

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.09.012

角型隔离开关触头接触程度对其导通特性的影响

李 爽¹², 韦德福¹², 李 斌¹², 鲁旭臣¹², 毕海涛¹², 洪 鹤³, 田庆阳³

(1. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 沈阳 110006; 2. 国网高电压强电流实验室, 沈阳 110006;

3. 国网辽宁省电力有限公司, 沈阳 110006)

摘要: 为了研究角型隔离开关触头在不同插接情况下的导通特性,对操动机构的调整标准进行指导,文中利用线性回归、汤逊理论等建立了隔离断口电场击穿模型,并结合 Ansys 有限元方法计算了隔离断口在不同插入深度下的电场强度,分析了隔离开关在此情况下的导通特性。最后,根据隔离开关操动机构原理,提出了机构的调整建议。研究表明:在设计插入深度为 32 mm 的情况下,动触头插入深度 $b_0 \geq 23$ mm 时,触头可正常导通;当 $8 \text{ mm} \leq b_0 \leq 22 \text{ mm}$ 时为电弧导通,对触头电寿命危害极大;当 $b_0 < 8 \text{ mm}$ 时为断路状态。因此,合闸时机机构的调整误差应欠位在 4.5 mm 以内。

关键词: 隔离开关; 动触头; 插入深度; 导通; 最大场强

Effect of Contact Degree of Angle Type Disconnecter Contact on Its Conduction Characteristic

LI Shuang¹², WEI Defu¹², LI Bin¹², LU Xuchen¹², BI Haitao¹², HONG He³, TIAN Qingyang³

(1. State Grid Liaoning Electrical Power Research Institute, Shenyang 110006, China; 2. State Grid High Voltage and Large Current Laboratory, Shenyang 110006, China; 3. State Grid Liaoning Electric

Power Supply Co., Ltd., Shenyang 110006, China)

Abstract: In order to study the angle disconnector conduction characteristics under the different insertion conditions, and to guide the adjustment of the operating mechanism accurately, the linear regression and the streamer theory are applied to establish the gap breakdown model of isolating fracture. Furthermore, the electric field intensity distribution of distinct insert depths is calculated by Ansys, and meanwhile the conduction characteristics are analyzed. Ultimately, the adjustment suggestion of the disconnector operating mechanism is put forward. The calculated results demonstrate that if the insert depth of moving-contact $b_0 \geq 23 \text{ mm}$, the contacts will be normally conduction under the condition of design insert depth 32 mm. When b_0 is between 8 mm and 22 mm, the contacts conduct by arc which is harmful to the contacts. The loop is open in the case of $b_0 < 8 \text{ mm}$. Therefore, the adjustment error of disconnector operating mechanism is within 4.5 mm.

Key words: disconnector; moving-contact; insert depth; conduction; maximum electric field intensity

0 引言

目前,全封闭式组合电器已广泛应用于变电站的建设中,其占地面积小、检修周期长、维护量少等特点远胜于敞开式变电站^[1-3]。但是,封装于金属壳体内的高压导体是不可见的,尤其是母线导体,存在多处连接,一旦接触不良便引发局部过热而造成事故^[4]。在 220 kV HGIS 变电站中,母线侧隔离开关有

时设计在套管的下部,呈“L”型,称为角型隔离开关。隔离开关作为组合电器内重要的电气设备,也是数量较多的设备,其绝缘性能的优劣将对整个变电站的安全稳定运行至关重要。

由于隔离开关与断路器原理本质上的差异,使电场计算往往侧重于断路器,而对隔离开关电场的综合计算相对较少。运行经验表明,隔离开关的事故发生率要远大于断路器的事发生率。文[5-9]对特高压隔离开关的电场进行了数值计算,同时求取了

收稿日期:2017-04-22; 修回日期:2017-06-20

各部位的分布电容值;文[10]重点研究了隔离断口屏蔽罩的结构优化;文[11]虽然分析了隔离开关触头接触不良引发事故的原因,但只是定性分析,没有通过数值计算定量分析,不能直观展现隔离断口接触不良时的绝缘状况。以上研究成果均没有对隔离开关触头在不同接触情况下的电场进行计算,也没有将本体与操动机构联合考虑。因此,研究隔离开关触头在不同插接情况下的导通特性,对现场操动机构的调整试验及电网的安全稳定运行具有重要意义。

