

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.02.018

## 利用红外热像技术检测劣化绝缘子的适用性分析研究

付炜平<sup>1</sup>, 王 伟<sup>1</sup>, 董俊虎<sup>1</sup>, 刘云鹏<sup>2</sup>, 张凯元<sup>2</sup>

(1. 国网河北省电力有限公司检修分公司, 石家庄 050071; 2. 华北电力大学电气工程系, 河北 保定 071003)

**摘要:**文中针对某500 kV变电站发现的低零值绝缘子缺陷进行了红外热相技术检测劣化绝缘子的适用范围研究,分析了各个电压等级的盘形绝缘子串中电压分布规律,对劣化绝缘子在不同阻值、不同位置下的发热情况进行了计算,给出测试盲区的范围和改善方法。现场测试表明,该方法使红外热像技术在适用范围内检出劣化绝缘子的概率明显提高。

**关键词:**红外热像技术;劣化绝缘子;适用性;低值绝缘子;零值绝缘子

### Study on the Applicability of Detecting Deterioration Insulator Based on Infrared Thermal Image

FU Weiping<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, DONG Junhu<sup>1</sup>, LIU Yunpeng<sup>2</sup>, ZHANG Kaiyuan<sup>2</sup>

(1. State Grid Hebei Maintenance Branch, Shijiazhuang 050071, China;

2. North China Electric Power University, Hebei Baoding 071003, China)

**Abstract:** This paper introduces a way of detecting zero and low resistance insulators defects in a 500 kV substation and studies the applicability of infrared thermal image technology used in deterioration insulator test area. The voltage distribution of the insulator strings among various voltage levels are analyzed, the heat produced by the deterioration insulators under different resistance and location are calculated, the boundary of blind zone of detection and a new field test method are proposed. Practical tests show that the new method make the success rate of detection based on infrared thermal image technology improve remarkably in its applicable range.

**Key words:** infrared thermal imaging technology; deterioration insulator; applicability; low resistance insulator; zero resistance insulator

## 0 引言

绝缘子在电力系统中大量应用,长期经受外部气象变化、高电场和强机械力作用,其绝缘性能和机械强度随着运行年限的增加出现劣化现象,成为影响输电线路和变电系统安全稳定运行的重要隐患。在绝缘子检测方法中,红外热像技术因其无需停电、劳动强度低等优点已经在电力系统中广泛应用<sup>[1]</sup>,相关标准对测试方法、判断依据也进行了详细规定<sup>[2-3]</sup>,如将温差超过1 K作为诊断判据等,但是实际测试中发现应用标准检测时检出率偏低。

2014年,在进行某500 kV变电站红外精确测温时,发现一条500 kV线路A相跨线高压侧第4片钢帽温升1.3 K,见图1;另一条500 kV线路A相高压

侧第5片钢帽温升0.9 K,见图2。怀疑此2片盘式绝缘子存在缺陷情况,为低值绝缘子,后利用停电机会进行了检查,发现此绝缘子绝缘电阻分别为89、100 M $\Omega$ ,均为低值绝缘子。

