

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.11.014

直流转换开关喷口的气流场仿真和试验研究

孙珂珂, 钟建英, 程铁汉, 张友鹏, 马志华

(平高集团有限公司, 河南 平顶山 467001)

摘要: 为优化直流转换开关结构,增强直流转换开关的直流电流转换能力,针对不同的喷口截面积进行空载气流场的仿真分析。根据仿真结果设计了两种直流转换开关的喷口结构,并以低频振荡回路模拟直流电流进行直流转换开关的电流转换试验研究。试验情况与仿真结果相吻合,验证了气流场计算的正确性,为直流转换开关的优化设计提供了指导。

关键词: 直流转换开关; 喷口; 空载气流场; 电流转换

Simulation and Experimental Study on the Flow Field of DC Transfer Switch Nozzle

SUN Keke, ZHONG Jianying, CHENG Tiehan, ZHANG Youpeng, MA Zhihua

(Pinggao Group Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China)

Abstract: In order to optimize the structure of the DC transfer switch and enhance current commutation capability of the DC transfer switch, the simulation of no-load flow field have been made for different nozzle cross-sectional area. According to the simulation results, two structures of DC transfer switch nozzle have been designed, and the experimental study of current commutation is carried out by using low-frequency oscillation circuit analogue DC current. Test cases are almost as same as the simulation results, the correctness of the flow field calculation is verified and the guidance of DC transfer switch design is provided.

Key words: DC transfer switch; nozzle; no-load flow field; current commutation

0 引言

无源型直流转换开关由于具有结构简单、性能可靠等优点而广泛应用于高压、特高压直流输电工程中^[1-4]。无源型直流转换开关是利用电弧的不稳定性和负电阻特性与并联的振荡回路产生自激振荡,使电弧电流产生过零点,迫使电流开断。因此,无源型直流转换开关需要开断装置有相当高的电弧电压。

计算机仿真技术是高压断路器设计和研究的重要手段之一,准确的气流场仿真计算可以实现灭弧室的优化设计,缩短产品研发周期,减少试验的工作量。喷口是开断装置灭弧室的重要组成部分,通过对气流场的研究,深刻理解气流场的变化规律,可以有针对性的进行灭弧室优化,增强气吹,更强的气吹可以增强开断装置的气吹冷却效果,提高

电弧的负阻特性,即提高电弧电压,从而提升振荡电流的增幅速度^[5-15],此结论在引用文献中已详细介绍,鉴于篇幅原因,文中不作详细论述。

1 喷口气体压力特性计算

1.1 数学模型及边界条件

灭弧室内电弧的熄灭主要依靠高速流动的 SF₆ 气体将电弧吹灭。断路器灭弧室内的气流场是一个复杂的二维轴对称流场,气流场的计算满足质量、动量和能量守恒定律,控制方程如下:

质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho V_r)}{\partial r} = 0. \quad (1)$$

轴向动量方程

$$\rho \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial t} - \rho \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r u \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(u \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r u \frac{\partial V_z}{\partial z} \right). \quad (2)$$

径向动量方程

$$\rho \left(\frac{\partial V_r}{\partial t} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(u \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(ru \frac{\partial V_r}{\partial r} \right) - \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(u \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(ru \frac{\partial V_r}{\partial r} \right) - \frac{2uV_r}{r^2} \quad (3)$$

能量方程

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} + V_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \sigma E^2 - q + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + V_z \frac{\partial P}{\partial r} \quad (4)$$

欧姆定律

$$I_a = \int_0^{r_a} 2\pi r \sigma E dr \quad (5)$$

为真实准确模拟灭弧室内气流场的流动情况,在封闭的计算区域内由活塞运动来压缩 SF₆ 气体。由于移动边界条件比较复杂,计算时假设运动过程中静止的是实际运动的动触头、压气缸和喷口等形状复杂的部件,而移动部件是形状相对简单的静触头和活塞。这样能够简化计算,并且应用相对运动可以产生同样的模拟效果。

