

一起均压环断裂故障的分析与处理

秦睿, 高健, 严丽, 杨萍, 袁芳

(国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 兰州 730050)

摘要: 甘肃河西新能源基地大负荷电力的输送主要依赖超高压输变电工程, 而超高压电气设备对外绝缘水平和电压分布要求高, 所以大多数设备对地距离高且加装均压环。甘肃河西750 kV输变电工程处于高风载地区, 投运以来已发生多起750 kV主变高压侧套管、避雷器、支柱绝缘子和330 kV隔离开关等设备均压环断裂的故障。为保障甘肃风电能够安全稳定的送出, 结合甘肃电网的实际情况, 笔者针对某330 kV变电站隔离开关均压环断裂的原因进行了全面分析, 提出了改进均压环结构的几种方案并进行了试验验证, 最后从设计、结构、加工工艺和运行维护等方面提出了增加不锈钢板、支撑筋及不锈钢抱箍等具体防范解决措施。

关键词: 高风载地区; 设备均压环; 断裂原因; 试验研究

中图分类号: TM564

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2014)07-0117-06

Dealing with a Grading Ring Fracture Failure

QIN Rui, GAO Jian, YAN Li, YANG Ping, YUAN Fang

(Gansu Electric Power Research Institute, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The Gansu Hexi 750 kV power transmission project, which is located in heavy wind-load area, has suffered some grading ring fracture failures on the 750 kV main transformer high-voltage side, surge arresters, post insulators, 330 kV isolating switches, and so on. In this paper, the causes of grading ring fracture on a 330 kV substation isolating switch is analyzed comprehensively on account of the actual situation of Gansu power grid, and several schemes are proposed for improving the grading ring structure. Experiments are conducted to verify these schemes. Preventive solutions to the fracture problem are hence put forward concerning design, structure, processing technology, operation, and maintenance, such as increasing stainless steel plate, stainless steel hoop and supporting tendons.

Key words: heavy wind-load area; grading ring; fracture cause; experimental research

0 引言

大力发展风电等可再生能源是国家重大战略决策。近年中国风电规模高速增长, 风电送出局部受限问题逐步凸现。根据规划, 未来中国风电以大规模集中开发为主要形态, 继续呈现快速增长势头^[1-6]。随着甘肃新能源基地将成为世界上最大的风电基地, 保障750 kV输电通道安全稳定运行问题亟待解决。

高压电气设备均压环作为改善静电场下电压

分布的一种金属部件, 一般由铝、铝合金、不锈钢和铁材料加工而成。主要作用是均衡对地杂散电容, 使电压分布均匀, 防止电压畸变造成局部的闪络和击穿而损坏设备, 在110 kV及以上的高压电气设备上大量应用^[7-12]。高风载地区运行的电气设备在受大风的频繁冲击下, 其顶部的均压环长期承受横向风载荷和自重的联合作用, 会产生静挠度而变形, 将固定拉筋与其连接部位拉薄甚至拉裂, 对电气设备安全稳定运行带来很大的隐患。

1 均压环断裂

330 kV某变电站一隔离开关支柱绝缘子顶端

收稿日期: 2013-12-11; 修回日期: 2014-01-11

基金项目: 国家电网公司科技项目(2012101022)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(2012101022).

下部椭圆形均压环连接支架断裂脱落,见图1。断裂均压环及支腿全貌见图2,由图2所知,均压环环体两端由两个弯曲的铝质半圆环构成,与中间两段同管径的铝管焊接相连形成一个近似椭圆形圆环,环体铝管壁厚度2.5~2.7 mm;环体椭圆长轴两端原分别焊接有一长一短两个支腿,均在距环体100 mm处进行了夹角约120°的弯折;两支腿由宽40 mm、厚10 mm的带状铝板制成,在两个支腿端部与支柱上端用固定螺栓连接。