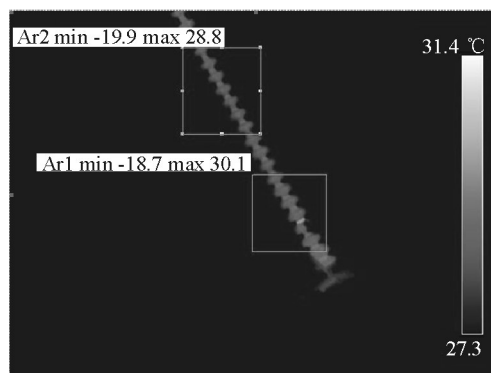


图1 线路1第4片温差

Fig. 1 Difference in temperature of the fourth insulator of line 1

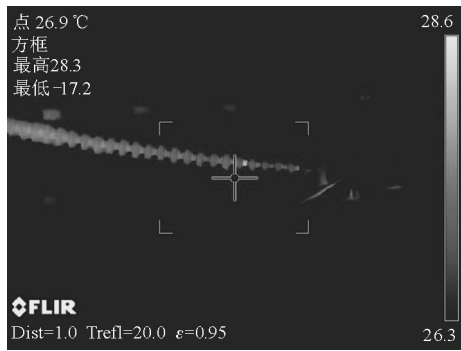


图2 线路2第5片温差

Fig. 2 Difference in temperature of the fifth insulator of line 2

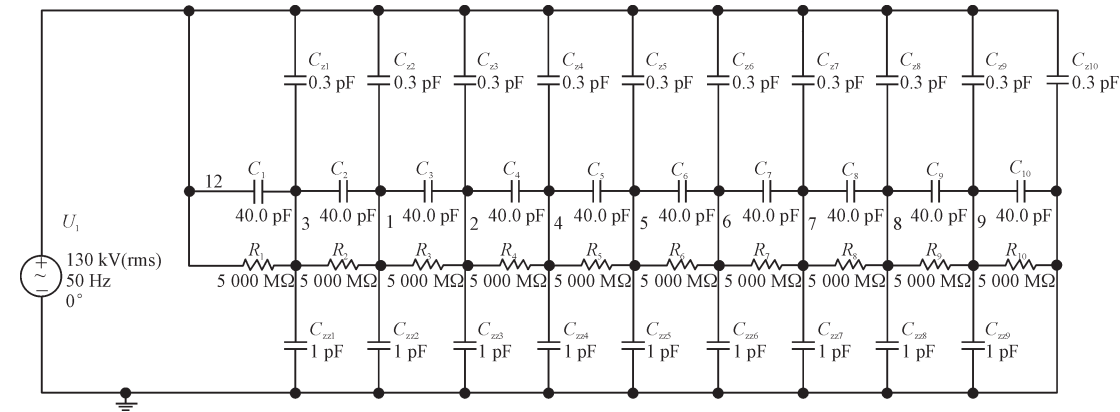


图3 杂散电容影响下的等值电路图

Fig. 3 Equivalent circuit under the influence of stray capacity

图3中： $C_{zn}$ 为绝缘子对高压端电容； $C_{zzn}$ 为绝缘子对地电容； $C_n$ 为单只绝缘子电容，由于绝缘子对地电容  $C_{zzn}$  以及绝缘子对高压端电容  $C_{zn}$  的存在，使得绝缘子串上的电压分布不均匀。如图3中，若忽略  $C_{zzn}$  的存在，由电流基尔霍夫定律可得，第10片绝缘子的电流最大，而各个绝缘子容抗基本相同，流过电流大的绝缘子分布电压高，所以第10片分得的电压最高；同理，若忽略  $C_{zn}$  的存在，流过第1片绝缘子的电流最大，使得第1片绝缘子分得的电压最高。由于这种现象的存在，使得绝缘子串上的电压呈不规律的马鞍形分布。

为进一步分析绝缘子劣化程度与其异常发热的关系，进行仿真计算。如图3：10片绝缘子串，端电压130 kV，绝缘子阻值5 000 MΩ，每片固有电容40 pF(实测值)，每片对地电容1 pF(经验值)，对高压端电容0.3 pF(经验值)。利用计算软件进行电路仿真计算，得位置—电压曲线见图4。单片绝缘子串承受电压整体呈不对称的马鞍形分布，电压越高电压偏差越大。与理论分析相符。

1.2 绝缘子发热机理

理论研究表明<sup>[6]</sup>，绝缘子的温升主要由3种发热

在停电检查中发现，线路1中距高压侧第21片绝缘子电阻为45 MΩ，但在红外线检测时未见异常，为确认红外精确测温对低零值绝缘子检查的有效性，进行了理论仿真及实验模拟，探究红外检查劣化绝缘子的适用范围。

