

一种直动压气式负荷开关机械特性的研究

郭瑞艳, 曾大生, 杜晓晖, 蔡润强, 李 勇

(广东省顺德开关厂有限公司, 广东 顺德 528300)

摘要: 笔者以 FLN44 型负荷开关为例, 通过对其灭弧原理的介绍, 给出了影响负荷开关开断和关合性能的机械特性的简单解释, 对分、合闸速度和同期性参数进行了详细的研究分析, 提供了一些有价值的经验数据。文中提出了负荷开关 25% 速度区间的概念, 并就具有“弧触头”结构不同期性的测量和判断给出了说明。研究结论可供同类产品的研发和制造参考和借鉴。

关键词: 直动压气式负荷开关; 机械动作特性; 分合闸速度; 弧触头结构; 同期性

中图分类号: TM56 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2014)06-0070-05

Research on Mechanical Performance Characteristics of a Vertical Puffer Type Load-breaking Switch

GUO Ruiyan, ZENG Dasheng, DU Xiaohui, CAI Runqiang, LI Yong

(Guangdong Shunde Switch Co., Ltd., Guangdong Shunde 528300, China)

Abstract: Taking FLN44 type switch for example, this papers gives a simple explanation of mechanical characteristics through the introduction of its arc-extinguishing principle, which have important impacts on the making and breaking capacity of the switch. It focuses on the analysis of opening and closing speed and its synchronism, by putting forward 25% speed range concept for the first time, estimating the measurement of simultaneity. The research results can provide references for R & D and manufacture of other similar products.

Key words: vertical puffer type load-breaking switch; mechanical performance characteristics; opening and closing speed; arcing contact structure; synchronism

0 引言

高压交流负荷开关是一种能关合、开断及承载线路正常负荷或规定过负荷电流, 并具有一定短路关合能力的开关设备。伴随着城乡电网的进一步更新换代, 高压负荷开关与熔断器配合保护变压器的方式越来越得到用户的青睐, 产品在电力系统中(尤其是用户终端)得到了广泛的应用。目前, 高压负荷开关是我国高压电器中灭弧方式最多, 结构类型最多的产品之一, 尤其在中压领域, 其中 SF₆ 负荷开关占据了很大的比例。从触头运动轨迹来说, SF₆ 负荷开关可以分为回转式和直动式两大类^[1-3]。从灭弧原理来说, 可以分为永磁铁旋弧、去离子栅、压气式 3 大类。文中涉及的是一种直动压气式 SF₆ 负荷开关, 其

不仅在国内长期保持着优良的运行记录, 近几年还大量出口到东南亚市场。

负荷开关的机械特性是一组重要的性能指标, 直接关系到产品的关合、开断能力和运行可靠性, 希望文中的一些研究和数据可以为同行们提供一些有益的参考和借鉴。

1 FLN44 型负荷开关结构及灭弧原理简介

FLN44 型负荷开关是笔者所在公司十多年前自主开发的, 有 12 kV 和 24 kV 两个电压等级, 且具有相同的外形尺寸, 见图 1。

1.1 产品结构

按功能及结构要素划分, 该产品由密封气室(也称开关本体)和弹簧操动机构^[4-5]两大部分组成。密封气室采用不锈钢薄板拉伸成型的上、下两外壳焊接



图1 FLN44 负荷开关外形

Fig. 1 Figure of FLN44 switch

而成,内充 0.14 MPa(绝对值) SF_6 气体,并设有可供外界观察其状态的窗口。上下各有三个纵向布置的大爬距套管作为三相高压接线端子,中间是开关的核心部分——负荷开关的动、静触头组件,动触头组件通过传动构件、开关主轴与气室外操动机构连接。此外,在负荷开关左侧设计有接地开关,与负荷开关组合实现三工位(工作、隔离、接地)功能。接地开关触