图1 断裂的隔离开关均压环

Fig. 1 The fracture isolation switch grading ring



图2 断裂均压环及支腿全貌

Fig. 2 The fracture grading ring and full view of outrigger

2 均压环断裂检验分析

2.1 断口宏观分析

断裂发生在两支腿与环体连接角焊缝处,两侧裂口均位于角焊缝靠近环体侧焊缝熔合线部位。先开裂的短支腿断口绝大部分沿环体侧角焊缝焊趾熔合线由外壁向内壁延伸,仅在靠近触头方向侧边角处有约10 mm长尖角形断裂面位于环体母材上。

从断口表面观察可知,大部分为陈旧断口,表面粗糙不平,无明显塑性变形,断面存在沿表面向内延伸的纹理,表面附着有一层灰黑色附着物,部分区域附着物一直延伸至内表面,说明裂透时间较早。部分区域靠内表面有一很小的剪切唇,表面金属光泽较好,为最后开裂区域。较长支脚与环体焊缝处断口均开裂于角焊缝靠环体侧焊脚部位,裂纹也是由外表面向内部延伸,靠近外表面的大部分断面较为粗糙,靠近内表的部分断裂面有塑性变形痕迹,大部分断口表面金属光泽较好,从上述情况判断此侧断口开裂时间较晚。

2.2 材质元素分析

采用SPECTRO xSORT手提式射线荧光光谱仪对均压环两端环体及两个支腿材质进行了元素分析,对支腿材质进行了检测。从成分分析结果判断,均压环材质与纯铝(1060)较接近,支腿材质与铝合金5A05相近,与厂家提供的均压环设计材质成分基本相符,见表1。

表1 均压环X射线荧光光谱分析结果及标准值

Tab. 1 The grading ring X-ray fluorescence spectrometry results and standard values							%
项目	Si	Mn	Ti	Fe	Zn	Mg	Al
短支腿侧环体	—	0.006	0.049	0.330	0.011	—	99.500
长支腿侧环体	—	0.007	0.071	0.350	0.010	—	99.500
支腿	0.090	0.350	0.010	0.170	0.010	5.400	余量约 94
1060纯铝标准值	0.250	0.030	0.030	0.350	0.050	0.030	99.600
5A05 铝合金标准值	0.500	0.300~0.600	—	0.500	0.200	4.800~5.500	余量

2.3 金相检验及扫描电镜断口分析

从最先开裂的短支腿断口上取样进行金相检验及扫描电镜断口分析;金相检验试样取在断口上包含少量环体母材的部位,检验结果此部位焊缝、熔合线及热影响区母材组织基本正常,未发现组织缺陷及微观焊接缺陷,母材、焊缝及熔合线金相组织见图3(200倍)。

从图3可看出,焊缝组织与母材组织存在差别,试样焊缝熔合区组织过渡良好,未发现微观裂纹及化合物相聚集现象。

断裂面扫描电镜组织形貌见图4,由图4可

看出,在断面上可以看到与外表面平行且间距较宽的疲劳辉纹及每次裂纹扩展过程中的撕裂台阶。扫描电镜断口检验试样取在表面附着有棕黑色物质的部位(试样1)及断裂面保存较为完好部位(试样2),见图5、6。从大部分断口区域扫描电镜显微图像看,可以判断断裂机理为高应力低周疲劳断裂。

试样1及试样2扫描电镜微区能谱分析结果见表2,从表2可看出,试样1与制造厂提供的材料牌号成分基本一致,但由于试样表面存在污染物,检测结果中存在质量分数较低的其他不相关元素