1 理论分析

1.1 运行中绝缘子串电压分布

考虑绝缘子的金属件与杆塔和输电线路之间存在的杂散电容<sup>[4-5]</sup>，不计位置影响，绝缘子串在运行中的等值电路见图3。

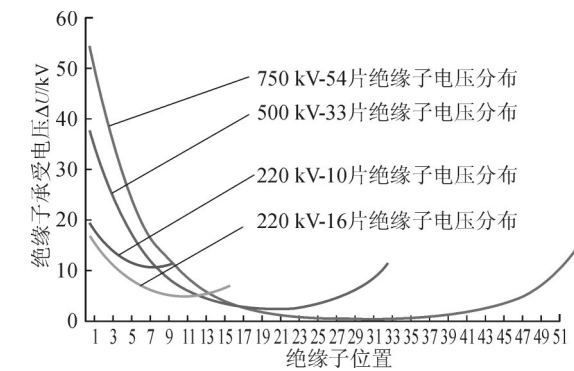


图4 位置—电压曲线

Fig. 4 Curve of position-voltage

功率造成，分别为工频交流电压下介质损耗发热、内部纯阻性泄漏电流引起的发热和表面的泄漏电流引起的发热。

工频交流电压下介质损耗产生的温升

$$\theta = \frac{P_j = U^2 w C \lg \delta}{ML}$$
 (1)

内部纯阻性泄漏电流引起的温升

$$\theta = \frac{U I_z}{ML}$$
 (2)

表面的泄漏电流引起的温升

$$\theta = \frac{U I_x}{ML}$$
 (3)

式(1)-(3)中: $U$ 为绝缘子承担的电压; $\omega$ 为工频角频率; $C$ 为绝缘子的等值电容; $I_L$ 为内部纯阻性的泄漏电流; $I_s$ 为表面纯阻性的泄漏电流; $M$ 为绝缘子散热面积; $L$ 为绝缘子的散热系数。

由于实际中介质极化损耗和表面泄漏电流损耗正常情况下极小,现将其影响忽略,劣化绝缘子的温升主要考虑绝缘子的内部泄漏电流产生的发热功率<sup>[7]</sup>。即式(2)。

为将发热功率转换为温升,必须取得散热系数,而现实中,绝缘子的散热系数为一极其复杂的变量,受湿度、环境温度、风速、日照等影响<sup>[8-9]</sup>。在此仅考虑试验室条件,采用实测的方式,测试实验环境下的散热系数,进行绝缘子温升与发热功率的研究。

在实验室环境下,散热面积取 $M=0.3\text{ m}^{2[10-11]}$ ,通过实验取散热系数

$$L=8.2\text{ W}/(\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}) \quad (4)$$

$$\theta=\frac{P}{ML}=\frac{P}{2.64} \quad (5)$$

按照式(2)、(4)、(5)将发热功率转换为温升<sup>[12]</sup>,正常绝缘子串温升计算结果见图5,建立 $R$ - $\theta$ 关系曲线见图6-8。温升—绝缘电阻—位置关系曲线见图9。

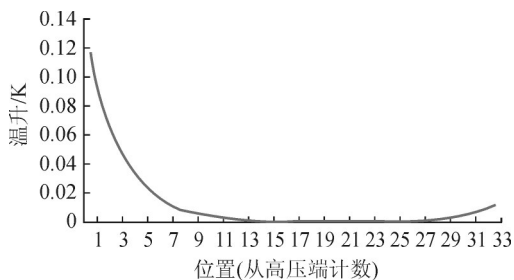


图5 正常绝缘子串温升计算结果

Fig. 5 Calculation results of the temperature increase of normal insulators

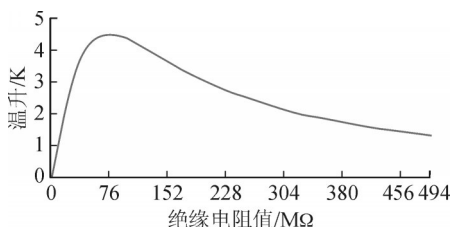


图6 劣化绝缘子 $R$ - $\theta$ 曲线(高压侧第1片)

Fig. 6  $R$ - $\theta$  curve of degradation insulators (1st in high voltage position)

