

±800kV 气体绝缘直流穿墙套管的研制

刘朋飞 南振乐 李振军

(西安西电开关电气有限公司, 西安 710077)

摘要 为支撑我国特高压直流输电工程建设, 实现重大装备国产化, 西安西电开关电气有限公司开展了±800kV 直流穿墙套管的研制工作。本文研制了一种气体绝缘直流穿墙套管, 使用专业分析软件对直流穿墙套管内部电场及结构强度进行了仿真计算, 并在国家高压电器质量监督检验中心通过全部型式试验, 其结构简单、通流能力强、可靠性高, 能够很好地适用于特高压直流输电工程中。

关键词: 气体绝缘; 直流; 穿墙套管; 研制

Development of ±800kV Gas-insulated DC Wall Bushing

Liu Pengfei Nan Zhenle Li Zhenjun

(Xi'an XD Switchgear Electric Co., Ltd, Xi'an 710077)

Abstract In order to support the construction of UHV DC transmission project in our country and localize the major equipment, we have been developing the ±800kV DC Wall Bushing. Gas-insulated DC wall bushing is developed in this article, simulation and calculation for electric field and structural strength of wall bushing are implemented by professional analysis software, and passed all type tests in national quality supervision & inspection center for high voltage apparatus. We successfully developed the ±800kV gas-insulated DC wall bushing, it is able to apply to UHV DC transmission project.

Keywords: gas-insulated; DC; wall bushing; development

在±800kV 特高压直流输电工程中, 必须通过穿墙套管才能将阀厅内的换流阀与户外的直流场设备连接起来, 保证输电回路对墙绝缘和承载直流电流。在±800kV 特高压直流系统中, 直流穿墙套管包括±800kV 直流穿墙套管、±400kV 直流穿墙套管和直流中性母线穿墙套管^[1-2]。其中, ±800kV 级直流穿墙套管是特高压设备制造难点之一。

1 特高压直流穿墙套管技术发展现状

目前直流穿墙套管类型主要有: 油浸纸电容式结构、环氧芯体 SF₆ 气体复合绝缘结构和 SF₆ 气体绝缘结构。油浸纸电容式结构低电压产品工艺成熟, 但存在漏油、爆炸燃烧等风险。环氧芯体 SF₆ 气体复合绝缘结构是当前主流产品, 最高电压等级为±800kV, 电气性能优良、绝缘结构合理, 但设计制造难度大, 通流能力较差^[3]。SF₆ 气体绝缘结构相对简单, 电气性能稳定, 通流能力强, 但设计和制造难度相对较高。

我国已建线路所采用的直流穿墙套管主要由国外公司供货, 加大了电力建设的成本, 并且在运行中也出现了一些故障。国内几家套管制造企业也在进行特高压直流穿墙套管的研制工作。

2 特高压直流穿墙套管研发

2.1 气体绝缘直流穿墙套管的结构

直流套管在固体绝缘介质上极易积聚静电荷, 静电荷的存在、转移和消失会直接导致固体绝缘介质内部电场分布改变, 对其内部的局部电场起到削弱或加强的作用。当直流套管运行状态变化时, 特别是极性反转, 静电荷极易使固体绝缘介质内部电场发生畸变, 使得局部区域电场集中, 引发闪络或击穿放电, 严重威胁特高压直流输电系统的安全运行^[4-6]。

为了解决直流电场条件下静电荷积聚对固体绝缘介质电场的畸变和劣化问题, 本文中设计的气体绝缘直流穿墙套管(以下简称穿墙套管)内部不设

任何固体绝缘材料支撑，其内部主绝缘为 SF_6 气体介质。穿墙套管结构（如图 1 所示）由两根复合绝缘子、支撑金属外壳和电连接金属导体三部分组成。其中间的导流导体由铝合金制成，两端与套管端部法兰采用可靠地插入式连接，端部法兰外部设有接线端子和均压屏蔽环，均衡套管外部电压分布^[7]，套管与中间支撑筒连接处设有接地端屏蔽，以均衡内部电压分布。

