

特高压电器设备绝缘试验技术研究

张小勇, 贾涛, 王韵, 王建生

(西安高压电器研究所, 陕西 西安 710077)

Study on Insulation Test Techniques for Ultra-high-voltage Equipment

ZHANG Xiao-yong, JIA Tao, WANG Yun, WANG Jian-sheng

(Xi 'an High Voltage Apparatus Research Institute, Xi 'an 710077, China)

摘要: 介绍了西高所高电压试验室实施特高压电器设备绝缘试验的情况及存在的问题, 针对几个难度较大试验项目的试验技术进行了探讨, 如套管的电容量及介质损耗测量、局部放电测量、开关设备断口间的联合电压试验、隔离开关开合容性及感性小电流试验、直流换流阀单阀的冲击试验, 并且在最后提出了比较可行的试验方案。

关键词: 特高压; 电器设备; 绝缘试验

中图分类号: TM85

文献标识码: A

Abstract: The first ultra-high voltage AC transmission project is in construction now. And various of the UHV equipment, such as GIS, circuit breaker, disconnecter, bushing, insulator etc., have been developed successfully. This paper introduces the key problems exist in performing dielectric test on UHV apparatus, discusses several difficult test items, including partial discharge measurement of bushing, combined voltage test across the break of switchgear, as well as impulse test on HVDC single valve, etc. Meanwhile, the feasible test schemes are proposed.

Key words: ultra high voltage(UHV); equipment; insulation test

0 引言

随着我国首条特高压输电线路的规划, 截止到现在, 各种特高压等级的电器设备如 GIS, SF₆ 罐式断路器、敞开式隔离开关、电容式套管、绝缘子等都已经陆续试制成功, 西安高压电器研究所(以下简称西高所) 高压电器实验室如何应对特高压电器产品的型式试验已经成为迫在眉睫的问题。由于特高压电器产品尺寸大、试验电压高, 如双柱垂直开启隔离开关分闸时最大尺寸达到了 12.35 m (长) ×23.79 m (高), GIS 一个间隔的最大尺寸达到了 20m(长) ×17m

(高)。因此要满足特高压电器产品的绝缘型式试验, 对试验大厅的空间尺寸和电压发生设备及测量装置均有很高的技术要求, 如隔离开关开合容性、感性小电流试验时使用的试验变压器、测量介质损耗及电容量时使用的标准电容器、测量局部放电或无线电干扰时使用的耦合电容器、直流换流阀单阀陡波冲击试验时使用的陡波分压器等等。由此看来, 要按照标准要求实施特高压电器设备的绝缘试验, 无论是对试验设备、试验空间尺寸、试验环境等因素都提出了非常高的要求。笔者将对西高所高电压试验室实施特高压电器设备绝缘试验的情况及存在的问题进行介绍, 并且针对几个难度较大的试验项目的试验技术进行探讨。

1 特高压电器产品绝缘水平

特高压等级电器产品绝缘水平见表 1~表 2^[1-7]。

表 1 直流特高压电器产品绝缘水平

产品种类	额定电压/kV	额定雷电冲击耐受电压/kV	额定直流 ^② 耐受电压/kV	额定操作冲击耐受电压/kV	额定工频 ^③ 耐受电压/kV
换流阀 ^① (MVU)	±800	2 250(与陡波值相同)	1 350	1 800	360

注: ①指西门子 ±800 kV 换流阀; ②此时电流为 300 mA;

③此试验对单阀实施, 此时电流为 2.5 A。

2 西高所高电压试验室实施特高压电器设备绝缘试验及相关试验的能力

西高所实施特高压电器设备绝缘试验及相关试验的能力见表3。

3 几种特高压绝缘试验项目的试验技术探讨

3.1 开关设备断口间的联合电压试验

根据 1 100 kV 电压等级的相关技术规范, 应采取联合电压的试验方法对断路器或隔离开关的断口

收稿日期: 2007-03-09

作者简介: 张小勇(1974-), 男, 工程师, 主要从事高电压试验技术研究工作。

表 2 交流特高压电器产品绝缘水平

产品种类	额定电压/kV	额定雷电冲击耐受电压/kV		额定操作冲击耐受电压/kV		额定工频(1 min) 耐受电压/kV	
		相对地	断口间	相对地	断口间	相对地	断口间
断路器 GIS 隔离开关	1 100	2 400	2 400+900	1 800	1 675+900	1 100	1 100+635
绝缘子	1 100	2 550	/	1 800	/	1 100	/
套管	1 100	2 400(全) 2 760(截)	/	1 960(干) 1 800(湿)	/	1 200(干/湿) (5 min)	/
互感器	1 100	2 400	/	1 800	/	1 100(5 min)	/
避雷器	1 100	2 400	/	1 825	/	1 100	/