考虑到热像仪的最小分辨精度,远距离测试误差,实际运行环境散热系数更大等影响因素,结合检测经验<sup>[13-14]</sup>,认为理论计算中的0.3 K温升在现场测试时约表现为0.1 K,将此设为现场最小可检测范围。即:图6-8中0.3 K以上的温差均可被检测,0.3 K以内的绝缘子温升现场测试难以发现,该结论表明,500 kV 绝缘子串中第8片之后的劣化绝缘子无法

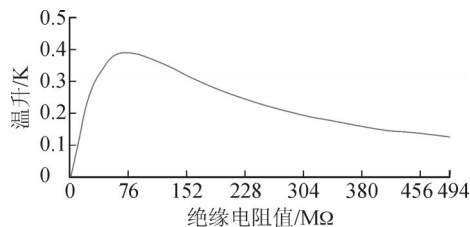


图7 劣化绝缘子 $R$ - $\theta$ 曲线(高压侧第33片)

Fig. 7  $R$ - $\theta$  curve of degradation insulators (33rd in high voltage position)

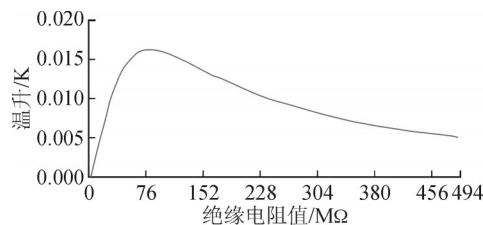


图8 劣化绝缘子 $R$ - $\theta$ 曲线(高压侧第21片)

Fig. 8  $R$ - $\theta$  curve of degradation insulators (21st in high voltage position)

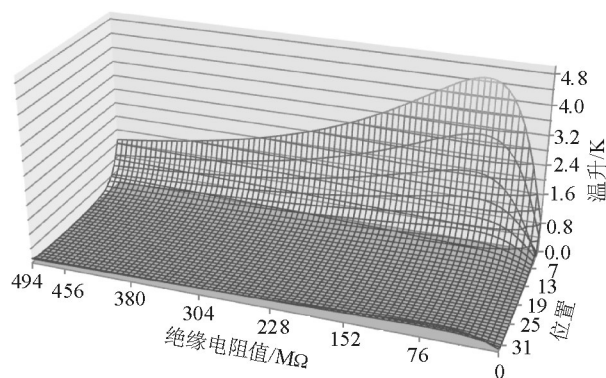


图9 温升—绝缘电阻—位置关系曲线

Fig. 9 Curve of relationship between temperature, resistance and position

被有效检测,零值绝缘子无法检测,该范围也可以由表1反映。红外热相检测劣化绝缘子适用范围见图10。

表1 不同位置的现场红外检测效果表

Table 1 Results of infrared detection on different positions

| 位置     | 阻值/MΩ     | 理论最大温升/K | 检测效果 |
|--------|-----------|----------|------|
| 第1片    | 5 ~ 1 495 | 4.50     | 热点明显 |
| 第2片    | 6 ~ 892   | 3.10     | 热点明显 |
| 第3片    | 10 ~ 590  | 2.20     | 热点明显 |
| 第4片    | 15 ~ 405  | 1.50     | 热点明显 |
| 第5片    | 25 ~ 275  | 1.00     | 热点明显 |
| 第6片    | 45 ~ 140  | 0.60     | 基本可辨 |
| 第7片    | 55 ~ 110  | 0.40     | 基本可辨 |
| 第8-32片 | —         | <0.30    | 不能辨别 |
| 第33片   | 50 ~ 110  | 0.39     | 基本可辨 |

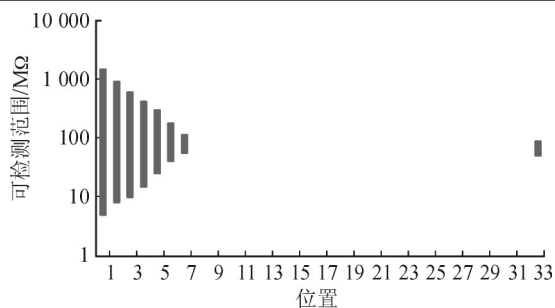


图10 红外热相检测劣化绝缘子适用范围

Fig. 10 Appropriate range of infrared detection

上述分析表明:

1)对于不同位置的绝缘子,存在不同的绝缘电阻范围,该范围内温升大于0.3 K,现场红外测温有效<sup>[15]</sup>。

2)当绝缘子距高压端距离超过整串长度的1/4时,发热温升与正常温升小于0.3 K,不易检测。

3)靠近架构一端绝缘子劣化后,由于鞍形曲线作用,当绝缘电阻在很小的特定范围内时,缺陷可能被检测。

4)零值绝缘子与正常绝缘子间理论温差小于0.3 K,无法有效检测。

基于以上分析,提出红外热相技术现场测试劣化绝缘子方法,对测试环境、仪器参数、现场操作、重点关注部位、后期图像分析、判据等进行了说明,细化了相关标准<sup>[16]</sup>,对现场工作起到了指导作用,检测效率和效果明显提升。

## 2 现场测试

应用新的检测方法对前述变电站绝缘子开展测温,经现场测试和后期图像分析共发现6片存在异常温升,停电检测结果与测温结论吻合,截止2014年8月底,完成了该站全部绝缘子更换工作,共更换悬式绝缘子552串(耐张198串、V串354串)。对更换下的15 810片旧绝缘子逐片进行外观检查及零值测试,共发现绝缘电阻不合格绝缘子53片,其中32片带电运行,通过统计,在带电运行的32片绝缘子中有7片处于图10范围内,在现场测试和后期分析两方面工作进行后,检出劣化绝缘子6片,检出率85.7%,一片处于第7片电阻102 MΩ未被检出,推测原因一是其特征在可检测范围边界附近<sup>[17-18]</sup>,二是由于文中假设条件和现场环境不一致,在图10可检测范围之外的25片劣化绝缘子均未检出。3号主变500 kV侧A相第3片(42 MΩ)见图11,图像

分析某线路A相高压侧第6片(97 MΩ)见图12。

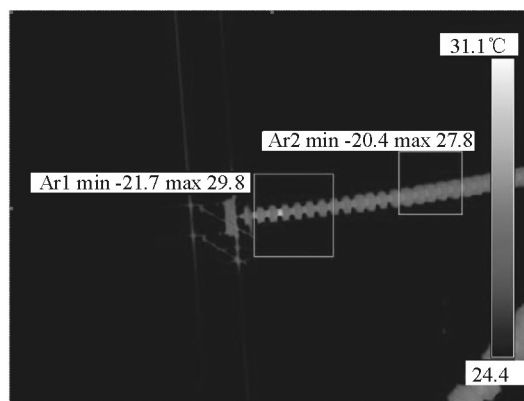


图11 3号主变500 kV侧A相第3片

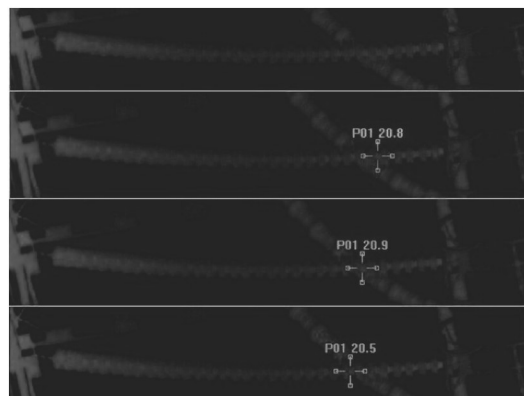
Fig. 11 3rd insulator on the A phrase  
3rd transformer

