

±800 kV直流穿墙套管安装和现场试验关键技术研究

潘国洪¹, 朱华艳²

(1. 中国南方电网超高压输电公司, 广州 510620; 2. 黔西南民族职业技术学院, 兴义 562400)

摘要: ±800 kV直流穿墙套管是特高压直流输电的关键设备之一, ±800 kV云南—广东特高压直流输电工程中的特高压直流穿墙套管在世界范围内属于首次研发和使用。介绍了±800 kV直流穿墙套管的结构及其主要技术参数, 给出了套管及其空心复合绝缘子的技术要求, 重点阐述了套管的安装及现场试验, 对直流耐压试验过程中出现的贯穿性闪络放电问题进行了阐述并从套管的外绝缘裕度、环境条件以及均压环的配置等方面分析了原因, 介绍了其在新工程中外绝缘裕度的改进措施, 为特高压直流穿墙套管的设计、制造提供依据。

关键词: ±800 kV直流输电; 穿墙套管; 关键技术

中图分类号: TM721.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2013)02-0098-05

Key Technologies Research for the Installation and Field Test of ±800 kV Wall Bushing

PAN Guo-hong¹, ZHU Hua-yan²

(1. CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510620, China;

2. Southwest Guizhou Vocational and Technical College, Xingyi 562400, China)

Abstract: The ±800 kV DC bushing is one of the most important equipment for the ±800 kV DC Transmission Project. The ±800 kV DC bushing used in the Yunnan-Guangdong Line ±800 kV DC Transmission Project is the first ±800 kV DC bushing in the world. This paper describes the dimension and inlet configuration of 800 kV bushing, the technical demands for the bushing and composite insulator are presented. The key technologies for field installation and test are given, and the flashover appeared in the DC withstander test and the insulation margin, environment; grading ring are discussed for this problem, and the improvement measure of insulation margin in the new project is also given, which is very helpful for the design and manufacture of ±800 kV DC bushing.

Key words: ±800 kV transmission; wall bushing; key technologies

0 引言

在特高压直流输电工程中, 阀厅直流侧出线需要单独装设穿墙套管, 直流穿墙套管包括±800 kV级直流穿墙套管、±400 kV级直流穿墙套管和直流中性母线穿墙套管。其中, 直流穿墙套管是特高压设备制造难点之一, ±800 kV级直流穿墙套管的研发、施工及试验无任何经验可以借鉴^[1-3]。

1 套管结构及参数

800 kV套管为干式充SF₆电容式套管, 其外形尺寸见图1^[4-5], 内部结构见图2^[6-7], 由两段户外式

SF₆充气套管通过SF₆充气腔连接组成。SF₆充气腔同时也构成了套管法兰。GSEW套管的内部主绝缘体为胶浸纸(epoxy resin impregnated paper, RIP), 由真空下浸渍了环氧树脂的特殊纸及起均压作用的铝薄膜构成。中间的导流管由铝合金制成, 并与主绝缘体紧密接触。导流管的端头通过专用的连接件与外部接线端子连接。导流管的法兰端为插头式连接, 插头式连接装置采用均压环屏蔽。内部电极的作用是均匀套管外部的电压分布。套管采用复合绝缘子外套; 复合绝缘子外套由玻璃纤维增强环氧树脂管和直接固化在该树脂管表面的硅橡胶伞群组成, 法兰腔采用特殊技术与环氧树脂管紧密连接。套管法兰腔通过螺杆连接。在套管的重力中心点附

近提供了悬吊装置。法兰腔上还有 2 个试验端子(分别对应户内和户外 2 根套管), 1 个接地端子和 1 个 SF_6 压力释放阀。在套管的高压接线端, 复合绝缘子管采用盖板封闭, 同时起着密封、固定外部连

