

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.03.017

高海拔变电站紫外检测异常现象分析

贾志杰, 刘守豹, 刘 凡, 甘德刚

(国网四川省电力公司电力科学研究院, 成都 610072)

摘要: 500 kV 色尔古变电站的 500 kV 设备场地电晕放电引起的可听噪声比其他 500 kV 变电站明显要大。而紫外检测技术主要是通过观测高压电气设备周围电晕放电, 来分析判断与电晕放电有关的电气缺陷或故障。笔者介绍了紫外检测在色尔古站的开展情况、实验室环境下避雷器均压环模拟试验和避雷器均压环电场仿真计算, 针对紫外检测异常现象进行了详细分析, 认为高海拔、风力大和昼夜温差大导致设备均压环相色漆剥落是造成电晕噪声明显偏大的主要原因, 并提出了改进措施。

关键词: 电晕放电; 紫外检测; 高海拔; 风力; 昼夜温差; 色漆

Analysis on Abnormal Phenomenon of UV Detection in High Altitude Substation

JIA Zhijie, LIU Shoubao, LIU Fan, GAN Degang

(Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610072, China)

Abstract: The audible noise caused by corona discharge of 500 kV electrical apparatus in Seergu substation is higher than that in other 500 kV substations. UV detection technology is used to detect defects and faults of high voltage electric apparatus by monitoring corona discharge around the apparatus. In this paper, the application of UV detection in Seergu substation is introduced, and the simulation test and electric field calculation of arrester grading ring are elaborated. The result shows that the obviously high corona noise is mainly caused by the colored paint stripping from the grading ring due to high altitude, strong wind, and great day-night temperature difference. Furthermore, some countermeasures are suggested.

Key words: corona discharge; UV detection; high altitude; wind force; day-night temperature difference; colored paint

0 引言

500 kV 色尔古变电站海拔高度 1 850 m。投运后, 运行人员发现 500 kV 场地设备电晕放电引起的可听噪声比其他 500 kV 变电站明显偏大。该电晕放电异常现象需要结合紫外检测、电场计算和实验室模拟加以分析。

对于大气条件下运行设备的外绝缘, 往往不可能完全排除电晕和表面局部放电的产生。随着绝缘性能降低、结构缺陷出现或者表面污秽和湿度的增加, 放电几率和强度也将增大, 这样便可利用电晕或表面局部放电的产生与增强现象间接评估现有运行设备的绝缘状况并及时发现设备本身缺陷^[1-9]。

利用空气中电晕放电会产生紫外光这一特性, 近年来, 国内外逐渐开展用紫外检测技术观测电晕放电的研究。美国电科院(EPRI)牵头多家电力公司共同开展了为期 3 年的紫外检测变电站及架空输电线路电晕放电的研究, 经过实验室模拟和现场实测, 编写了《变电站电晕及电弧放电检测导则》以及《架空输电线路电晕及电弧放电检测导则》^[10-11]。紫外检测仪器正快速进入中国市场, 尽管中国电力系统已制定了首个相应的规程标准——DL/T 345—2010《带电设备紫外诊断技术应用导则》^[12], 但是该导则偏重于定性分析而非定量分析, 所以当前仍处于技术引进吸收的初级阶段。

笔者借鉴了现有高压输变电设备绝缘缺陷及污秽紫外线检测与评价研究成果, 对 500 kV 色尔古站开展了紫外电晕检测, 结合现场检测进行了缺

陷模拟电场计算和实验室环境下避雷器均压环模拟试验,并针对紫外检测异常现象进行了分析,提出了降低紫外电晕放电强度的解决方案。

1 紫外检测过程

紫外检测时的气象条件:温度 20℃,湿度 40%(RH),风速 6 级(10.8~13.8 m/s),多云。

所用紫外检测仪器为以色列 OFIL 公司的 DayCor SUPERB 型日间盲区型紫外检测仪,工作波段为 240~280 nm 之间,可避开太阳光中的紫外线。现场距离检测仪器为瑞士 LEICA 公司的 D5 型激光测距仪,有效检测距离 200 m。

电晕放电将使设备周围空气发生电离,在电离过程中,空气分子中的电子不断地从电场中获得能量,当大量的电子从激励态轨道返回原来的稳态电子轨道时,会释放能量并产生光波^[13]。气体电离后辐射光波的频率与气体种类有关,而空气的主要成分是氮气,氮气电离的辐射频谱主要落在紫外光波段。因此可以通过观测紫外线来检测电晕放电现象。色尔古站 500 kV 高压设备紫外检测到的电晕放电强烈部位见图 1-3 中方框部分。由图 1-3 可得,电晕放电严重的部位主要集中在线路侧、主变进线侧避雷器和 CVT 的均压环上,少部分在线路进线构架 V 型串均压环上。



