

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.10.002

传感器绝缘子的结构分析与爬电距离设计

谭东现¹, 黄晨奕², 田 阳³, 张 卓⁴, 刘玉春¹

(1. 上海雷博司电气股份有限公司, 上海 201807; 2. 三峡大学电气与新能源学院, 宜昌 443002;
3. 中国电力科学研究院有限公司高电压研究所, 北京 100192; 4. 国网河南省电力公司, 郑州 450018)

摘要: 传感器绝缘子被广泛用于中压开关设备中既起绝缘支撑作用也作为取电压信号的传感器。其绝缘水平直接影响开关设备整体绝缘性能。现场运行与试验结果发现, 内部传感器与外部伞裙的设计严重地影响了外伞裙表面的电场分布。文中通过对5种不同绝缘结构的传感器绝缘子的爬电距离与其工频耐压水平的关系进行电场分析及极限工频耐压试验, 详细分析了不同爬电距离与对应的极限工频耐压水平之间的联系, 为同类产品的结构设计与仿真分析提供参考。

关键词: 传感器; 绝缘子; 爬电距离; 闪络电压; 电场分布

Structure Analysis and Creepage Distance Design of Sensor Insulator

TAN Dongxian¹, HUANG Chenyi², TIAN Yang³, ZHANG Zhuo⁴, LIU Yuchun¹

(1. Shanghai ROX Electric Co., Ltd., Shanghai 201807, China; 2. College of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Yichang, 443002; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 4. Stated Power Grid Company, Henan Province Power Company, Zhengzhou 450018, China)

Abstract: The sensor insulators are used as support and to achieving voltage signal in medium voltage switchgears, and its insulation level directly determines the insulation performance of the entire set of equipment. Field operation and test results show that sensors embedded in epoxy resin and shed structure heavily affect on the distribution of electrical field on the surface of insulator. By comparing, analyzing and discussing the relationship between creepage distance and power frequency withstand voltage level of sensor insulators of 5 different insulation structures, the relationship between creepage distance and power frequency withstand voltage level is obtained. These results can provide usable reference for the structural design of similar products and electrical field simulation.

Key words: sensor; insulator; creepage distance; flashover voltage; electric field distribution

0 引言

传感器绝缘子是用来检测电压信号的绝缘子, 主要用于3.6~40.5kV空气绝缘的中压开关设备, 用来检测开关设备及其某个部分的带电状态、同时又起到绝缘支撑和固定的作用, 是中压开关设备的关键绝缘件之一。

由于前期传感器绝缘子的设计、制造和安装存在一定的缺陷。随着运行时间的增加和缺陷的积

累发展, 近年来, 空气绝缘开关设备因传感器绝缘子的缺陷造成由沿面爬电、绝缘击穿、短路等引起大面积停电的恶性事故^[1-11]时有发生, 给生产和生活造成了严重的影响。

引起传感器绝缘子事故的原因很多, 主要有设计缺陷、环氧材料耐电痕性差、选型不合理、安装缺陷等。其中的设计缺陷, 特别是爬电距离与伞裙结构及其布置的配合存在问题是造成事故的主要原因, 其中一个典型的现场事故照片见图1。由图1可

以看出,该传感器绝缘子靠近母排地方的伞裙表面已出现因表面局部放电而发生的环氧树脂老化、环氧树脂已炭化变黑,如果不及时处理,很快就会发展成为高压对地的贯穿性闪络和短路击穿,严重威胁了开关设备和电网的安全、可靠运行。



图1 传感器绝缘子的典型事故

Fig. 1 Typical fault of sensor insulator

传感器绝缘子的关键技术不仅有绝缘材料(目前主要是环氧树脂材料)的选择、产品的外形安装尺寸,还涉及到绝缘子伞裙的外形大小、伞裙的伞间距大小及其布置。因为这些因素不但决定了爬电距离的大小,还决定了爬电距离的有效性和绝缘子的绝缘水平。对于绝缘设计来说,并不是伞裙布置的越密越好、也不是爬电距离越大越好,而是在有效爬电距离满足设计要求的情况下,伞裙大小与伞裙布置做到有效的统一和结合,才能达到高绝缘水平的产品。

