

新型 1 100 kV 隔离开关的开发研制

吴文海, 余良清, 王 娜, 刘吉成

(新东北电气集团高压开关设备有限公司, 沈阳 110025)

摘要: 隔离开关是 GIS 设备中的关键结构, 特别是对于特高压电压等级, 研制具有高性能及高可靠性的隔离开关是开发 GIS 过程中的重中之重。文中介绍了一种新型 1 100 kV 隔离开关的结构特点及性能参数, 该隔离开关不带有分合闸电阻, 整体结构体积小, 重量轻, 布置灵活。采用仿真分析软件对新型隔离开关的绝缘性能及操作时可能产生的 VFTO 进行计算, 并与原有结构隔离开关的计算结果进行对比分析, 计算结果表明: 该新型隔离开关性能安全可靠, 各项型式试验的顺利通过验证了新型隔离开关设计的合理性及计算结果的正确性。目前, 该新型 1 100 kV 隔离开关已经成功应用于某特高压变电站工程中。

关键词: 特高压; 隔离开关; 分合闸电阻; 绝缘性能; VFTO

Development of a New Type 1 100 kV Disconnect Switch

WU Wenhai, YU Liangqing, WANG Na, LIU Jicheng

(High Voltage Switchgear Co., Ltd., New Northeast Electric Group, Shenyang 110025, China)

Abstract: Disconnect switch is one of the important part in GIS especially in the UHV level. It is very important to develop the disconnect switch with excellent performance and security. The development process and structure characteristic of 1 100 kV disconnect switch is introduced in this paper. The new disconnect switch is small and light. The disposal of the new disconnect switch is random. The insulation performance and VFTO causing by disconnect switch is calculated using simulation software. The results are contrasted with the old disconnect switch. It is indicated that the new disconnect switch is safe and reliable. Simultaneously, the design of the new type 1 100 kV disconnect switch is proved to be reasonable by the type test. Recently, the disconnect switch is running in UHV station.

Key words: UHV; disconnect switch; parallel resistor; insulation performance; VFTO

0 引言

随着中国经济建设的蓬勃发展, 对电网建设也提出了更高的要求, 2011 年 12 月 16 日, 1 000 kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程扩建工程正式投入运行, 调试期间最大输送功率达到 5 720 MW, 完全具备了稳定输送 5 000 MW 电力的能力, 充分验证了特高压大容量、远距离、低损耗输电的优势, 成为世界上运行电压最高、输送容量最大、技术水平最先进的交流输电工程^[1-2]。

2006 年, 东北某电气集团高压开关设备有限公司采用消化引进日本 AE-power 公司 1 100 kV GIS 技术, 承担了 1 000 kV 特高压交流试验示范工程南

阳开关站的 H-GIS 供货任务^[3-5]。为满足中国特高压电力市场的需求, 增强产品的竞争能力, 该公司决定研制具有自主知识产权的 1 100 kV GIS 设备。

隔离开关是 GIS 设备中的关键结构^[6-7], 研制具有高性能及高可靠性的隔离开关是开发 GIS 过程中的关键环节。随着电网结构发生巨大变化和电压等级的升高, 使隔离开关气室更容易发生闪络和击穿, 因而其绝缘结构的设计受到越来越多的关注^[8-12]。此外, 隔离开关操作时, 会产生特快速暂态过电压(简称 VFTO), 可能威胁一次设备绝缘, 干扰二次设备工作, 因此, 设计隔离开关时, 必须考虑其操作时产生 VFTO 的大小及影响^[13-16]。

文中介绍了新型 1 100 kV 隔离开关与原有隔离开关的结构特点及主要技术参数对比, 对两者的绝缘

性能进行仿真分析,并对 1 000 kV 济南变电站工程隔离开关操作引起的 VFTO 大小进行计算。新型隔离开关与原有隔离开关的计算结果对比表明:新型隔离开关的性能安全可靠,相关型式试验的顺利通过进一步验证了新型 1 100 kV 隔离开关设计的合理性。

1 新型 1 100 kV 隔离开关的结构特点

2006 年,该公司引进日本 AE-power 公司的

1100 kV GIS 设备,其中隔离开关体积庞大,整体重量较大,该隔离开关带有分合闸电阻,采用电动弹簧操动机构。

公司自主研发的新型隔离开关结构小型化,不带分合闸电阻,在保证隔离开关所要求的各项性能的前提下,无论从结构上还是性能上,均比原隔离开关具有较大优势。新型隔离开关与原有隔离开关主要技术参数对比见表 1。

