

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.06.005

特高压电器专题

1 100 kV 盆式绝缘子研制开发

余良清, 王洪涛, 魏俊梅, 常越, 王娜

(新东北电气集团高压开关有限公司, 沈阳 110025)

摘要: 在气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)中,盆式绝缘子起着隔离相邻气室、支撑导体及绝缘的重要作用,研制开发高参数、高性能的 1 100 kV 盆式绝缘子是保证 1 100 kV 特高压 GIS 安全可靠运行的基础。详细介绍了所研制开发的 1 100 kV 盆式绝缘子的设计特点;应用有限元分析计算软件对其绝缘性能和机械性能进行了详细的计算分析,计算结果表明:接地屏蔽环可以有效降低其三交区电场强度。介绍了 1 100 kV 盆式绝缘子的浇注工艺。该 1 100 kV 盆式绝缘子在产品质量检测中心顺利通过了整套型式试验,其雷电冲击耐受水平高达 2 880 kV,爆破压力最低达 3.15 MPa,最高达 4.0 MPa,验证了其绝缘性能及机械性能的高可靠性。

关键词: 盆式绝缘子; 绝缘性能; 机械性能

Development of 1 100 kV Spacer

YU Liangqing, WANG Hongtao, WEI Junmei, CHANG Yue, WANG Na

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

Abstract: In GIS, the spacer is used for separating adjacent gas compartments, supporting conductor, and insulation. Development of a reliable 1 100 kV spacer is very important to ensure the safe service of a 1 100 kV GIS. In this paper, the characters of the 1 100 kV spacer developed by NHVS are introduced, and its dielectric performance and mechanical performance are computed with a finite element analysis software. The results show that the grounding shield ring can weaken the electric field strength in the triple zone. The casting process of the spacer is also introduced. This 1 100 kV spacer has passed type test in High Voltage Apparatus Quality Test & Research Center, where its lightning pulse withstand voltage reached 2 880 kV, and its minimum and maximum burst pressure reached 3.15 MPa and 4.0 MPa, respectively, verifying its high dielectric and mechanical performances.

Key words: spacer; dielectric performance; mechanical performance

0 引言

在中国建设坚强的 1 000 kV 特高压电网是中国优化电力发展的必然要求^[1-5]。2008 年底,中国首个 1 000 kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程建成并投入了商业化运行。根据国家电网公司规划,未来将建设三纵——锡盟—南京、张北—南昌、陕北—长沙及三横——蒙西—潍坊、晋中—徐州、雅安—皖南六条特高压输电线路,并建设淮南—南京—泰州—苏州—上海—浙北—皖南—淮南长三角特高压双环网,到 2020 年中国将建成 55 座特高压变电站^[6]。

特高压气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)是保证特高压电网安全运行的重要设备^[7-10]。开发具有自主知识产权的 1 100 kV GIS 能满足未来庞大的特高压输变电系统对保护设备的迫切需求。

在 1 100 kV GIS 中,盆式绝缘子起着隔离相邻气室、支撑导体及绝缘的重要作用^[11-13],是决定 1 100 kV GIS 能否安全可靠运行的关键元件。文中详细介绍了所研制开发的 1 100 kV 盆式绝缘子的设计特点;应用有限元分析计算软件 ANSYS 对其绝缘性能和机械性能进行了详细的计算分析,比较了接地屏蔽环对其绝缘性能的影响;对其浇注工艺进行了比较详细的介绍。该 1 100 kV 盆式绝缘子在某产品质量检测中心顺利通过了整套型式试验。

收稿日期:2016-01-04; 修回日期:2016-03-15

1 100 kV 盆式绝缘子技术参数及主要特点

100 kV 盆式绝缘子是在 363、550、800 kV 系列 GIS 盆式绝缘子基础上优化设计而自主研发的产品。南阳站 100 kV HGIS 设备见图 1; 100 kV 盆子结构外形及其与其他电压等级盆式绝缘子的比较见图 2。