文中通过对两款典型结构的传感器绝缘子的结构外形、电场分布仿真分析对比和工频极限耐受性能测试结果对比,来探讨传感器绝缘子的爬电距离设计及其关键技术,为类似产品的绝缘设计提供参考。

1 传感器绝缘子的典型结构与仿真模型

1.1 传感器绝缘子的典型结构

用于空气绝缘开关设备的传感器绝缘子的典型结构,见图2。这种结构的传感器绝缘子主要由高压电极、电容分压器、环氧树脂和低压电极组成。通常,环氧树脂的介电强度是空气的10倍左右。绝缘设计的原则就是在一定范围内尽量提高环氧树脂中的电场强度、同时降低空气中的场强,在电极形状和尺寸一定的情况下,可以通过伞裙的结构优化来优化电场分布和提高绝缘利用系数。

由图2的典型结构图经过计算可知,两种典型结构传感器的干弧距离和爬电距离分别是98 mm/205 mm和125 mm/333 mm。按正常情况分析,典型结构2的绝缘水平应该明显高于典型结构1。但是,

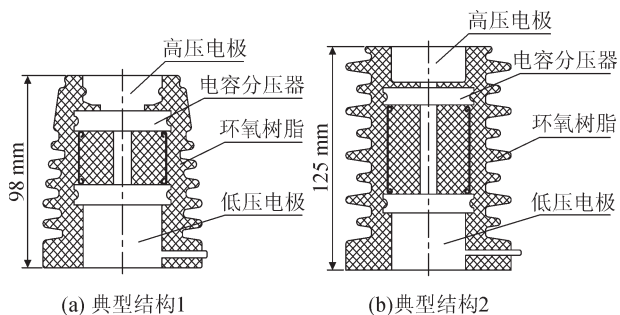


图2 传感器绝缘子的典型结构

Fig. 2 Typical structure of sensor insulator

实际测试结果却与上述的分析相反,结构1的工频耐压值却高于结构2的(具体详见后面内容)。对常见的40.5 kV空气绝缘开关柜用传感器绝缘子进行雷电冲击测试并用高速相机抓拍其放电过程和放电路径得知,其放电路径并不是沿着我们预期的路径(及绝缘子的沿面)放电,实际情况是:有时从高压电极穿过空气对地放电,有时从靠近高压电极伞裙边缘的空气直接对地放电,见图3。

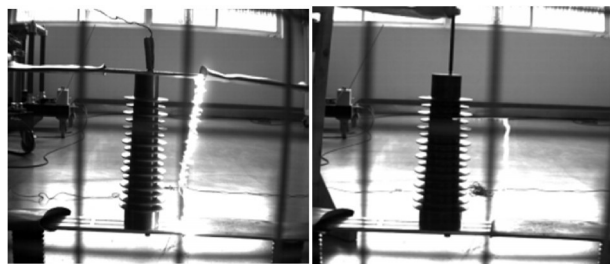


图3 雷电冲击下的典型放电路径

图3 雷电冲击下的典型放电路径

Fig. 3 Typical discharge path under lightning impulse

因此,有必要对不同结构绝缘子的爬电距离、电场分析值和工频极限耐压能力进行综合分析和研究,找出其中的关联,为绝缘子的结构设计和优化提供参考。

1.2 不同绝缘结构的仿真模型

为了进一步说明不同设计结构和爬电距离对传感器绝缘子的绝缘水平的影响,在参考相关文献的基础上^[12-18],文中对5种不同结构的绝缘子进行电场分析^[19-23]。

