

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.02.024

断路器喷口材料PTFE耐烧蚀性能的研究

邢照亮¹, 焦彦俊², 张 翀¹, 陈 敏², 李卫国³, 陈 新¹

(1. 全球能源互联网研究院先进输电技术国家重点实验室, 北京 102209; 2. 国网江苏省电力公司, 南京 210024;
3. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 喷口材料的性能直接影响着断路器的开断特性, 为研究喷口材料的耐烧蚀性能, 文中设计了一套直流电弧发生装置, 可以产生电压、电流、时间、弧长可控的直流电弧, 在电弧轴向中充入气流模拟断路器吹弧对聚四氟乙烯(PTFE)的烧蚀, 以PTFE材料经受一次电弧烧蚀所损失的质量作为其烧蚀性能的指标。结果表明: 稳定燃烧的直流电弧呈现负电阻特性, PTFE的烧蚀量随着电弧电流的增大而增大, 随着电弧功率的增加而增大, 在电弧中充入气流, 电弧燃烧不稳定, 并且气流可以明显减少电弧对PTFE的烧蚀量。

关键词: 喷口材料; PTFE; 耐烧蚀; 电弧

Research on Ablation Resistance of Circuit Breaker Nozzle Material PTFE

XING Zhaoliang¹, JIAO Yanjun², ZHANG Chong¹, CHEN Min², LI Weiguo³, CHEN Xin¹

(1. National Key Laboratory of Advanced Transmission Technology, Global Energy Interconnection Research Institute, Beijing 102209, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China; 3. National Key Laboratory of New Energy Power System, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The performance of nozzle material directly affects the characteristic of circuit breaker. To investigate the ablation resistance of nozzle material of a circuit breaker, a DC electric arc generator is designed with controllable arc voltage, current, length and time. Air flow is blown into the electric arc along axial direction to simulate the PTFE ablation in circuit breaker, and the mass loss of PTFE after suffering arc ablation is taken as an indicator of its ablative performance. The results show that: 1) the DC arc with stable combustion presents negative resistance characteristic; 2) the mass loss of PTFE increases with increasing arc current and arc power; and 3) the arc becomes unstable when blowing air flow, and the air flow can significantly reduce the arc ablation of PTFE.

Key words: nozzle materials; PTFE; ablation resistance; arc

0 引言

中国电网架构正朝着高电压、大容量方向飞速发展, 对开关电器的要求也越来越高。为了保障电力系统的安全可靠运行, 需要断路器具有更高的可靠性、更长的寿命。而断路器灭弧室内触头和喷口材料的烧蚀是影响断路器电寿命的主要因素。喷口是高压断路器灭弧装置中控制电弧、创造高速气吹条件的核心部件。当断路器在开断短路电流时, 电弧在喷口内剧烈燃烧, 与喷口材料聚四氟乙烯(PTFE)发生能量交换, 使得 PTFE 材料发生烧蚀, 喷口材料的性能直接影响着高压断路器的

开断能力和使用寿命^[1]。

断路器喷口采用耐高温、耐电弧性能优异的 PTFE 材料制成。纯 PTFE 在电弧辐射下发生显著的表面分解, 甚至严重的内部破裂, 导致降解气体和同位素碳的产生^[2]。喷口烧蚀是由开断电流、燃弧时间、灭弧室的结构形式及参数、喷口形状与尺寸决定的^[3-4]。通常在断路器内试验 PTFE 材料耐烧蚀性能, 操作复杂、试验结果波动性大, 不易分析含有不同填料的 PTFE 材料的性能差异。文中针对直流电弧稳定燃烧的条件, 设计了一种新型直流电弧发生装置, 可以产生稳定燃烧的直流电弧, 对特定尺寸的 PTFE 材料进行试验分析, 分析 PTFE 的性能差别。并模拟断路器内部吹弧的特性, 在稳定燃烧的

电弧中加入气流, 分析气流对电弧的影响以及对 PTFE 材料烧蚀的影响。

1 喷口材料 PTFE 耐电弧烧蚀机理

喷口烧蚀是电弧、吹弧介质及喷口 3 方面的热—力综合效应, 喷口性能直接影响到高压断路器的开断性能和使用寿命。通常, 断路器的喷口材料为聚四氟乙烯, 属于结晶性高分子化合物。其分子结构为 $[-CF_2-CF_2-]_n$, 密度为 $2\ 140\sim 2\ 200\ \text{kg/m}^3$, 导热系数为 $0.29\ \text{W/(m}\cdot\text{K)}$, 比热容为 $1.47\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$, 有优异的电气绝缘性能, 但当它吸收能量及温度上升后, 会发生转变、松弛和分解等现象^[5-7]。电弧烧蚀 PTFE 材料的示意图见图 1。