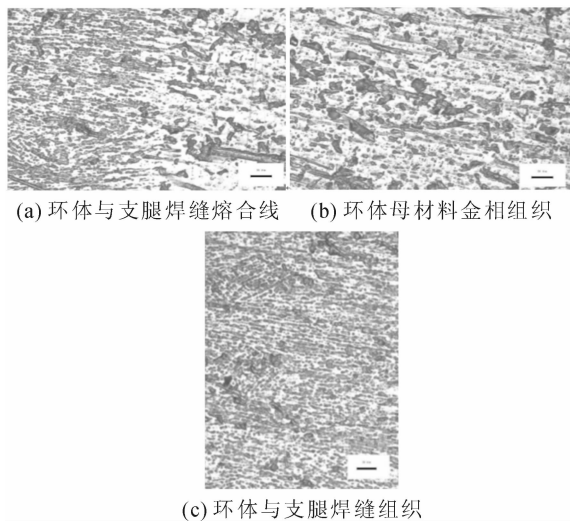


图3 均压环环体金相组织形貌

Fig. 3 Appearance of the grading ring body microstructure

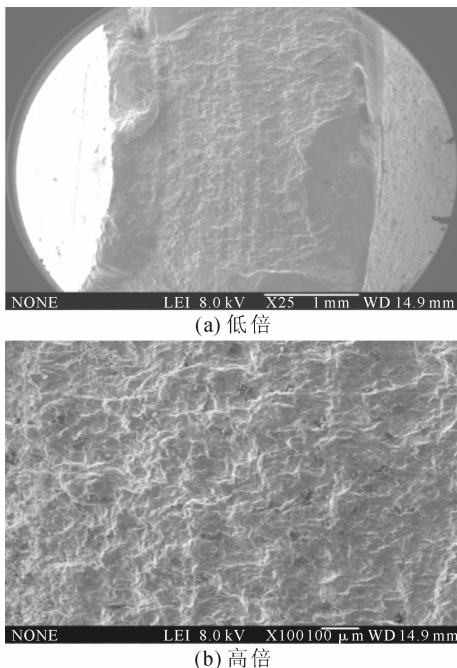


图4 断裂面扫描电镜组织形貌

Fig. 4 Appearance of the fracture surface scanned electron microscopy

成分。表面存在棕黑色附着物的试样断口表面主要成分为氧化铝。

2.4 硬度检测

采用 TH160 里氏硬度计对均压环环体、支腿及环体焊缝进行了硬度检测,见表 3。

从表 3 可看出,原材料硬度在 HL264 至 HL282 之间,环体与支腿硬度值差别较小;环体焊缝硬度值为 HL233,小于母材平均硬度约 15%。

3 均压环断裂原因分析

从以上试验分析结果来看,均压环及支腿材质

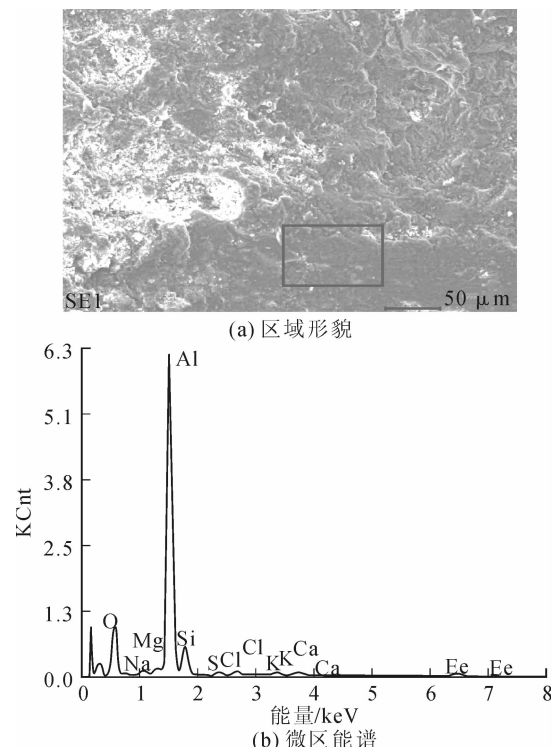


图5 试样1断口表面

Fig. 5 Specimen 1 fracture surface

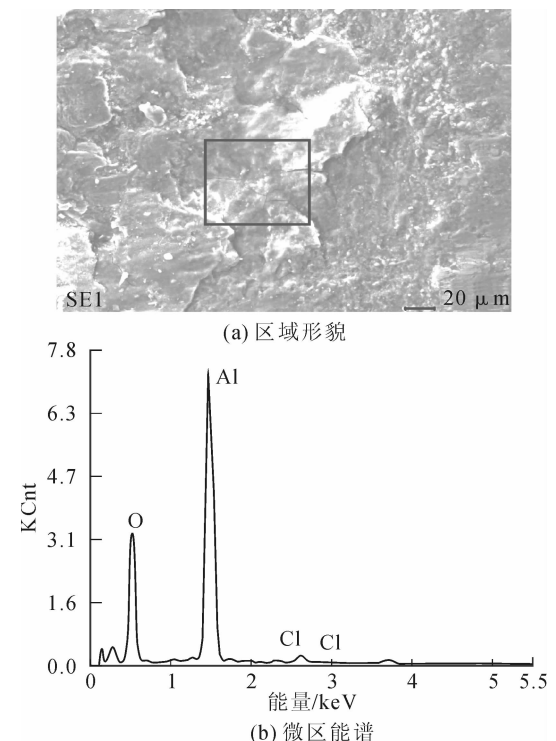


图6 试样2断口表面

Fig. 6 Specimen 2 fracture surface

未发现严重问题,引起断裂的原因主要有:

1)结构因素。从均压环整体结构看,下部环体尺寸和重量较大(4 kg),支撑环体的仅为两个截面 10 mm×40 mm 的带状支腿,因此,均压环整体稳定性较差,在外力作用下容易产生晃动。另一方面,在

表2 试样1及试样2扫描电镜微区能谱分析结果
Tab. 2 Specimen 1 and specimen 2 scanned electron microscope micro-energy spectrum analysis results

元素	试样 1		试样 2	
	Wt/%	At/%	Wt/%	At/%
OK	24.66	36.42	47.24	60.37