文中以电网中一次角型隔离开关因插接不良而引发的短路事故为背景,利用线性回归、汤逊理论等分析方法,建立了隔离断口电场击穿模型。将区域非重叠有限元计算方法应用于隔离断口间电场的计算上,取得了较好的剖分效果,分析了角型隔离开关在触头不同接触程度下的导通特性。最后,根据隔离开关操动机构原理,给出了该种操动机构的调整建议,以防接触不良故障的发生。

1 模型建立

某型号 ZF□-252 角型隔离开关结构示意图见图 1,其内部额定充气压力为 0.4 MPa。计算动静触头间隙 d 的示意图(图 1 中圆圈部分)见图 2,并将其置于平面坐标系中,由于是轴对称结构,因此选取其中的一半。当动触头与静触头完全接触状态下,则导通良好。如果由于某些原因而导致动触头插接不完全,触头之间有一定的间隙 d ,根据图 2 可列出

$$(x-a)^2+(y-b)^2=r^2; \quad (1)$$

$$y_1=k_1x_1+b_1; \quad (2)$$

$$y_2=k_2x_2+b_2。 \quad (3)$$

式(1)-(3)中, a 、 b 分别为梅花触指端部以半径为 r 的圆心坐标; k_1 、 b_1 分别为动触头直线方程的斜率和截距; k_2 、 b_2 分别为动静触头间最小距离直线方程的斜率和截距。

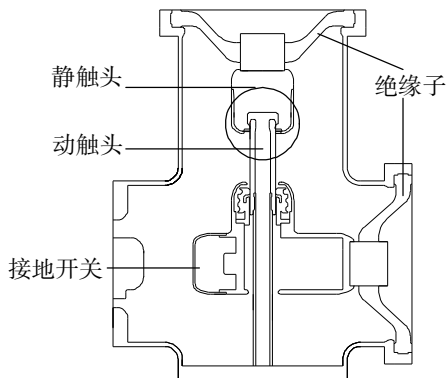


图 1 角型隔离开关结构示意图

Fig. 1 The structure sketch map of angle type disconnector

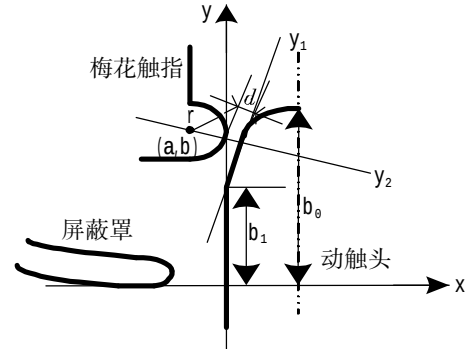


图 2 触头间隙 d 计算示意图

Fig. 2 The sketch map for calculation the gap d between the contacts

当动静触头有一定间隙后,触头间的最短距离(d)场强最大, b_0 为从屏蔽罩下沿到动触头弧触头部分的长度,定义其为插入深度。根据式(3)分别与式(1)、(2)求出两个交点坐标 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) ,再利用线性回归方法得到两点间的最短距离,即触头间的间隙为

$$d=\min[\sqrt{(x_1-x_2)^2+(y_1-y_2)^2}]。 \quad (4)$$

若触头间的距离 d 在某一范围时,间隙可构成均匀电场的条件,近似为平板电极。在均匀电场中,要使 SF_6 有效电离系数 $\alpha>0$,则^[12]

$$E/p>(E/p)_0=88.5 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{MPa}。 \quad (5)$$

式(5)中: E 为电场强度, kV/mm ; p 为气室内气体压强, MPa 。

当隔离开关触头间隙超过某一值时,间隙为稍不均匀电极结构,其电场不均匀系数 f 为

$$f=\frac{E_{\max}}{E_{\text{av}}}。 \quad (6)$$

式(6)中: $E_{\max}$ 为间隙中最大场强; E_{av} 为平均场强。

当隔离开关处于带电状态下,不同的插入深度对触头间导通特性的影响不同。触头离开一定距离后,间隙距离还比较小,若忽略边缘效应,根据流注理论^[13-16],则间隙的临界击穿条件为

$$\int_0^{x_0} [E-(E_0/p)p]dx=K/c。 \quad (7)$$

式(7)中: x_0 为临界电子崩长度; E_0/p 为 SF_6 临界击穿场强值,实验测得其值为 $88.5 \text{ kV/mm} \cdot \text{MPa}$; K 、 c 为常数, $K/c=0.38$ 。