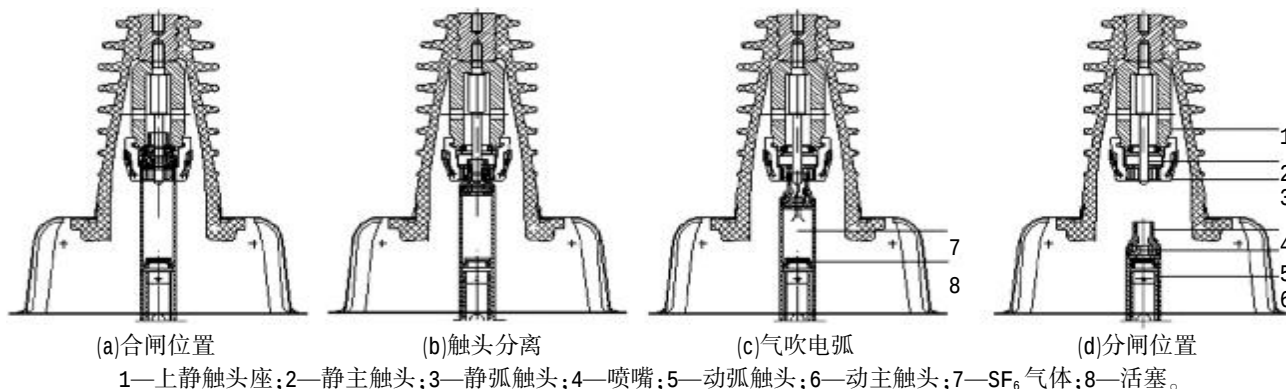


图2 FLN44 型负荷开关开断过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of FLN44 type switch's opening process

当负荷开关开断电路时,操动机构释放的弹簧力,通过主轴及传动构件带动主触头 6、动弧触头 5 同时向下快速移动,动触头管内部的 SF_6 气体 7 受压,气压迅速上升,当动、静弧触头 5、3 分离瞬间产生电弧时,动触头管内的高压气体经喷嘴 4 吹向电弧,拉长并冷却后使电弧熄灭。动触头在操动机构的带动下,继续向下运动,与静触头实现无电弧分离,最终到达分闸位置。

2 对负荷开关机械动作特性的理解

在对 FLN44 开关的灭弧原理进行分析后不难发现,其灭弧能力的大小与动触头的运动速度有着密不可分的关系:触头速度越快,气体压缩越快,气吹效果就越好,吹熄电流的能力也就越强。因此,燃弧的时间就越短,可有效降低触头烧损的程度,从而延长开关的寿命。其他类型负荷开关也有类似现象,机械特性与灭弧能力(电气性能)之间关系密切。

开关设备的动作特性,一般是指开关本体与操动机构相配合,在空载条件下(回路中没有施加高压

头组件通过接地主轴与气室外操动机构连接。

弹簧操动机构安装在密封气室的正前方。由两个独立又相互间“联锁”的操动机构组成。左侧是接地开关的操动机构(Ⅱ型机构),右侧是负荷开关的操动机构(Ⅰ型机构)。当产品作负荷开关——熔断器组合电器使用时,则将Ⅰ型机构换成具有撞击脱扣功能的Ⅲ型机构。弹簧操动机构释放的动能,通过主轴传递给对应的开关,从而实现开关的分、合闸动作。

1.2 灭弧过程及原理

该产品采用的直动压气式灭弧原理是将高压 SF_6 断路器中的“单压压气式”原理^[6]向中压领域延伸,最大特点就是开断性能十分优越,尤其在 24、40.5 kV 电压等级性能优势更加明显,但结构相对较复杂。

直动压气式灭弧过程及原理见图 2。

电),分闸或合闸过程中表征出来的、按照预先定义的、与时间、位移相关联的机械特性参数值。上述动触头 6 向下的运动速度(即分闸速度)就是机械特性参数之一,此外合闸速度、分合闸时间、合分闸同期性等都是负荷开关常见的机械特性参数。很显然,机械特性参数作为一项决定产品性能指标的重要参数,必须在产品的技术条件和出厂检验报告中给予明确的规定。国家标准^[7-8]亦就此给出了强制性要求:在每台负荷开关的型式试验和出厂检验过程中,必须对其机械特性进行测量和控制。然而在现实中,很多人认为,相对于断路器而言,负荷开关开断的电流小(一般在 630 A 以下),产品结构比较简单,机械动作特性不值得给予太多关注。

3 FLN44 开关机械特性的研究

鉴于各类产品的实际结构有所不同,且国家标准对负荷开关机械动作特性的具体数值和测量方法没有给出明确要求,众多制造厂家在这方面的研究近几年并不多见。根据多年从事负荷开关设计和质量控制工