NaK	0.82	0.84	—	—
MgK	0.90	0.87	—	—
AlK	57.66	50.49	50.84	38.53
SiK	9.07	7.63	—	—
SK	0.81	0.60	—	—
ClK	0.96	0.64	1.92	1.11
KK	0.94	0.57	—	—
CaK	1.02	0.60	—	—
FeK	3.18	1.34	—	—

表3 硬度检测结果
Tab. 3 Hardness test results

检测部位	环体 母材	短支 腿母材	长支 腿母材	环体对 接焊缝
里氏硬度值(HL)	264, 282	275	268	233

支腿与环体的连接部位为直接焊接的角焊缝结构,在角焊缝焊趾部位工件外形与尺寸发生了突变,且此处均压环环体壁厚仅为 2.5 mm,造成局部承载截面突然下降和载荷方向改变。使得角焊缝边缘应力明显大于其他部位,产生明显的应力集中现象。

2) 载荷因素。均压环整体结构以及断口和其他部位材料无明显塑性变形,表明均压环与支腿的连接结构正常情况下能满足对环体的支撑要求,但是在多风且风力较强的环境条件下使用,由于均压环两个支腿悬吊结构稳定性较差,在风力的作用下会产生振动现象,造成焊缝边缘应力集中部位出现交变和幅值较高的弯曲应力和剪应力^[13-16],在这种交变应力的长期作用下,会造成该部位疲劳源的产生和疲劳裂纹的不断扩展,最终导致支腿从角焊缝边缘处断裂。

3) 其他因素。均压环环体与支腿以焊接方式连接,在焊接热循环作用下焊缝热影响区可能会出现过热和粗晶区,造成局部材料强度和韧性下降^[17-20]。一方面焊缝熔融金属在凝固过程中会产生残余拉应力,这些因素都为焊缝热影响区裂纹的产生和扩展创造了条件。另一方面,对于纯铝而言,在产生疲劳损伤的过程中,其裂纹尖端材料通常会出现软化现象,这就造成材料疲劳强度的进一步下降,加速了裂纹扩展和疲劳断裂的进程。

综上所述,在高风载区域设备顶部均压环由于

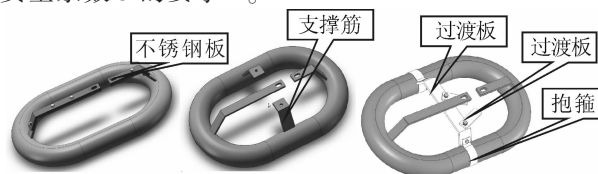
迎风面面积大,在频繁风力作用下引发振荡,风载荷和自重的联合作用造成高应力低频疲劳,造成结构薄弱的部位出现缺陷,最终导致均压环发生断裂。