表 1 新型隔离开关与原有隔离开关主要技术参数对比

Table 1 Parameter contrast of the new disconnect switch and old disconnect switch

项目	新型隔离开关	原有隔离开关
额定电压/kV	1 100	1 100
额定电流/A	6 300	8 000
额定频率/Hz	50	50
1 min 工频耐受电压(rms)/kV	1 100(对地)/(1 100+635)(断口)	1 100(对地)/(1 100+635)(断口)
雷电冲击耐受电压(峰值)/kV	2 400(对地)/(2 400+AC900)(断口)	2 400(对地)/(2 400+AC900)(断口)
操作冲击耐受电压(峰值)/kV	1 800(对地)/(1 675+AC900)(断口)	1 800(对地)/(1 675+AC900)(断口)
额定压力/MPa	0.36	0.50
最低功能压力/MPa	0.29	0.40
机械寿命/次	10 000	5 000

新型 1 100 kV 隔离开关与原有隔离开关结构对比见图 1。新型隔离开关有如下结构特点:

1) 新型隔离开关不带分合闸电阻,整体结构更加简洁、小型化;

2) 原有隔离开关体积较大,整体重量为 6 000 kg,新型隔离开关体积较小,整体重量为 1 000 kg,重量大大减轻,占地面积减小;

3) 新型隔离开关布置灵活,可以简化总体 GIS 布置结构;

4) 新型隔离开关采用直连操动机构,不需要拐臂及连杆转换,降低了传动环节故障的风险;

5) 新型隔离开关触头材料采用更加耐烧的铜钨合金,以保证隔离开关在切断容性和感性电流时产生的电弧不会使触头烧蚀;

6) 新型隔离开关拉杆采用环氧树脂浇注而成,机械性能及绝缘性能更加安全可靠。

2 新型 1 100 kV 隔离开关绝缘性能计算分析

对于隔离开关,由于其主要功能是在设备维修时将线路中的各元件进行电气隔离,形成有效可见断口,因此其断口绝缘至关重要,尤其对于特高压隔离开关,需要具备更高的绝缘水平^[7]。

文中对隔离开关绝缘试验中 3 种较苛刻工况下的电场分布进行三维电场强度分析^[18-19],这 3 种工况分别为:①分闸位置,静侧加载雷电冲击耐受

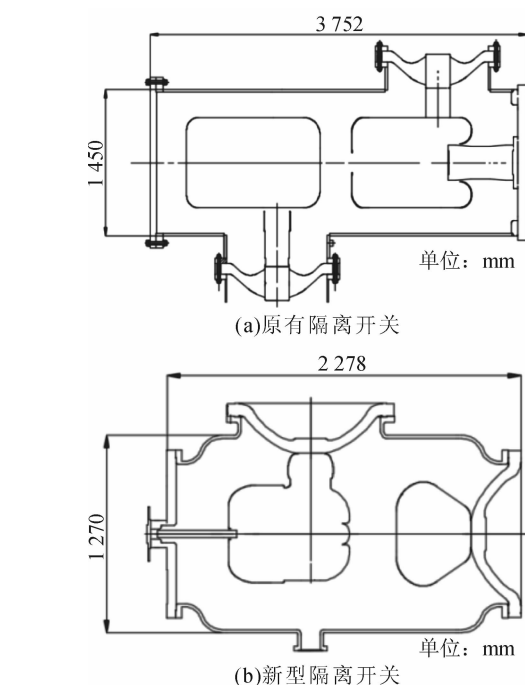


图 1 原有隔离开关与新型隔离开关结构对比
Fig. 1 Comparison of old disconnect switch and new disconnect switch

电压 2 400 kV,动侧加载反向相电压峰值 900 kV,罐体接地 0 V;②分闸位置,动侧加载雷电冲击耐受电压 2 400 kV,静侧加载反向相电压峰值 900 kV,罐体接地 0 V;③合闸位置,高电位上加载雷电冲击耐受电压 2 400 kV,罐体接地 0 V。