作的经验,对机械特性的 3 种参数进行分析研究。

3.1 分、合闸速度

3.1.1 对开断和关合能力的影响

结合理论分析^[9]和多年来的试验验证情况,发现触头的分闸速度 $V_{\text{分}}$ 在一定范围内与开关的开断能力成近似正比关系,但随着 $V_{\text{分}}$ 的继续提高,开断能力上升慢慢变得不明显,并接近饱和(受制于气缸直径大小、喷嘴形状等)。而在关合过程中,合闸速度 $V_{\text{合}}$ 越快,触头的电弧烧损程度越小。由于负荷开关

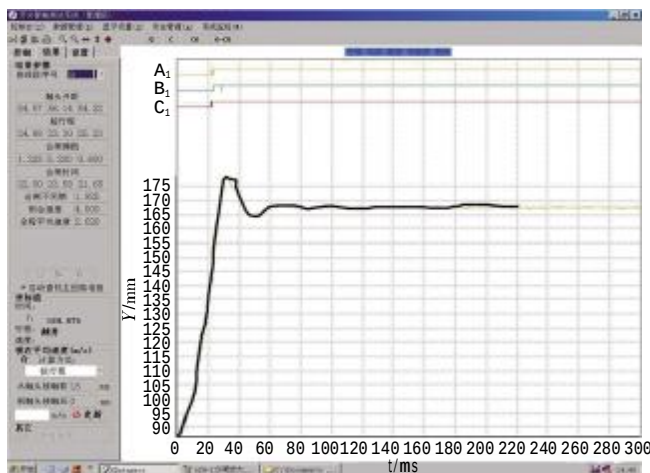


图 3 开关合闸过程的位移—时间曲线

Fig. 3 Displacement-time curve for switch closing

不难理解, $V_{\text{分}}$ 、 $V_{\text{合}}$ 的数值取决于所定义的某一位移(或时间)区间, 区间选择不同, 计算的结果也不同。据了解, 目前绝大多数厂家仍将 $V_{\text{分}}$ 、 $V_{\text{合}}$ 定义为全过程的平均速度, 即 $V_F = l_{\text{总}}/t_{\text{总}}$ 。

而笔者认为, 将 $V_{\text{分}}$ 、 $V_{\text{合}}$ 定义为动、静主触头分离或接触之前的某段区间(非全程)内的平均运动速度, 即 $V_S = l_{AB}/t_{AB}$ 更为实际, 也更为准确, 该区间可称之为 AB 速度区间。

原因有两点: ①要想通过提高 $V_{\text{分}}$ 来提高开关性能, 操动机构必须提供更大的能量, 这会导致机构的操作功加大、磨损加速、反冲加大等, 开关的机械操作极限次数(寿命)也将大大减少; ②从电弧产生和熄灭的角度来看, 真正影响开关开断和关合性能的只是在动、静主触头刚刚分离或即将接触之前的某段区间, 在这区间以外, 电弧已经熄灭或者没产生。当 SF_6 气体介质的绝缘恢复强度远远超过断口间施加的工频电压(瞬时恢复电压 TRV 之后的), 此时, 触头的运动速度的大小已经失去意义。

以分闸过程为例, FLN44 开关对 AB 区间的定义见图 5、6。

图 5、6 中, A 点为动、静主触头分离瞬间点; B 点为动、静主触头分离后与 A 点的距离值等于断口开距的 25%。其中, 断口开距 $l_{\text{开}}$ = 动主触头的总行程

要具备关合短路电流(12 kV, 峰值 50 kA)的能力, 其远大于开断电流值, 故 $V_{\text{合}}$ 一般要求大于 $V_{\text{分}}$ 。

3.1.2 定义和测量

分、合闸速度有专门的仪器可以测量^[10], 行业上的通用做法是, 通过与动触头刚性连接的位移传感器来模拟并得到触头动作的时间—位移曲线, 然后再根据预先设定的软件程序计算出 $V_{\text{分}}$ 、 $V_{\text{合}}$ 。图 3、4 是用“SWT11 型开关智能测试仪”测量分、合闸速度的两个截屏。