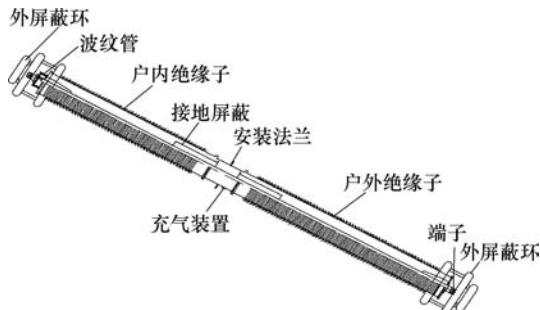


图 1 穿墙套管结构

与其他油浸纸穿墙套管和环氧浸渍干式穿墙套管相比，采用 SF_6 气体绝缘结构的直流穿墙套管，还有重量轻、结构简单、性能稳定、散热条件好、通流能力强等优点。

2.2 绝缘结构研究

穿墙套管的绝缘结构分为内绝缘和外绝缘，内绝缘采用 SF_6 气体作为主绝缘，其设计重点通过设置合理的接地屏蔽来保证电场分布的均匀程度，同时保证所有元件的最高工作场强在许用值之内。外绝缘主要考虑穿墙套管运行中所承受的电气负荷持续电压、瞬时过电压、空气绝缘等，还要考虑污秽程度对外绝缘的影响^[8]。

1) 外绝缘结构研究

外绝缘采用重量轻、强度高的空心复合绝缘子。考虑直流电的静电吸附效应会吸附较多的灰尘，所以户外部分的爬电比距达到了 $51\text{mm}/\text{kV}$ 。外屏蔽环设计采用 3 层均压环组合结构，其重量轻、结构简单，可以保证穿墙套管正常运行时空气中不产生电晕放电现象。同时，高刚性和强度的空心复合绝缘子保证在悬臂安装时不产生较大的挠度变形和有很高的机械可靠性^[9]。

2) 内绝缘结构研究

特高压直流穿墙套管在运行过程中会承受直流、交流、极性反转等多种工况^[10-11]。本文提出的穿墙套管内部不设任何固体绝缘支撑，主要研究穿墙套管在交流激励电压下的电场分布情况。考虑穿

墙套管中心导体挠度变形及复合绝缘子悬臂变形等因素，基于有限元分析计算软件，建立穿墙套管的计算分析模型，进行雷电冲击电压下的静电场分析，各部分材料的介电常数取值见表 1。与穿墙套管中心导体相连接的导电体加载雷电冲击耐受电压为 2100kV ，穿墙套管中部用于与墙体支架相连接的安装法兰及墙体电压取值 0。穿墙套管整体的计算电位分布图如图 2 所示。电场计算仿真结果如图 3 所示。

表 1 介电常数

| | 空气 | SF_6 | 硅橡胶伞群 | 环氧玻璃丝筒 | 金属导体与支撑外壳 |
|------|--------|--------|-------|--------|--------------------|
| 介电常数 | 1.0005 | 1.002 | 4.5 | 5.5 | 1×10^{10} |

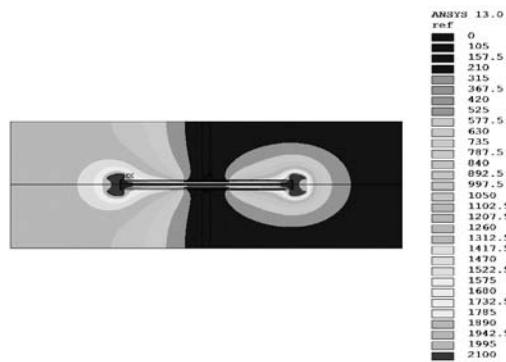


图 2 穿墙套管电位分布

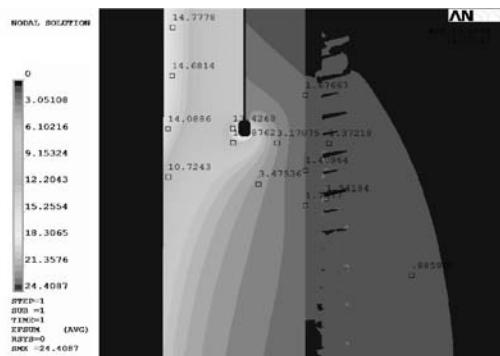


图 3 穿墙套管内部电场分布

根据穿墙套管内部电场仿真计算结果，接地屏蔽末端为内部电场值最大的部位，最大电场值约为 SF_6 气压 0.5MPa 时设计基准值^[12]的 80% 。

2.3 通流能力研究

随着电网负荷不断增长的需求，对换流站的传输容量提出了更高的要求，作为换流站的重要设备——穿墙套管的通流能力也成为设备可靠运行的重要指标。

构建穿墙套管整体有限元分析模型，利用专业

分析软件进行分析计算，通流电流取值 1.2 倍额定电流。设定边界条件：中心导体，内部高压端屏蔽，两端外部屏蔽加压流进电流 9600A，流出-9600A；接地屏蔽，安装试验墙，户内屋顶和远端墙壁施加电压的。

根据 GB/T 11022 规定镀银触头，在 SF₆ 气体中的最大温度为 105℃，周围空气温度为 40℃时的温升 65K。导电零件镀银件、裸铝合金件在 SF₆ 气体中的最大温度为 115℃，周围空气温度 40℃ 时温升 75K。