采用专业的有限元分析软件进行分析计算,3种工况下新型隔离开关的电位等值云图分布见图2~4,新型隔离开关及原有隔离开关绝缘性能计算结果对比见表2。

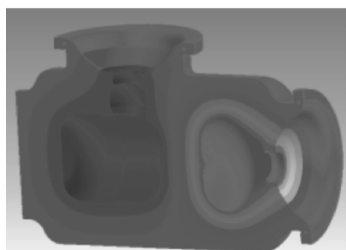


图2 工况1
Fig. 2 Mode 1

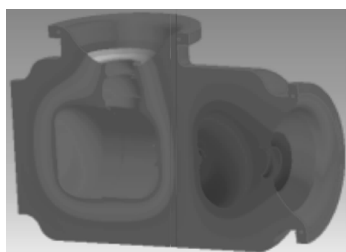


图3 工况2
Fig. 3 Mode 2

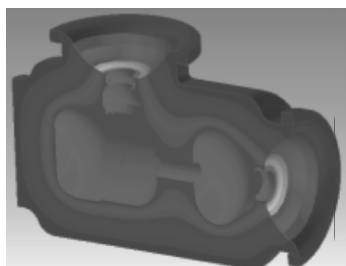


图4 工况3
Fig. 4 Mode 3

表2 新型隔离开关及原有隔离开关绝缘性能
计算结果对比

Table 2 Insulation contrast of the new disconnect
switch and the old disconnect switch

工况	新型隔离开关	原有隔离开关	kV/cm
1(分闸静侧加高压)	174.3	239	
2(分闸动侧加高压)	160.5	227	
3(合闸对地)	150.4	197	

新型110 kV隔离开关最低功能压力为0.29 MPa,该压力下电场强度许用值^[20]为208 kV/cm,从表2计算结果可知,110 kV隔离开关在3种工况下电场强度计算结果均小于电场强度许用值,并且新型隔离开关电场强度计算结果优于原有隔离开关电场强度计算结果,因此新型110 kV隔离开关绝缘性能安全可靠,并具有很大的安全裕度。

3 新型110 kV隔离开关操作引起的VFTO计算分析

隔离开关操作过程中,由于其动触头移动速度较慢,会引起触头间多次的预击穿或重击穿,每一次击穿都会产生过电压(VFTO)。随着GIS电压等级的提高,当隔离开关操作时,在GIS的不同部位,如隔离开关本身、绝缘间隙、绝缘子、套管以及所连接的二次设备均会出现故障。因此,在设计GIS时必须考虑VFTO的影响^[21]。

在隔离开关断口两侧并联电阻可以有效地降低VFTO的幅值,但使隔离开关结构非常复杂并容易引起相关可靠性问题^[22]。因此,新型110 kV隔离开关的设计在满足VFTO幅值小于允许值的条件下,不设置分合闸电阻。

VFTO的幅值与被操作隔离开关所处的位置、电站的布置及母线上的残余电荷等众多因素有关。文中以1000 kV济南变电站工程为研究背景,采用EMTP-ATP暂态过电压分析软件对新型110 kV隔离开关操作引起的VFTO进行计算分析。1000 kV济南变电站主接线搭建的计算分析模型见图5。其中DS₁₃、DS₁₄、DS₆₃、DS₆₄为新型隔离开关。等效模型中,隔离开关操作时等效为电阻电感与开关^[23]。

仿真过程按照偏严格考虑,即假定隔离开关负载侧残压为-1 p.u.,电源侧电压为1 p.u.时发生击穿,以得到最严重工况下的VFTO幅值。通过对隔离开关不同操作方式时产生的VFTO进行计算,结果表明当操作DS₁₃时产生的VFTO最大,幅值为1830 kV,即为2.0 p.u.(1 p.u.=898 kV),VFTO曲线见图6。

考虑VFTO波前时间比雷电冲击波短,GIS绝缘的耐受电压稍有提高,所以VFTO与雷电冲击耐受电压比较时安全裕度取15%是合适的^[16],110 kV雷电冲击耐受电压为2400 kV,因此VFTO幅值应小于2087 kV。

在计算隔离开关操作产生的VFTO时,新型隔离开关与原有隔离开关的计算模型、计算结果对比见表3。从表3对比可以看出,新型隔离开关操作时产生的VFTO幅值虽然比原有隔离开关操作时产生的VFTO略大,但计算结果仍然小于许用值2087 kV的要求,所以,即使不带有分合闸电阻,新型隔离开关操作时产生的VFTO仍然可以满足要求。

