

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.12.012

氮气环网柜中复合绝缘的工频特性研究

周柏杰¹, 谭东现², 韩冬¹, 赵小令², 肖登明²

(1. 南京南瑞集团公司智能电器装备事业部, 南京 210093; 2. 上海交通大学电气系, 上海 200030)

摘要: 采用氮气(N_2)或干燥空气替代 SF_6 作为中压开关设备的绝缘介质是目前环保型开关设备的发展热点。要保证气箱结构紧凑小巧,需要完全掌握环保气体的绝缘特性,并对固体—气体复合绝缘的配合进行深入研究。文中从研究 N_2 的基础绝缘特性入手,研究了不同电场均匀度、气体压力以及电极间隙下的 N_2 工频耐压特性数据,提出了 N_2 绝缘的经验公式以指导气箱的整体设计和局部优化。基于 N_2 气箱关键部位的绝缘配合的系统性的建模仿真分析,结合局部复合绝缘的耐压特性实验,得出结论气箱结构设计中需要采用极不均匀场的特性作为设计依据,同时在关键位置的固体—气体复合绝缘处需要保证足够的气体间隙。

关键词: 气体绝缘; 环保型开关; 绝缘配合; 电场分布; 复合绝缘

Investigation into the Characteristics of Composite Insulation in Nitrogen Insulated Ring Main Unit

ZHOU Baijie¹, TAN Dongxian², HAN Dong¹, ZHAO Xiaoling², XIAO Dengming²

(1. Department of Intelligent Electrical Equipment, Nari Group Corporation, Nanjing 210093, China;

2. Department of Electric Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Using nitrogen(N_2) or dry air to replace SF_6 as insulation media in high voltage apparatus is a hot topic in the development of environmental friendly switching equipment. To ensure compact structure and small size of the devices, engineers need to study the insulation characteristics of the utilized gas and the solid-gas compound insulation. The fundamental properties of N_2 as the insulation medium under different uniformities of electric field, pressures and electrodes gaps are studied. Furthermore, the empirical equations of N_2 insulation are obtained for optimizing the design of N_2 insulated switchgear. According to the simulation, calculation and analysis of insulation coordination at key points in the N_2 switchgear, and the results of solid-gas insulation coordination experiments, it is concluded that the characteristic of non-uniform electric field is important in designing criterion, and a sufficient gap is required when considering solid-gas compound insulation.

Key words: gas insulation; eco-friendly switchgear; insulation coordination; electric field distribution; compound insulation

0 引言

采用气体绝缘的开关设备,主要包括高压领域的封闭式组合电器(GIS)、气体绝缘高压输电线(GIL),以及中低压领域的柜式气体绝缘金属封闭开关设备(C-GIS),通常都采用六氟化硫气体(SF_6)作为

绝缘介质。这主要是由于 SF_6 气体具有无毒、不可燃、绝缘强度高和灭弧能力远远超过一般电介质的特点^[1]。根据美国世界资源研究所(WRI)的统计,全球每年生产的 SF_6 气体约有80%被应用于电力工业领域^[2]。但由于其较大的温室效应和较长的分解周期^[3],目前已被《京都议定书》规定为禁用的气体介质。

目前气体绝缘开关设备的取代 SF_6 环保性替代方案主要包括,氮气(N_2)及其与 SF_6 的混合气体^[4-8]、

收稿日期:2016-06-28; 修回日期:2016-08-21

基金项目:国家自然科学基金项目资助(51337006)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51337006).

CF₄、C₄F₈、CF₃I^[9-18]以及含氟酮类和含氟腈^[13]类等物质。基于目前的应用研究现状,中低压领域的绝缘替代多采用干燥 N₂ 或空气作为绝缘介质替代 SF₆ 气体。包括国外的 ABB、施耐德、东芝电气等企业,均开发了采用干燥空气作为绝缘介质的 40.5 kV 以下电压等级 C-GIS 产品;而国内的相关厂家也参照空气绝缘特性,开发了采用干燥 N₂ 作为绝缘介质的中压开关产品^[10-12]。