图中方框为色茂一线B相进线构架V型串均压环;增益为120;测试距离为28.92 m;光子计数为8 730。

图 1 紫外检测图像 1

Fig. 1 The first image of UV detection

2 检测结果分析

2.1 地理气象因素的影响

影响电晕放电的外部因素较多,如温度、湿度、海拔高度、气压、风力等^[14-16]。500 kV 色尔古变电站紫外检测主要受海拔高度与风力的影响。

2.1.1 海拔高度的影响

随着海拔高度升高,气压降低,相同电极和相



图中方框为1号主变500 kV侧C相进线CVT均压环;增益为120;测试距离为19.09 m;光子计数为9 010。

图 2 紫外检测图像 2

Fig. 2 The second image of UV detection

间间隙情况下的起始电晕电压降低^[17]。例如当海拔升高 2 000 m 时,起始电晕电压大致降低 30%。该站海拔 1 850 m,属于较高海拔地区,高压带电设备电场集中处更容易发生电晕放电。

对比海拔高度相差很大的德阳换流站 500 kV 交流场(海拔 550 m),同一台仪器进行紫外检测的结果显示,500 kV 交流场电晕放电强度明显弱于色尔古站,较强的电晕放电检测图像见图 4。虽然紫外光子数大致相同,但是考虑到仪器增益的影响因素,同等增益下其光子计数仍明显小于色尔古站的情况。

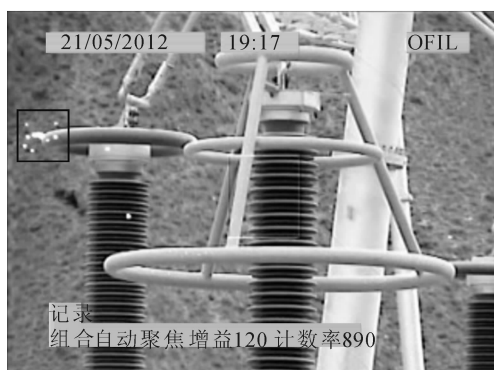
2.1.2 风力的影响

对于交流电晕放电,当有风时,负半周产生的空间电荷容易被吹掉,这使得正极性流注更活跃;当无风时,该空间电荷将减弱电晕源的表面电位梯度,从而对正极性流注的形成具有抑制作用^[18]。因此有风的情况会使电晕放电更活跃。而色尔古站常年刮 7、8 级大风,也导致 500 kV 设备电晕放电现象较剧烈。

2.2 设备本体的影响

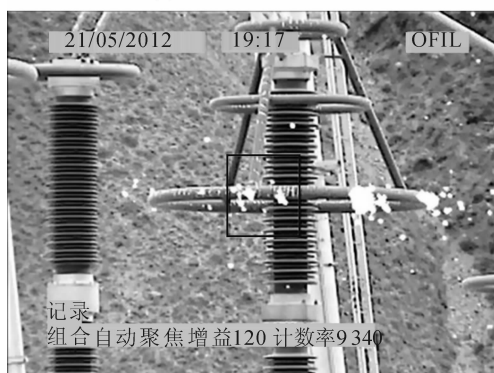
色尔古变电站相色漆剥落的现象较明显。由毛色线出线避雷器均压环的三相对比检测可得,B 相比 A、C 相电晕放电更活跃,见图 3。该色漆为三峡牌油漆,施工工艺是毛刷刷漆,色漆本身的附着力小,不如喷、烤漆工艺性能好。另外,若刷漆前对底材的表面处理不够到位,所选的色漆基料交联密度不够高,也会明显削弱色漆的附着力。

漆膜与均压环铝合金基材热膨胀系数的差异也影响漆膜的附着性能。当涂料涂布于均压环基材表面时,由于热胀冷缩,涂料与被涂表面间的粘结点将遭到不同程度的破坏。因为色漆和铝合金基材的热膨胀系数分别为 $6.8 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 和 $2.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,漆膜的热膨胀系数明显大于基材的热膨胀系数,所以在温度变动很大时,漆膜的膨胀或收缩程度均比均压环铝