1.2 计算模型及方案

由于无源型直流转换开关的转换电流较小,一般为几千安培,可近似认为是空载条件下的开断,因此可通过灭弧室内空载气流场计算得出气体压力的变化情况^[16-23]。

文中采用 PHOENICS 软件进行气流场计算,并结合自编程序对 PHOENICS 进行二次开发,计算了 3 种喷口的气体压力情况。为研究喷口对直流电流转换的影响,除喷口喉部截面不同外,文中选用的初始气体压力、行程、速度和压气缸直径等均相同,计算方案见表 1。用于气流场计算的灭弧室简化图见图 1。

表 1 灭弧室的 3 种计算方案

Table 1 Three calculation plans of interrupter

方案	喉部截面/p.u.	充气压力
1	1.00	1.0 P ₀
2	1.05	1.0 P ₀
3	1.10	1.0 P ₀

注:P₀为标准大气压。

由于直流转换开关燃弧时间一般要求不超过 20 ms,所以将刚分点到分后 20 ms 时间内的压力变化作为重点研究对象。为了更好地观察分闸过程中 3 种方案灭弧室内压力的变化特性,对灭弧室内喷口上游、喷口喉部、喷口下游 3 个位置进行了压力监测,监测点位置见图 2。

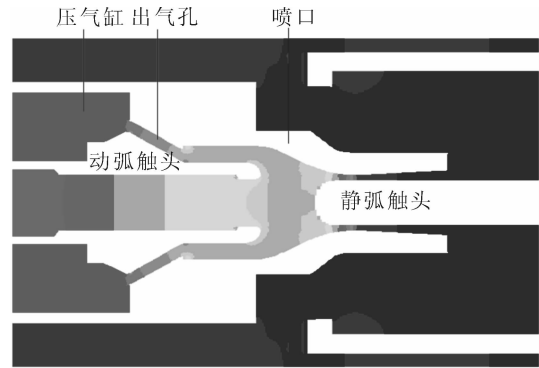
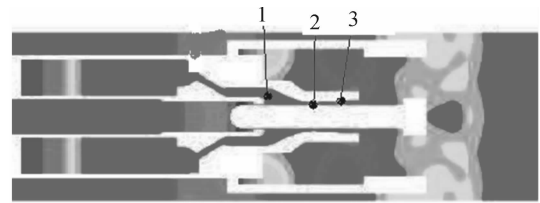


图 1 灭弧室简化图

Fig. 1 Simplification of interrupter



1—喷口上游; 2—喷口喉部; 3—喷口下游。

图 2 分闸过程中灭弧室内压力监测点

Fig. 2 Pressure monitoring point in interrupter during opening process

1.3 计算结果及分析

3 种方案分闸过程中喷口上游监测点压力的变化见图 3。

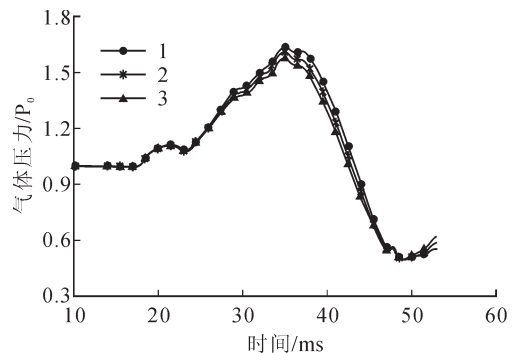


图 3 喷口上游监测点压力变化

Fig. 3 Upstream monitoring point pressure change of the nozzle

动静触头分离后,产生的电弧使热量和带电微粒会在喷口上游区域积聚,所以上游区域必须具有足够的气吹来冷却电弧弧根,并将带电微粒吹出该区域,才能保证电弧的最终熄灭。因此,喷口上游区域的压力变化对熄弧非常重要。在整个分闸过程中,方案 1 中上游区域监测点的压力最大,最大值可达 1.64 P₀,方案 2 中上游区域监测点的最大压力为 1.61 P₀,方案 3 中上游区域监测点的最大压力为 1.58 P₀。

