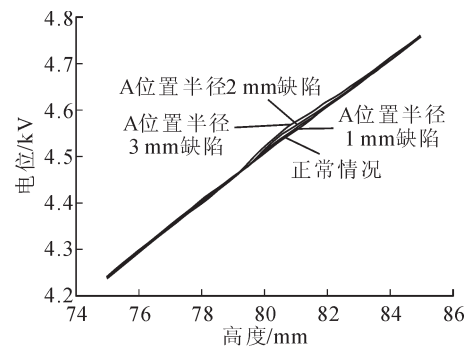


图10 各种情况下电位分布

Fig. 10 In each case the electric potential distribution

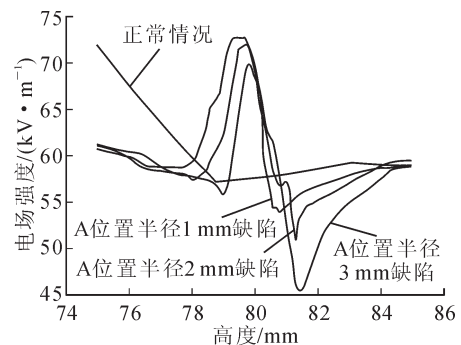


图11 各种情况下电场分布

Fig. 11 In each case the electric field strength distribution

3.3 缺陷的位置对电场强度的影响

触头盒中缺陷出现在不同的位置, 会对缺陷附近电场强度的大小产生不同的影响, 在位置分别为 A、B 处产生半径为 1 mm 的缺陷, 分别取缺陷中心上下各 5 mm 内的电位、电场强度进行分析, 见图 12、13。由图 12 可见, 位置在 A 处的缺陷附近电位明显大于 B 处的电位, 且两个不同位置的电位都呈线性分布。由图 13 可知, A 处缺陷的最大电场强度大于 B 处缺陷的电场强度, 且 A 处缺陷附近电场强度的平均水平也大于 B 处缺陷附近电场强度的平均值。A 处缺陷内部电场最大值为 69.864 kV/m, B 处缺陷内部最大电场值为 53.150 kV/m。A、B 缺陷处电场最大值的差值为 16.714 kV/m。由此可见, 在

触头盒中, 缺陷出现的位置越高, 缺陷附近的就电位越高, 缺陷中电场强度差值越小, 缺陷出现的位置越低, 缺陷附近电位越低, 缺陷中电场强度差值越大。

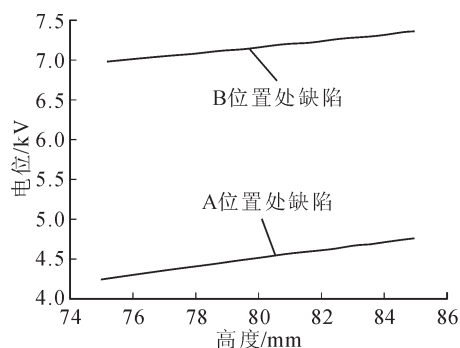


图 12 不同缺陷位置电位对比

Fig. 12 Comparison of potential in different defect location

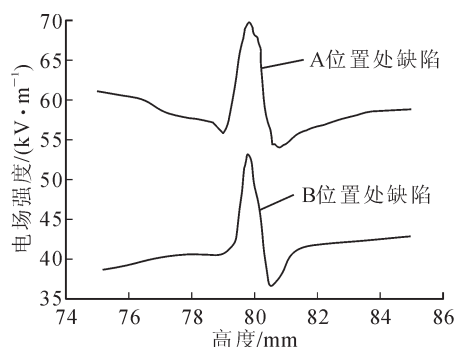


图 13 不同缺陷位置电场强度对比

Fig. 13 Comparison of electric field strength in different defect location

4 结论

1) 缺陷的出现改变了缺陷附近的电场分布, 缺陷的最大电场强度向下偏离缺陷中心, 缺陷越大, 向下偏离越多, 电场值向上下逐渐减小。

2) 缺陷的大小对电场的畸变具有一定的影响, 缺陷越大, 缺陷中电场强度越大。

3) 越高的位置触头盒壁内部电位越高, 电场强度越低。

参考文献:

- [1] LEE H, NEVILLE K. 环氧树脂[M]. 北京: 中国工业出版社, 1965.
LEE H NEVILLE K. Epoxy [M]. Beijing: China Industry Press, 1965.
- [2] 林忠文, 刘涛, 林军. 对环氧浇注工艺问题的研究[J]. 科技成果纵横, 2009(4): 79-80.
LIN Zhongwen, LIU Tao, LIN Jun. The study of epoxy pouring process problems[J]. Perspectives of Scientific and Technological Achievement, 2009(4): 79-80.
- [3] 周华梁. 新型环氧树脂填料氧化铝的研究[J]. 上海电器技术, 1996(1): 51-59.
ZHOU Hualiang. The new epoxy resin filler alumina research[J]. Shanghai Electric Appliance Technology, 1996(1): 51-59.
- [4] 张斌. 劣化绝缘子检测技术的国内外研究现状[J]. 电网技术, 2006, 30(s1): 275-278.
ZHANG Bin. Insulators research status deterioration detection technology[J]. Power System Technology, 2006, 30(s1): 275-278.
- [5] 金建铭. 电磁场有限元方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998.
JIN Jianming. Finite element method[M]. Xi'an: Xidian University Press, 1998.
- [6] 谢龙汉, 耿煜, 邱婉. Ansys 电磁场分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
XIE Longhan, GENG Yu, QIU Wan. Ansys electromagnetic field analysis[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.
- [7] 张洪武. 有限元分析与 CAE 技术基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
ZHANG Hongwu. Finite element analysis and CAE technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [8] 倪光正. 工程电磁场数值计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
NI Guangzheng. Engineering electromagnetic field calculation[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [9] 王佳颖, 方春恩, 戴玉松, 等. 35 kV 触头盒电场计算及优化设计[J]. 高电压技术, 2007, 33(12): 63-65.
WANG Jiaying, FANG Chun'en, DAI Yusong, et al. Electric field calculation and optimal design of 35 kV contactor box[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(12): 63-65.
- [10] 舒立春, 何彦淳, 叶开颜, 等. 直流电场对复合绝缘子覆冰及其闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 353-359.
SHU Lichun, HE Yanzhun, YE Kaiyan, et al. Influence of DC electrical field on composite insulators icing and flashover characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 353-359.
- [11] 谢从珍, 刘珊, 刘芹, 等. 交流 500 kV 复合绝缘子内部缺陷对轴向电场分布的影响[J]. 高电压技术, 2012, 38(4): 922-928.
XIE Congzhen, LIU Shan, LIU Qin, et al. Internal defects influence of 500 kV AC composite insulator on the electric field distribution along the axis[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(4): 922-928.
- [12] 阚仲元. 电动力学教程[M]. 北京: 人民教育出版社, 1979.
KAN Zhongyuan. Electrodynamics course[M]. Beijing: The People's Education Press, 1979.