图中方框为毛色线出线A相避雷器均压环; 增益为120; 测试距离为35.8 m; 光子数为890。

(a)A相避雷器均压环



图中方框为毛色线出线B相避雷器均压环; 增益为120; 测试距离为35.85 m; 光子数为9340。

(b)B相避雷器均压环



图中方框为毛色线出线C相避雷器均压环; 增益为120; 测试距离为35.89 m; 光子数为2010。

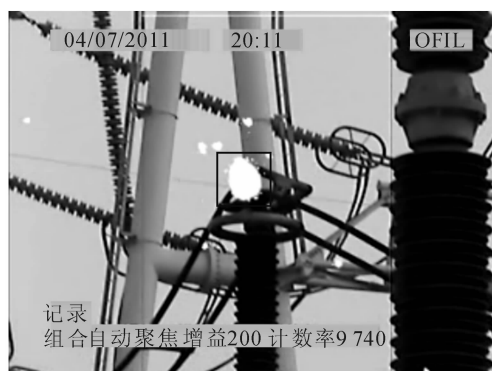
(c)C相避雷器均压环

图3 紫外检测图像3

Fig. 3 The third image of UV detection

合金大,从而引起漆膜变形,产生皱纹、龟纹等,降低了漆膜的附着力。色尔古站常年昼夜温差大,一般日夜差都在15~30℃之间。因此,毛刷刷漆后由于昼夜温差很大,且油漆和均压环铝合金的热膨胀差异较大,造成刷的油漆不能很好地附着在均压环上。

另外色尔古站常年刮大风,风速经常在7到8级左右,此风速下人很难正常行走。在强风下涂装油漆往往导致油漆被吹得出现桔皮、翻卷、剥落或开裂,以致在均压环上出现毛刺,形成局部极不均匀电场。



图中方框为站用变进线支柱绝缘子均压环上端部; 增益为200; 测试距离为21 m; 光子数为9740。

图4 德阳换流站500 kV交流场紫外检测图像

Fig. 4 The image of UV detection in 500 kV AC field of

Deyang inverter station

色尔古站500 kV开关场从投运到检测时才半年,现场可发现500 kV避雷器和CVT均压环上色漆剥落现象十分严重,而海拔相差不大但投运5年以上的500 kV茂县站同类设备色漆剥落现象不明显。茂县站常年风速比色尔古站小得多,只有2到4级。

由于刷漆本身附着力不强,昼夜温差大和风力大的共同影响,色尔古站500 kV避雷器和CVT均压环上的色漆剥落现象从基建阶段就比较严重,而形成的局部不均匀电场又加重了电晕放电的程度,电晕放电伴随着声光电现象,特别是产生了大量臭氧 O_3 、可溶于水形成硝酸的 NO_2 等强氧化性分解产物,这对色漆这种有机物具有强腐蚀性,进一步加速了色漆的分解与剥落。

3 实验室环境下避雷器均压环模拟试验

为了研究色漆对避雷器均压环电晕放电的影响,开展了在最高运行相电压318 kV下均压环电晕放电的观测试验。为了模拟色漆起皮后漆皮一般会附着上少量的均压环金属微粒,在均压环表面粘贴涂有金属杂质的透明胶带,并向外伸出约5 cm。作为对比,在均压环表面粘贴一些未涂金属微粒的透明胶带,同样向外伸出约5 cm。试验设备及试品见图5、6。



图5 均压环试品

Fig. 5 The arrester grading ring



图6 模拟色漆起皮用的附着有金属微粒的透明胶带

Fig. 6 The sellotape with metal impurity to simulate peeling colored paint

用 Daycor SUPERB 紫外成像仪观测到均压环在交流 318 kV 电压下电晕放电情况见图 7。

由图 7 可得, 均压环无透明胶带粘贴部位并未检测到电晕放电现象, 均压环有透明胶带粘贴但未涂金属杂质的部位电晕放电现象很不明显, 电晕放电剧烈部位集中在粘贴涂有金属杂质的透明胶带向外伸出部分, 相当于出现了金属毛刺尖端放电。对比图 7(b)、(c), 可发现同为涂有金属杂质的透明胶带, 两张图的电晕放电量却有较大区别, 这与粘贴在均压环上的胶带向外伸出的实际长度有关。图 7(b)的胶带沿均压环径向向外伸出长度约为 5 cm, 而图 7(c)的胶带向外伸出部分紧贴均压环表面, 其沿均压环径向向外伸出的实际长度只有 2 cm, 相当于形成的金属尖端的长度比图 7(b)明显短了一截, 导致电晕放电程度较大幅度减弱。综上, 当色漆起皮翻起时, 如果色漆表面粘有铝合金均压环的金属微粒等杂质, 那么在正常运行电压下会发生表面电场畸变, 导致较严重的电晕放电。