3 种方案分闸过程中喷口喉部监测点压力的变

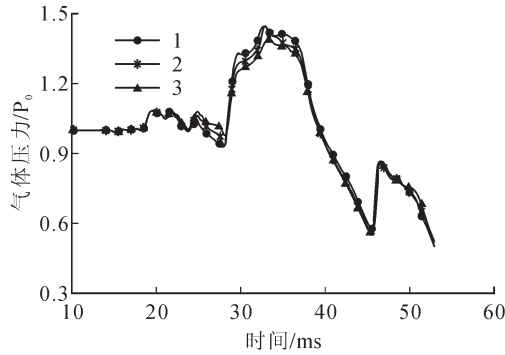


图4 喷口喉部监测点压力变化

Fig. 4 Throat monitoring points pressure variation of nozzle

化见图4。

喷口是一个先收缩后扩张的形状,喉部是喷口最为关键的部位。由图4可知,在分闸过程中,方案1中喷口喉部监测点的压力最大,最大值为 $1.45 P_0$,方案2中喷口喉部监测点的最大压力为 $1.43 P_0$,方案3中喷口喉部监测点的最大压力 $1.37 P_0$ 。

3种方案分闸过程中喷口下游监测点压力的变化见图5。

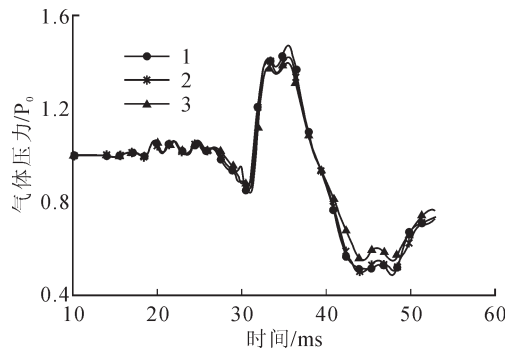


图5 喷口下游监测点压力变化

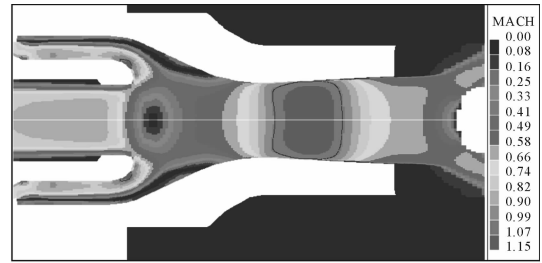
Fig. 5 Downstream monitoring point pressure change of the nozzle

由图5可知,在分闸过程中,方案1中喷口下游监测点的压力最大,最大值为 $1.46 P_0$,方案2中喷口喉部监测点的最大压力为 $1.42 P_0$,方案3中喷口喉部监测点的最大压力为 $1.39 P_0$ 。

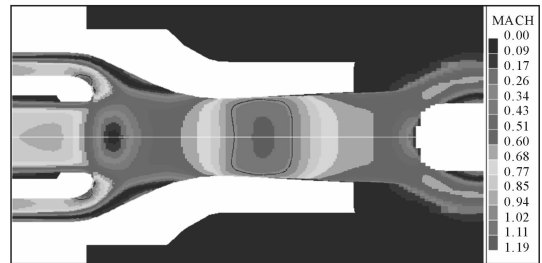
由图3和图5可看出,分闸时间约37 ms时,喷口上游和喷口下游压力达到最大值。

分闸时间40 ms时灭弧室内马赫数分布见图6。

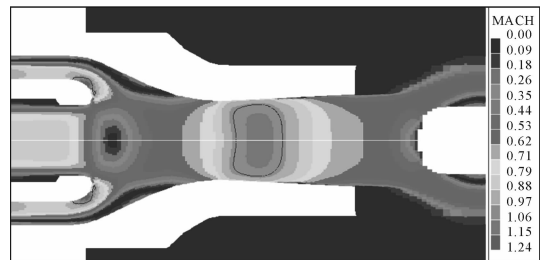
由图6可知,分闸时间为40 ms时,3种方案灭弧室内的马赫数除喷口喉部附件外皆小于1,方案1喉部的马赫数大于1的区域最大,方案2次之,方案3最小。即除喷口喉部附近,灭弧室内的流动为亚声速流,流体由喷口上游流向喉部时,流通通道收缩,流速增加,压力降低,则喉部监测点的压力小