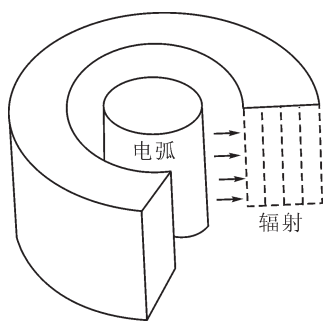


图 1 电弧烧蚀 PTFE 材料原理图

Fig. 1 The principle diagram of the arc ablation PTFE material

当电弧作用于喷口时, 电弧能量直接作用于喷口上, 使 PTFE 的温度升高。随着其吸收能量的增加, 将发生由玻璃化到高弹态再到粘流态的转变。当吸收的能量达到一定值后, PTFE 大分子链上的一些键将发生断裂, 分解成小分子的生成物, 使分子量减小, 放出低分子气体产物^[8-10]。这个过程就意味着 PTFE 通过熔解、热解和蒸发的方式被烧蚀。一般认为, PTFE 的热解温度约为 $1\ 000\ \text{K}$, 喷口材料的磨损是开断电弧的热效应和喷口内气流机械冲刷作用的总和结果, 而以电弧热效应为主要因素。电弧的热效应可分为 3 种情况: ①喷口表面存在冷气流时, 电弧的辐射能量作用在 PTFE 材料的内表面上, 引起表面分解; ②当电弧周围存在的热气体使喷口发生热堵塞, 热气体的温度极高, 喷口内表面在其作用下会产生熔化或气化; ③当发生弧柱堵塞, 高温弧柱的温度可达 $10\ 000\sim 20\ 000\ \text{K}$, 弧柱等离子体直接作用于喷口内表面, 使喷口材料大量地汽化和分解, 其烧蚀严重^[11-13]。另外, 在上述电弧烧蚀的情况下, 再与气流对喷口内表面冲刷作用结合, 使喷口逐渐磨损, 直接影响断路器的熄弧能力和电寿命。

2 电弧稳定燃烧的机理分析

对于断路器这类开关电器, 在大气中开断电路时, 如果负荷电流大于 $0.25\sim 1\ \text{A}$, 且断口间隙电压大于 $12\sim 20\ \text{V}$, 在触头开断后将在触头断口间产生电弧^[14], 电弧的存在将影响电器的开断特性以及电器的其他指标, 同时对外界也将产生影响。如图 2 所示一简单直流电路, 电源电压为 U 、电阻为 R 、电感为 L , 在开关触头分断期间会产生电弧, 当开关闭合, 电路达到稳定时, 电路电流应为

$$i=I=\frac{U}{R}。 \quad (1)$$

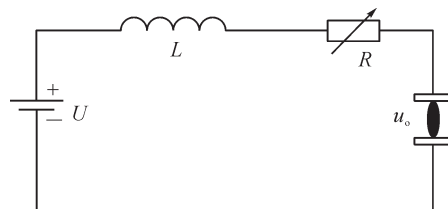


图 2 直流电弧稳态原理图

Fig. 2 The principle diagram of the DC arc steady state

当开关打开时产生直流电弧, 此时电弧电压为

$$u_0=U-\left(Ri+L\frac{di}{dt}\right)。 \quad (2)$$

当电弧长度很小时, 电弧电压很低, 电弧可以稳定地燃烧, 可认为 $di/dt=0$, 所以当 $u_0\neq U-Ri$ 时, 电弧因不能稳定燃烧而熄灭。可得到直流电弧稳定燃烧的条件是电源电压足以维持稳态电弧电压及其电阻压降。即

$$u_0<U-Ri。 \quad (3)$$

由此可见, 电源电压 U 越高, 电路电阻 R 越小, 电弧越容易稳定燃烧。

3 试验装置的设计

由前所述, 只要电路中加在电弧两端的电压足够大, 就可以维持电弧的稳定燃烧。该装置设计的目标是能够提供一个直流电流从 $10\sim 50\ \text{A}$, 对喷口 PTFE 材料进行电弧烧蚀的试验检测平台。对试验装置要求为: ①为了评估电弧对材料的烧蚀程度, 必须使试验环境具有可重复性, 即电弧电流、电弧电压、燃弧时间以及电弧长度保持不变, 以保证对材料烧蚀度的可比性; ②燃弧时间、电弧长度、电弧电流以及电弧电压可调, 以分析不同种因素对喷口材料烧蚀性能的影响; ③电弧电压、电流可测可记录, 电弧长度可调, 且具有一定的精度 ($0.1\ \text{mm}$); ④引弧方式采用电打火方式, 以保证燃弧的可靠性以及