4 避雷器均压环电场仿真分析

借助 ANSOFT 电场仿真软件对 500 kV 避雷器的均压环电晕放电较剧烈的原因进行分析: 首先对金具及其组合部件建模, 达到校验设计合理性的目的; 其次通过对简单模型进行表面油漆脱落的模拟以了解油漆脱落对金具表面电场分布的影响程度。

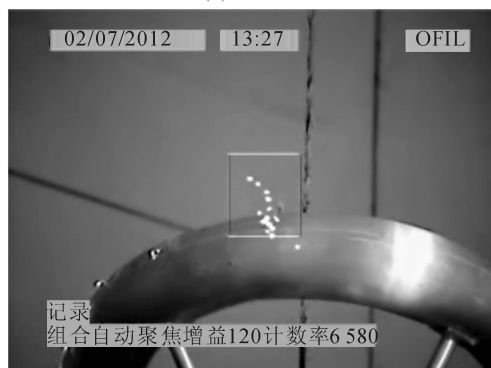
依据实际尺寸(均压环上、中、下环的外径分别为: 700、1 008、1 750 mm, 管径分别为: 160、120、160 mm), 建立避雷器的简化模型, 并仿真得到电场分布, 见图 8、9。

由图 8、9 可得, 避雷器均压环沿面电场大部分在 500 kV 金具设计场强限值(15 kV/cm)以下。避雷器 3 个均压环中, 最下面也是直径最大的均压环外侧下表面的电场最为集中, 场强为 15.8 kV/cm, 略微



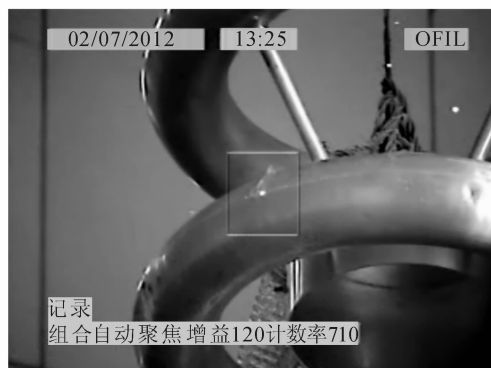
图中方框为未涂金属杂质的透明胶带; 增益为120; 测试距离为16 m; 光子数为90。

(a)检测图1



图中方框为涂有金属杂质的透明胶带; 增益为120; 测试距离为16 m; 光子数为6 580。

(b)检测图2



图中方框为涂有金属杂质的透明胶带; 增益为120; 测试距离为16 m; 光子数为710。

(c)检测图3

图7 实验室紫外检测图像

Fig. 7 The image of UV detection in laboratory

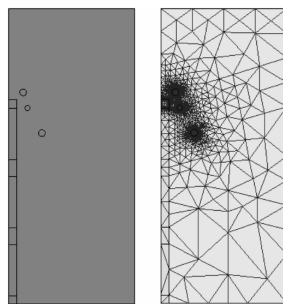


图8 避雷器的轴对称模型及剖分情况

Fig. 8 The axisymmetric model and partition of arrester grading ring

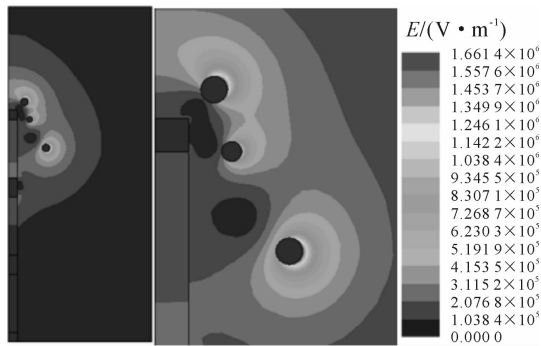


图9 避雷器电场分布情况

Fig. 9 Electric field distribution of arrester

超过了设计场强限值,但远小于空气的击穿场强(30 kV/cm)。若此处均压环表面存在尖端或毛刺,易发生电晕放电。以上分析表明,避雷器3个均压环的尺寸基本满足实际电场分布要求。