接螺栓并固定外部均压环的作用。此外, 在盖板上还有另外 1 个 SF_6 压力释放阀。密封材料为能够有效防止 SF_6 泄漏的 O 型圈。套管两端设置有均压环。

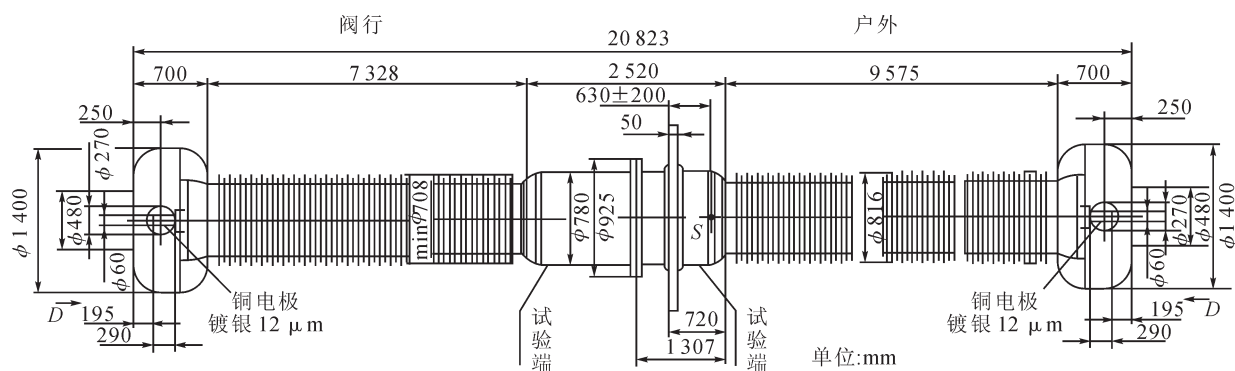


图 1 800 kV 直流穿墙套管外形尺寸图

Fig. 1 The dimension of 800 kV bushing

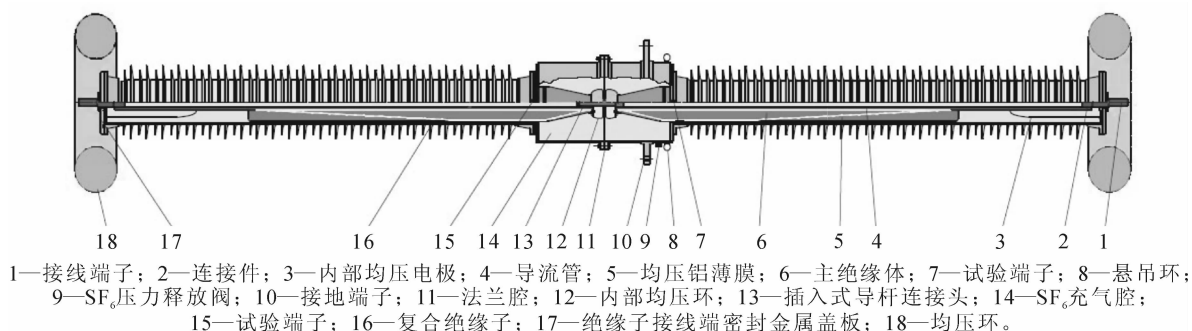


图 2 穿墙套管内部结构图

Fig. 2 The inlet configuration of 800 kV bushing

直流穿墙套管的主要技术参数见表 1^[8]。

2 技术要求

1) 套管用空心复合绝缘子: 套管用空心复合绝缘子的技术要求应符合 IEC 61462—2007 的规定; 其伞套材料的耐漏电起痕及电蚀损性能、阻燃性能、主要电气及机械性能应符合 DL/T 810—2002 的要求, 其憎水性、憎水性的丧失特性、憎水性的迁移特性、憎水性恢复时间特性等应符合 DL/T 864—2004 的要求; 套管伞套表面单个缺陷面积(如缺胶、杂质、凸起等)不应超过 25 mm^2 , 深度不大于 1 mm , 凸起表面与合缝应清理平整, 凸起高度不得超过 0.8 mm , 粘接缝凸起高度不得超过 1.2 mm , 总缺陷面积不应超过复合外套总表面的 0.2% 。