计算结果如图 4 所示，中心导体与螺旋弹簧接触位置最大温度点为 83.6℃，中心导体和户内端部盖板温度为 77.6℃，各部位温升值均符合标准要求。散热系数见表 2。

表 2 散热系数

| | 导体 | 中部 法兰 | 弹簧 触指 | 接线 端子 | 端部法兰 外表面 |
|--------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| 散热系数/ (W/mm ² ℃) | 1×10^{-5} | 6×10^{-6} | 6×10^{-6} | 9×10^{-6} | 1.25×10^{-5} |

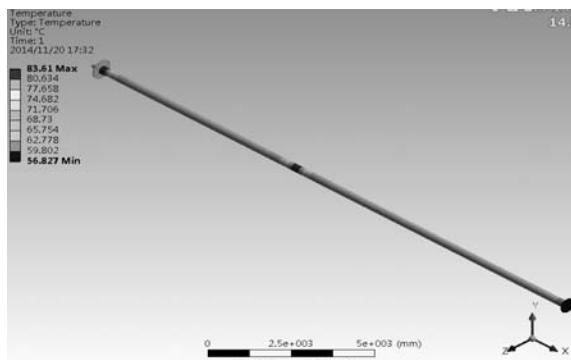


图 4 穿墙套管温升仿真

2.4 机械强度计算分析

由于穿墙套管安装时两端套管处于悬臂状态，因此，需对复合绝缘子、中部支撑筒的强度进行分析计算。同时还要考虑内部的中心导体产生的挠度对内绝缘的影响。

1) 导体强度计算

中心导体在正常安装状态下可简化为一端固定、一端简支梁的模型，根据机械设计手册提供计算公式，对其弯曲变形量进行计算，即

$$f = \frac{PL^3}{192EI} \quad (1)$$

式中，P 为导体自重，N；L 为模型长度，m；E 为绝缘子的弹性模量，GPa；I 为复合绝缘子转动惯量 m⁴。

从式（1）可以计算出中心导体挠度值为 0.032m。

建立中心导体模型采用有限元软件进行仿真分析（如图 5 所示），计算结果为 0.041m，仿真结果与公式计算结果对比较为接近。

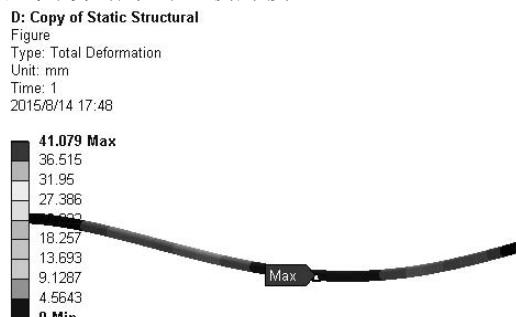


图 5 中心导体挠度仿真

穿墙套管装配完成后对中心导体中部的挠度进行测量，测量结果为 0.035m，实际测量结果与公式计算、仿真结果对比均较为接近。

2) 绝缘子刚度分析

穿墙套管安装完成后，其两侧绝缘子均呈悬臂状。根据机械设计手册提供计算公式，对其弹性变形量进行计算，即

$$f = \frac{Fl^3}{3EI} \quad (2)$$

式中，F 为导体自重，N；L 为模型长度，m；E 为绝缘子的弹性模量，GPa；I 为复合绝缘子转动惯量 m⁴。

从式（2）可以计算出绝缘子端部挠度为 0.035m。

3) 穿墙套管抗震计算分析

对穿墙套管进行建立模型，采用有限元软件进行仿真计算，分析此结构能否满足 AG3 地震强度下的运行要求。

仿真计算结果显示，Y 轴和 Z 轴方向（即垂直于套管轴线截面）地震运动对穿墙套管的影响较大。Von Mises 应力最大值出现在中间法兰的筋板与壳体的焊接部位（如图 6 所示），其值为 11.378MPa，

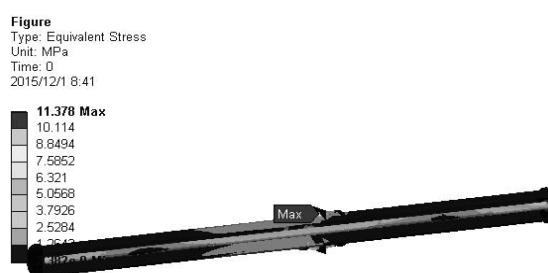


图 6 安装法兰受力分析

远小于铝合金材料的设计许用应力 93.3MPa; 穿墙套管内导体的变形量也较小(如图 7 所示), 最大变形量出现在垂直于导体轴线的方向(即 Y 轴或 Z 轴方向)最大变形量 $\delta_{\max} < 10\text{mm}$ 。