图12 图像分析某线路A相高压侧第6片

Fig. 12 6th insulator on the high voltage side of A phrase  
of one line

## 3 结论

通过现场实测<sup>[19]</sup>和仿真计算发现,红外热相技术可以用于检测零值(低值)绝缘子,但应注意其存在特定的适用范围。

1)红外线测温在适用范围内可发现劣化绝缘子,其现场测试结果与停电测试结果完全对应。

2)红外检测的适用范围由绝缘子在长串中所处位置、绝缘电阻值、环境因素、测试仪器因素等共同决定,目前技术水平和一般环境条件下的可检测区间见图10。

3)为提高检测效果,缩小检测盲区,应选用更高精度测试仪器,规范现场操作方法,注重后期软件分析工作。

4)现场测试工作中重点关注可检测范围设备情况,可大大增加工作效率。

5)对于可检测范围以外的盲区内设备仍应坚持停电轮试的方式进行检查<sup>[20]</sup>。

## 参考文献:

- [1] 卢明,姚德贵,张国民,等.劣化绝缘子检测方法的对比分析[J].电瓷避雷器,2006(5):9-13.  
LU Ming, YAO Degui, ZHANG Guomin, et al. Study on methods of detection of faulty insulators[J]. Insulators and Surge Arresters, 2006(5):9-13.
- [2] 劣化盘形悬式绝缘子检测规程:DL/T 626—2005[S].北京:中国标准出版社,2005.  
Code of aging cap and pin insulators inspection: DL/T 626—2005[S]. Beijing: China Standard Press, 2005.
- [3] 带电设备红外诊断技术应用导则:DL/T 664—2008[S].北京:中国电力出版社,2008.  
Technical guide for infrared diagnosis alive equipment: DL/T 664—2008[S]. Beijing: China Standard Press, 2008.
- [4] 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.
- [5] 陈林华,梁曦东.特高压交流瓷绝缘子串电压分布的计算[J].高电压技术,2012,38(2):376-381.  
CHEN Linhua, LIANG Xidong. Computational analysis on voltage distribution along ceramic insulator strings of UHV AC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2):376-381.
- [6] 金光熙,权光日,郎成,等.故障绝缘子的发热机理及其红外热像检测[J].电瓷避雷器,2011(5):12-15.  
JIN Guangxi, QUAN Guangri, LANG Cheng, et al. Heating mechanism and infrared thermography detection of failure insulators[J]. Insulators and Surge Arresters, 2011(5):12-15.
- [7] 何洪英,姚建刚,蒋正龙,等.基于支持向量机的高压绝缘子污秽等级红外热像检测[J].电力系统自动化,2005,29(24):70-74.  
HE Hongying, YAO Jiangang, JIANG Zhenglong, et al. Infrared thermal image detecting of high voltage insulator contamination grades based on support vector machine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24):70-74.
- [8] 刘云鹏,王娟.高压开关柜局部放电UHF在线检测系统的研制[J].高压电器,2009,45(1):15-17.  
LIU Yunpeng, WANG Juan. The development of the high voltage switchgear on-line partial discharge UHF detection system[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(1):15-17.
- [9] 邱太洪,李国伟,王俊波,等.移动式在线监测与负荷监测相结合在GIS故障检测中的应用[J].高压电器,2015,51(1):133-138.  
QIU Taihong, LI Guowei, WANG Junbo, et al. Application case of mobile online monitoring and load monitoring in GIS fault detection[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1):133-138.
- [10] 胡连清,刘卫东,李哲文,等.SF<sub>6</sub>气体红外成像检漏仪与定量检漏仪现场使用经验探讨[J].高压电器,2014,50(10):126-130.  
HU Lianqing, LIU Weidong, LI Zhewen, et al. Discussion of on-site using experience of infrared image leakage detector and quantitative leakage detector for SF<sub>6</sub> gas[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(10):126-130.
- [11] 马奎,王圆圆,梁笑尘,等.基于红外检测法针板缺陷下的SF<sub>6</sub>分解情况研究[J].高压电器,2012,48(12):70-74.  
MA Kui, WANG Yuanyuan, LIANG Xiaochen, et al. Infrared detection law needle board flaw-based under SF<sub>6</sub> decomposition research[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(12):70-74.
- [12] 傅闯,许树楷,饶宏,等.交流输电系统直流融冰装置设计及其应用[J].高电压技术,2013,39(3):705-711.  
FU Chuang, XU Shukai, RAO Hong, et al. Design and application of DC deicer for AC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3):705-711.
- [13] 陈仁刚,冯新岩,辜超,等.红外测温技术在GIS故障诊断中的应用[J].高压电器,2015,51(9):190-194.  
CHEN Rengang, FENG Xinyan, GU Chao, et al. Application of infrared thermometry technology for the fault diagnosis in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(9):190-194.
- [14] 黄荣辉,张欣,秦逸帆,等.雷电冲击下金属污染物对GIS中盆式绝缘子闪络特性的影响[J].高压电器,2016,52(4):111-116.  
HUANG Ronghui, ZHANG Xin, QIN Yifan, et al. Influence of metallic particle contamination on flashover characteristics of disc insulators in GIS under lightning impulse voltages[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4):111-116.
- [15] 桑建平.避雷器热等价性及复合外套避雷器稳态热特性初探[J].电瓷避雷器,2013(2):53-58.  
SANG Jianping. Study on thermal equivalency of arrester and the steady-state thermal behaviors of polymeric housing arrester[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(2):53-58.
- [16] 关石磊.基于红外热像的零值绝缘子识别方法研究[D].长沙:湖南大学,2012.  
GUAN Shilei. Research on the method of zero value insulator identification based on infrared imaging[D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [17] 刘兆林.2011年华东电网高压开关设备运行情况[J].华东电力,2012,40(10):1787-1790.  
LIU Zhaolin. Analysis of HV switch equipment operation in east China power grid in 2011[J]. East China Electric Power, 2012, 40(10):1787-1790.
- [18] 寇海荣,梁峻伟.220 kV高压隔离开关完善化改造[J].高压电器,2011,47(8):68-71.