由图2可知,传感器绝缘子的整体结构属于圆台型结构,因此,其电场分析模型可以简化成二维轴对称模型、且不影响仿真分析结果的准确度。图2所示两种典型结构简化后的仿真模型分别见图4(a)和图4(b)。为了验证典型结构2减小爬电距离后的电场分布情况,采用3种方案对其进行仿真建模:①减小低压电极附近的伞裙;②减小高压电极附近的伞裙;③同时减小高压电极和低压电极附近的伞裙。相应的仿真模型分别见图4(c)、图4(d)和图4(e)。

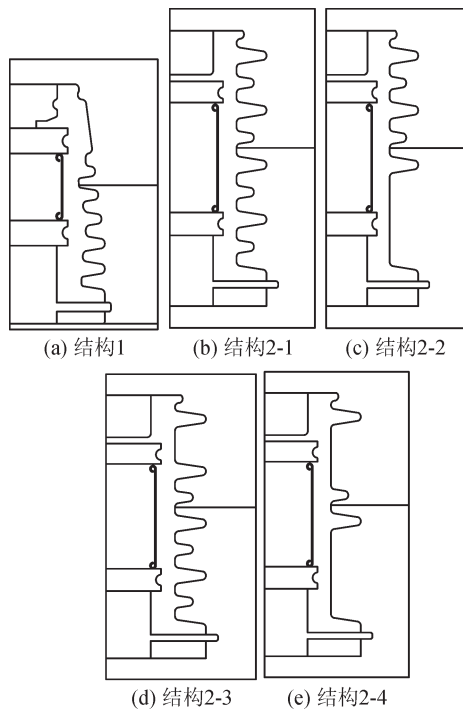


图4 不同绝缘结构仿真模型

Fig. 4 Simulation models of different insulation configurations

为了保证仿真结果的一致性,仿真模型和条件作了如下规定^[24-25]:①求解区域尺寸完全一致;②模

型剖分采用相同剖分方式和单元边长度;③施加电压峰值相同。根据耐压试验的标准要求,其工频耐压为有效值 42 kV,由于仿真过程中所加电压为常数,因此,需要将其换算为峰值:即 $42 \text{ kV} \times \sqrt{2} \approx 60 \text{ kV}$ 。

仿真模型中的材质设置为:环氧树脂的相对介电常数 ϵ 为 3.8,空气的相对介电常数 ϵ 为 1.0。

2 电场仿真对比与分析

5 种仿真模型的电场仿真结果对比见图 5-8 和表 1。

从表 1 可以看出,在绝缘类型相同、施加电压都是 60 kV 的情况下:①环氧树脂中的最大场强值,与干弧距离和爬电距离没有直接的关系,干弧距离和爬电距离较小的结构其最大场强值也可以做到较低;②空气中的最大场强值,与干弧距离和爬电距离也没有直接的关系,干弧距离和爬电距离较大的结构其最大场强值也不是最低;③在干弧距离相同的情况下,空气中的最大场强值基本不随爬电距离的变化而变化,而环氧树脂中的最大场强值随着爬电距离的减小而减小。