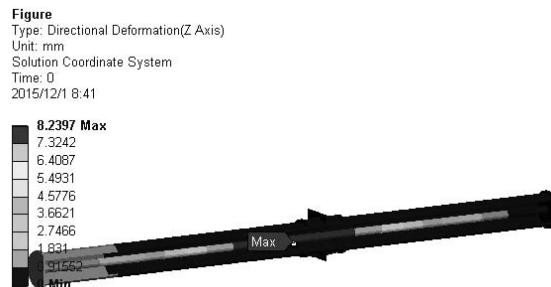


图 7 导体变形分析

将上述穿墙套管的机械强度计算分析结果进行电场校核, 其机械强度满足设计要求。

3 型式试验

±800kV 气体绝缘直流穿墙套管在国家高压电器质量监督检验中心一次性通过了规定的所有型式试验项目^[13-17], 其中温升试验是在 8000A 的试验电流下完成, 套管各部位的温升值远小于标准要求值。

对穿墙套管按国标规定依次进行了逐个试验及型式试验。其中逐个试验项目包括: 直流耐受电压试验、极性反转试验、介质损耗与电容量测量试验等。型式试验项目包括: 工频耐受电压试验、雷电冲击耐受电压试验、操作冲击耐受电压试验、温升试验、热短时电流耐受试验、悬臂负荷耐受电流试验、无线电干扰电压试验等(分别如图 8 和图 9 所示)。

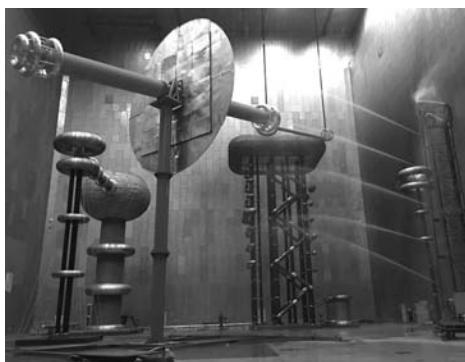


图 8 直流湿耐受电压试验

4 结论

本文分析了我国特高压直流穿墙套管设备的使用现状。根据未来我国直流输电建设对直流穿墙套

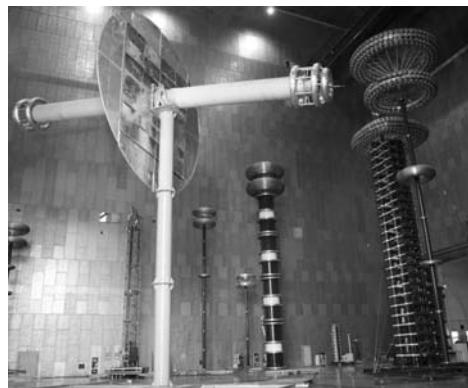


图 9 雷电冲击耐受电压试验

管的使用需求, 从结构设计、电场分析、机械性能计算等方面进行深入研究, 研发出了一种在通流能力强、可靠性高、结构简单的特高压直流穿墙套管产品, 并通过了国家标准规定的强制型式试验。该产品的成功研发, 将更好地支持我国特高压直流输电的建设。

参考文献

- [1] 李立涅. 特高压直流输电的技术特点和工程应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 5-6.
- [2] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 1-3.
- [3] 舒印彪, 刘泽洪, 高理迎, 等. ±800kV 6400MW 特高压直流输电工程设计[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 1-8.
- [4] 汪沨, 方志, 邱毓昌. 高压直流 GIS 中绝缘子的表面电荷积聚的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 105-109.
- [5] 王健, 李伯涛, 李庆民, 等. 直流 GIL 中线形金属微粒对柱式绝缘子表面绝缘子表面电荷积聚的影响[J]. 电工技术学报, 2016, 31(15): 213-222.
- [6] 吴光亚, 王钢, 蔡炜, 等. ±500kV 直流复合绝缘子的电位分布特性[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 132-135.
- [7] 刘振, 卞星明, 王黎明, 等. 特高压直流复合绝缘子均压环设计[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 137-141.
- [8] 范建斌, 宿志一, 李武峰, 等. 高压直流支柱绝缘子和套管伞形结构研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(21): 1-6.
- [9] GB/T 21429—2008. 户外和户内电气设备用空心复合绝缘子定义、试验方法、接收准则和设计推荐[S].
- [10] 江汛, 王仲奕. 复合高压套管的电场计算和分析[J]. 高电压技术, 2004, 30(3): 17-18, 21.

(下转第 52 页)