2) 套管本身技术要求: 额定电流和绝缘水平相同的套管对所有变压器应具有互易性; 套管设计应保证运行时任何部分都不出现异常的机械或电应力, 同时还应使外表面的电场分布均匀; 应提供能容纳导线膨胀和散热的方法^[9-10]。所有套管都应满足

环境条件的要求, 便于现场更换, 并有坚实的机械结构以便能安全承受运输、安装和运行中的震动。在运行期间, 绝缘介质不应老化。充油套管应有油位表, 并能取油样, 还要能排干套管。当接头套管和变压器分别供货时, 变压器接头的端子应捆住(不是焊)以防各股线分开。在现场安装套管的内部连接螺栓时, 连接部件应能防止该螺栓掉进油箱。

3 安装关键技术控制

1) 安装前的准备工作: ①准备 50 t 吊车; ②起吊中滑轮尽量靠到墙面; ③用高空作业车代替脚手架; ④当套管与墙面有较大间隙时采用 500 mm 全丝杆进行拉入等措施。安装前的检查: ①检查施工机器、起吊工具合格方可使用; ②检查阀厅墙面套管开孔尺寸是否与到货实物相符(发现低端阀厅墙面套管开孔尺寸不符, 已作处理); ③套管开箱后, 检查冲击记录仪在 3 g 内, 外包装完好, 微正压正常; ④检查作业人员到位, 室内外沟通指挥到位。

2) 施工控制要点: ①开箱检查没有问题后, 用吊

表1 直流穿墙套管参数
Tab. 1 UHVDC bushing' parameters

参数名称	高压套管	中压套管	低压套管
基座材料	复合材料	复合材料	复合材料
额定电压/kV	800	400	100
最大持续运行电压(rms)/kV	816	408	50DC+80ACpk
额定电流/A	3 125	3 125	3 125
最大持续电流(户内 $\leq 50^{\circ}\text{C}$ /户外 $\leq 40^{\circ}\text{C}$)/A	3 461	3 461	3 461
最大持续电流(户内 $\leq 50^{\circ}\text{C}$ /户外 $\leq 25^{\circ}\text{C}$)/A	3 795	3 795	3 795
2 h 过负荷电流(户内 $\leq 50^{\circ}\text{C}$ /户外 $\leq 25^{\circ}\text{C}$)/A	3 965	3 965	3 965
5 s 过负荷电流(户内 $\leq 50^{\circ}\text{C}$ /户外 $\leq 40^{\circ}\text{C}$)/A	4 193	4 193	4 193
3 s 过负荷电流(户内 $\leq 50^{\circ}\text{C}$ /户外 $\leq 25^{\circ}\text{C}$)/A	4 892	4 892	4 892
3 s 过负荷电流(户内 $\leq 50^{\circ}\text{C}$ /户外 $\leq 35^{\circ}\text{C}$)/A	4 539	4 539	4 539
基本闪络冲击绝缘水平(最大值)/kV	1 950	1 175	450
基本操作冲击绝缘水平(最大值)/kV	1 600	950	325
外部闪络冲击绝缘水平(最大值)*kV	2 103	1 300	450
外部操作冲击绝缘水平(最大值)*kV	1 698	1 050	325
最小闪络距离(户外段,复合基座部分)/(mm $\cdot\text{kV}^{-1}$)	45	45	45DC+25AC
最小闪络距离(户外段)/mm	36 720	18 360	3 809
最小爬距(户内段)/mm	$\geq 11\,312$	$\geq 5\,712$	$\geq 1\,204$
抗弯能力(户外段)/N	1 500	1 500	1 500
抗弯能力(户内段)/N	1 500	1 500	3 500
无线电干扰水平/ μV	$< 2\,500$	$< 2\,500$	$< 2\,500$
局放试验水平(10 min, ≤ 10 个脉冲)/pC	$> 2\,000$	$> 2\,000$	$> 2\,000$
颜色	浅灰	浅灰	浅灰