图 1 南阳站 100 kV HGIS 设备

Fig. 1 100 kV HGIS in Nanyang substation



图 2 363、550、800、1100 kV 盆式绝缘子比较

Fig. 2 Comparison of 363, 550, 800, 1100 kV spacers

100 kV 盆式绝缘子主要技术参数见表 1。

表 1 100 kV 盆式绝缘子主要技术参数

Table 1 Main technique parameters of 100 kV spacer

参数	数值
额定电压/kV	100
额定电流/A	8000
额定雷电冲击耐受电压/kV	2400
额定操作冲击耐受电压/kV	1800
额定短时工频耐受电压/kV	100
爆破压力/MPa	≥2.7

新研制的 100 kV 盆式绝缘子由中心嵌件、铝法兰、接地屏蔽圈及树脂浇注部分组成, 该盆子结构图及其在 GIS 母线中的典型应用见图 3。

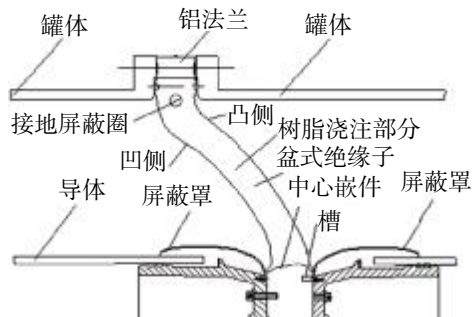


图 3 100 kV 盆式绝缘子在 GIS 母线中的典型应用

Fig. 3 Classic application of 100 kV spacer in busbar

100 kV 盆式绝缘子具有如下主要特点:

- 1) 采用铝法兰结构, 使得盆式绝缘子与罐体联接时不必使用铜(或铝)短接板;
- 2) 带有接地屏蔽圈, 有效降低了盆式绝缘子尾

部三交区的电场强度;

- 3) 中心嵌件在浇注过程中涂抹特殊材质的界面剂。

2 100 kV 盆式绝缘子绝缘性能研究

盆式绝缘子的绝缘性能至关重要^[14-15], 在电力设备中, 较多的接地故障均是由盆式绝缘子的沿面闪络引起^[16]。盆式绝缘子的绝缘性能与其结构形状及相关联的屏蔽结构有很大关系^[17]。

图 3 为 100 kV 盆式绝缘子在 GIS 母线中的典型应用, 应用 ANSYS 软件对其绝缘性能进行仿真计算, 为比较接地屏蔽圈对其绝缘性能的影响, 计算时考虑了带有和不带有接地屏蔽圈两种工况。

2.1 数学模型

与 100 kV 盆式绝缘子电场分布对应的数学模型^[18-19]见式(1), 考虑最苛刻工况, 即雷电冲击耐受电压下的绝缘性能, 计算电压取 2400 kV。

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\varepsilon_r \varepsilon_0 \nabla u) = 0 \\ u_1 = 2400 \\ u_2 = 0 \\ \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{\partial u}{\partial n} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: u 为电势; ε_0 为真空介电常数; ε_r 为材料相对介电常数。

场域中各点的电场强度

$$E = -\nabla u. \quad (2)$$

式(2)中, E 为电场强度。

2.2 计算结果

在雷电冲击耐受电压 2400 kV 下, 带有接地屏蔽圈的 100 kV 盆式绝缘子的电位等值云图分布见图 4; 带和不带接地屏蔽圈两种结构的盆式绝缘子凹侧和凸侧(凹侧和凸侧定义见图 3)沿面的电场强度分布见图 5、6, 两种结构的盆式绝缘子电场强度最大值对比见表 2。