建立避雷器色漆剥落的二维轴对称简化模型,即在所有均压环表面涂上1 mm厚的色漆,然后在避雷器从上往下第3个均压环的外延开口1 mm的凹槽,具体情况见图10、11。

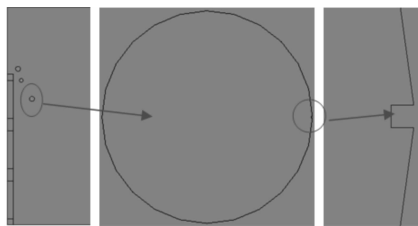


图10 避雷器均压环表面掉漆处理

Fig. 10 Simulation of surface paint off of arrester grading ring

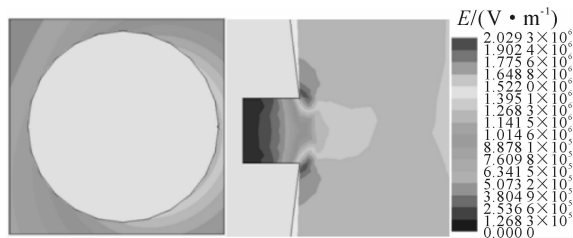


图11 避雷器第3个均压环表面电场分布情况

Fig. 11 Surface field distribution of the third grading ring of arrester

由图10、11可得,避雷器均压环表面色漆脱落处的电场最为集中,最大场强达到18.8 kV/cm,明显超过了500 kV金具设计要求的场强限值(15 kV/cm),比无色漆剥落时均压环的表面最大场强提高了3 kV/cm。因此,此处发生电晕放电的可能性大。图3中毛色线出线B相避雷器均压环由于表面色漆脱落最严重,对应的电晕放电紫外光子数数倍于其他两相,这也间接验证了上述仿真计算结果。

5 结论

1)色尔古站海拔较高且风力很大,导致其电晕放电明显活跃。

2)由于毛刷刷漆导致油漆的附着力不强,在较大昼夜温差和强风力的共同作用下,色尔古站均压环色漆剥落现象较严重,导致金具表面粗糙,局部电场集中,使色漆剥落处电晕放电异常。同时,电晕放电伴随着声光电现象,特别是产生了大量O₃等强氧化性分解产物,对色漆具有强腐蚀性,加速了色漆的分解与剥落。

3)当色漆起皮翻起时,如果色漆表面粘有铝合金均压环的金属微粒等杂质,那么在正常运行电压下会发生表面电场畸变,导致较严重的电晕放电。

4)500 kV避雷器3个均压环的尺寸大小基本满足实际电场分布要求,但其表面色漆脱落处电场集中,超过了500 kV金具设计要求的场强限值,发生电晕放电的可能性大。

5)建议对均压环重新喷涂基料交联密度较高的色漆,或不在均压环等较高位置涂色漆,改在设备不带电的支架等较低位置涂色漆标识,减少风力与电晕的损害。

参考文献:

- [1] 迟殿林,曾庆立. 用紫外成像检测电气设备外绝缘状况[J]. 东北电力技术,2005,26(1):22-23.
CHI Dianlin, ZENG Qingli. Detecting outer insulating status for electric appliances by way of UV imaging[J]. Northeast Electric Power Technology, 2005, 26(1): 22-23.
- [2] 刘安文,汤卫,程光强,等. 紫外成像检测技术在电力设备放电检测上的应用[J]. 电网与清洁能源,2013,29(3): 50-54.
LIU Anwen, TANG Wei, CEHGN Guangqiang, et al. Application of ultraviolet imaging detection technology in electric equipment discharge detection[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(3): 50-54.
- [3] 寇晓适,卢明,夏中原,等. 紫外放电检测在电力系统设备状态检修的应用[J]. 河南电力,2008(1):1-5.
KOU Xiaoshi, LU Ming, XIA Zhongyuan, et al. Application of UV detection in condition-based maintenance of power equipment[J]. Henan Electric Power, 2008(1): 1-5.
- [4] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社,2005: 255-256.
LIU Zhenya. Ultra-high voltage grid[M]. Beijing: China Economic Publishing House, 2005: 255-256.
- [5] 冯杰,司马文霞,余德芬,等. 覆冰棒板间隙直流电晕放电试验及测量[J]. 高电压技术,2006,32(5):1-3.