燃弧时间的精度;⑤电弧对喷口材料的烧蚀,以每次烧蚀前后喷口材料的质量减少量,来表征其耐电弧烧蚀性能。

试验平台的原理见图3,主电路由三相电源、三相调压器、交流接触器、三相整流器、保护电路与滤波电路、试验台构成,原理如下:试验的供电电源是工频三相交流电源;三相电源接调压器,用来控制接入电路的三相电压;调压器接接触器,用来控制电路的开断;接触器与三相整流器相连,把三交流整流为直流;然后与保护电路相连,保护滤波电路不受击穿;滤波电路使整流器出来的直流电流更稳定;滤波电路出来的电压加在试验台的电极之间,用来维持电弧的燃烧。辅助电路由接触器引出,主要包括:变压器、AC/DC转化电路,控制电路、电流/电压测量电路以及点火电路构成。变压器从交流接触器引出,出口包括110 V和24 V,其中的110 V为点火电路供电,24 V的交流电经过AC/DC电路,转换为5 V,为控制电路供电;点火电路用来产生一个瞬间的上万伏的电压,用来引燃电弧;控制电路主要由ATMEGA16芯片构成,分别用3个继电器来控制接触器的闭合与关断时间,控制点火电路的点火时刻与点火时长,控制保护电路的接入,控制电弧燃烧的时间;电流/电压测量电路用来测量电弧燃烧时的电压与电流;试验台由动电极、静电极、试样卡盘、气仓,弧道长度标尺等组成,电极采用碳电极,调整动静电极之间的距离,便可以控制电弧的长度。

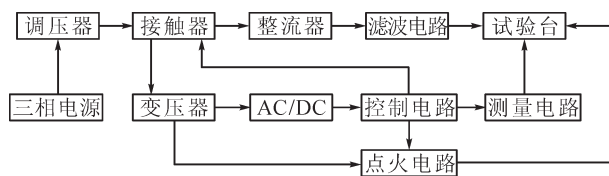


图3 试验装置原理图

Fig. 3 The principle diagram of the test apparatus

该试验采用的喷口材料为长度20 mm,且内外径分别为10 mm和20 mm的圆柱体,整个圆柱体在一个半封闭的卡槽内,见图4,碳电极伸入圆柱体内部,接通电源后,电弧在电极之间产生,调整电极的距离即可控制电弧的长度,通过外电路可控制电弧的燃烧时间。电弧强大的能量辐射在喷口材料内表面上,强大的热量引起喷口材料的烧蚀,以烧蚀前后质量的减少量作为评判喷口材料耐烧蚀性能的判据,通过外电路可控制电弧的燃烧时间。显然,喷口材料的烧蚀量与电弧功率的强弱有关,文中用设计的试验装置,深入分析喷口烧蚀量与电弧的功

率,燃弧时间以及电弧长度之间的关系。

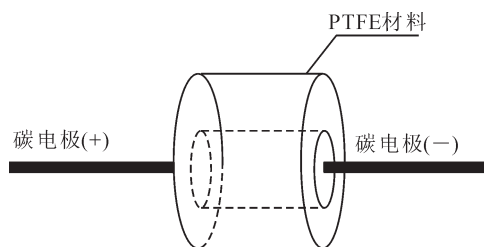


图4 试验电极装置

Fig. 4 The electrode of the test device

4 试验分析

电弧作用于喷口材料PTFE上导致其质量减少,文中利用实验装置,着重分析直流电弧的伏安特性,以及PTFE烧蚀量与电弧电流,电弧能量之间的关系,并在燃烧的电弧中充入气流模拟断路器中气吹灭弧,探讨PTFE的耐烧蚀性能。