(下转第 153 页)

- [17] 缪芸, 缪翼军, 陈红坤, 等. 基于模糊层次分析法与支持向量机的变压器风险评估[J]. 现代电力, 2014, 31(6): 64-69.
MIAO Yun, MIAO Yijun, CHEN Hongkun, et al. Risk assessment of transformer based on fuzzy analytic hierarchy process method and support vector machine[J]. Modern Electric Power, 2014, 31(6): 64-69.
- [18] 郭丽娟, 鲁宗相, 邓雨荣. 基于风险的输变电设备状态检修实用化技术研究[J]. 高压电器, 2013, 49(1): 81-86.
GUO Lijuan, LU Zongxiang, DENG Yurong. Risk based maintenance technology of transmission and transformation facilities[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(1): 81-86.
- [19] 陈立, 郭丽娟, 邓雨荣. 基于状态和风险评估的老旧变压器安全经济性管理分析[J]. 高压电器, 2012, 48(2): 81-85.
CHEN Li, GUO Lijuan, DENG Yurong. Safety and economics analysis of the aged transformer based on the condition evaluation and risk assessment[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(2): 81-85.
- [20] 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. A risk assessment method of power transformer based on fuzzy analytic hierarchy process and neural network[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2012, 39(5): 59-64.
- [21] 杜平, 刘浩, 张华. 基于状态检修的电力变压器风险评估指标和方法[J]. 电气技术, 2012(10): 17-19.
DU Ping, LIU Hao, ZHANG Hua. Research on the impact of DG on the distribution network current protection[J]. Electrical Engineering, 2012(10): 17-19.
- [22] Q/CSG 11001—2010 110 kV~500 kV 油浸式电力变压器(电抗器)状态评价导则(试行)[S]. 2010.
Q/CSG 11001—2010 110 kV to 500 kV oil-immersed power transformers (reactors) status assessment guidelines (trial) [S]. 2010.
- [23] Q/CSG 11099—2010 110 kV~500 kV SF₆ 断路器状态评价导则(试行)[S]. 2010.
Q/CSG 11099—2010 110 kV to 500 kV SF₆ circuit breaker status assessment guidelines (trial) [S]. 2010.

田雨(1980—), 女, 硕士, 工程师, 从事电力系统运行、设备运行分析方面工作。

张晗(1987—), 男, 硕士, 工程师, 从事输变电状态监测技术、设备运行分析方面工作。

(上接第 145 页)

- [13] 孙敏, 王燕, 卢明, 等. 介质中气泡电场的计算分析[J]. 高电压技术, 1999, 25(1): 68-70.
SUN Min, WANG Yan, LU Ming, et al. Computation of electric field in dielectric voids[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(1): 68-70.
- [14] DI LORENZO DEL CASALE M, ROMANO P, SCHIFANI R. A life model for epoxy resins subjected to PD activity at different temperatures[C]//2000 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. [S.l.]: IEEE, 2000: 564-567.
- [15] NIEMEYER L. A generalized approach to partial discharge modeling[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(4): 510-528.
- [16] 田玉春, 蒋兴良, 舒立春, 等. 高海拔地区 10 kV 合成绝缘子覆冰闪络特性和电压校正[J]. 高电压技术, 2002, 28(6): 11-15.
TIAN Yuchun, JIANG Xingliang, SHU Lichun, et al. High altitude of 10 kV composite insulator icing flashover performance and voltage correction[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(6): 11-15.
- [17] 刘刚, 阮班义, 陈志娟, 等. 10 kV XLPE 电缆接头连接管含空气隙缺陷的电场分析[J]. 绝缘材料, 2011, 44(5): 62-66.
LIU Gang, RUAN Banyi, CHEN Zhijuan, et al. Analysis on the electric field of 10 kV XLPE cable joint connecting pipe with air gap defects[J]. Insulating Materials, 2011, 44(5): 62-66.
- [18] 江汛, 王仲奕. 复合高压套管的电场计算和分析[J]. 高电压技术, 2004, 30(3): 17-21.
JIANG Xun, WANG Zhongyi. Calculation and analysis for the electric field of composite high voltage bushing[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(3): 17-21.

操李节(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事高压绝缘方面研究。

汪霄飞(1963—), 男, 高级工程师, 长期从事高电压设备技术管理、测试工作。

徐勇(1955—), 男, 研究生导师, 主要从事计算机测试系统、电气设备故障诊断及电力系统过电压方面的研究。