对式(6)进一步修正,得电场的击穿判据为^[17]

$$E_{\max}>E_0=1.167\rho。 \quad (8)$$

式(8)中: ρ 为气体密度, $\rho=\frac{NR_{SF_6}}{R_0}$,其中 N 为带电粒子密度; R_{SF_6} 为 SF_6 气体分子量, 146.07 g/mol ; R_0 为阿伏加德罗常数, $6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 。在充气压力为 0.4 MPa 下,计算得到 $E_0=44.5 \text{ kV/mm}$ 。

2 实例计算及分析

上述隔离开关动触头插入深度设计图见图 3。从图 3 中可以看出,以屏蔽罩下沿最低点为基准,动触头的设计插入深度为 32 mm。该型号隔离开关投运后第 4 天,在负荷电流为 80 A 的情况下发生 B 相对地短路,解体后测试触头的插入深度为 19 mm,插入量不足。

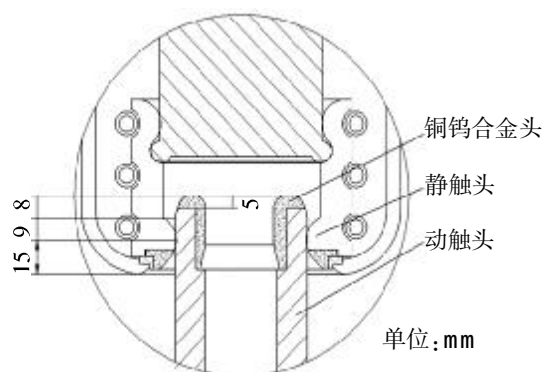


图 3 动触头插入深度设计图

Fig. 3 The design chart of insert depth of movable contact

为了计算隔离开关在该状态下的导通特性,结合设计图纸,利用 Ansys 有限元分析方法对其电场进行计算。由于触头间的间隙狭小,对剖分带来很大困难,采用区域分解法中的不重叠分析方法进行计算^[18]。计算条件为:由于隔离开关静触头连接母线套管,因此静触头加载 145.5 kV 工频相电压峰值,动触头及外壳为零电位,气室充气压力为 0.4 MPa。电场计算分布云图见图 4。

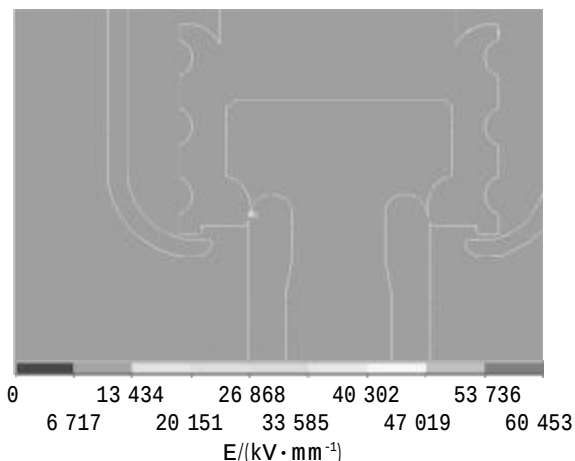


图 4 插入深度 19 mm 电场云图

Fig. 4 Electric field intensity distribution of insert depth 19 mm

计算表明,触头间的最大电场 $E_{\max}=60\ 453\ \text{kV/mm}$,间隙距离 $d=0.3\ \text{mm}$,电场不均匀系数 $f=1$,为均匀电场。由式(5)求得临界 $E/p=151\ 132.5\ \text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{MPa}$,远大于临界值 $88.5\ \text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{MPa}$,间隙发生了场致发