从目前的产品应用现状看,采用干燥 N₂ 绝缘的开关设备可能存在的问题包括:①N₂ 绝缘产品的设计都基于空气的绝缘特性参数,并采用一定的偏差裕度,这与实际情况存在差异;②气箱内部较多采用复合绝缘,在绝缘配合方面存在较多的场强集中问题,需要开展深入研究。文中针对上述问题,开展工频特性的仿真与试验研究,旨在为后续的系统性环保产品开发提供助力。

1 氮气的绝缘特性研究

1.1 氮气绝缘试验装置与试验步骤

为研究 N₂ 的基础绝缘特性,建立了能够满足气体绝缘性能试验平台。该试验平台主要包括气体放电腔体、电极系统、抽真空及充放气系统、工频电源及测量系统等。放电腔体见图 1。图 1 为一个内径 600 mm,高 760 mm 的铝合金压力容器,上端采用盆式绝缘子作为高压导杆的绝缘支撑件,上端高电压电极可更换为球状和针状电极,下端接地电极为平板电极,电极距离可在 0~100 mm 范围内调节。

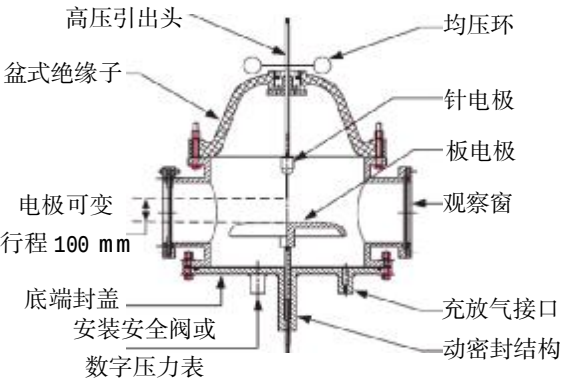


图 1 气体放电腔体示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the test rig

在文中的研究中,构建极不均匀场(针—板电极)和稍不均匀场(球—板电极),以模拟电气设备中常见的电场环境。采用电场仿真软件得到的不同电极间隙下的电场均匀度见表 1^[11]。

由表 1 中数据可见,电极间隙距离在 5~50 mm 范围内变化时,球板电极所形成的电场都为稍不均匀电场。针电极由于其尖端曲率半径较小,会诱使电

表 1 不同间隙距离下的电场不均匀系数

Table 1 Non-uniform coefficient for electric field at different gap distance d

针—板电极		球—板电极	
极间距离 d/mm	不均匀系数 f	极间距离 d/mm	不均匀系数 f
5	7.238	5	1.067
10	12.156	10	1.137
15	17.037	15	1.208
20	21.185	20	1.282
25	25.501	25	1.357
30	29.956	30	1.434
40	37.988	40	1.591
50	45.641	50	1.749
60	52.312	60	1.906

场线集中于针电极表面,尤其是针尖部位,从而导致电场分布不均匀,形成极不均匀电场。当 d=20 mm 时,针板电极的电场不均匀系数为 21.185,电极间隙为 5 mm 时 f 值仍高达 7.238。因此在当前的试验条件下,针板电极所形成的电场都为极不均匀电场。

工频绝缘试验均在室内常温下进行,所采用的试验方法及步骤如下:在试验开始前,首先使用无水酒精对腔体内部、电极及所有的装配部件进行彻底的清洁,确保装配后试品的表面处于清洁状态。放电腔体内抽真空后充入高纯 N₂。开始试验时,先将高压端及接地线稳妥的连接在电极上,之后以稳定的升压速率提高电压直至气隙被击穿为止。同一气隙下重复击穿至少 5 次,且每次击穿后间隔 3~5 min 再进行下一次试验以消除上次击穿对本次试验结果的影响。实验所使用高纯 N₂ 纯度均为 99.99%。

1.2 氮气工频击穿特性与分析

N₂ 在稍不均匀场中的工频击穿电压曲线见图 2。由图 2 可以看出,在不同气压条件下,N₂ 的工频击穿电压峰值 U_b 都随间隙距离 d 的增大而增大,但由于电场不均匀度也随之下降,因此二者并未表现出完全的线性关系,而是呈现出一种趋向饱和的态势。气压越低,这种非线性的变化趋势就越明显。当间隙距离保持一定时,N₂ 的工频击穿电压随气压的升高线性增长,且间隙越大,击穿电压增长的速度就越快。