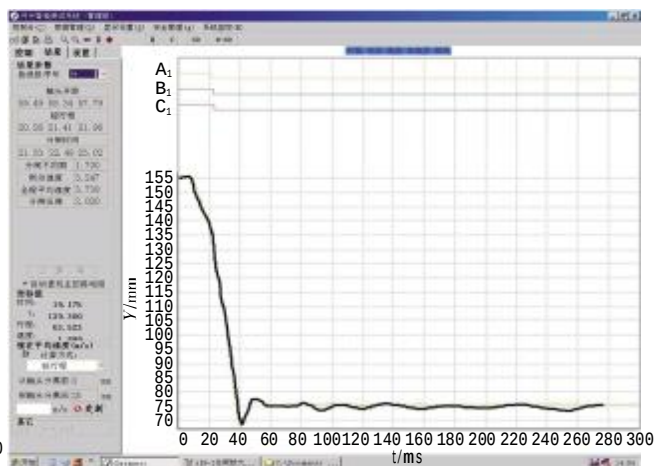


图 4 开关分闸过程的位移—时间曲线

Fig. 4 Displacement-time curve for switch opening

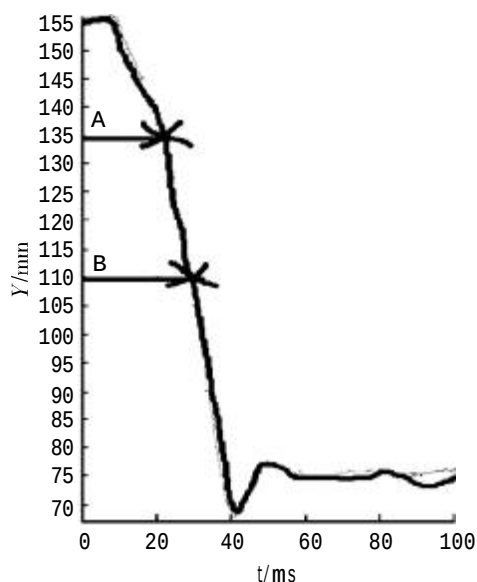


图 5 分闸速度曲线的 AB 区间

Fig. 5 AB area for opening speed curve

$l_{\text{总}}$ - 超行程 $l_{\text{超}} = 80 - 20 = 60$ mm (FLN44 开关的数据), 则 $L_{AB} = 60 \times 25\% = 15$ mm。

经过产品多次型式试验和十多年的运行经验表明, 12 kV 电压等级下, 在上述 AB 区间(简称 25%速度区间)内, 如下测试结果均可判定为合格: $V_{\text{分}} = (2.8 \sim 3.5)$ m/s, $V_{\text{合}} = (3.2 \sim 4.0)$ m/s。

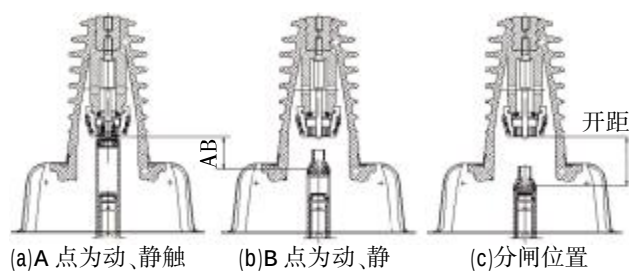


图6 分闸过程的 AB 区间定义

Fig. 6 Definition of opening AB area

在此范围内,负荷开关的最大开断能力(通过额定转移电流值^[4]体现出来),可以分别达到 2 200 A (12 kV)和 1 400 A (24 kV)。

3.1.3 决定 $V_{分}$ 、 $V_{合}$ 的设计要素

鉴于 $V_{分}$ 、 $V_{合}$ 的重要性,其标称数值的确定、误差范围的选择都要十分慎重,要有试验(尤其是型式试验)的验证结果作为依据,不允许轻易更改。在产品大批量生产和持续改进过程中,如何保证 $V_{分}$ 、 $V_{合}$ 处于合格水平,产品有 3 个设计要素值得参考:

1)触头超行程越大,分闸速度越快,但要兼顾触头开距和机构输出总行程的大小;

2)分合闸弹簧的弹性系数越大,速度越快但会出现饱和,要设法提高在 AB 区域内的有效“出力(做功)”;