表 3 实施特高压电器设备绝缘试验及相关试验的能力

	隔离开关	罐式断路器	GIS	套管	绝缘子
可满足的项目	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4, 6	1, 2, 3, 4, 6	1, 2, 3, 4, 7, 8	1, 2, 3, 4
不满足的项目	5	无	5	6	无
说明	对垂直开启隔离开关, 分闸试验时, 需要适当调整动导杆长度以保证其对大厅顶部的空气距离。		无	对开合容性(感性)小电流第 6 项中仅是 953 kV/1 h 下的同放测量暂时不能满足。	无

注: 1——雷电冲击耐受电压试验 2——操作冲击耐受电压试验 3——短时工频耐受电压试验 4——无线电干扰测量试验 5——开合容性(感性)小电流试验 6——局部放电测量试验 7——介质损耗及电容量测量试验 8——热稳定性试验

进行试验。

实施工频耐受电压试验时, 一端施加额定工频相对地耐受电压, 另一端施加有效值为 $U_m/\sqrt{3}$ 的反相工频电压; 实施雷电(操作)冲击耐受电压时, 一端施加额定相对地雷电(操作)冲击耐受电压, 另一端施加峰值为 $\sqrt{2} U_m/\sqrt{3}$ 的反相工频电压。试验回路见图 1。

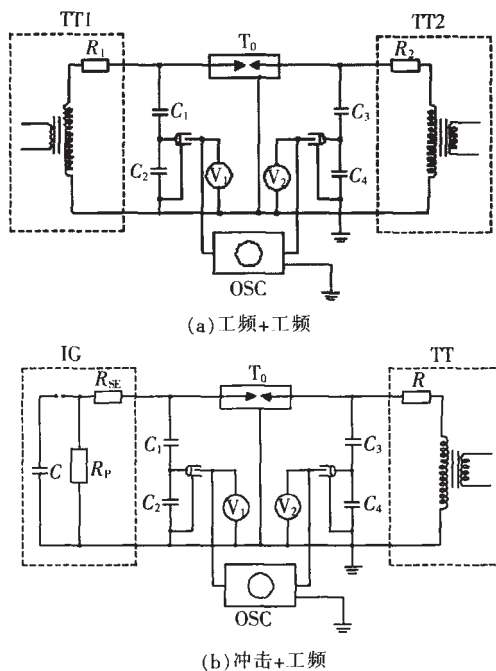


图 1 联合电压试验回路图

此试验的难点在于断口绝缘击穿时如何保护试验变压器的绝缘不受损坏。因为试验时一旦被试开关断口击穿, 试验变压器将承受一个幅值和陡度都很高的冲击电压。此时工频系统的保护电阻虽然能起到一定的阻尼作用, 但变压器内部绝缘还是会受

到过电压的作用。一般的试验变压器在设计时并不会考虑此种工况, 因此需要采取措施来保护变压器, 可采取外部回路保护或有针对性地加强变压器的内部绝缘。但笔者认为后者应该是研究重点。西高所目前正在结合特高压厅的建设准备进行此方面的研究工作。研究的步骤如下:

(1) 建立工频试验变压器电磁模拟成套试验设备, 研究在陡波冲击电压作用下工频试验变压器内部的波过程, 研究工频试验变压器的耐冲击结构。

(2) 建立包括断口电容链型回路和试验变压器、保护电阻、电容分压器等在内的数学物理模型, 对联合电压的稳态和暂态过程进行分析和测量, 研究各种外部保护措施。

(3) 分两阶段建立 1/6 ~ 1/3 电压比例物理模型, 即 150 ~ 2 x 150 kV 工频试验变压器、450 ~ 900 kV 冲击电压发生器和开关断口等的物理模型, 进行实际联合电压试验和各种外部保护措施的考核。