4 改进方案及试验验证

根据均压环支腿的连接结构断裂原因,提出了改进方案并进行了均压环支架焊接质量检验、支架焊缝渗透检测、支撑杆与均压环焊接部位渗透检测、风载仿真模拟现场试验。

4.1 均压环加固措施

1) 增加不锈钢板。结合现场的实际情况,在保障产品使用性能的前提下,在均压环的固定板上增加不锈钢固定板,脱焊部位的安全系数由 4 提高到 14,如图 7(a)。选择最苛刻的迎风方向进行计算得出:最小安全系数 4.4,计算结果满足铝材疲劳强度安全系数 3 的要求^[21]。



(a) 增加不锈钢板 (b) 增加支撑筋 (c) 增加抱箍

图 7 均压环加固效果图

Fig. 7 Grading ring reinforcement effect diagram

2) 增加支撑筋。均压环支撑筋由 2 条增加到 4 条,支撑筋弧现场焊接,如图 7(b)。通过对支撑杆与均压环焊接部位进行检验可以看到,各焊接部位均存在焊接时出现的少量隐藏于焊接部位的细小气泡。

3) 增加不锈钢抱箍,如图 7(c)。

4.2 风载模拟试验验证

根据相关标准^[22],在制造厂对均压环进行风载模拟试验现场验证。参照变电站现场最苛刻的运行环境,核算现场风力载荷,设计具有输出交变力(交变力方向可调)的试验装置,按照预定频率施加试验负载,验证整改效果。模拟试验采用一端钢丝绳拉拽均压环受力部位,通过滑轮在钢丝绳另一端悬挂 10 kg 重物进行试验,利用弹簧的伸缩受力对重物进行上下往复运动,使得钢丝绳另一端所捆绑的均压环受到作用力,该运动往复进行 10 000 次,验证均压环与支撑杆焊接部位的质量。纵向受力完成后,用同样的模拟方法对均压环进行横向受力验证,次数为 10 000 次。该试验中,均压环焊接部位的平均受力大于自然风情况下的受力。经检查,验证全过程未发现焊接部位出现裂纹以及明显影响均压环受力的变形等异常现象。试验装置见图 8。

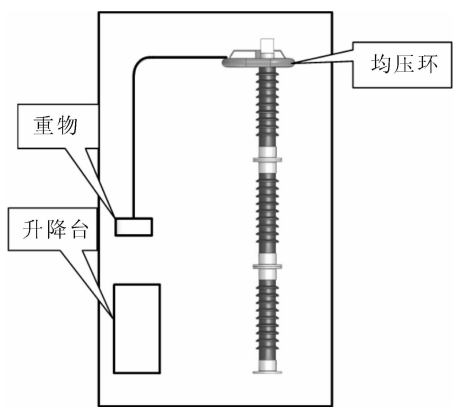


图8 均压环风载模拟试验装置

Fig. 8 The grading ring wind load simulation test device

试验验证表明以上整改方案完全能够满足变电站的使用环境要求,以后不会发生类似质量问题。综合3种改造方案的可靠性、现场可操作性,按照增加抱箍加固方案实施。

4.3 电晕放电测试

在高压试验大厅对加装抱箍和支腿的两种均压环,模拟330 kV电压等级环境分别进行了电晕放电测试,在达到试验电压后维持电压不变进行紫外成像测试,均未发现异常放电现象。

5 结语

长期运行在大风环境中,电气设备均压环易局部疲劳撕裂,导致断裂截面逐步增加甚至全部撕裂。应针对高风载地区的均压环应优化结构设计,采取局部补强措施,加大支腿与环体连接部分焊接处的铝管壁厚度,圆滑过渡,最大限度减少局部应力幅值和改善应力集中现象。加强对制造过程中焊接工艺和焊接质量的监控,采取热处理措施,防止出现焊接过热、焊接裂纹等微观及宏观焊接缺陷,减少外侧表层的拉裂几率。对均压环制造、安装质量的检测以及高风载地区在役运行均压环的定期利用红外、紫外成像技术进行监督检查,及时发现和处理可能出现的裂纹。通过有效的改进措施并进行试验验证,提高均压环稳定性及抵御交变风载的能力。