为了便于对比气体在不同气压以及间距下的绝缘性能,同时也使文中所得到的试验数据更具有普遍参考价值,利用式(1)将不同间距与气压下的击穿电压数值 U_b 转换成击穿时的最大电场

$$E_m = fU_b/d. \tag{1}$$

由于稍不均匀场中不存在稳定的电晕放电,一旦出现局部放电,将直接导致整个气隙的击穿。因此,可以认为 E_m 是引起稍不均匀场中电晕放电的临

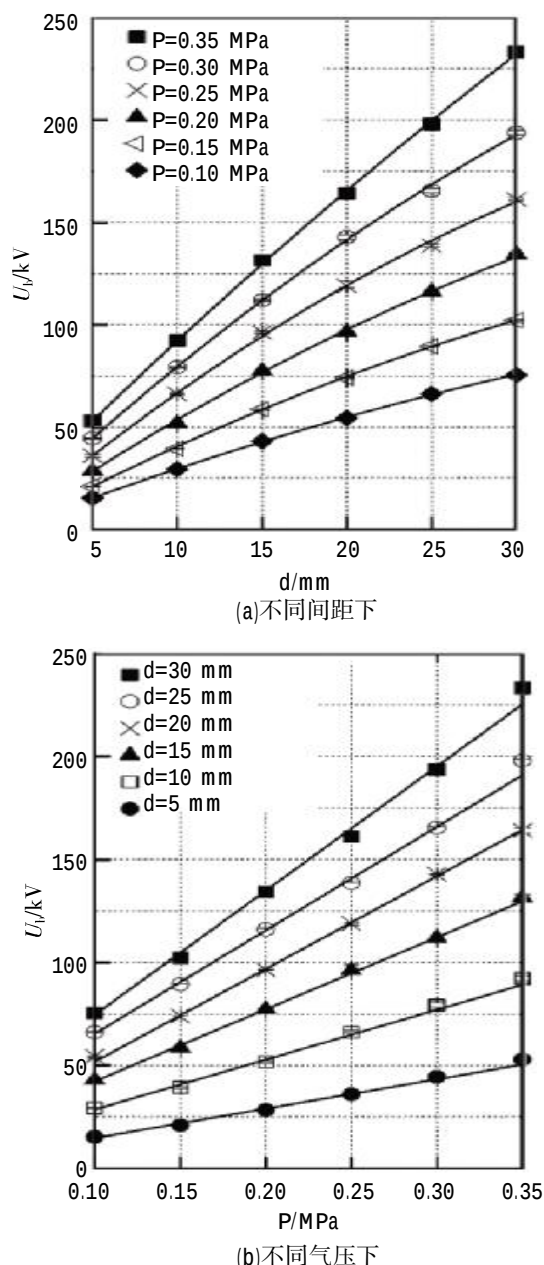


图 2 不同间距及气压下 N_2 在稍不均匀电场中的工频击穿电压

Fig. 2 Breakdown voltage of N_2 in the condition of quasi-homogeneous electric field at different gap distance d and gas pressure P

界值。只要在稍不均匀电场中出现电场值大于 E_m 的情况,气体间隙就会被击穿。该数值只与气压和电极形状有关,与放电间隙的大小无关。

在极不均匀电场中,当所施加的电压达到一定数值时,会首先在针电极尖端电场最为集中的位置产生稳定的电晕放电。之后随着电压逐渐升高,电晕放电将不断扩大,直至间隙被完全贯穿。 N_2 在极不均匀电场中工频击穿电压 U_b 随间隙距离 d 和气压 P 的变化情况,见图 3。由图 3 可以看到,由于电场均匀程度下降, N_2 的工频击穿电压不再同间隙距离