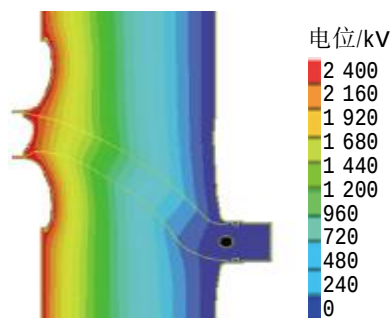


图 4 电位等值云图分布

Fig. 4 Equipotential contours

2.3 结果分析及校核

由计算结果图 5、6 和表 2 可知, 当 100 kV 盆式绝缘子不带有接地屏蔽圈时, 其凹侧及凸侧尾部

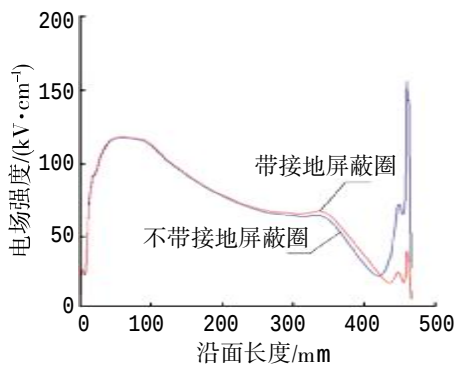


图 5 盆式绝缘子凹侧沿面电场强度分布

Fig. 5 Electric field intensity along in-cone surface

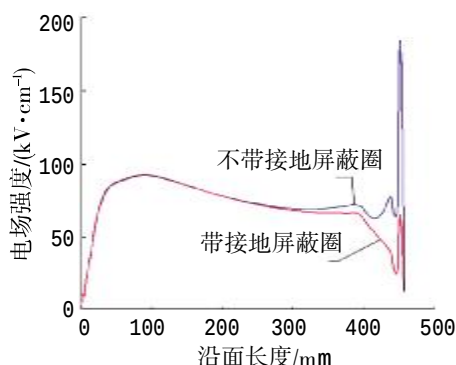


图 6 盆式绝缘子凸侧沿面电场强度分布

Fig. 6 Electric field intensity along against-cone surface

表 2 1 100 kV 盆式绝缘子电场强度最大值

Table 2 Maximum electric field intensity

on 1 100 kV spacer		kV/cm	
盆式绝缘子工况	凹面	凸面	法兰处三交区
带接地屏蔽圈	118.9	92.76	68.67
不带接地屏蔽圈	156.0	184.3	168.5
许用场强(0.29 MPa 表压时的 SF ₆)	157.1	157.1	118.0

三交区(环氧树脂、SF₆ 气体及法兰金属三者交汇的位置)场强均较带有接地屏蔽圈时增大很多,而该三交区正是盆式绝缘子在装配过程中可能出现的灰尘杂质的藏身之所,如若不带有接地屏蔽圈,必会对其长期运行可靠性带来安全隐患。因此,1 100 kV 盆式绝缘子最终方案带有接地屏蔽圈。

1 100 kV 盆式绝缘子在 GIS 中的最低功能 SF₆ 充气压力为 0.29 MPa(表压),根据文[20],该气压下各部位的许用场强见表 2。由表 2 可知,1 100 kV 盆式绝缘子在雷电冲击耐受电压 2 400 kV 下,各部位电场强度最大值均远远小于许用场强,因此该盆式绝缘子绝缘性能安全可靠。

3 1 100 kV 盆式绝缘子机械性能研究

盆式绝缘子的机械性能主要取决于其结构形状、浇注工艺及环氧树脂与固化剂等原材料的配比。

结合 1 100 kV 盆式绝缘子在 GIS 中的实际应用: 分别有凹面受压、凸面受压和双面受压 3 种情况。在这 3 种情况中,凹面受压时盆式绝缘子的受力条件最为苛刻,文中应用有限元数值分析计算软件 ANSYS,对其凹面受压时的机械性能进行分析计算。

3.1 计算模型

1 100 kV 盆式绝缘子具有轴对称的特点,采用轴对称分析计算方法对其轴截面的 1/2 进行分析。计算模型及部位指示见图 7。

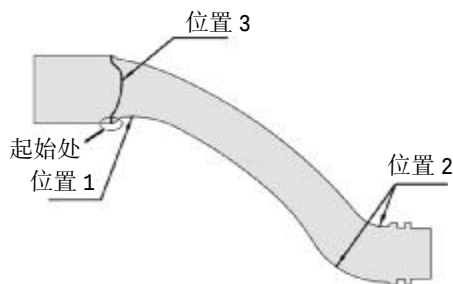


图 7 计算模型

Fig. 7 Calculation model

3.2 计算结果

当 1 100 kV 盆式绝缘子凹面承受 1 MPa 压力时,其位移等值云图分布见图 8,应力等值云图分布见图 9。对应图 7 的位置指示,1 100 kV 盆式绝缘子应力最大值见表 3。