(4) 在完成步骤(1) ~ (3) 模型试验并确有把握后, 利用 4 800 kV/720 kJ 冲击电压发生器和 2 250 kV/1 A 工频试验变压器对 1 100 kV 断路器或隔离开关的断口进行各种电压类型的联合电压试验。

3.2 隔离开关开合容性、感性小电流试验

根据 1 100 kV 电压等级的相关技术规范, 该电压等级的隔离开关应进行容性(感性)小电流开合试验。试验回路见图 2。

对于此试验项目, 难点在于需要大容量试验变压器和合适的电容及电感负载, 而且变压器的短路阻抗要尽可能小以降低试验时的过电压水平。对于容性小电流试验, 负载可以采用集中式电容器, 该电容器除了应具备合适的电容量外, 其内、外绝缘的水

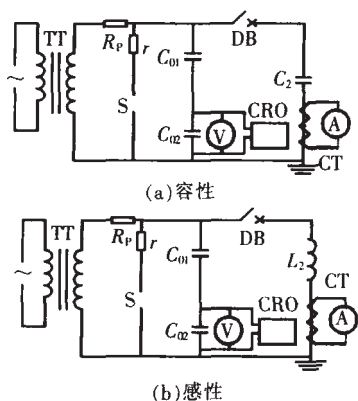


图 2 容性(感性)小电流开合试验回路

平至少应具备耐受 2.0~2.5 倍试验电压的特种操作过电压。为了减少隔离开关开、合小电流前后试验电压的变化,需要在变压器的出口并联电容器进行电源容量的补偿。对于感性小电流试验,存在的主要问题是采用何种感性负载,如高压可调电抗器、变压器高压绕组等等。高压可调电抗器电流调节能力强,但是考虑过电压的要求,其占用的空间较大;变压器高压绕组作为感性负载,最大的缺点是电流调节能力差,试验过程中的过电压与变压器的自身特性有关。

特高压等级敞开式隔离开关进行该试验时,试验过程中有可能出现很高的过电压(波形为特种操作波)和很大的电弧,而此过电压就有可能损坏变压器的绝缘。因此,对试验变压器的绝缘强度和试验空间的要求非常高。由于没有进行过此电压等级下的实际研究,现在还不能确定实际出现过电压的倍数,也是下一步要进行研究的重点和难点。

3.3 换流阀单阀的冲击试验

单阀冲击试验包括:单阀操作冲击试验(干/湿)、单阀加热雷电冲击试验和单阀加热陡波冲击试验。这 3 项试验均需要在施加冲击电压前很短的时间内对单阀施加一个电压幅值较低的辅助冲击电压或者工频电压,用于给晶闸管的控制单元提供储能。在试验回路上,就存在多电源同步配合的问题。对于加热冲击试验需要在上述回路的基础上增加对换流阀加热的回路,同时考虑晶闸管结温达到最高温度至施加冲击电压的时间间隔要求很短(毫秒级),致使试验实施过程中试验流程控制问题值得关注。根据已经完成的两台 120 kV 换流阀绝缘型式试验和一台 ±500 kV 高压直流换流阀绝缘型式试验,对上述问题已经有了一定的技术基础和实践经验。但是对于测量陡波冲击的分压器,要求其额定电压为 1 000 kV,方波响应时间小于 10 ns,同时高压臂阻值不能太小(约 8 k)。根据相关理论可知,满足此技术参数要求的分压器在制造上难度非常大。其结构一般采用充油式或充气式,并且需要进行纵向或横向补偿,以改善其电压分布的均匀度进而减小测量误差。