或气压成正比关系,而是都表现出了不同程度的非线性特征。在 0.1 MPa 时, N_2 的击穿场强约为 6~7 kV/cm。与稍不均匀场时相比, N_2 在极不均匀场中的击穿场强只有前者的 1/5。

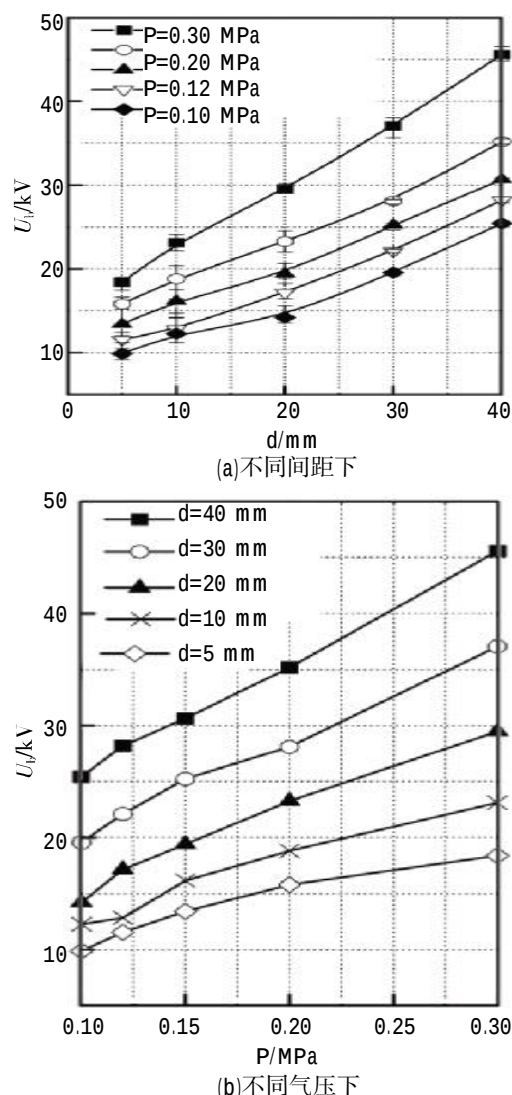


图 3 不同间距及气压下 N_2 在极不均匀电场中的工频击穿电压

Fig. 3 Breakdown voltage of N_2 in the condition of extremely non-uniform electric field under different gas pressure P and gap distance d

N_2 在稍不均匀电场中最大电场 E_m 随气压的变化情况,见图 4。由图 4 可以看出, N_2 的临界值随气压的升高线性增加。在 0.1 MPa 时,其最大击穿场强约为 32 kV/cm,在一定的电场均匀度条件下,击穿电压与气压、电极间隙乘积值(pd)之间的关系符合巴申定理所阐述的基本方程,见图 4。稍不均匀场和极不均匀场条件下的关系式分别为:在稍不均匀场中曲线拟合符合度为 $U_b = 10.97 \times (pd) + 10.23 \sqrt{pd} = 0.99$;在极不均匀场中曲线拟合符合度为 $U_b = 0.438 \times (pd) + 8.132 \sqrt{pd} = 0.95$ 。其中 U_b 单位为 kV, pd 单位为

MPa·mm。对于文中所涉及的 12 kV 绝缘气箱,其工频过电压值为 42 kV,充气压力最大为 0.15 MPa,则稍不均匀场下的电气最小间隙为 16.1 mm,而极不均匀场电气最小间隙则为 106.7 mm。但由于拟合曲线对于稍不均匀场和极不均匀场的数据拟合相似度有所不同,前者的较高为 0.99,后者仅为 0.95,因此可认为在稍不均匀场条件下击穿电压与 pd 的关系更加接近线性。这主要是由于在极不均匀场条件下,随着间隙增大,场不均匀度 f 产生较大的变化,且伴随产生电晕作用,造成了线性关系的偏离。