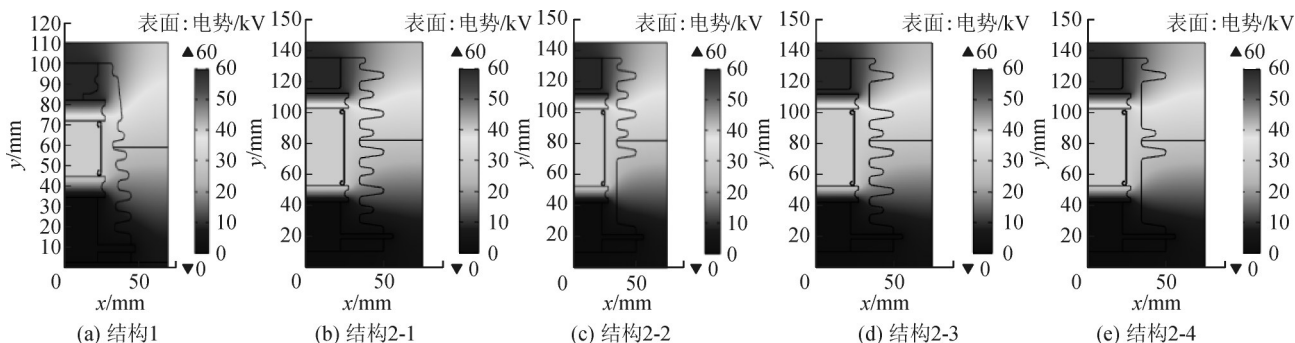


图5 整体电压分布对比

Fig. 5 Comparison of overall voltage distribution

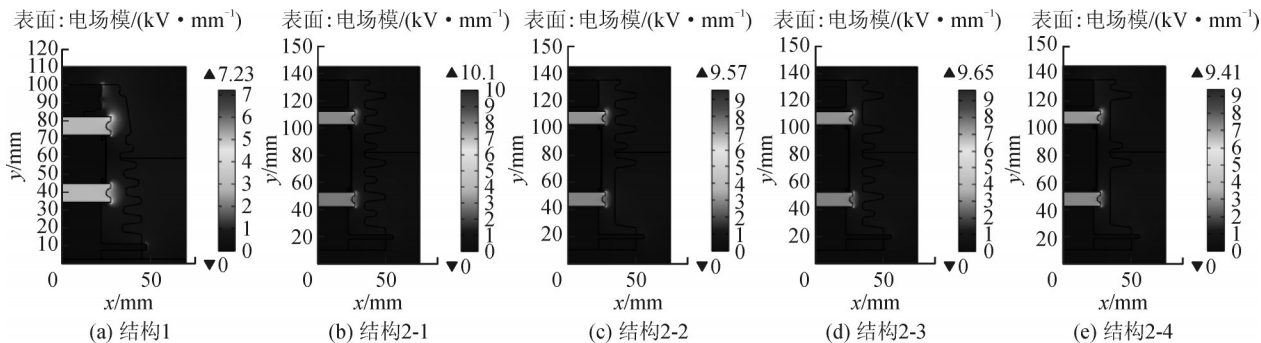


图6 整体电场分布对比

Fig. 6 Comparison of overall electric field distribution

3 试验测试结果与分析

按照标准和技术条件对传感器绝缘子的绝缘

性能要求,必须对其进行工频耐压试验。按照国标的要求,12 kV 传感器绝缘子的对地工频耐压值为 42 kV/1 min。文中对 5 种结构的产品进行了试验测

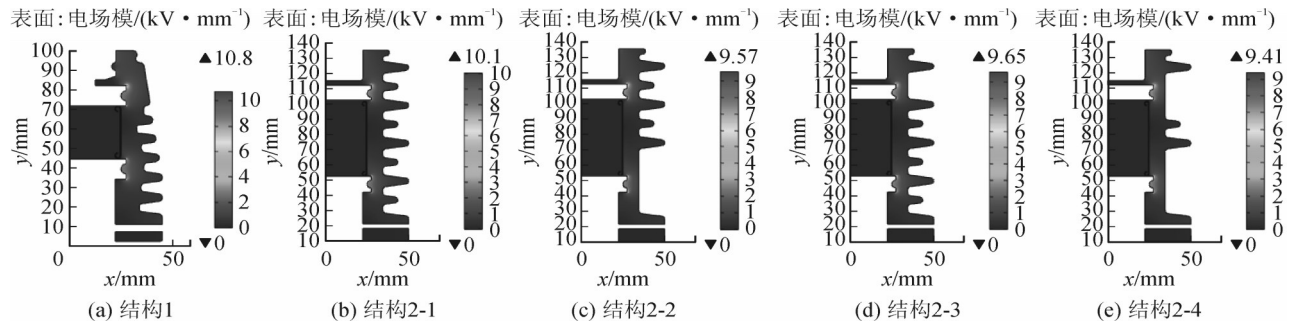


图7 环氧树脂中电场分布对比

Fig. 7 Comparison of electric field distribution in epoxy resin

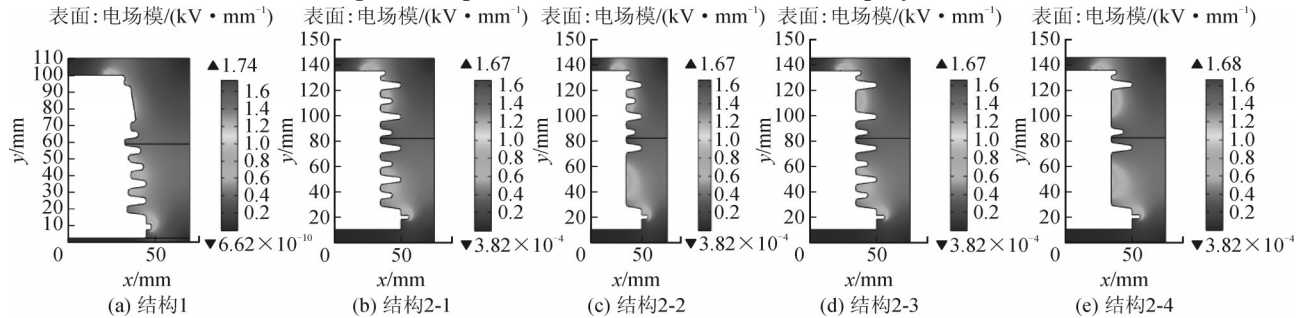


图8 空气中电场分布对比

Fig. 8 Comparison of electric field distribution in air

表1 电场仿真结果汇总

Table 1 Summary of electric field simulation results

结构 类型	干弧 距离/ mm	爬电 距离/ mm	环氧树脂中 最大场强/ ($\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$)	空气中 最大场强/ ($\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$)
结构1	98	205	7.23	1.74
结构2-1	125	333	10.10	1.67