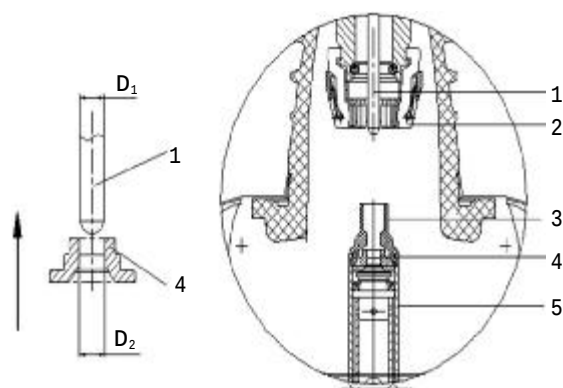
3)动静触头间的触头压力越小,速度越快,但要满足温升和短时耐受电流(热稳定)对接触电阻的要求。

3.2 分合闸同期性

分合闸同期性是指开关设备的三极(A、B、C)触头,在合闸或分闸的过程中,依次接触或分离的时间顺序差。该值虽然在国家标准^[7]中没有提出具体要求,但同样不应该被忽视。首先,负荷开关在遇到关合三相短路电流情况时,由于电流值非常大(40 kA 或 50 kA 峰值),三极触头在分合闸的瞬间容易产生电弧,若同期性越差,电弧产生能量越大,动静触头的烧损程度就越大,并最终可能导致触头熔焊,开关无法正常操作。由于三相分合闸同期性的存在,在正常操作负荷电流的过程中,特定环境下可能会产生一些震荡、(低频)谐波和操作过电压,并最终给线路和用户终端设备造成冲击和损害。在 GB 1984—2003 中有规定:如果没有特别要求,合闸同期性不应超过额定频率的 1/4 周波(即 50 Hz 时为 5 ms),分闸同期性不应超过额定频率的 1/6 周波(即 50 Hz 时为 3.3 ms),这些规定值得作为负荷开关的设计参考。

负荷开关的分合闸同期性一般的机械特性测试仪都可以进行测量。文中所涉及的 FLN44 开关,由于采用的是具有“弧触头”的结构,即开关触头除了

一对通载正常负荷电流的主触头之外,还增加了一对用于开断或关合过程中引导电弧产生并熄灭的弧触头,见图 7。因为触头分离的存在两组电信号,所以很容易产生“误判”,同期性的测量数值与实际相比明显偏大。



1—静弧触头;2—静主触头;3—喷嘴;
4—动弧触头;5—动主触头。

图7 主、弧触头结构示意图

Fig. 7 Structure of contact and arc-extinguishing contact

弧触头与主触头的动作顺序为:

1)分闸时,主触头 2、5 先分开,弧触头 1、4 后分开并产生电弧,电弧被吹灭后,主触头继续分离到位;

2)合闸时,弧触头先接触并产生电弧,主触头接触后电弧熄灭,然后主触头继续滑动到位。

普通的机械特性测试仪^[10](如 SWT11)在测量同期性参数时,通过施加在主回路上一组低电压信号的通断,程序设定分别以三极触头第 1 次接触或分离的信号点为“取样点”,然后得出三极的时间差作为测量结果。

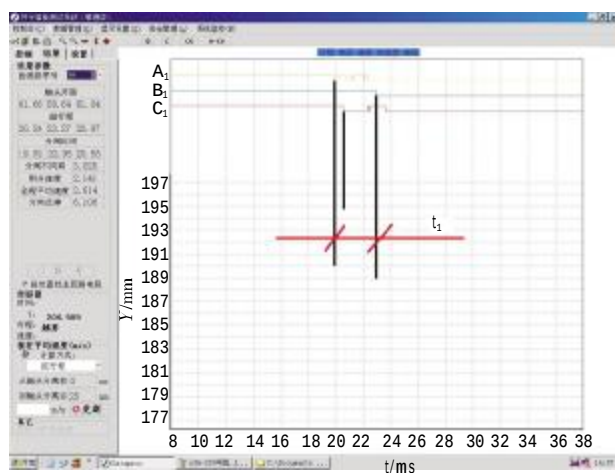
从图 7 中左侧放大部分可以发现,静弧触头 1 外径是 D_1 ,动弧触头 4 的内径是 D_2 ,而从引弧的设计功能和结构要求来看,必须满足条件 $D_1 < D_2$,即两者之间必须存在一个配合间隙^[11-12]。