4 型式试验验证

根据文中计算结果,研制的新型110 kV隔离

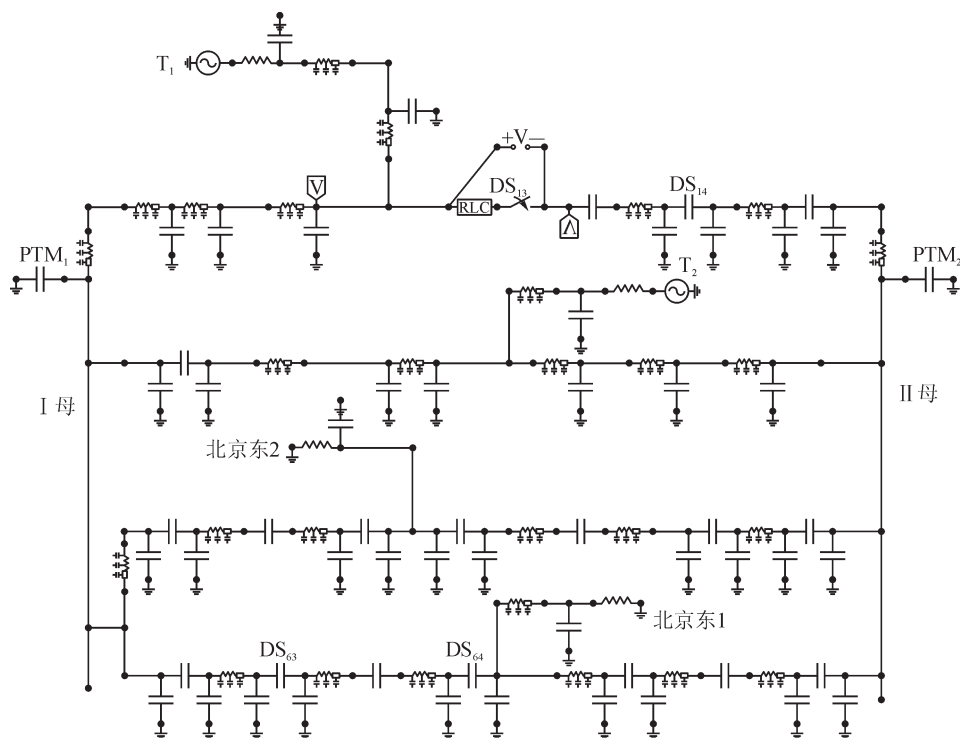


图 5 1 000 kV 济南变电站等效模型

Fig. 5 The equivalent modal of Jinan station

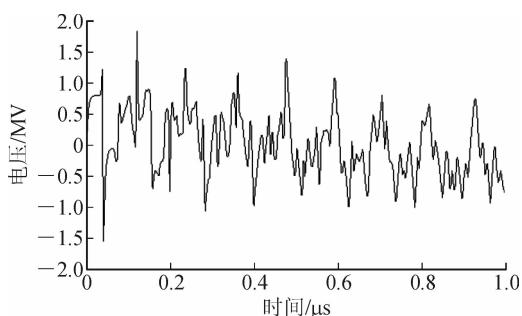


图 6 操作 DS₁₃ 产生的 VFTO 曲线

Fig. 6 VFTO causing by DS₁₃

表 3 新型隔离开关与原有隔离开关操作时产生的 VFTO 最大值对比

Table 3 VFTO contrast of the new disconnector and the old disconnector

类型	计算模型	VFTO最大值	应用工程
新型隔离开关		1 830 kV	济南工程
原有隔离开关		1 365 kV	南阳工程

开关在机械工业高压电器产品质量检测中心和国家高压电器质量监督检验中心顺利通过了国家标准要求的全部试验。

4.1 绝缘试验

新型 1 100 kV 隔离开关顺利通过了标准要求的全部绝缘试验, 包括: 1 min 工频耐受电压 1 100 kV

(对地)、1 100 kV+635 kV(断口); 操作冲击耐受电压 1 800 kV(对地)、1 675 kV+900 kV(断口); 雷电操作冲击耐受电压 2 400 kV(对地)、2 400 kV+900 kV(断口); 局部放电试验 762 kV, 1.1 pC。绝缘试验极布置见图 7。



图 7 绝缘试验

Fig. 7 Insulation test

4.2 开合母线充电电流试验(方式 3)