注:* 为适用于送端换流站,送端换流站海拔高度为 1 850 m。

车将套管水平吊出包装箱,吊出时,箱周围必须派人看好,防止包装箱上的铁钉挂坏硅胶;②用吊环将 2 条 10 t,12 m 长的尼龙吊带固定在套管法兰及套管头部位置,然后用吊钩再挂 1 条 10 t,12 m 长的尼龙吊带,并用链条葫芦连接,用于起吊时调正套管的角度,使套管中心轴线与水平线小于 15° 角;③吊起套管离地面 1.5 m 左右进行电气试验,合格后绑扎好两根晃绳,控制套管的摆动方向;④在室外侧用高空作业车,把安装人员送至作业点,调正好套管角度,并将保护套固定在内侧套管上,然后缓慢的把套管推入阀厅内;⑤套管固定好后要用力矩扳手校核为 120 N $\cdot\text{m}$ 。

3)质量控制要点^[11]:①套管在安装前应进行检查,硅胶、法兰应完整无裂纹,胶合处牢固无变形,冲撞记录小于 3 g,内微正压合格;②套管安装前应按交接标准及厂家要求进行试验;③安装角度偏差应小于 0.5° ,中心线偏差应小于 1.5/1 000;④均压环、金具等应安装牢固,位置正确;⑤安装套管的孔径应比嵌入部分大 10 mm 左右,毛边要处理;⑥穿墙套管的法兰固定板应为非导磁材料,并应做好防

涡流的措施,固定板的孔距误差应小于 2 mm;⑦ SF_6 气体压力 0.375 MPa。

4)安装中出现的问题及处理措施:①为便于监视检查套管 SF_6 气体压力,将密度计改装至室外并加装不锈钢保护箱;②充气后检测 SF_6 气体微水含量超标,经过置换气体处理后合格。

4 现场交接试验项目及标准

1)外观检查,安装前进行,不允许存在下列缺陷:①面积大于 25 mm²(总缺陷面积不超过绝缘子总面积的 0.2%) 或者是深度或高度大于 1 mm 的表面缺陷;②伞裙、金属附件与伞根附近有裂纹或缺陷;③凸出外套表面超过 1 mm 的模压飞边;④护套与端部密封是否完好;⑤护套与芯棒体之间粘结应密实,不应有较大突起、鼓包或空洞感;⑥均压环表面应光滑,不得有凸凹等缺陷。

2)气体泄漏值和微水含量检测:①气体泄漏值应在套管充气 24 h 后进行检测;②采用灵敏度不低于 1×10^{-6} (体积比)的检漏仪对各气室密封部位、管道接头等处进行检测时,检漏仪不应报警;③必要

时可采用局部包扎法进行气体泄漏测量。以 24 h 的漏气量换算, 每 1 个气室年漏气率不应大于 0.5%; ④包扎法的描述见《IEC 60137—2008 高于 1 000 V 交流电压绝缘套管》^[12], 对应国标 GB/T 4109—2008; ⑤气体含水量的测量应在套管充气 48 h 后进行, 气体含水量应小于 250 $\mu\text{L/L}$ 。

3) 套管主绝缘和测量端子的绝缘电阻测量^[13]:

①测量主绝缘(导杆对法兰)的绝缘电阻, 应使用 5 000 V 兆欧表, 主绝缘的绝缘电阻值应不低于 10 000 M Ω ; ②测量端子(末屏对法兰)的绝缘电阻, 应使用 2 500 V 兆欧表, 其绝缘电阻值不应低于 1 000 M Ω 。

4) 套管主绝缘的介损和电容量测量: ①测量套管主绝缘(导杆对末屏) $\tan\delta$ 时的试验电压为 10 kV, 采用正接法测量; ② $\tan\delta$ 值应不大于 1%; ③实测电容量值与产品铭牌数值或出厂试验值相比, 其偏差应小于 5%。

5) 套管末屏的介损和电容量测量: ①测量末屏对地 $\tan\delta$ 时的试验电压建议为 1 kV, 采用反接线进行测量; ②末屏对地的 $\tan\delta$ 应不大于 3%; ③试验电压和 $\tan\delta$ 值的合格判据的确定应进一步参考出厂试验报告。