正因为动、静弧触头之间存在一定的间隙,理论设计值为 0.3~0.5 mm,受零件加工和装配等因素的影响,实际约为 0~1 mm。以开关分闸过程为例,在弧触头分开前,瞬间两者保持接触或者不接触,将会是一个随机现象,而这种“随机现象”最终将造成一个较大地“误判”。换句话说,因为常规测量仪器无法判断出该信号究竟是来自弧触头,或者是主触头,它们只能将每相信号的第一个“断开点”视为分闸开始时间,这就是产生“误判”的根本原因。对同一次分闸测量曲线的不同判断见图 8。

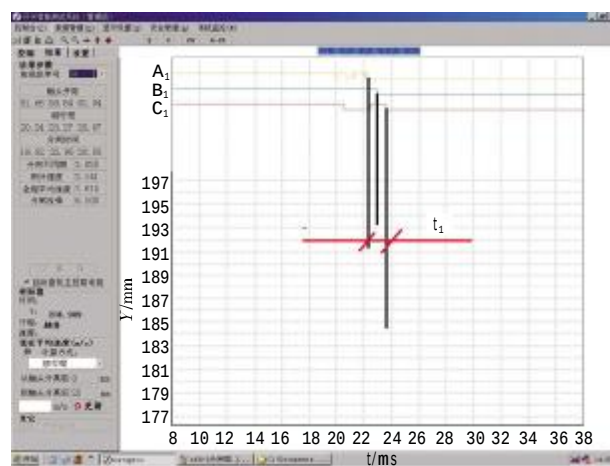
图 8(a)中按照仪器设置,将每相的第一个“断开点”(代表主触头开始分开)定义为取样信号,“测出”

的分闸同期性为 $t_1, t_1=3.1\text{ ms}$; 图 8(b) 中将每相的最后一个“断开点”(代表弧触头开始分开)定义为取样

信号, 再经过坐标测量, 得到的分闸同期性为 $t_2, t_2=1.7\text{ ms}$ 。



(a) $t_1=3.1\text{ ms}$



(b) $t_2=1.7\text{ ms}$

图 8 开关分闸同期性测量的结果对比

Fig. 8 Comparing the metrical result of opening simultaneity

很显然, 上述两个“结果”之间存在着不小的差别(误差接近 45%)。考虑到主触头先于弧触头分开, 弧触头分离才应是负荷开关真正开始分离, 因此 t_2 值应该更真实反映其分闸的不同期。该过程的研究对该产品检测数据的正确判断有较高的指导意义。

4 结语

高压负荷开关广泛应用于电力系统中, 作为配电领域和终端用户的坚强“执行者”, 其产品的质量应该受到越来越多的关注。文中通过对 FLN44 型 SF_6 负荷开关的动作机械特性的研究和阐述, 强调了开关触头分、合闸速度和分、合闸同期性的重要性, 提出了自定义的 25% 区间的分、合闸速度和同期性测量结果的正确判定。

文中的一些观点和数据不仅适用于直动压气式负荷开关, 对其他各类型的负荷开关和压气式断路器的研发、制造也有借鉴作用。

参考文献:

- [1] 李 鹏, 梁维宏. 高压开关设备国内外产品水平[M]. 第五版. 西安: 西安高压电器研究院有限责任公司, 2011.
LI Peng, LIANG Weihong. Level of high voltage switchgear for internal and external[M]. Fifth edition. Xi'an: Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., 2011.
- [2] 李建基. 高压开关设备实用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
LI Jianji. High voltage switchgear practical technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [3] GB 1984—2003 高压交流断路器[S]. 2003.

GB 1984—2003 High-voltage alternating-current circuit-breakers[S]. 2003.

- [4] 吴鸣军. 中压开关柜接地开关电动操作的研发与设计[J]. 高压电器技术信息, 2011, 7(3): 23-27.
WU Mingjun. Development and design on electrical motor operation of grounding switch for MV switchgear cubicle [J]. Technical Review on High Voltage Apparatus, 2011, 7 (3): 23-27.
- [5] 苑 舜. 高压断路器弹簧操作机构[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
YUAN Shun. Spring-operation mechanism of high voltage circuit-breakers[M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [6] 徐国政, 张节容, 钱家骊, 等. 高压断路器原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
XU Guozheng, ZHANG Jierong, QIAN Jiali, et al. Principle and application for high-voltage circuit-breakers[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [7] GB 3804—2004 3.5~40.5 kV 高压交流负荷开关[S]. 2004.
GB 3804—2004 High-voltage alternating-current switches for rated voltage above 3.5 kV and less than 40.5 kV[S]. 2004.
- [8] GB 16926—2009 高压交流负荷开关—熔断器组合电器[S]. 2009.
GB 16926—2009 High-voltage alternating-current switch-fuse combination[S]. 2009.
- [9] 虞宇飞, 胡秋江, 施文耀. 配用弹簧液压机构的 SF_6 断路器刚分(合)速度的计算与分析[J]. 高压电器, 2007, 43(5): 329-332.