开合母线充电电流 2 A, 次数 50 次, 过电压值在 2.0 p.u. 以下, 试验顺利通过, 试验布置见图 8。

4.3 开合母线转换电流试验

开合母线转换电流 3 200 A, 次数 100 次, 试验顺利通过, 试验布置见图 9。

5 工程应用

原有隔离开关由于结构限制, 工程布置中只能

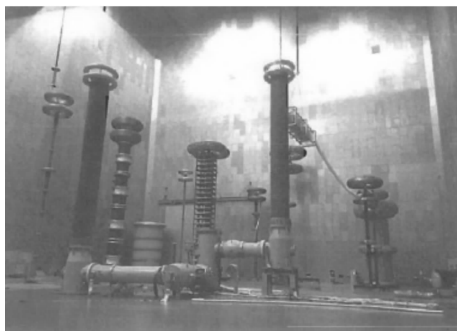


图8 开合母线充电电流试验

Fig. 8 Switching of bus-charging current test

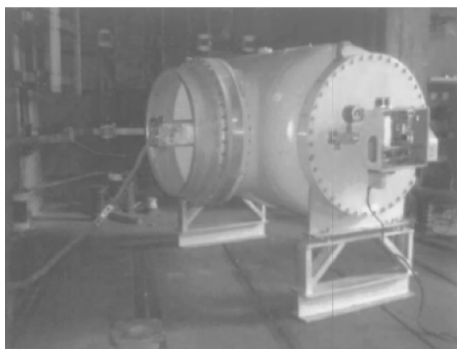


图9 开合母线转换电流试验

Fig. 9 Switching of bus transferring current test

采用竖式型式,而新型隔离开关结构小巧,布置上可以采用竖式及横式型式,且灵活多变,因此在工程布置中更为方便。

目前,该新型 1 100 kV 隔离开关已应用于特高压济南工程中,已于 2016 年 8 月并网运行,运行情况良好。新型 1 100 kV 隔离开关在济南工程现场见图 10。



图10 济南现场隔离开关图片

Fig. 10 The disconnect switch in Jinan

6 结论

新东北电气自主研发了高性能、高可靠性的特高压 GIS 母线,通过对其绝缘性能及操作时产生的 VFTO 的相关研究表明:

1)在各种工况下,新型 1 100 kV 隔离开关的电场强度值均小于许用场强值,因此其绝缘性能安全可靠;

2)根据特高压济南工程进行了 VFTO 计算,计算结果表明:即使不带有分合闸电阻,操作隔离开关时产生的 VFTO 最大值小于雷电绝缘水平的 15%,满足绝缘配合的要求;

3)相关型式试验的顺利通过及工程应用,进一步验证了新型隔离开关结构设计的合理性。

新型 1 100 kV 隔离开关的成功研制及顺利运行是我国乃至世界上特高压交流输电技术和开关设备制造技术的突破和创新,标志着我国特高压设备的研制水平迈上了新的台阶。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压交流输电技术研究成果专辑[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
LIU Zhenya. The achievements of UHV AC power transmission[M]. Beijing: Electric Power Press, 2012.
- [2] 钟振蛟. 国产高压交流隔离开关的发展和向特高压的跨越[J]. 高压电器, 2007, 43(4): 265-267.
ZHONG Zhenjiao. Development of high-voltage AC disconnect and span of UHV[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(4): 265-267.
- [3] 孙永恒, 张 铎, 孟维东, 等. 新沈高 1 100 kV GIS 的结构及计算[J]. 高压电器, 2007, 43(5): 354-357.
SUN Yongheng, ZHANG Duo, MENG Weidong, et al. The structure and analysis for 1 100 kV GIS of NHVS[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(5): 354-357.
- [4] 孙永恒, 张 铎, 赵云学, 等. 800 kV 罐式 SF₆ 断路器的研制开发[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 1-4.
SUN Yongheng, ZHANG Duo, ZHAO Yunxue, et al. Development of tank 800 kV circuitbreaker[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 1-4.
- [5] 牛文军, 王 娜, 魏俊梅, 等. 800 kV GIS 设备的研制与开发[C]//2012 输变电年会论文集. 上海: 西安高压电器研究院, 2012: 1-4.
NIU Wenjun, WANG Na, WEI Junmei, et al. Development of 800 kV GIS[C]//the Conference of 2012 Transmission and Transformation Power. Shanghai: XIHARI, 2012: 1-4.
- [6] 罗学琛. SF₆ 气体绝缘全封闭组合电器[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
LUO Xuechen. SF₆ gas insulated metal inclosed switchgear [M]. Beijing: China Power Press, 2009.
- [7] 林 莘. 现代高压电器技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
LIN Xin. High voltage electric appliance design[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2011.