6) 直流耐压试验: ①试验电压为出厂试验电压的 80%, 试验时间为 30 min; ②直流耐受试验前后分别进行介损和电容量的测量, 与出厂试验值不应有明显偏差。

5 直流耐压试验中出现的放电现象及原因分析

1) 极 1 套管放电现象: 当试验电压升至 +960 kV 进行至 11 min 时, 开始有 1 次较大的放电声, 16 min 45 s 时套管室内段发生贯穿性闪络放电现象, 并伴随着爆响, 现场录像截图的放电瞬间见图 3^[14], 加压设备——直流高压发生器出现高压过流跳闸。放电前试验电压 960.3 kV, 电流为 894 μA , 放电后电压迅速降为 214 kV, 电流上升很快、无法看清。经检测, 套管 SF_6 气体露点 -54°C , 压力为 0.385 MPa, 与试验前数据一致, 额定压力为 0.375 MPa(20 $^\circ\text{C}$), 此外, 外观检查也没有发现明显放电点。试验前套管已清洗过, 压力、微水正常, 确认该套管具备耐压条件, 当时看套管表面并没有明显脏污。随后, 施工单位用西门子提供的专用洗洁液体将套管重新清洗后, 并且西门子在室内侧接线导杆上加装了 1 个小均压环(处于原均压环中心), 再次进行直流耐压试验, 试验电压仍为 +960 kV, 泄漏电流在 750 μA 至 950 μA 之间波动, 从 17 min 开始有断断续续的放

电声, 室内均压环底侧有放电火苗, 但没有贯穿性放电, 最终耐压试验 960 kV 30 min 通过。



图 3 800 kV 直流套管闪络图

Fig. 3 The flashover of 800 kV bushing

2) 放电原因分析: ①该套管室内段外绝缘裕度不大。该型号套管室外段均压环至法兰的长度为 9.575 m, 而管室内段均压环至法兰的长度为 7.328 m, 明显是厂家考虑了运行环境室内比室外好而压缩了室内段的长度, 但减小 2.247 m 是否太多存在疑问, 并且现场该套管是倾斜 15° 安装在金属墙上, 室内段套管下面外绝缘有效长度被进一步减小(极 1 套管放电的现场录像显示闪络就在此位置)。现场试验双极该类套管发生外部闪络都在室内段, 并且采取清洗等措施后, 双极该类套管在最后通过的耐压过程中, 室内均压环下面有约 20 cm 长的放电火花, 伴随明显的放电声, 因此, 现场试验证明, 该类套管室内段外绝缘裕度不大, 建议将室内段适当加长; ②现场环境是套管试验过程中发生闪络的重要因素。厂家将该类套管的室内段比室外段压缩了 2.247 m, 设计考虑到运行环境室内比室外好, 但进行交接试验时处于工程安装阶段, 室内环境并不比室外好多少, 阀厅未密封, 其地板未经严格除尘处理, 进出人员较多, 因此, 造成试验时套管合成外套的表面存在一定灰尘, 并且试验时室内的湿度比室外还大。灰尘和湿度是造成套管表面闪络的重要因素, 较潮湿的灰尘在耐压过程中逐步被极化成悬浮电极, 逐步恶化套管表面的电场强度分布, 最终导致贯穿性闪络放电, 清洗后试验通过是因为除掉灰尘; ③该套管的均压环的均压效果不够合理。该套管的均压环采用的是单环结构, 环的外部直径 2.2 m, 管直径 0.6 m, 套管金属头直径 1.06 m, 通过 4 根较细的方形支架稍微偏外固定均压环在套管金属头上, 套管金属头内侧比均压环突出有 0.8 cm, 显然, 此均压环对改善套管金属头内侧场强分布效果不太理想, 从放电瞬间的图片上看到这个位置放电火光非常强烈就有所证明, 即使是双极该类套管在最后通过的耐压过程中, 室内均压环下面有约 20 cm 长的放电火花, 进一步证明均压环均压效果不够理想, 使得起始放电条件容易达成。