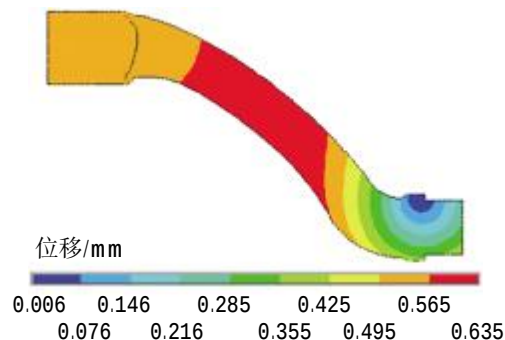


图 8 1 100 kV 盆式绝缘子位移等值云图分布

Fig. 8 Displacement contours of 1 100 kV spacer

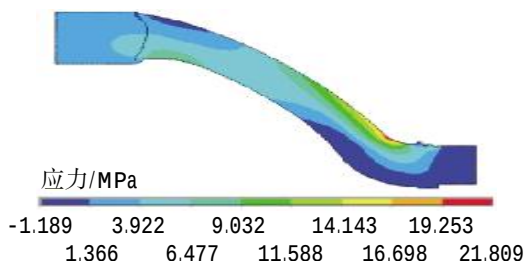


图 9 1 100 kV 盆式绝缘子应力等值云图分布

Fig. 9 Stress contours of 1 100 kV spacer

3.3 结果分析及校核

1 100 kV 盆式绝缘子凹面承受 1 MPa 压力时,其上的应力最大值发生在位置 2,最大值为 21.81 MPa。在恰当的配比及浇注工艺保证下,环氧树脂的破坏

表3 1 100 kV 盆式绝缘子应力 σ_1 最大值

Table 3	Maximum σ_1 in 1 100 kV spacer			MPa
部位	位置 1	位置 2	位置 3	
应力 σ_1	9.26	21.81	6.49	

应力可以达到 75 MPa,如若能保证中心嵌件与树脂间的良好结合,其水压耐受强度预期可高达 3.5 MPa。因此,该 1 100 kV 盆式绝缘子的机械性能预期能够满足相关要求。

4 1 100 kV 盆式绝缘子浇注工艺研究

盆式绝缘子的浇注工艺流程见图 10。

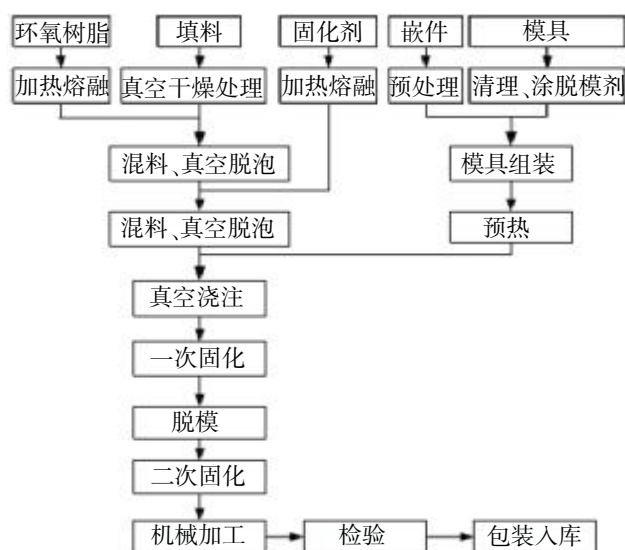


图 10 盆式绝缘子浇注流程图

Fig. 10 Casting flow chart of spacer

中心嵌件通常采用高导电率且膨胀系数和环氧树脂最为接近的铝材,由于铝是活泼金属,与氧的亲合性较强,在空气中会很快形成三氧化二铝,覆盖在铝表面,从而严重影响中心嵌件与环氧树脂的结合力。因此,在浇注之前的特定时间内,要采用特殊材质、适当粒度的粒子如石英砂对中心嵌件进行喷砂处理,使其喷砂面粗糙度均匀且适当。