射,形成电弧,电路以电弧的形式导通,此时电流密度的表达式为^[19]

$$J=A_1(T+A_2E)^2e^{-\frac{11\ 600W_y}{T+A_2E}} \quad (9)$$

式(9)中: A_1 为常数, $A_1=60.2\sim 120$,纯金属取 100; W_y 为逸出功,eV,金属银为 4.74 eV; T 为金属表面温度,K; A_2 为常数,0.01; E 为金属表面电场强度,V/cm。在当时 80 A 负荷电流下,计算得银表面的温度为 1 750 °C,高于银的熔点 962 °C 和铜的熔点 1 083 °C。

由于电弧的能量很大,热量不断积累使温度超过了铜和银的熔点而发生熔化,滴落的金属熔液导致最终的短路故障。当时动静触头的烧损情况见图 5。



图 5 动、静触头的烧损情况

Fig. 5 Erosion condition of static contact and movable contact

3 不同插入深度对导通特性的影响

隔离开关操动机构的轴销分合闸位置示意图见图 6。图 6 中分别标出了合闸定位点和分闸定位点,轴销上的小孔与定位点重合说明分合闸良好,否则会发生欠位或过位分合闸。通过机构连杆与动触头的配合可知,动触头的插入深度(b_0)是分合闸欠位或过位(D)的 2 倍,即 $b_0=2D$ 。动触头不同插入深度下的触头导通特性及合闸欠位情况分别见表 1、2。动触头插入深度与触头间最大电场强度的对数关系曲线见图 7。上述不同插入深度时电场计算结果见图 8-13。由此可见,随着动触头插入深度的逐渐变小,最大电场强度也逐渐变小,当触头间隙大于 3 mm 时,电场由均匀电场转变为稍不均匀电场。总体来说,当动触头插入深度 23 mm 及以上时,触头可正常导通(区域 C),触头间为等电位,电场为 0;插入深度在 8、22 mm 之间时为电弧导通,对触头电寿命危害极大(区域 B),影响电网的安全运行;当插入深度小于 8 mm 时为断路状态(区域 A),此时三相负荷电流将不平衡,非全相保护将动作。

表 2 中的数据也说明了为了保证隔离开关触头正常导通而不影响设备的安全运行,操动机构的合闸欠位误差应该在 4.5 mm 以内。

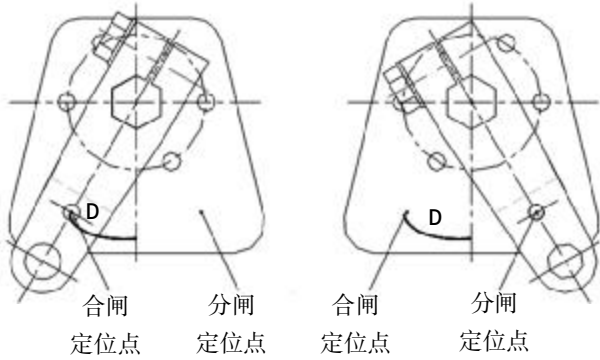


图 6 操动机构轴销分合闸位置示意图

Fig. 6 The opening and closing positions of operating mechanism dowel

表 1 不同插入深度下的导通特性

Table 1 Conduction characteristics in different insert depths

插入深度 b_0/mm	不均匀 系数	导通 状态	导通 条件	$E_{\max}/$ ($\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$)
≥ 23	—	正常导通	—	—
19	$f=1.00$	电弧	$E/p>88.5$	60 453.00
15	$f=1.00$	电弧	$E/p>88.5$	1 212.00
12	$f=1.00$	电弧	$E/p>88.5$	126.44
11	$f=1.00$	电弧	$E/p>88.5$	98.55
9	$f=1.21$	电弧	$E_{\max}>44.5$	76.07
8	$f=1.15$	电弧	$E_{\max}>44.5$	53.46
6	$f=1.12$	断路	$E_{\max}<44.5$	40.40

表 2 不同插入深度下的合闸欠位情况

Table 2 Closing errors in different insert depths

间隙 距离 d/mm	插入 深度 b_0/mm	合闸 欠位 D/mm
0.3	≥ 23.0	≤ 4.5
0.5	19.0	6.5
1.0	15.0	8.5
2.0	12.0	10.0
3.0	11.0	10.5
4.0	9.0	11.5
5.0	8.0	12.0
6.0	6.0	13.0