参考文献:

- [1] 黄强. 含大规模风电的电力系统有功平衡问题研究综述[J]. 电力建设, 2013, 34(4): 27-31.
HUANG Qiang. Research on active power balance problem of power system with large-scale wind power connection[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(4): 27-31.
- [2] 国家电网公司. 国家电网公司促进风电发展白皮书[Z]. 北京: 国家电网公司, 2011.

- [3] 李军军, 吴政球. 风力发电及其技术发展综述[J]. 电力建设, 2011, 32(8): 64-73.
LI Junjun, WU Zhengqiu. Review of wind power generation and relative technology development[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(8): 64-73.
- [4] 汪宁渤, 马彦宏, 夏懿. 甘肃酒泉10 GW级风电基地面临的巨大挑战[J]. 电力建设, 2010, 31(1): 101-104.
WANG Ningbo, MA Yanhong, XIA Yi. Enormous challenges for Gansu Jiuquan 10 GW wind power base[J]. Electric Power Construction, 2010, 31(1): 101-104.
- [5] 华文, 徐政. 包含风电场的发电系统可靠性研究[J]. 高压电器, 2010, 46(12): 36-40.
HUA Wen, XU Zheng. Reliability assessment of generation systems containing wind farm[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 36-40.
- [6] 王天施, 苑舜. 风力发电对电网的影响及对策[J]. 高压电器, 2010, 46(8): 89-92.
WANG Tianshi, YUAN Shun. Effects of wind power generation on power grid with countermeasures[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(8): 89-92.
- [7] PHILLIPS J, FEL J K, BAKER A, et al. Electric fields on AC composite transmission line insulators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 823-830.
- [8] 卢明, 阎东, 杨庆. 均压环安装错误对电场分布的影响[J]. 河南电力, 2011(1): 1-2.
LU Ming, YAN Dong, YANG Qing. The effect of error installation of grading ring on electric field distributions[J]. Insulators and Surge Arresters, 2011(1): 1-2.
- [9] 曹晶, 张勤, 谢梁, 等. 330 kV输电线路均压环优化研究[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(10): 15-19.
CAO Jing, ZHANG Qin, XIE Liang, et al. Optimization research of grading ring for 330 kV transmission line[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(10): 15-19.
- [10] 陈树挺, 李日隆. 复合绝缘子均压环应用研究[J]. 电瓷避雷器, 2004(3): 8-10.
CHEN Shuting, LI Rilong. Study on application of grading ring for the composite insulators[J]. Insulators and Surge Arresters, 2004(3): 8-10.
- [11] 沈鼎申, 张孝军, 万启发, 等. 750 kV线路绝缘子串电压分布的有限元计算[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 54-57.
SHEN Dingshen, ZHANG Xiaojun, WAN Qifa, et al. Calculation of voltage distribution along insulator strings of 750 kV by finite element method[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 54-57.
- [12] 毛凤麟, 王雪松. 复合绝缘子均压环对电场分布的影响[J]. 高电压技术, 2000, 26(4): 40-42.
MAO Fenglin, WANG Xuesong. Effects of grading ring of polymer insulator on the field distribution[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(4): 40-42.
- [13] 卫李静, 王伯时, 汪忆新, 等. 均压环对复合绝缘子电场