(下转第 80 页)

- LIU Gang, TANG Jun, ZHANG Ming. Discussion on correction of transmission line lightning trip-out rate based on lightning location data[J]. Insulators and Surge Arresters, 2011(6):95-102.
- [15] 张 怡, 张 锋. 雷电定位系统在电力系统中的应用[J]. 浙江电力, 2005(2):26-29.
- ZHANG Yi, ZHANG Feng. Application of lightning location system in electric power system [J]. Zhejiang Electric Power, 2005(2): 26-29.
- [16] 陈家宏. 雷电定位技术及其我国电网雷电监测网[C]//2007 年中国电机工程学会高电压专委会论文集. 北京:清华大学出版社, 2007:314-318.
- CHEN Jiahong. Lightning location technology and China grid lightning detection network [C]//Proceedings in 2007 of High Voltage Subcommittee of Chinese Society for Electrical Engineering. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 314-318.
- [17] 王海涛, 童杭伟, 冯万兴, 等. 浙江省地闪密度图的绘制方法及其有效性验证[J]. 高电压技术, 2008, 34(11): 2488-2491.
- WANG Haitao, TONG Hangwei, FENG Wanxing, et al. Drawing methods and validity for cloud-to-ground flash density map of Zhejiang Province [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(11):2488-2491.
- [18] 国网武汉高压研究院. 采用网格法确定雷电参数的统计方法: 中国专利, CN1936880[P]. 2007-03-28.
- Wuhan High Voltage Research Institute of SGCC. Statistical method for determining lightning parameters using grid method: China Patent, CN1936880[P]. 2007-03-28.
- [19] 赵 淳, 陈家宏, 王 剑, 等. 电网雷害风险评估技术研究[J]. 高电压技术, 2011, 37(12):3012-3021.
- ZHAO Chun, CHEN Jiahong, WANG Jian, et al. Research on technology of lightning disaster risk assessment for power system [J]. High Voltage Engineering. 2011, 37(12): 3012-3021.
- [20] 汤 明, 李成榕. 输电线路雷击闪络电流传感器的研制[J]. 电网与清洁能源, 2008, 24(8):22-25.
- TANG Ming, LI Chengrong. Development of a lightning flashover current sensor on transmission lines [J]. Power System and Clean Energy, 2008, 24(8):22-25.
- 刘 欢(1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向为输电线路防雷、风险评估。
- 阮江军(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电磁场数值计算及其工程应用、高压电器、电磁兼容。
- 李振柱(1961—), 男, 高级工程师, 研究方向为超高压输电线路灾害评估防治技术。

(上接第 74 页)

- YU Yufei, HU Qihong, SHI Wenyao. Calculation & analysis for opening(closing) speed of SF₆ circuit breakers with spring liquid pressure mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(5): 329-332.
- [10] 李 超, 孔祥飞, 陈晓飞, 等. 光栅位移传感器在高压开关机构位移测量中的应用 [J]. 仪表技术与传感器, 2011(12):81-95.
- LI Chao, KONG Xiangfei, CHEN Xiaofei, et al. Crating displacement sensor application in high voltage switch displacement measurement [J]. Instrument Technique and sensor, 2011(12):81-95.
- [11] GB/T 1800.2—2009 产品几何技术规范(GPS)极限与配合第二部分: 标准公差等级和孔轴极限偏差表[S]. 2009.
- GB/T 1800.2—2009 GPS—Limits and fits—Part2: Tables of standard tolerance grades and limits deviations for holes and shafts [S]. 2009.
- [12] 张美芸, 陈棱佳, 陈 磊. 公差配合与测量[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010.
- ZHANG Meiyun, CHEN Lengjia, CHEN Lei. Tolerance fit and measuring[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2010.
- 郭瑞艳(1967—), 女, 工程师, 主要从事中压开关设计及技术管理工作。