结构2-2	125	282	9.57	1.67
结构2-3	125	320	9.65	1.67
结构2-4	125	245	9.41	1.68

试,在现有产品的基础上,通过车去不同位置的伞裙来实现相应结构的产品,其实物见图9。不同结构绝缘子的工频耐压水平测试结果见表2。

从表2可以看出:①在干弧距离不同的情况下,爬电距离较小的结构,其工频耐压值反而较高;②在干弧距离相同的情况下,随着爬电距离的降低,工频耐压值先增大再减小;③工频耐压值的高低取决于爬电距离和电场分布的共同作用。

4 结论

文中针对中压开关设备用典型结构的传感器绝缘子的工频耐压水平与干弧距离及爬电距离的关系进行了分析研究,根据不同结构的传感器绝缘子建立了5种电场仿真分析模型,并对其进行了仿真分析。通过电场仿真结果和试验测试结果进行

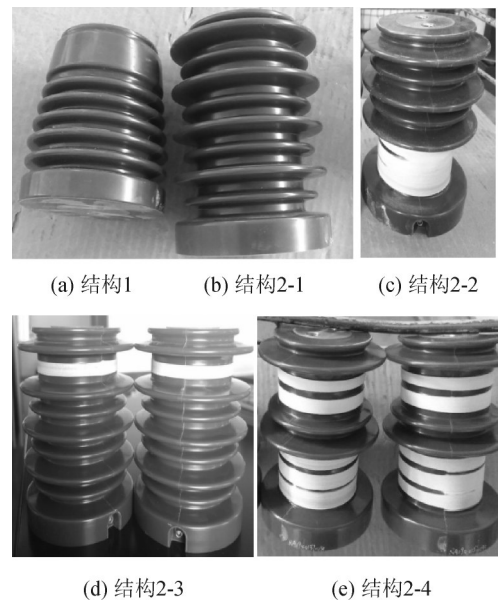


图9 产品实物

Fig. 9 Product physical photos

表2 工频耐压水平测试结果

Table 2 Test results of power frequency withstand voltage level

结构 类型	干弧 距离/ mm	爬电 距离/ mm	环氧树脂中 最大场强/ ($\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$)	空气中最 大场强/ ($\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$)	1 min 工 频耐受 电压/kV
结构1	98	205	7.23	1.74	55
结构2-1	125	333	10.10	1.67	49
结构2-2	125	282	9.57	1.67	55
结构2-3	125	320	9.65	1.67	51
结构2-4	125	245	9.41	1.68	53