4.1 直流电弧的伏安特性分析

电弧的伏安特性曲线说明电弧电压与电流的关系,是电弧最重要的特性之一。电弧电压与电流之间的函数关系,首先决定于电弧间隙的物理过程。电弧的物理状态不是静止的,在其中始终进行着游离和去游离过程。如果游离和去游离过程相平衡,则弧柱处于动平衡状态而不是时间的函数。弧柱处于动平衡的工作状态称为静态或稳态。当电弧工作状态改变时,弧柱动平衡被破坏,发生过渡过程。如果电的过程改变得很快,以致热的过程跟不上而出现热滞迟现象,这时的伏安特性称为动特性^[15]。

结合该试验条件,为得到电弧稳定燃烧状态下的静态伏安特性曲线,将调压器的电压分别调在275、300、325、350、380 V,调整电极之间的距离分别为4、6、8 mm,分别测试在这些电压下的电流值,记录并绘制成曲线图,并得出电弧的伏安特性曲线见图5。

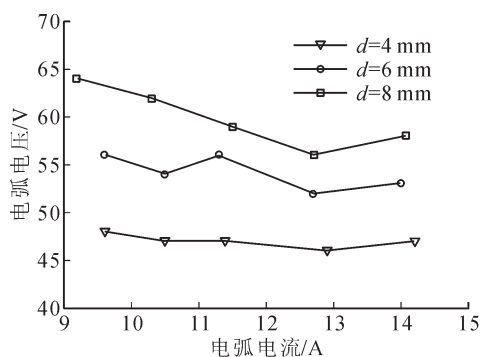


图5 电弧伏安特性曲线

Fig. 5 The volt-ampere characteristic curve of arc

通过试验可以得到:在同一试验条件下,电弧电压随着电流的增大而减小,电弧呈现负电阻特性;电弧长度的变化几乎不影响电弧电流的大小,电弧长度越长,用来维持电弧稳定燃烧的电压就越大。

4.2 PTFE 材料耐烧蚀性能的研究

喷口烧蚀是电弧、吹弧介质及喷口 3 方面的热—力综合效应,直接影响到高压断路器的开断性能和使用寿命^[16]。当断路器开断电流较小时,如开断电流小于 10 kA,电弧等离子区、热区和外部冷气流区共存于喷口内部,电弧辐射和对流等大部分热量被弧柱周围的气体吸收,这是由于高温热区直接作用在喷口内表面所致,且随着电流的增加,电弧直径的增大,弧柱边缘和喷口内表面间距减小,热区与表面接触的温度较高,烧蚀的表面层厚度加深^[17-18]。

结合该试验装置及要求,就喷口材料耐电弧烧蚀性能,并用小电流、小电压、长时间的烧蚀来表征大电流、大电压、短时间的大容量断路器喷口材料烧蚀性能。将调压器的电压分别调在 350、380 V,调整电极之间的距离分别为 4、6、8 mm,分别测量电弧电流与喷口材料 PTFE 的烧蚀量,最后分别对上述一些情况,测量在燃烧时间为 5.0 s,记录喷口材料烧蚀量。材料的烧蚀量与电弧电流之间的关系见图 6,烧蚀量与电弧的功率输出的关系见图 7。

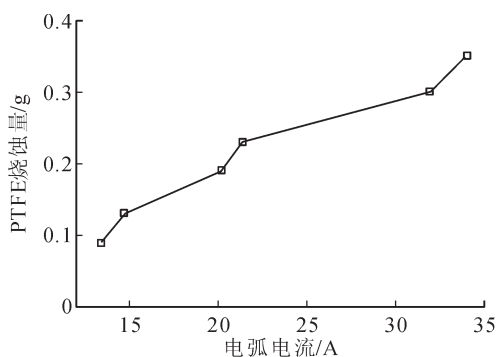


图 6 PTFE 烧蚀量与电弧电流曲线

Fig. 6 The curve of the PTFE quality reduction and electric arc current

由试验结果可以得到,在一定的燃弧时间下,喷口材料的烧蚀量随着电弧电流的增加而增加,并且燃烧量随着电弧的功率 UI 的增加而增加,且 PTFE 的烧蚀量与电弧长度无直接联系。