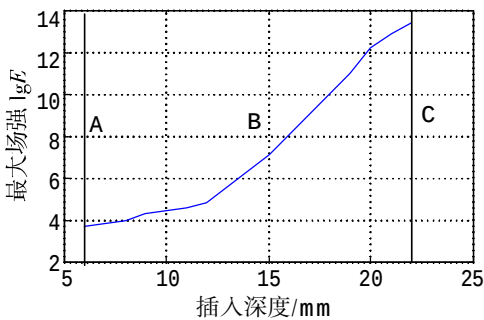


图 7 插入深度与最大场强的对数关系曲线

Fig. 7 Logarithm curve between insert depth and maximum Electric field intensity

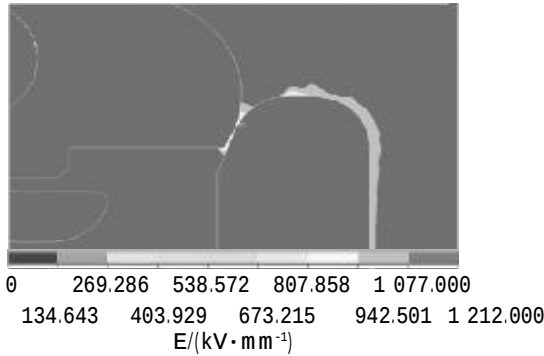


图 8 插入深度 15 mm

Fig. 8 Electric field intensity distribution of insert depth 15 mm

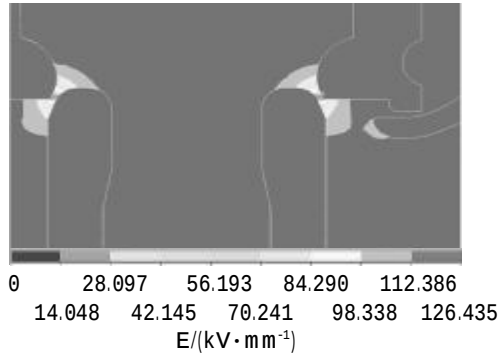


图 9 插入深度 12 mm

Fig. 9 Electric field intensity distribution of insert depth 12 mm

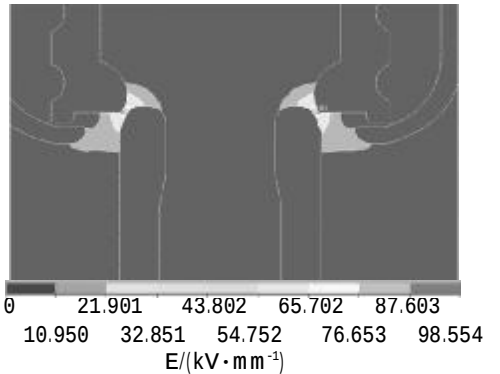


图 10 插入深度 11 mm

Fig. 10 Electric field intensity distribution of insert depth 11 mm

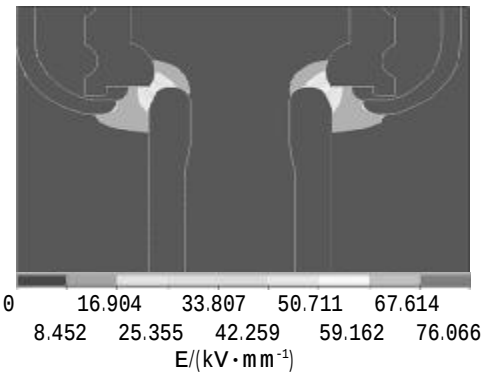


图 11 插入深度 9 mm

Fig. 11 Electric field intensity distribution of insert depth 9 mm

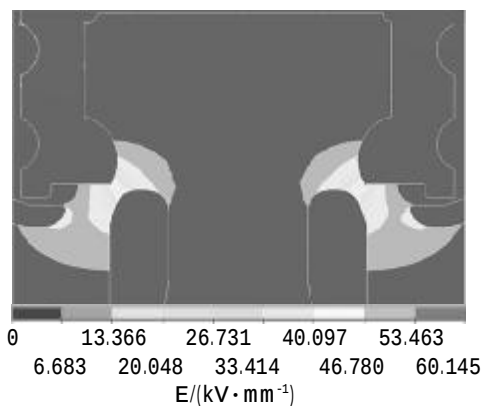


图 12 插入深度 8 mm

Fig. 12 Electric field intensity distribution of insert depth 8 mm

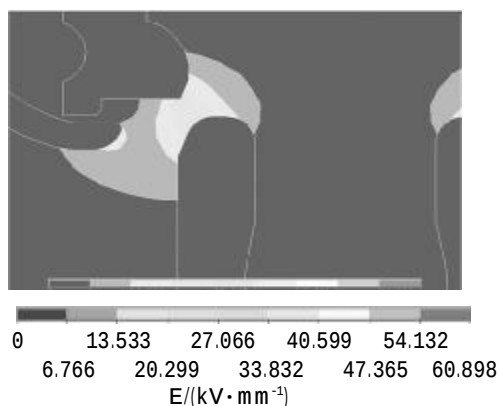


图 13 插入深度 6 mm

Fig. 13 Electric field intensity distribution of insert depth 6 mm

4 结论

文中针对某 220 kV HGIS 变电站中母线侧角型隔离开关在触头不同接触程度下的导通特性进行了详细研究,得到如下结论:

1)触头间隙中的电弧能量使触头金属温度高于其熔点而导致熔化,最终引发短路事故。

2)动触头插入深度 23 mm 及以上时,触头可正常导通;插入深度在 8、22 mm 之间时为电弧导通,对触头电寿命危害极大;当插入深度小于 8 mm 时为断路状态。

3)合闸状态时操动机构轴销的合闸定位点调整误差应欠位在 4.5 mm 以内。

4)当触头间隙大于 3 mm 时,电场由均匀电场转变为稍不均匀电场。

参考文献:

- [1] 林 莘,李 爽,徐建源,等.超高压 GIS 暂态壳体电压的仿真研究[J]. 高压电器,2011,47(3):12-17.
LIN Xin,LI Shuang,XU Jianyuan,et al.Research on the simulation of TEV in EHV GIS [J]. High Voltage Apparatus,2011,47(3):12-17.
- [2] 林 莘,李 爽,徐建源.特高压 GIS 壳体过电压特性[J]. 沈阳工业大学学报,2009,31(6):606-610.
LIN Xin,LI Shuang,XU Jianyuan.Enclosure over-voltage characteristics of UHV GIS[J]. Journal of Shenyang University of Technology,2009,31(6):606-610.
- [3] 林 莘,李 爽,徐建源,等.考虑 GIS 外壳传输特性的 VFTO 计算模型[J]. 电网技术,2010,34(11):203-207.