分析对比,得出以下结论:

1)针对传感器绝缘子的特殊结构,单靠增加爬电距离和干弧距离很难提高其工频绝缘水平,有时反而会适得其反;爬电距离较小的结构也能做到较高的绝缘水平。

2)在干弧距离一定的情况下,可以通过适当降低爬电距离来提高其工频绝缘水平。

3)传感器绝缘子的爬电距离大小及其伞裙布置方式决定了其工频绝缘水平,可以通过电场仿真和结构优化相结合的方式提高绝缘子的绝缘水平。

参考文献:

- [1] 徐国浩. 高压开关柜绝缘事故的分析及防范对策[J]. 中国科技信息, 2006(14): 94-95.
XU Guohao. High voltage switchgear insulation accident's analysis and countermeasures[J]. China Science and Technology Information, 2006(14): 94-95.
- [2] 耿 伟, 鲁 永. 一起 35 kV 开关柜内部受潮放电的原因分析及处理[J]. 电气开关, 2008(4): 65-66.
GENG Wei, LU Yong. The cause analysis and treatment of a inner discharge case caused by moistened 35 kV switchgear[J]. Electric Switchgear, 2008(4): 65-66.
- [3] 黄晓胜. 预防 10 ~ 35 kV 金属封闭开关柜事故措施[J]. 云南电力技术, 2010(1): 48-49.
HUANG Xiaosheng. Prevention 10 ~ 35 kV metal-enclosed switchgear accident measures[J]. Yunnan Electric Power, 2010(1): 48-49.
- [4] 杜岩伟, 郑卫东, 罗道军, 等. CWB-35 型穿墙套管内腔放电原因分析[J]. 河南电力, 2011(1): 40-41.
DU Yanwei, ZHENG Weidong, LUO Daojun, et al. Analysis about the cavity discharge of CWB-35 wall bushing[J]. Henan Electric Power, 2011(1): 40-41.
- [5] 潘长明, 刘 刚, 熊 炬, 等. 高压开关柜绝缘事故的分析及防范措施[J]. 高压电器, 2011, 47(7): 90-93.
PAN Changming, LIU Gang, XIONG Ju, et al. High voltage Switchgear insulation accident's analysis and countermeasures[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(7): 90-93.
- [6] 刘玉春, 郎福成, 谭东现, 等. 40.5 kV 套管事故分析及结构优化[J]. 电瓷避雷器, 2015(12): 39-42.
LIU Yuchun, LANG Fucheng, TAN Dongxian, et al. Fault analysis and structure optimization of 40.5 kV wall bushing[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(12): 39-42.
- [7] 杨定乾, 陈 赟, 丁 杨, 等. 典型 40.5 kV 穿柜套管绝缘击穿案例仿真和分析[J]. 高压电器, 2017, 53(12): 221-228.
YANG Dingqian, CHEN Yun, DING Yang, et al. Simulation and analysis for typical insulation breakdown fault of bushing through 40.5 kV cabinet[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(12): 221-228.
- [8] 杨 波, 庄 俊, 姚运昌, 等. 一种可阻断直流故障电流的双逆阻型 MMC 研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 39-46.
YANG Bo, ZHUANG Jun, YAO Yunchang, et al. A dual reverse blocking sub-module based MMC with DC fault current blocking capability[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 39-46.