- 分布影响的研究[J]. 高压电器, 2006, 42(4): 262-264.
- WEI Lijing, WANG Baishi, WANG Yixin, et al. Effects of shielding rings on the electric field distributions of composite insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(4): 262-264.
- [14] 孙恒峰, 张 扬, 孙正华, 等. 均压环的漆膜对断口均压电容器介损测量的影响[J]. 高压电器, 2010, 46(8): 70-71.
- SUN Hengfeng, ZHANG Yang, SUN Zhenghua, et al. Influence of grading ring's paint film on measurement of grading capacitor's dielectric loss[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(8): 70-71.
- [15] 杨 杰, 吉晓波, 周国华, 等. 均压装置对复合绝缘子电气性能的影响[J]. 高电压技术, 2004, 30(2): 24-25.
- YANG Jie, JI Xiaobo, ZHOU Guohua, et al. The influence of voltage grading fittings on electrical performance of composite insulators[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(2): 24-25.
- [16] 杨 帆, 姚德贵, 彭 卉, 等. 高压变电站工频电磁场屏蔽效能测试及分析[J]. 高压电器, 2010, 46(1): 85-88.
- YANG Fan, YAO Degui, PENG Hui, et al. Measurement and analysis of shielding effectiveness for power frequency electromagnetic field in HV substation[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(1): 85-88.
- [17] 司马文霞, 杨 庆, 孙才新, 等. 基于有限元和神经网络方法对超高缝合成绝缘子均压环结构优化的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 115-120.
- SIMA Wenxia, YANG Qing, SUN Caixin, et al. Optimization of corona ring design for EHV composite insulator using finite element and neural network method[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 115-120.
- [18] 黄道春, 阮江军, 刘 佳, 等. 330 kV 绝缘子串电压分布和屏蔽环位置的优化[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 91-94.
- HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, LIU Jia, et al. Calculation of voltage distribution along insulator string of 330 kV transmission line and position optimization of grading ring[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 91-94.
- [19] 薄学微, 卞星明, 王黎明, 等. 750 kV 交流复合绝缘子均压环优化设计[J]. 高压电器, 2010, 46(12): 5-8.
- BO Xuewei, BIAN Xingming, WANG Liming, et al. Optimal design of grading rings for 750 kV AC composite insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 5-8.
- [20] 周志成, 何俊佳, 陈俊武, 等. 均压环改善绝缘子串电压分布研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 45-48.
- ZHOU Zhicheng, HE Junjia, CHEN Junwu, et al. Research on improving the voltage distribution of the insulator string by voltage balance slices[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(11): 45-48.
- [21] DL/T 760.3—2012 均压环, 屏蔽环和均压屏蔽环[S]. 2012.
- DL/T 760.3—2012 Grading ring, shielding ring, grading and shielding ring[S]. 2012.
- [22] GB/T 2317.2—2008 电力金具试验方法[S]. 2008.
- GB/T 2317.2—2008 Test method for electric power fittings [S]. 2008.
- 秦 睿(1967—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电气设备研究。
- 高 健(1980—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电气设备金属材料分析研究。

(上接第 116 页)

- impurity analysis of SF₆ for fault diagnosis of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 53-54.
- [22] 闫 斌, 何喜梅, 王志惠, 等. X 射线数字成像检测系统在 GIS 设备中的应用[J]. 高压电器, 2010, 46(11): 89-91.
- YAN Bin, HE Ximei, WANG Zhihui, et al. Application of X-ray digital imaging defect detection system in GIS equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(11): 89-91.
- [23] 李云阁, 侯清川, 周 斌, 等. 750 kV GIS 中 VFTO 峰值[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(12): 8-11.
- LI Yunge, HOU Qingchuan, ZHOU Bin, et al. VFTO magnitude values on the 750 kV GIS[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(12): 8-11.
- [24] 朱作欣, 朱全胜, 马 超, 等. 基于 MapX 的电力系统 GIS 人机交互设计[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(12): 28-33.
- ZHU Zuoxin, ZHU Quansheng, MA Chao, et al. Design of GIS human-computer interaction based on MapX for electric power system[J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(12): 28-33.
- 晏年平(1985—), 男, 工学硕士, 工程师, 研究方向为高压电器设备绝缘分析与诊断技术。
- 于钦学(1960—), 男, 博士, 主要从事电气绝缘测试技术、绝缘材料老化及寿命评估等方面的研究。
- 任文娥(1960—), 女, 高级工程师, 主要从事理化分析绝缘材料老化与寿命评估、理化和微观分析。
- 钟力生(1961—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事电介质与电气绝缘技术、聚合物光电材料及器件、生物电介质及应用等方面的研究。