(a)方案1



(b)方案2



(c)方案3

图6 分闸时间40 ms时灭弧室内马赫数分布

Fig. 6 Maher distribution in interrupter when opening time is 40 ms

于喷口上游监测点的压力。流体再由喷口喉部流向下游时,流通通道扩张,流速降低,压力增加,则喷口下游监测点的压力大于喷口喉部的压力^[24-25]。

通过对开断装置分闸过程中各点压力的变化及灭弧室内气体流动特性的分析,得出结论为:同样条件下,整个分闸过程中,方案1喉部各监测点的压力均最高,方案2次之,方案3最小,因此方案1对电弧的气吹能力要优于方案2和3。

2 试验研究

为验证仿真结果,针对方案1和方案3进行了喷口的结构设计,以验证喷口截面对气吹特性和直流电流转换的影响。直流电流转换试验主要有两种试验方法,一种是采用直流电源直接试验,另外一种是利用低频振荡模拟直流电源进行试验,笔者采用后者进行验证试验,试验回路原理图见图7。

三相电源首先通过升压变压器进行升压,经整流装置转换成直流电压。电路中, K_1 合闸、 K_2 分闸时,整流装置对电容器组 C_1 充电。 K_1 分闸、 K_2 合闸、试品CB合闸时,电容器组 C_1 和电抗器 L_1 构成振荡

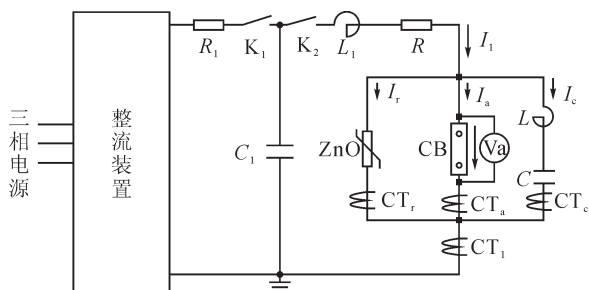


图 7 试验与测量回路

Fig. 7 Testing and measurement circuit

回路放电。放电电流的频率由 C_1 、 L_1 的参数确定, 电流幅值由 C_1 的充电电压确定。通过选择合适的参数, 该系统的电流振荡的频率为 4.12 Hz。

采用相同的转换回路参数配置和分闸速度, 对两种方案进行了多次的试验研究, 试验时转换电流为 5 000 A 左右。方案 1 的燃弧时间在 20 ms 左右, 转换电流和燃弧时间比较稳定; 方案 3 的燃弧时间在 23 ms 左右, 并且多次出现转换失败现象。说明方案 3 在采用该转换回路参数配置时已经达到了极限的电流转换能力。转换电流相同时两种方案的振荡电流波形对比情况见图 8。

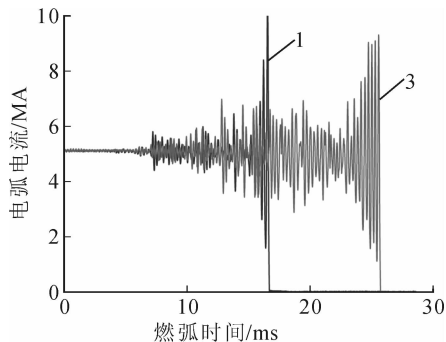


图 8 两种方案振荡电流对比

Fig. 8 Comparison of two schemes for oscillating current

由图 8 可知, 方案 1 的电流转换能力明显强于方案 3, 随着灭弧室开距的增大方案 1 的振荡电流基本处于增长状态, 较快的完成电流过零; 而方案 3 多次出现电流振荡幅值的跌落, 之后振幅再增长, 直至灭弧室开距较大时才出现过零点, 从而延长了电流振荡过零的时间。