- [9] 周华良, 宋 斌, 安 林, 等. 特高压输电线路分布式故障诊断系统研制及其关键技术[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 115-122.
ZHOU Hualiang, SONG Bin, AN Lin, et al. Key technologies and development of distributed fault diagnosis system for EHV transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 115-122.
- [10] 夏海峰, 刘一民, 董希建, 等. 稳定控制装置特高压交流线路无故障跳闸判据的改进[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 105-112.
XIA Haifeng, LIU Yimin, DONG Xijian, et al. Improvement of non-fault UHV AC line trip criterion in power system stability control equipment[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 105-112.
- [11] 贾勇勇, 杨景刚, 高 山, 等. 高压开关柜内部电场仿真及其影响因素分析[J]. 高压电器, 2017, 53(6): 154-160.
JIA Yongyong, YANG Jinggang, GAO Shan, et al. Analysis of electric field simulation and its influencing factors in high voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(6): 154-160.
- [12] 王文峰, 张清杰, 蒋立齐. 40.5 kV 开关柜穿墙套管电场分析与优化设计[J]. 华电技术, 2011, 33(2): 20-21.
WANG Wenfeng, ZHANG Qingjie, JIANG Liqi. Electric field analysis and optimization design of 40.5 kV switchgear wall bushing[J]. Water Conservancy & Electric Power Machinery, 2011, 33(2): 20-21.
- [13] 韩筛根, 曹 彬, 黄 强, 等. 40.5 kV 穿墙套管电场分析及屏蔽优化[J]. 高压电器, 2017, 53(1): 113-118.
HAN Shaigen, CAO Bin, HUANG Qiang, et al. Electric field analysis and shielding optimization of 40.5 kV wall-bushings[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(1): 113-118.
- [14] 王海燕, 朱志豪, 费 翔, 等. 40.5 kV 空气绝缘开关柜穿墙套管电场优化与结构设计[J]. 高压电器, 2019, 55(1): 59-63.
WANG Haiyan, ZHU Zhihao, FEI Xiang, et al. Electric field optimization and structure design of wall bushing in 40.5 kV air-insulated switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1): 59-63.
- [15] 杨璐雅, 黄新波, 张 烨, 等. 基于边缘检测的瓷质绝缘子裂缝特征检测方法[J]. 广东电力, 2018, 31(7): 106-111.
YANG Luya, HUANG Xinbo, ZHANG Ye, et al. Detection method for porcelain insulator crack characteristic based on edge detection[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(7): 106-111.
- [16] 孔 灿, 张大宁, 田 杰, 等. 110 kV 变压器油纸绝缘套管不均匀绝缘受潮劣化分析[J]. 智慧电力, 2020, 48(4): 119-124.
KONG Can, ZHANG Daning, TIAN Jie, et al. Non-uniform moisture degradation analysis of 110 kV transformer oil-paper insulation bushing[J]. Smart Power, 2020, 48(4): 119-124.