(下转第120页)

- ceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 113-119.
- [17] ZENG Shucheng, ZHANG Yu, WANG Zhihao, et al. Condition diagnosis of oil-paper insulation during the accelerated electrical aging test based on polarization and depolarization current[C]//2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). [S.l.]: IEEE, 2015: 448-451.
- [18] 杨 雁, 杨丽君, 徐积全, 等. 用于评估油纸绝缘热老化状态的极化/去极化电流特征参量[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 336-341.
- YANG Yan, YANG Lijun, XU Jiquan, et al. Characteristic parameters for assessing aging condition of oil-paper insulation by polarization/depolarization current[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 336-341.
- [19] 刘捷丰, 廖瑞金, 吕彦冬, 等. 电力变压器油纸绝缘含水量定量评估的时域介电特征量[J]. 电工技术学报, 2015, 30(2): 196-203.
- LIU Jiefeng, LIAO Ruijin, LYU Yandong, et al. Time domain dielectric characteristics for quantitative assessment of moisture content in transformer oil-paper insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(2): 196-203.

夏国强(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事变压器状态评估与绝缘检测方面的研究。

吴广宁(1969—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事高电压与绝缘技术相关教学与科研工作。

(上接第 114 页)

- KOU Hairong, LIANG Junwei. Comprehensive improvement of 220 kV GW10-220 high-voltage isolating switch[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(8): 68-71.
- [19] 张硕颖. 一起 220 kV 隔离开关控制失效的诊断与处理[J]. 高压电器, 2012, 48(4): 92-96.
- ZHANG Shuoying. Control malfunction diagnosis and elimination of 220 kV disconnect switch[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(4): 92-96.
- [20] 输变电设备状态检修试验规程: DL/T 393—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- Regulations of condition-based maintenance and test for electric equipment: DL/T 393—2010[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- 付炜平(1976—), 男, 高级工程师, 从事超高压电网的维护工作。
- 王 伟(1985—), 男, 工程师, 从事超高压电网的维护工作。
- 董俊虎(1986—), 男, 工程师, 从事超高压电网的维护工作。
- 刘云鹏(1976—), 男, 博士(后), 教授, 从事特高压输电技术、电气设备在线检测和故障诊断等方面的研究。