3 对比分析

3.1 灭弧室特性分析

开断装置的分闸时间为 20 ms 左右, 从接到分闸命令到完全打开的时间为 50 ms 左右, 灭弧室开始动作到完全打开的时间约为 15~50 ms。灭弧室打开过程根据其运动特性可分为预压缩、触头堵塞、触头打开 3 个阶段。其中触头打开阶段是从静弧触头拉出喷口喉部到灭弧室完全打开瞬间。这个过程大

约为 30~50 ms, 这一阶段, 喷口逐渐打开, 气体压力集中释放, 气体急速喷出喷口, 会产生强烈的吹弧。

3.2 对比分析

喷口下游压力曲线、行程曲线的对应情况见图 9。

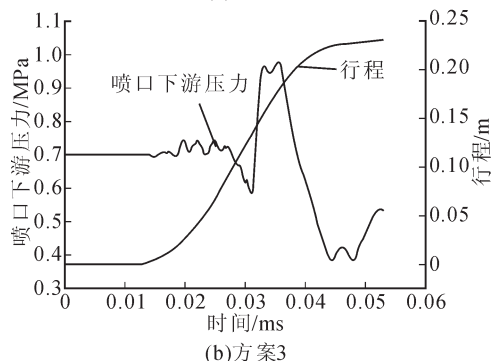
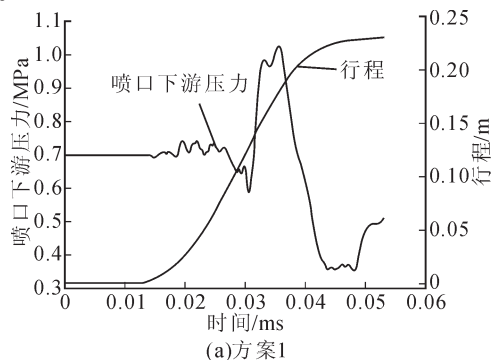


图 9 行程、喷口下游压力对应情况

Fig. 9 Corresponding of trip and downstream pressure

根据仿真分析当开断装置分闸电磁铁带电 30 ms 后, 灭弧室开始产生强烈的气吹, 与实际测量情况基本一致。方案 1 和方案 3 均在 30 ms 左右时开始产生强烈的振荡电流; 方案 1 在 37 ms 左右产生过零点, 方案 3 在 43 ms 左右产生过零点。

由仿真分析和试验情况的对比可知, 方案 1 由于喷口喉部截面积较小, 在相同条件下喷口上游、喉部、下游的气体压力均较高, 能产生更为强烈的气吹, 更强的气吹可以增强开断装置的气吹冷却效果, 提高电弧的负阻特性, 即提高电弧电压, 从而提升振荡电流的增幅速度, 使电弧电流快速的产生过零点。

方案 3 的喷口喉部截面积较大, 在相同条件下喷口上游、喉部、下游的气体压力均较低, 不能产生强烈的气吹, 导致需要靠增大触头开距来提高电弧电压, 从而产生过零点。

4 结论

通过空载气流场仿真和直流电流转换试验的研究, 得出如下结论:

1) 相同条件时, 在不影响气体流动的前提下, 喷

口喉部截面越小, 气吹越强烈, 可转换的直流电流越大, 燃弧时间越短;

2) 空载气流场仿真结果和试验情况相吻合, 直流转换开关的燃弧时间基本在气吹较强烈的时间区间。

参考文献:

- [1] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 71-79.
ZHAO Wanjun. High voltage direct current transmission engineering technologies[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 71-79.
- [2] 浙江大学发电教研组直流输电科研组. 直流输电[M]. 北京: 电力工业出版社, 1982: 352-355.
DC Transmission Group of Generation Teaching and Research Team in Zhejiang University. DC transmission[M]. Beijing: Power Industry Press, 1982: 352-355.
- [3] 国网运行有限公司. 高压直流输电岗位培训教材开关设备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 136-149.
SGCC Operation Limited Company. HVDC job training material for switch equipment[M]. Beijing: China Electric Power Press, 136-149.
- [4] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑-2008 年[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 221-234.
LIU Zhenya. Album of research achievements on UHVDC (2008) [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009: 221-234.
- [5] 郑占锋, 邹积岩, 董恩源, 等. 直流开断与直流断路器[J]. 高压电器, 2006, 42(6): 445-449.
ZHENG Zhanfeng, ZOU Jiyan, DONG Enyuan, et al. DC interruption and DC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(6): 445-449.
- [6] 孙广生, 王永荣, 冯荣琼, 等. 自激振荡式高压直流断路器开断能力的研究[J]. 电工技术学报, 1993(4): 6-10.
SUN Guangsheng, WANG Yongrong, FENG Rongqiong, et al. An investigation on interruption capability of an HVDC self-excited oscillation breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1993(4): 6-10.
- [7] 严萍, 王永荣, 孙广生, 等. 直流开断过程的模拟计算[J]. 中国电机工程学报, 1993, 13(S1): 87-91.
YAN Ping, WANG Yongrong, SUN Guangsheng, et al. Study on arc-flow interaction for a high voltage SF₆ circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13(S1): 87-91.
- [8] 张力超, 张节容, 吉嘉琴. 高压直流断路器的自激振荡计算[J]. 高压电器, 1991, 27(2): 26-29.
ZHANG Lichao, ZHANG Jierong, JI Jiaqin. Computation of the self-excited oscillation in high voltage DC circuitbreaker[J]. High Voltage Apparatus, 1991, 27(2): 26-29.
- [9] 孙广生, 王永荣, 冯荣琼, 等. 自激振荡式高压直流断路器开断能力的研究[J]. 电工技术学报, 1993(4): 6-10.
SUN Guangsheng, WANG Yongrong, FENG Rongqiong, et al. An investigation on interruption capability of an HVDC self-excited oscillation breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1993(4): 6-10.
- [10] BACHMAN B, MAUTHE G, LIPPS H P, et al. Development of a 500 kV airblast HVDC circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, PER-5(9): 43-43.
- [11] VITHAYATHIL J J, COURTS A L, PETERSON W G, et al. HVDC circuit breaker development and field tests[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, PER-5(10): 29-30.
- [12] KAIROUANI N, PERRIN B, ROBIN-JOUAN P, et al. Numerical analysis of the SFB dielectric recovery in high voltage circuit-breakers around current zero[C]//Piscat of the 17th International Conference on Gas Discharges and Their Application Sway, USA: IEEE, 2008: 145-148.
- [13] 孙舒捷, 邵能灵, 薄志谦. 高压直流输电工程中的直流断路器设计及应用仿真[J]. 华东电力, 2009, 37(3): 412-417.
SUN Shujie, TAI Nengling, BO Zhiqian. Design and simulation of DC breakers for HVDC projects[J]. East China Electric Power, 2009, 37(3): 412-417.
- [14] 张力超. 高压直流断路器自激振荡问题的研究[D]. 北京: 清华大学, 1991.
ZHANG Lichao. Investigation on the self-excited oscillation in HVDC circuit breaker[D]. Beijing: Tsinghua University, 1991.
- [15] 郑占锋, 邹积岩, 董恩源, 等. 直流开断与直流断路器[J]. 高压电器, 2006, 42(6): 445-449.
ZHENG Zhanfeng, ZOU Jiyan, DONG Enyuan, et al. DC interruption and DC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(6): 445-449.
- [16] 刘晓明, 曹云东, 王尔智. 高压 SF₆ 断路器电弧与气流相互作用研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 151-155.
LIU Xiaoming, CAO Yundong, WANG Erzhi. Study on arc-flow interaction for a high voltage SF₆ circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 151-155.
- [17] 刘晓明, 袁大勇, 曹云东, 等. SF₆ 断路器磁流体二维电弧模型化与仿真[J]. 沈阳工业大学学报, 2009, 31(3): 257-261.
LIU Xiaoming, YUAN Dayong, CAO Yundong, et al. 2D arc modeling and simulation of SF₆ circuit breaker based on magnetohydrodynamics[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2009, 31(3): 257-261.
- [18] 刘晓明, 王尔智, 曹云东. 高压 SF₆ 断路器电弧动态模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 102-106.
LIU Xiaoming, WANG Erzhi, CAO Yundong. Study on dynamic arc model for high voltage SF₆ circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 102-106.
- [19] YAN J D, FANG M T C, HALL W. The development of PC