4.3 加入气流后电弧对喷口烧蚀性能的影响

在试验台的气仓内,通过气泵充入气流,模拟断路器的吹弧对喷口耐烧蚀性能的影响,通过调节三相调压器的电压和调节接入电弧发生回路的电

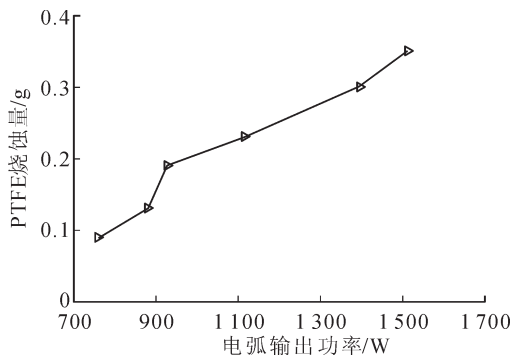


图 7 PTFE 烧蚀量与电弧功率曲线

Fig. 7 The curve of the quality reduction of PTFE and the arc output power

阻,可以控制电弧的燃弧电流和电压。在此部分的试验中充入的气流为同一气压下的气流。

充入气流后,电弧燃烧极不稳定,电弧被气流吹散,电弧电压、电流波动很严重。若充入气流过大,电弧燃烧很短时间就会熄灭,原因是电弧稳定燃烧时是处于热动平衡状态,电弧弧柱是高温、已游离的气体,充满了带电粒子,电极两端的电压维持电弧的燃烧,使得弧柱内部游离与去游离的粒子达到动态平衡。而粒子的去游离方式主要分为带电粒子的复合与扩散,充入气流使得弧柱内带电粒子的扩散变得极为剧烈,增大了电弧之间的去游离程度,导致电弧容易熄灭^[19]。试验过程中,调节输入的三相电压和电路中的电阻,使得电弧能够稳定燃烧。调整电极间距为 6 mm,燃弧时间设为 5 s,气流从碳电极的负极气仓内充入,得到的试验结果见表 1。

表 1 充入气流的试验结果

Table 1 Test results when filling the air flow

燃弧电 流/A	燃弧电 压/V	初始质 量/g	烧蚀后质 量/g	质量减少 量/g
30~38	50~65	10.07	9.76	0.31
20~26	80~90	10.07	9.81	0.27
18~23	80~90	10.06	9.88	0.18
14~17	100~120	10.06	9.85	0.21

通过试验对比可以发现,充入气流使得电弧对喷口材料的烧蚀量减少了,而且电弧变得不稳定,电弧的电压和电流变化都很大。说明气流可以减少电弧对喷口材料的烧蚀。

5 结语

目前电弧的研究主要依据大量的假设,这使得断路器内喷口材料 PTFE 的研究极为复杂。文中设计一套直流电弧发生设备,用小电流、低电压的电弧烧蚀喷口材料,来研究喷口材料的耐烧蚀性能。

通过试验分析,得出稳定燃烧下的直流电弧具有负电阻特性,但是并非规整的函数关系。PTFE 材料的烧蚀与电弧的电流有着正相关的特点,与电弧的功率输出也呈现正相关的特点。最后在稳态燃烧的电弧中充入气流,模拟断路器气吹对电弧的影响,得到气流使电弧燃烧变得不稳定,并大幅度减少 PTFE 的烧蚀量。

参考文献:

- [1] 李仰平,耿波,刘泽响,等. SF₆ 断路器喷口用复合PTFE 电气性能的研究[J]. 高压电器,2006,42(2):122-124.
LI Angping, GENG Bo, LIU Zexiang, et al. Research on the electric properties of PTFE composite used in nozzle of SF₆ circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(2): 122-124.
- [2] 李仰平,张建宏,彭宗仁,等. 高压断路器喷口材料的试验研究[J]. 高压电器,2002,38(4):19-21.
LI Angping, ZHANG Jianhong, PENG Zongren, et al. Experimental study on nozzle materials of high-voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(4): 19-21.
- [3] 贾继钧,赵长征. SF₆ 断路器喷口烧蚀规律及其应用的研究[J]. 电工技术杂志,1992(6):21-23.
JIA Jijun, ZHAO Changzheng. The research on the law of SF₆ circuit breaker nozzle ablation and its application[J]. Electrotechnical Journal, 1992(6): 21-23.
- [4] 张俊民. 喷口电弧与喷口材料蒸气相互作用的数学模型[J]. 中国电机工程学报,2004,24(7):210-213.
ZHANG Junmin. Mathematical model of the interaction between nozzle arc and PTFE vapour[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 210-213.
- [5] 刘阳. 高压断路器喷口结构优化设计的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2009.
LIU Yang. Research on nozzle optimization of high voltage circuit breaker [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2009.
- [6] 张俊民,徐国政,王其平. PTFE 蒸气对电弧特性影响的数值分析[J]. 高压电器,2002,38(4):12-15.
ZHANG Junmin, XU Guozheng, WANG Qiping. Numerical analysis of the influence of PTFE vapour on the characteristics of nozzle arc[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(4): 12-15.
- [7] RUCHTI C B, NIEMEYER L. Ablation controlled arcs[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 1986, PS-14(4):423-434.
- [8] 李仰平,周庆,刘翔. 复合聚四氟乙烯耐电弧烧蚀及其介电性能的试验研究[J]. 绝缘材料,2006,39(2):36-38.
LI Angping, ZHOU Qing, LIU Xiang. Experimental study on arc ablation resistance and dielectric property of PTFE composites[J]. Insulating Materials, 2006, 39(2): 36-38.
- [9] BOUAZIZ M. An experimental and theoretical study of the absorption of SF₆ arc plasma radiatio by cold SF₆ gas[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 1996, 29(13):2885-2891.
- [10] 刘先兰. 聚四氟乙烯(PTFE)制品的成型工艺及质量分析[J]. 现代机械,2003(3):77-78.
LIU Xianlan. Moulding techniques and quality analysis of the products of poly cetra fluoro ethylene [J]. Modern Machinery, 2003(3): 77-78.
- [11] 贾继钧,赵长征,曹广斌. SF₆ 断路器喷口烧蚀性能的试验研究[J]. 高压电器,1991,27(3):9-13.
JIA Jijun, ZHAO Changzheng, CAO Guangbin. Experimental study on nozzle ablation resistance of SF₆ circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 1991, 27(3): 9-13.
- [12] 荣命哲,杨茜,范春朵. 高压自能式 SF₆ 断路器电弧能量作用过程仿真[J]. 中国电机工程学报,2004, 24(2):92-97.
RONG Mingzhe, YANG Qian, FAN Chunduo. Simulation of the process of arc energy-effect in H.V. auto-expansion SF₆ circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 92-97.
- [13] 杨涌,王其平. SF₆ 断路器喷口电弧熄灭过程的数字模拟[J]. 中国电机工程学报,2000,20(5):9-13.
YANG Yong, WANG Qiping. Computer aided numerical analysis of arcing process in SF₆ circuit breaker nozzle[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 9-13.
- [14] 赵云学. 800 kV 超高压 SF₆ 断路器绝缘特性计算与喷口研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2007.
ZHAO Yunxue. Computation of insulation performance and study of nozzle for 800 kV extra high voltage SF₆ circuit breaker[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2007.
- [15] 施金武. 交流框架式低压断路器灭弧系统研究[D]. 上海:上海海事大学,2005.
SHI Jinwu. Research on the AC frame and low voltage circuit breaker arcing system[D]. Shanghai: Shanghai Maritime University, 2005.
- [16] 王其平. 电器电弧理论[M]. 北京:机械工业出版社,1991.
WANG Qiping. Electric arc theory[M]. Beijing: China Machine Press, 1991.
- [17] 李仰平,张建宏,刘泽响,等. 高压 SF₆ 断路器喷口烧蚀特性的模拟研究[J]. 西安交通大学学报,2002, 36(8):785-788.
LI Angping, ZHANG Jianhong, LIU Zexiang, et al. Simulative study of the nozzle ablation characteristics in high-voltage SF₆ circuit breaker[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(8): 785-788.
- [18] 张俊民,徐国政. SF₆ 自能膨胀式断路器喷口烧蚀的数学模型[J]. 清华大学学报(自然科学版),2002,42(9):1172-1175.