- [8] 徐光辉. 800 kV 隔离开关屏蔽环设计[J]. 高压电器, 2006, 42(5): 337-339.
XU Guanghui. Design of shield ring for 800 kV Disconnect[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(5): 337-339.
- [9] 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 numerical analysis of 1 100 kV DS and ES[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2007, 29(5): 524-533.
- [10] 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): 1-5.
LIN Xin, CAI Qiang, XU Jianyan, et al. Large electric analysis of 1 100 kV disconnecter based on the area decomposition method[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(2): 1-5.
- [11] 韩国辉, 谭盛武, 韩书漠. ZF27-800 型 GIS 的关键技术[J]. 高压电器, 2008, 44(1): 26-28.
HAN Guohui, TAN Shengwu, HAN Shumo. The key technology of ZF27-800 type of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(1): 26-28.
- [12] 王 娜, 张 浩, 魏俊梅. 新型 800 kV 隔离开关三维电场数值分析[J]. 电气时代, 2013(9): 76-78.
WANG Na, ZHANG Hao, WEI Junmei. Numerical analysis of three-dimensional electric field for new type 800 kV disconnecter[J]. Electric Age, 2013(9): 76-78.
- [13] 何善庆. GIS 中的快速暂态过程[J]. 高压电器, 1995, 31(2): 41-46.
HE Shanqing. The very fast transient overvoltage procedure in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 1995, 31(2): 41-46.
- [14] 史保壮, 李智敏, 张文元. 超高压 GIS 中快速暂态过电压造成危害的原因分析[J]. 电网技术, 1998, 22(1): 1-3.
SHI Baozhuang, LI Zhimin, ZHANG Wenyuan. The hazard analysis of very fast transient overvoltage for UHV GIS[J]. Power System Technology, 1998, 22(1): 1-3.
- [15] 张重远, 梁贵书, 崔 翔. GIS 隔离开关操作对二次设备的影响[J]. 高电压技术, 2002, 28(2): 5-7.
ZHANG Chongyuan, LIANG Guishu, CUI Xiang. The influence of GIS disconnecter operation for equipment[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(2): 5-7.
- [16] OZAWA J, YAMAGIWA T, HOSOKAWA M, et al. Suppression of very fast transient overvoltage during gas disconnecter switching in GIS[J]. IEEE Transaction on PWRD, 1986, 1(4): 194-201.
- [17] 严 璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
YAN Zhang, ZHU Deheng. Insulation technology of high voltage[M]. Beijing: Electric Power Press, 2007.
- [18] ABDEL-SLAM M, ANIS H, EL-MORSHEDEY A, et al. High voltage engineering: theory and practice[M]. New York: Marcel Dekker Inc., 2000: 34-40.
- [19] 黎 斌. SF₆ 高压电器设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
LI Bin. SF₆ High voltage electric appliance design[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2009.
- [20] 徐国政, 张节容. 高压断路器原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
XU Guozheng, ZHANG Jierong. The theory and application of high voltage circuit breaker[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [21] POVH D, SCHMITT H, VALCKER O. Modeling and analysis guidelines for very fast transients[J]. IEEE Transaction on PWRD, 1996, 11(4): 2028-2035.
- [22] YAMAGATA Y, TANAKA K, NIAHIWAKI S, et al. Suppression of VFT in 1 100 kV GIS by adoption resistor-fitted disconnecter[C]//IEEE/PES Summer Meeting. [S.l.]: PWRD, 1995: 499-503.
- [23] 吴文海, 曹祥麟. 电力系统电磁暂态计算与 EMTP 应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
WU Wenhui, CAO Xianglin. The electromagnetic transient calculation and EMTP application for electric power system[M]. Beijing: China Water Power Press, 2012.

吴文海(1977—), 男, 高级工程师, 从事高压开关设备的研制及管理工作。

余良清(1968—), 男, 教授级高级工程师, 总工, 从事高压开关设备的研制及管理工作。

王 娜(1981—), 女, 高级工程师, 硕士, 从事高压开关设备的研制及产品结构仿真分析工作。

刘吉成(1981—), 男, 高级工程师, 本科, 从事特高压 1 100 kV GIS 工程设计工作。