LIN Xin,LI Shuang,XU Jianyuan,et al.Calculation model of VFTO considering transmitting characteristics of GIS enclosure[J]. Power System Technology,2010,34(11):203-207.
- [4] 黄辉敏,夏小飞.220 kV GIS 隔离开关触头烧坏故障分析与对策[J]. 广西电力,2014,37(6):70-72.

- HUANG Huimin,XIA Xiaofei.Analysis and countermeasures of contact burned out fault of 220 kV GIS disconnector[J]. Guangxi Electric Power,2014,37(6):70-72.
- [5] 林 莘,司秉娥,徐建源,等.1 100 kV GIS 中隔离开关及故障接地开关电场数值分析[J]. 沈阳工业大学学报,2007,29(5):524-533.
LIN Xin,SI Bing'e,XU Jianyuan,et al.Electric field numerical analysis of extra-high voltage disconnector and fault earthing switch in 1 100 kV GIS[J]. Journal of Shenyang University of Technology,2007,29(5):524-533.
- [6] 徐建源,路 璐,林 莘.1 100 kV GIS 隔离开关的电场数值计算与分析[J]. 高电压技术,2008,34(10):2102-2106.
XU Jianyuan,LU Lu,LIN Xin.Numerical analysis of electric field of 1 100 kV disconnector in GIS[J]. High Voltage Engineering,2008,34(10):2102-2106.
- [7] 田冀焕,沙彦超,周远翔,等.800 kV 等级高压隔离开关的交、直流电场仿真计算[J]. 高电压技术,2011,37(5):1216-1223.
TIAN Jihuan,SHA Yanchao,ZHOU Yuanxiang,et al.Simulation of AC and DC electric field for 800 kV grade high voltage disconnector[J]. High Voltage Engineering,2011,37(5):1216-1223.
- [8] 徐建源,司秉娥,林 莘,特高压 GIS 中隔离开关的电场及参数计算[J]. 高电压技术,2008,34(7):1324-1329.
XU Jianyuan,SI Bing'e,LIN Xin,et al.Electric field numerical analysis and parameter calculation of ultra high voltage GIS disconnector[J]. High Voltage Engineering,2008,34(7):1324-1329.
- [9] 徐建源,司秉娥,林 莘,等.基于虚拟介电常数法的特高压 GIS 中隔离开关电场参数计算[J]. 电工技术学报,2008,23(5):37-42.
XU Jianyuan,SI Bing'e,LIN Xin,et al.Electric field parameter calculation of extra-high voltage GIS disconnector based on dummy dielectric constant method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2008,23(5):37-42.