(下转第 165 页)

- [9] 贾文卓. 基于 Ansys 的开关柜电场与温度场仿真计算[D]. 天津: 天津大学, 2013: 17-33.
JIA Wenzhuo. The simulation of electric field and temperature field about switchgear based on Ansys[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013: 17-33.
- [10] 卢 旻. 基于 Ansys 仿真的 10 kV 开关柜绝缘改造[J]. 电气技术, 2015(9): 83-85.
LU Min. 10 kV high voltage switchgear insulation modification based on Ansys[J]. Electrical Engineering, 2015(9): 83-85.
- [11] KANE C, BLOKHINTSEV I, GOLUBEV A. Measurement and analysis of partial discharge in switchgear[C]//Proceedings of the Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Conference. [S.l.]: IEEE, 2005: 203-210.
- [12] KURRER R, KLUNZINGER K, FESER K, et al. Sensitivity of the UHF-method for defects in GIS with regard to on-line partial discharge detection[C]//Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. [S.l.]: IEEE, 1996: 95-98.
- [13] 李军浩, 韩旭涛, 刘泽辉, 等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2583-2601.
LI Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2583-2601.
- [14] 叶海峰, 钱 勇, 王红斌, 等. 开关柜表面暂态地电压信号频谱特征[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3849-3857.
YE Haifeng, QIAN Yong, WANG Hongbin, et al. Spectrum characteristics of transient earth voltages aroused by partial discharge in switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3849-3857.
- [15] KEMP I J. Partial discharge plant-monitoring technology: present and future developments[J]. IEE Proceedings of the Science, Measurement and Technology, 1995, 142(1): 4-10.
- [16] 何肖军, 徐志斌. 高压开关柜绝缘性能检测与故障诊断技术研究[J]. 浙江电力, 2010, 29(5): 6-10.
HE Xiaojun, XU Zhibin. Study on insulating property detection and fault diagnosis technology for HV switchgear [J]. Zhejiang Electric Power, 2010, 29(5): 6-10.
- [17] 张文凯, 吴小钊, 郑亚利, 等. 基于静电场分析的固封极柱局部放电研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3858-3865.
ZHANG Wenkai, WU Xiaozhao, ZHENG Yali, et al. Research on embedded pole partial discharge based on electrostatic field analysis[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3858-3865.
- [18] 廖嘉骏, 阳 林, 郝艳捧. 融冰期 110 kV 覆冰复合绝缘子电场仿真研究[J]. 高压电器, 2015, 51(3): 47-54.
LIAO Jiajun, YANG Lin, HAO Yanpeng. Simulation of electric field for 110 kV iced composite insulator in melting period[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(3): 47-54.
- [19] 刘国利, 肖登明. 套管局部放电分析及电场仿真[J]. 电气技术, 2014(9): 1-4.
LIU Guoli, XIAO Dengming. Bushing PD analysis and electric field simulation[J]. Electrical Engineering, 2014(9): 1-4.
- [20] 段大鹏, 赵承楠, 詹花茂, 等. 252 kV GIS 盆式绝缘子金属法兰开孔的电场分析及优化设计[J]. 高压电器, 2013, 49(9): 74-79.
DUAN Dapeng, ZHAO Chengnan, ZHAN Huamao, et al. Electric field simulation and optimization design of the metal flange pouring hole of basin-type insulator in 252 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(9): 74-79.
- [21] 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 disconnecter[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1216-1223.
- [22] 杨敬华, 范承勇. 40.5 kV 真空断路器绝缘结构电场分析及优化设计[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 146-152.
YANG Jinghua, FAN Chengyong. Electric field analysis and optimization design of insulation structure of 40.5 kV vacuum circuit-breaker[J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 146-152.
- 苏海博(1986—), 男, 工程硕士, 助理工程师, 主要从事高压设备试验及新技术应用推广。
- 普美娜(1990—), 女, 工学硕士, 主要研究方向为配电网主要开关设备的寿命延长措施。
- 朱兆芳(1990—), 女, 工学硕士, 主要研究方向为电力开关设备故障诊断技术。
- 易满成(1985—), 男, 工程硕士, 工程师, 主要从事高压开关设备试验及新技术应用推广。
- 李 刚(1957—), 男, 工学学士, 教授级高级工程师, 主要从事大型变压器和超高压断路器等电力设备的运行维护、安装调试和故障检修工作。
- 杨爱军(1986—), 男, 工学博士, 讲师, 主要研究方向为电力开关设备故障诊断和寿命评估。

(上接第 158 页)

- ZHANG Junmin, XU Guozheng. Mathematical model of nozzle ablation in an SF₆ auto-expansion circuit breaker[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2002, 42(9): 1172-1175.
- [19] 李介谷. 电器的熄弧原理[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1956.
- LI Jiegu. The principle of electric arc[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1956.
- 邢照亮(1988—), 男, 硕士研究生, 主要进行电工设备绝缘材料的绝缘性能及耐烧蚀性能研究。