目前西高所高电压试验室正在和专业公司联合研制满足陡波测量要求的 1 000 kV 电阻分压器。

3.4 套管的局部放电测量试验

进行套管局放测量试验时施加的电压最高为 1 100 kV。此试验的难点在于如何使得试验回路的背景局放在试验电压下满足要求,采取的措施是将整个试验回路的高压导线用直径 400 mm 的铝筒连接,过渡连接处采用了双环结构(环外径为 2 200 mm,内径为 1 800 mm,环间距为 500 mm),这样就保证了回路在试验电压下无电晕发生。试验采用了串联法^[8]进行局部放电测量。试验结果表明,所采用的高压导线及过渡用均压环均满足特高压产品实施局放试验的要求。现场试验的照片如图 3,试验回路见图 4。

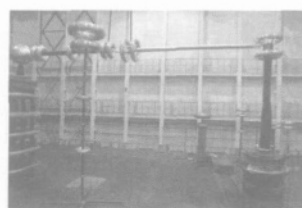


图 3 局部放电测量现场照片

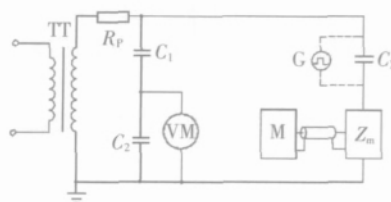


图 4 局部放电量测量试验回路图

3.5 套管的介质损耗及电容量测量试验

测量套管的介损和电容量时施加的最高电压为 953 kV,试验时使用的标准电容器额定电压为 1 200 kV。此试验的难点同样在于如何控制回路在试验电压下不发生电晕,最后采用了和局放测量试验同样的高压导线和均压环,从而保证了回路在试验电压下无电晕发生。测量仪器是 2801 西林电桥。现场试验的照片见图 5,试验回路见图 6。

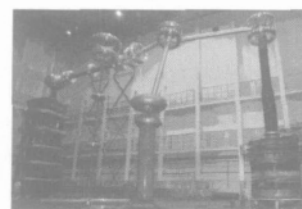


图 5 介损及电容量测量现场照片

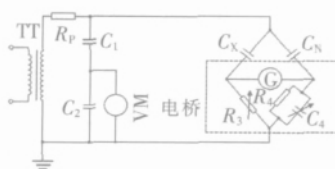


图 6 介损及电容量测量回路图

(下转第 117 页)