- [10] 武奇, 楼丹. 几种隔离开关断口屏蔽罩的电场计算[J]. 高压电器, 2011, 47(11): 31-34.
WU Qi, LOU Dan. Electric field calculation of three types of isolator shields for disconnecter[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(11): 31-34.
- [11] 陈金法, 杨立川, 李思南. 一例隔离开关触头烧损引发 GIS 外壳放电故障的分析[J]. 浙江电力, 2007, 26(3): 23-25.
CHEN Jinfa, YANG Lizhou, LI Sinan. Analysis of discharge in GIS caused by disconnecter failure[J]. Zhejiang Electric Power, 2007, 26(3): 23-25.
- [12] 徐国政. 高压断路器原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
XU Guozheng. Principle and application of high voltage circuit breaker[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [13] 倪光正. 工程电磁场原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
NI Guangzheng. Principle of engineering electromagnetic field[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [14] HAZANADAR Z, CARSIMAMOVIE S. More accurate modeling of gas insulated substation components in digital simulations of very fast electromagnetic transients[J]. IEEE Transactions on PD, 1992, 7(1): 8-11.
- [15] TAKUMA T, KAWAMOTO T. Numerical calculation of electric fields with a floating conductor[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997, 4(2): 77-188.
- [16] 林福昌. 高电压工程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 144-156.
LIN Fuchang. High voltage engineering[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007: 144-156.
- [17] 林莘, 李鑫涛, 王飞鸣, 等. 触头烧损对 SF₆ 断路器介质恢复特性的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3125-3134.
LIN Xin, LI Xintao, WANG Feiming, et al. Dielectric recovery characteristics of SF₆ circuit breaker considering contact burning loss[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3125-3134.
- [18] 林莘, 蔡强, 徐建源, 等. 基于区域分解法的 1 100 kV 隔离开关大规模电场计算问题[J]. 高压电器, 2011, 47(2): 1-6.
LIN Xin, CAI Qiang, XU Jianyuan, et al. Large scale of electric field calculation of 1 100 kV disconnecter based on domain decomposition method[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(2): 1-6.
- [19] 张冠生. 电器学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1980.
ZHANG Guansheng. Electrical appliances[M]. Beijing: China Machine Press, 1980.

李爽(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为高压开关设备及其相关技术。

(上接第 71 页)

- Technologies, 2006, 29(3): 658-665.
- [20] 吴国华, 周洲, 涂春华. 高压断路器接触电阻的研究[J]. 华中电力, 2011, 24(6): 80-82.
WU Guohua, ZHOU Zhou, TU Chunhua. Research on contact resistance of high voltage circuit breaker[J]. Central China Electric Power, 2011, 24(6): 80-82.
- [21] 王万岗, 梁明亮, 吴广宁, 等. 弓网系统静态接触电阻特性研究[J]. 高压电器, 2012, 48(1): 30-34.
WANG Wangang, LIANG Mingliang, WU Guangning, et al. Characteristics of static contact resistance between pantograph and catenary[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(1): 30-34.
- 吴杨(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为开关电接触理论和试验、过电压保护。
- 蓝磊(1969—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷电及其防护、污秽外绝缘、绝缘材料老化等。