3)改进措施:在糯扎渡电站送电广东 ± 800 kV 直流输电工程中,800 kV 套管整体尺寸由 20.823 m 增加至 22.504 m,其中室外段均压环至法兰的长度由 9.575 m 增加至 10.1 m、室内段均压环至法兰的长度由 7.328 m 增加至 8.05 m^[15-16]。

6 结语

文中阐述的内容对于特高压直流穿墙套管的设计、制造、现场施工及试验、运行维护都有重要的指导意义,特别是套管的生产厂家及科研院所在设计研发及生产时,要充分考虑套管的绝缘裕度及套管末端均压环的配置以及现场的实际运行环境。

参考文献:

- [1] 李立呈. 特高压输电的技术特点和工程应用,报告编号缺失[R]. 广州:南方电网技术研究,2005.
LI Li-cheng. Technology and development of ultra-high voltage transmission[R]. Guangzhou: Southern Power System Technology, 2005.
- [2] 尚 春. 特高压输电技术在南方电网的发展与应用[J]. 高电压技术, 2006, 32(1): 35-37.
SHANG Chun. Development of ultra-high voltage transmission technology in China southern power grid[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(1): 35-37.
- [3] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
LIU Zhen-ya. Ultra high voltage direct current transmission technology research achievement album[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [4] 中国南方电网超高压输电公司. CSG/YG/EB4_138 CS maintenance manual[M]. 广州: 中国南方电网超高压输电公司, 2008.
- [5] 林志波. 高压直流设备基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [6] 南方电网科学研究院有限责任公司. 直流穿墙套管设计审核报告[M]. 广州: 南方电网科学研究院有限责任公司, 2011.
- [7] 南网科研院. 特高压输电关键技术[R]. 广州: 中国南方电网公司, 2007.
- [8] 中国南方电网超高压输电公司. CSG/YG/ED3_138 CS equipment specification[M]. 广州: 中国南方电网超高压输电公司, 2008.
- [9] 刘 鹏, 金海云, 石惠承, 等. 特高压直流套管用环氧树脂/皱纹纸复合绝缘体系介电性能的研究[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 6-8.
LIU Peng, JIN Hai-yun, DAN Hui-cheng, et al. Investigation on dielectric properties of epoxy/crepe paper composites for ultra-high voltage DC bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 6-8.
- [10] 张小勇, 贾 涛, 王 韵, 等. 特高压电器设备绝缘试验技术研究[J]. 高压电器, 2007, 43(2): 106-108.
ZHANG Xiao-yong, JIA Tao, WANG Yun, et al. Study on insulation test techniques for ultra-high-voltage equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(2): 106-108.
- [11] 尚 涛. 云南至广东 ± 800 kV 直流输电工程施工关键技术研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
SHANG Tao. Key technologies of Yunnan-Guangdong ± 800 kV transmission project[M]. Beijing: China Waterpower Press, 2008.
- [12] IEC 60137—2008. Insulated bushings for alternating voltages above 1 000 V[S].
- [13] 尚 春. ± 800 kV 特高压直流输电工程直流主设备交接验收试验技术规范[R]. 广州: 中国南方电网公司, 2009.
- [14] 中国南方电网超高压输电公司修试中心. 穗东换流站极 1 直流套管耐压试验视频[DB/CD]. 广州: 中国南方电网超高压输电公司修试中心, 2010.
Test and Maintenance Center of CSG EHV Power Transmission Company. DC bushing high voltage test video of pole 1 of Suidong converter station[DB/CD]. Guangzhou: Test and Maintenance Center of CSG EHV Power Transmission Company, 2010.
- [15] 中国南方电网超高压输电公司. CSG/YGII/EC4.138 HV_OD_HSPE[M]. 广州: 中国南方电网超高压输电公司, 2011.
- [16] 南方电网科学研究院有限责任公司. 糯扎渡直流工程直流场设备设计冻结[M]. 广州: 南方电网科学研究院有限责任公司, 2011.

潘国洪(1982—),男,高级工程师,本科,从事超高压直流输电工程的技术研究。

朱华艳(1984—),女,讲师,本科,从事高压电器的技术研究。

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!