- [2] CIGRÉ Working Group 13.07. Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers (1st Part/2nd Part). Electra No 183/185[R]. Paris: CIGRÉ, 1999.
- [3] CIGRÉ Working Group A3.07. Controlled Switching of HV AC Circuit Breakers: Guidance for Further Applications Including Unloaded Transformer Switching, Load and Fault Interruption and Circuit-breaker uprating [R]. Paris: CIGRÉ, 2004.
- [4] CIGRÉ Working Group A3.07. Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Benefits & Economic Aspects [R]. Paris: CIGRÉ, 2004.
- [5] CIGRÉ Working Group A3.07. Controlled Switching: Non-conventional Applications. Electra No 214 [R]. Paris: CIGRÉ, 2004.
- [6] Berneryd S, Andersen E, Lindahl S. Synchronous Energizing of Shunt Reactors and Shunt Capacitors [C]// Paris: CIGRÉ, 1988: 13-22.
- [7] Reid J F, Tong Y K, Waldron M A. Controlled Switching Issues and the National Grid Company's Experiences of Switching Shunt Capacitor Banks and Shunt Reactors [C]// Paris: CIGRÉ, 1998: 13-112.
- [8] Jones S, Gardner K, Brennan G. Switchgear Issues in de-regulated Electricity Industries in Australia and New Zealand [C]// Paris: CIGRÉ, 2000: 13-102.
- [9] Nordin R, Holm A, Norberg P. Ten Years of Experience with Controlled Circuit Breaker Switching in the Swedish Regional Network [C]// Paris: CIGRÉ, 2002: 13-204.
- [10] Fernandez P C, Esmeraldo P C V, Fihlo J A, et al. Use of Controlled Switching Systems in Power System to Mitigate Switching Transients. Trends and Benefits-brazilian Experience [C]// Paris: CIGRÉ, 2002: 13-207.
- [11] Tinggren R, Yi Hu, Le Tang, et al. Power Factor Controller -an Integrated Power Quality Device [J]. IEEE Transmission and Distribution Conference, 1999(2): 572-578.
- [12] Cipcigan L, Chindris M, Smith K S, et al. Expert System for Voltage Control and Synchronised Switching Command in a 400 kV Power Substation [C]// Power Tech Proceedings, 2001: 10-13.
- [13] Laszlo P, Gyorgy B, Gabor B, et al. Reducing the Magnetizing Inrush Current by Means of Controlled Energization and De-energization of Large Power Transformers [C]// International Conference on Power Systems Transients, New Orleans, USA, 2003.
- [14] Portales E, Bui-van Q. New Control Strategy of Inrush Transient During Transformer Energization at Toulustouc Hydropower Plant Using Double-break 330 kV Circuit Breaker [C]// International Conference on Power Systems Transients, New Orleans, USA, 2003: 1-6.
- [15] Filion Y, Isbister R, Coutu A. Experience with Controlled Switching Systems (CSS) Used for Shunt Capacitor Banks: Planning, Studies and Testing Accordingly with CIGRE A3-07 Working Group Guidelines [C]// IEEE PES International Symposium Quality and Security of Electric Power Delivery Systems, 2003(8): 80-85.
- [16] Kobayashi T, Tsukao S, Ohno I, et al. Application of Controlled Switching to 500 kV Shunt Reactor Current Interruption [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2003, 18(4): 480-486.
- [17] 段雄英, 邹积岩, 顾丕冀, 等. 相控真空断路器同步关合电容器组的研究 [J]. 高压电器, 2003, 39(4): 28-30.
- [18] 方春恩, 段雄英, 邹积岩. 基于自适应神经元的短路电流参数提取 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 115-118.
- [19] 丁富华, 邹积岩, 方春恩, 等. 相控真空断路器投切空载变压器的应用研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 89-93.
- [20] 丁富华, 段雄英, 邹积岩. 基于同步真空断路器的智能无功补偿装置 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 30-35.
- [21] 丁富华, 邹积岩, 段雄英, 等. 采用数字信号处理器的永磁机构同步控制系统 [J]. 电网技术, 2005, 29(19): 39-42.
- [22] 丁富华, 邹积岩, 段雄英. 相控开关的最佳投切相位研究 [J]. 高压电器, 2005, 41(6): 408-411.
- [23] 何善庆. 采用断路器同步合闸装置解决大朝山 500 kV 系统内过电压问题 [J]. 高压电器, 2003, 39(5): 78-80.
- [24] 程战斌. 法国阿尔斯通公司的 Point-on-Wave Controller [J]. 西北电力技术, 2004, 32(6): 42-45.
- [25] ZOU Ji-yan, DUAN Xiong-ying, DONG En-yuan. Permanent Magnetic Actuator and Electronic Drive for Vacuum Switches [C]// Proc. 5th Inter. Conf. on Elec. Machines and Systems, 2001: 1323-1326.

(上接第 108 页)

4 结论

(1) 结合特高压等级电器产品标准绝缘水平分析了西高所高电压试验室目前实施特高压电器产品绝缘试验及相关试验的能力。

(2) 探讨了五个难度较大的试验项目: 联合电压试验、隔离开关开合容性(感性)小电流试验、换流阀单阀的冲击试验、套管的介质损耗及电容量测量试验、套管的局部放电测量试验, 阐述了各个项目试验中的难度所在及应注意的问题。

参考文献:

[1] 1000 kV 系统用交流 SF₆ 断路器技术规范 [Z]. 国家电网公司,

2005.

- [2] 1000 kV 系统用气体绝缘金属封闭开关设备技术规范 [Z]. 国家电网公司, 2005.
- [3] 1000 kV 系统用隔离开关技术规范 [Z]. 国家电网公司, 2005.
- [4] 1000 kV 系统用交流户外棒形支柱绝缘子技术规范 [Z]. 国家电网公司, 2005.
- [5] 1000 kV 系统用交流高压套管技术规范 [Z]. 国家电网公司, 2005.
- [6] 1000 kV 系统用 SF₆ 电流互感器技术规范 [Z]. 国家电网公司, 2005.
- [7] 1000 kV 系统用金属氧化物避雷器技术规范 [Z]. 国家电网公司, 2005.
- [8] GB 7354. 局部放电测量 [S]. 2003.