为防止中心嵌件表面附着有灰尘杂质,应对其采用超声波进行彻底清洗。重点在清洁的嵌件表面涂抹一层环氧底胶或半导体胶类的界面剂,利用其弹性变形可以有效消除中心嵌件与环氧树脂界面在收缩过程中可能产生的空穴。

新研制的 1 100 kV 盆式绝缘子采用进口树脂,在中心嵌件表面涂抹界面剂,改善了盆式绝缘子的机械性能。

5 型式试验验证

5.1 绝缘试验

新东北电气研制的 1 100 kV 盆式绝缘子在产

品质量检测中心顺利通过了国家标准要求的绝缘型式试验(包括 1 min 工频耐受电压试验、操作冲击耐受电压试验、雷电冲击耐受电压试验及局部放电等项目),试验极布置见图 11,其雷电冲击耐受电压高达 2 880 kV。1 100 kV 盆式绝缘子绝缘型式试验的顺利通过,验证了其绝缘性能的可靠性。



图 11 1 100 kV 盆式绝缘子绝缘型式试验极

Fig. 11 Dielectric type test pole of 1 100 kV spacer

5.2 水压爆破试验

对 10 个 1 100 kV 盆式绝缘子进行了破坏压力试验,最低破坏压力 3.15 MPa,最高破坏压力高达 4.0 MPa,典型破坏形态见图 12。1 100 kV 盆式绝缘子水压爆破试验的顺利通过,验证了其机械性能的可靠性。



图 12 1 100 kV 盆式绝缘子破坏形态

Fig. 12 Burst shape of 1 100 kV spacer

6 结论

对 1 100 kV 盆式绝缘子绝缘性能、机械性能及浇注工艺的相关研究表明:

1)接地屏蔽圈可有效降低其三交区场强,提高盆式绝缘子的绝缘性能。新研制的 1 100 kV 盆式绝缘子雷电冲击耐受电压高达 2 880 kV,满足其绝缘性能要求。

2)新研制的 1 100 kV 盆式绝缘子最低可以耐受 3.15 MPa 水压试验压力,满足其机械性能要求。

3)1 100 kV 盆式绝缘子在产品质量检测中心以高参数顺利通过了整套绝缘型式试验及水压型式试验,验证了其可靠性。

1 100 kV 盆式绝缘子的研制成功,为其 1 100 kV GIS 的安全可靠运行提供了必要的技术保障。

参考文献:

- [1] 刘振亚.特高压电网[M]. 北京:中国经济出版社,2005.
LIU Zhenya. Extra high voltage power grid[M]. Beijing: China Economic Publishing House,2005.
- [2] 周小谦.我国的能源结构与电力规划[J]. 高压开关,2003(2):1-4.
ZHOU Xiaoqian. China's energy resources structure and electric power planning[J]. High Voltage Switchgear,2003(2):1-4.
- [3] 刘振亚.特高压交流输电技术研究成果[M]. 北京:中国电力出版社,2005.
LIU Zhenya. Research results of UHV AC transmission technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [4] 谷定燮,周沛洪,修木洪,等.交流 1 000 kV 输电系统过电压和绝缘配合研究[J]. 高电压技术,2006,32(12):1-6.
GU Dingxie,ZHOU Peihong,XIU Muhong,et al. Study on overvoltage and insulation coordination for 1 000 kV AC transmission system[J]. High Voltage Engineering,2006,32(12):1-6.
- [5] 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. Introduction of 1 100 kV GIS of shenyang high voltage switchgear Co. Ltd.[J]. High Voltage Apparatus,2007,43(5):354-357.
- [6] 国家发展和改革委员会.国家十二五规划[R]. 北京:国家发展和改革委员会,2011.
National Development and Reform Commission.National 12th five-year program[R]. Beijing:National Development and Reform Commission,2011.
- [7] 林 莘.现代高压电器技术[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
LIN Xin. Modern high-voltage electrical technology [M]. Beijing: Mechanical Industry Press,2002.
- [8] 李建基.国内外机械工业基本情况[M]. 北京:机械工业出版社,1995.
LI Jianji. Basic situation of domestic and foreign machinery industry[M]. Beijing: China Machine Press,1995.
- [9] 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 of high voltage circuit breaker [M]. Beijing: Publishing House of Tsinghua University,2000.
- [10] 孙永恒,张 铎,孟维东,等.1 100 kV GIS 的研制开发[J]. 电力建设,2007,28(4):1-6.
SUN Yongheng,ZHANG Duo,MENG Weidong,et al. Research and development of 1 100 kV GIS[J]. Electric Power Construction,2007,28(4):1-6.
- [11] 周 晔.1 100 kV 盆式绝缘子绝缘性能及机械性能研究[C]//输变电年会 2010 论文集.[S.l.]:IEEE,2010:122-125.
- ZHOU Ye. Analysis of insulation properties and mechanical properties of 1 100 kV's support insulator[C]//Proceedings of 2010 Power Transmission Annual Meeting. [S.l.]: IEEE,2010:122-125.
- [12] 魏俊梅.550 kV 盆式绝缘子电场优化设计[J]. 沈阳工业大学学报,2004,26(2):153-156.
WEI Junmei. Optimal design of 550 kV support insulator electric field[J]. Journal of Shenyang University of Technology,2004,26(2):153-156.
- [13] 曹 斌.800 kV GIS 的研制与应用[J]. 机电信息,2011(8):65-66.
CAO Bin. Manufacture and application of 800 kV's GIS[J]. Electrical and Mechanical Information,2011(8):65-66.
- [14] 徐建源.三相共箱 GIS 盆式绝缘子三维电场的计算分析[J]. 高电压技术,2000,26(1):11-13.
XU Jianyuan. Analysis of three-dimensional electric field of three-phase total box GIS support insulator[J]. High Voltage Engineering,2000,26(1):11-13.
- [15] 孙永恒,魏俊梅.ZF15-550 型 GIS 母线用盆式绝缘子电场强度及机械强度计算[C]//中国电机工程学会高压电器委员会 2004 年学术会议论文集. 中国电机工程学会高压电器委员会.[S.l.]:中国,2004:855-859.
SUN Yongheng,WEI Junmei. Calculation of electric field strength and mechanical strength of insulator in ZF15-550 GIS[C]//Proceedings of the 2004 Academic Conference. High Voltage Apparatus Committee of China Electrical Engineering Society.[S.l.]:China,2004:855-859.
- [16] 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: Mechanical Industry Press,2003.
- [17] 田志海.超高压固体复合绝缘材料的电击穿研究[J]. 高电压技术,1995,21(1):29-31.
TIAN Zhihai. Study on flashover of extra high voltage solid composite insulating materials[J]. High Voltage Engineering,1995,21(1):29-31.
- [18] 刘其昶.电气绝缘结构设计原理[M]. 西安:西安交通大学,1987.
LIU Qichang. Principle of electrical insulation structure design [M]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University,1987.
- [19] 盛剑霓.电磁场数值分析[M]. 北京:科学出版社,1984.
SHENG Jianni.Computation of electromagnetic fields[M]. Beijing: Science Press,1984.
- [20] 刘绍峻.高压电器[M]. 北京:机械工业出版社,1988.
LIU Shaojun. High voltage apparatus[M]. Beijing: China Machine Press,1988.

余良清(1968—),男,高级工程师,从事高压开关设备的研发和管理工作。

王洪涛(1966—),男,教授级高级工程师,从事高压电器工艺和管理的工作。