- FENG Jie, SIMA Wenxia, YU Defen, et al. DC corona discharge test and measurement in an icicle to iced-plate air gas system[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(5): 1-3.
- [6] 张海峰, 庞其昌, 陈秀春. 高压电晕放电特征及其检测[J]. 电测与仪表, 2006, 43(2): 6-8.
- ZHANG Haifeng, PANG Qichang, CHEN Xiuchun. The characteristics of high-voltage corona and its detection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2006, 43(2): 6-8.
- [7] 甘德刚, 陈洪波, 刘平, 等. 紫外检测技术在电力系统中的应用及其展望[J]. 电气应用, 2012(7): 77-81.
- GAN Degang, CHEN Hongbo, LIU Ping, et al. Application and outlook of ultraviolet detection technique in electric power system[J]. Electrotechnical Application, 2012(7): 77-81.
- [8] 雷红才, 臧春艳, 蒋正龙, 等. 紫外成像法检测支柱绝缘子的破损缺陷[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 87-91.
- LEI Hongcai, ZANG Chunyan, JIANG Zhenglong, et al. Detecting breakage defect of post insulator with ultraviolet imaging method[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 87-91.
- [9] 叶会生, 雷红才, 臧春艳, 等. 极不均匀场中电晕放电的紫外成像检测特性研究[J]. 高压电器, 2010, 46(1): 35-39.
- YE Huisheng, LEI Hongcai, ZANG Chunyan, et al. Study on UV imaging detection characteristics of corona discharge under non-uniform electric field[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(1): 35-39.
- [10] 1001792 Guide to corona and arcing inspection of substations[S]. US: Electric Power Research Institute, 2002.
- [11] 1001910 Guide to corona & arcing inspection of overhead transmission lines[S]. US: Electric Power Research Institute, 2003.
- [12] DL/T 345—2010 带电设备紫外诊断技术应用导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- DL/T 345—2010 Charged device technology application guidelines for UV diagnostics[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [13] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 64-79.
- YAN Zhang, ZHU Deheng. High voltage insulation technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002: 64-79.
- [14] 崔昊杨, 陈琳, 汤乃云, 等. 紫外成像技术在电力设备局部放电探测中的应用[J]. 上海电力学院学报, 2012, 28(1): 93-96.
- CUI Haoyang, CHEN Lin, SHANG Naiyun, et al. The application of UV imagery technology in electrical equipment PD detection[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2012, 28(1): 93-96.
- [15] 刘超群, 李宪斌, 陈花玲, 等. 基于CAE的变压器结构减振降噪技术研究[J]. 变压器, 2014, 51(4): 41-43.
- LIU Chaoqun, LI Xianbin, CHEN Hualing, et al. Research on vibration and noise reduction technology of transformer based on CAE[J]. Transformer, 2014, 51(4): 41-43.
- [16] 刘明, 李金忠, 刘锐, 等. 电子式互感器技术和应用评述[J]. 变压器, 2013, 50(2): 24-26.
- LIU Ming, LI Jinzhong, LIU Rui, et al. Review on technology and application of electronic instrument transformer[J]. Transformer, 2013, 50(2): 24-26.
- [17] 关志成, 陈枫林, 卞星明, 等. 高海拔条件下钢芯铝绞线的正直流电晕起始电压分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 809-816.
- GUAN Zhicheng, CHEN Fenglin, BIAN Xingming, et al. Analysis on onset voltage of positive corona on stranded conductors in high-altitude condition[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 809-816.
- [18] 王会斌. 基于紫外成像的不同海拔下导线起晕特性的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2009.
- WANG Huibin. Research on corona onset characteristics of conductors at different altitudes based on UV imaging technology[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2009.

贾志杰(1985—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高电压绝缘与试验技术。

(上接第98页)

- electric fields with a floating conductor[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997, 4(2): 177-181.
- [20] HAMA H. Surface flashover characteristic of disc-type spacer system initiated by wedge shaped gas gap and its improvement[J]. IEEE Trans. on PD, 1992, 8(6): 1070-1079.
- [21] BARANNIK S I. Resistance and inductance of a gas arc[J]. Soviet Physics-technical Physics, 1975(19): 4-5.
- [22] DEMENIK J V. Resistance of a xenon plasma in a large flash lamp[J]. Soviet Physics-Technical Physics, 1968(13): 20-21.
- [23] KUSHNER M J, KIMURA W D, BYRON S R. Arc resistance of laser triggered spark gaps[J]. Journal of Applied Physics, 1985, 58(5): 1744-1751.
- 赵承楠(1987—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为电力系统调度运行与控制。