- based CAD tools for auto 2 expansion circuit breaker design[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1999(14): 176-181.
- [20] YAN J D, ZHANG J L, KWEON K, et al. Computer simulation of high voltage circuit breakers[M]. Toulouse France: The XVth International Conference on Gas Discharges and their Applications, 2004: 1025-1034.
- [21] 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 HV auto-expansion SF₆ circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 92-97.
- [22] 王尔智, 刘晓明, 曹云东. 考虑湍流影响的高压 SF₆ 断路器喷口优化设计[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 30-34.
WANG Erzhi, LIU Xiaoming, CAO Yundong. Optimization design for arc nozzle of high voltage SF₆ circuit breaker considering turbulent influence[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 30-34.
- [23] 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 processes in SF₆ circuit breaker nozzle[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 9-13.
- [24] FANG M T C, ZHUANG Q, GUO X J. Current-zero behavior of an SF₆ gas-blast arc. Part II: Turbulent flow[J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 1994(27): 74-83.
- [25] 黎 斌. SF₆ 高压电器设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
LI Bin. SF₆ high voltage apparatus design[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- 孙珂珂(1982—), 男, 硕士, 从事高压开关科研工作。

简讯

CIGRE女工程师论坛在南京召开

2015年9月24日,由 CIGRE 和 CIGRE 中国国家委员会共同组织,中国女科技工作者协会、南瑞继保电气有限公司、国网英大传媒投资集团公司共同协办的 CIGRE 女工程师论坛在南京召开。会议主题为“我们可以做的更好”。来自国内外电力企业、科研机构的女性工程技术人员、来自高校的电气工程专业的教师和学生等近 120 位代表参加了论坛。

论坛由 CIGRE 秘书长助理 Rachel MAHON 女士主持。

CIGRE 技术委员会主席 Mark WALDRON 先生,中国科协副主席、中国女科技工作者协会副主席程东红女士, CIGRE 中国国家委员会前副主席李若梅女士参加会议。来自国内外杰出的电力界女工程师代表做了精彩发言。她们是,来自挪威的 CIGRE B5 专委会秘书 Rannveig S. J. Løken 女士,河海大学副校长陈星莺女士、新西兰国家委员会主席 Rebecca STEWART 女士、华北电力大学教授毕天姝女士、西安高压电气研究院《高压电器》主编薛晔女士、中国南方电网电力调度中心继保处处长赵曼勇女士等。

女工程师们通过图文并茂的报告,展示了自身的职业成长历程、事业成就以及在促进家庭和事业平衡中的经验和体会。与会的代表们表示受到很大的鼓舞和启迪,特别是在校的女学生们表示,以后也希望能成长为一名优秀的女工程师,并对自身充满了信心。在会议讨论环节中,英国曼彻斯特大学的 Peter Crossley 教授根据自身的任教经历认为中国过去的 30 年已经有了极大的发展,工科的女性留学生比例也比 20 世纪末有了很大提升,他认为中国女学生非常的刻苦和优秀,也有不少获得了较高的职位。他非常欢迎中国的女性学生到曼彻斯特大学留学。