- [17] 俞 胜,梁 晖,马恒瑞. 考虑环境因素影响的配电线路雷电绝缘防护失效概率计算[J]. 智慧电力, 2020, 48(5): 106-110.
YU Sheng, LIANG Hui, MA Hengrui. Lightning insulation failure probability calculation of distribution line considering environmental factors[J]. Smart Power, 2020, 48(5):106-110.
- [18] 彭向阳,黄 振,张中浩,等. 高湿热地区高温发热复合绝缘子分析[J]. 智慧电力, 2019, 47(8):83-90.
PENG Xiangyang, HUANG Zhen, ZHANG Zhonghao, et al. Analysis of high temperature heating composite insulators in hot and humid areas[J]. Smart Power, 2019, 47(8):83-90.
- [19] 王 刚,安 琳. COMSOL Multiphysics 工程实践与理论仿真[M]. 北京:电子工业出版社, 2012.
WANG Gang, AN Lin. Engineering practice and theoretical simulation of COMSOL Multiphysics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.
- [20] 谭东现,贺弋玲,林 钧,等. 12 kV 复合绝缘开关设备的绝缘特性研究[J]. 高压电器, 2018, 54(4):28-33.
TAN Dongxian, HE Yiling, LIN Jun, et al. Investigations on insulation characteristics of 12 kV composite insulated switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(4):28-33.
- [21] 杜伯学. 有机绝缘耐电痕性的评定与发展[J]. 高电压技术, 2005, 31(5): 10-13.
DU Boxue. Research and development of test method on tracking resistance of polymer insulating materials[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(5): 10-13.
- [22] 郑一泉. 有机绝缘材料耐电痕化的影响因素探讨[J]. 绝缘材料, 2012, 45(4):55-59.
ZHENG Yiquan. Factors influencing the tracking resistance of organic insulating materials[J]. Insulating Materials, 2012, 45(4):55-59.
- [23] 田付强,彭 潇. 耐电晕耐电痕化绝缘材料研究进展[J]. 电工技术学报, 2017, 32(16):3-13.
TIAN Fuqiang, PENG Xiao. The research progress of corona-resistant and tracking-resistant insulating materials[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(16):3-13.
- [24] 严 璋,朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2007.
YAN Zhang, ZHU Deheng. High voltage insulation technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [25] 严酷环境条件下使用的电气绝缘材料 评定耐电痕化和蚀损的试验方法:GB/T 6553—2014[S]. 2014.
Electrical insulating materials used under severe ambient conditions-test methods for evaluating resistance to tracking and erosion:GB/T 6553—2014[S]. 2014.

谭东现(1976—),男,博士,主要从事电气设备绝缘设计、绝缘故障检测与分析、绝缘材料环境适应性、电气设备运行性能与剩余寿命的在线监测等方面的研究(E-mail: tandongxian@126.com)。

田 阳(1984—),男,高级工程师,主要从事新型高压开关设备的研究、开发及技术管理工作(E-mail:tianyang@epri.sgcc.com.cn)。

张 卓(1983—),男,学士,高级工程师,从事变电设备检修与运维管理。

刘玉春(1977—),男,工学硕士,从事输变电设备的绝缘设计和结构优化(E-mail:liuyuchun2004@126.com)。

(上接第6页)

- Smart Power, 2020, 48(1):97-104.
- [11] High-voltage switchgear and controlgear-Part 1: Common specification for alternating current switchgear and controlgear: IEC 62271-1—2017[S]. 2017.
- [12] Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards:GB 11022—2011[S]. 2011.
- [13] IEEE standard for common requirements for high-voltage powerswitchgear rated above 1 000 V:IEEE Std C 37.100.1—2018[S]. 2018.
- [14] High-voltage switchgear and controlgear-part 200: AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV: IEC 62271-200—2011[S]. 2011.
- [15] 3.6~40.5 kV 交流金属封闭开关设备与控制设备: GB 3906—2020[S]. 2020.
Alternating-current metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 3.6 kV and up to and including 40.5 kV: GB 3906—2020[S]. 2020.
- [16] IEEE standard for metal-clad switchgear: IEEE Std C37.20.2—2015[S]. 2015.
- [17] High-voltage switchgear and controlgear-Part 304: Design classes for indoor enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV up to and including 52 kV to be used in severe climatic conditions: IEC 62271-304—2008[S]. 2008.
- [18] Additional requirements for enclosed switchgear and controlgear from 1 kV to 72.5 kV to be used in severe climatic conditions: IEC 60932—1988[S]. 1988.

谭东现(1976—),男,博士,主要从事电气设备绝缘设计、绝缘故障检测与分析、绝缘材料环境适应性、电气设备运行性能与剩余寿命的在线监测等方面的研究(E-mail: tandongxian@126.com)。

王志川(1983—),男,硕士,高级工程师,主要从事高压开关运检管理(E-mail:zhichuan@outlook.com)。

毛文奇(1981—),男,教授级高级工程师,主要从事变电设备技术运检管理。