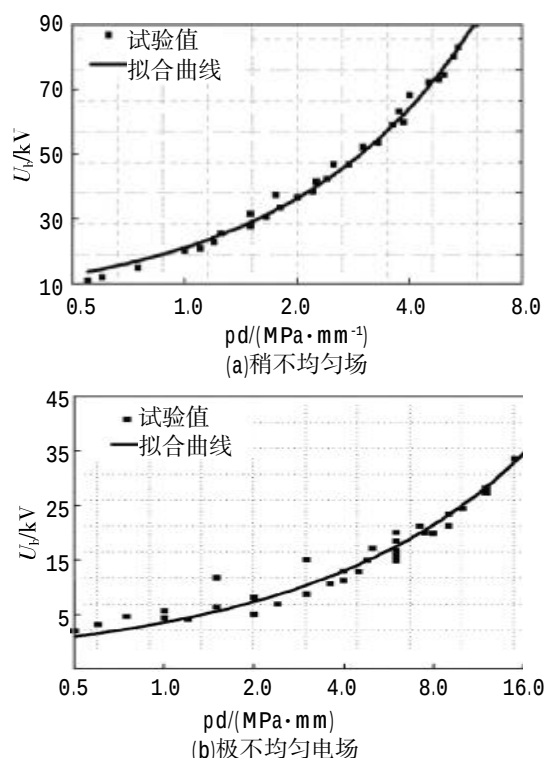


图 4 在稍不均匀场和极不均匀电场中 N_2 的 U_b - pd 曲线

Fig. 4 Breakdown voltage of N_2 in the condition of quasi-homogeneous electric field and extremely non-uniform electric field versus pressure distance (pd) curves

2 氮气绝缘气箱中复合绝缘典型案例

2.1 氮气绝缘气箱的结构设计

2.1.1 保证最小安全电极间隙

根据上述的基础数据,参照 SF_6 气箱的基本结构,设计的电极中心间距为 150 mm,最小间隙为 100 mm,对地最小间隙为 100 mm,通过仿真计算可知,采用传统的 C 型母排(截面 40 mm×10 mm),圆角半径为 10 mm,相间及对地的 f 值约为 4.5 和 3.5。上述基础数据表明在允许气压下,极不均匀场下的需要保证上述的电极间隙。所设计的气箱结构见图 5。

2.1.2 避免极不均匀电场条件的出现

即使在保证了安全裕度的条件下,气箱设计中

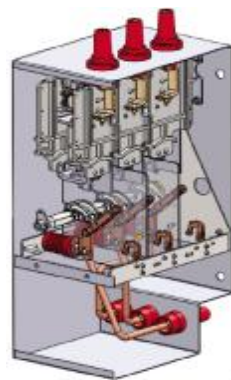


图 5 N_2 气箱三维示意图

Fig. 5 N_2 insulated tank 3D image

也需要尽量避免出现极不均匀电场,以防止可能出现的沿面及局放问题^[19-20]。关键部位包括隔离开关部分、连杆拐臂位置以及高压端与固定板连接位置等。上述部位均采用了大圆角以及均压处理等方式,有效降低局部的场强集中。

2.2 复合绝缘设计及其仿真分析

由于固体绝缘的耐压强度较高,在电场强度较为集中区域多被采用,以有效降低高压导体附近的电场集中问题。通过棒—棒电极模型计算得到结论^[9],通过绝缘材料包覆后的平行电极间的气隙电场强度可实现有效的降低,文中通过仿真数值计算可得到相同结论。更为重要的是,采用固体绝缘材料包覆的导体,可以有效避免电极电离周围的绝缘气体,引发电子崩的产生,从而有效降低发生局放甚至贯穿性放电的可能。

当然固体绝缘的引入也可能造成一定的问题,尽管文中所设计的 N_2 气箱未采用固体绝缘包覆母线的方案,但在其他关键部位仍可能出现复合绝缘的问题,包括套管部分、绝缘支撑板以及绝缘隔板等。以套管部件为例,试验样机采用的绝缘套管为 SF_6 气箱中应用的套管,但该部件在 N_2 气箱实验中发生了工频击穿的问题,见图 6,因此需要在该部件位置找到问题关键,并进行优化改进。



图 6 发生闪络击穿后的套管照片

Fig. 6 Breakdown pictures under power frequency withstand voltages

2.2.1 局部复合绝缘模型

气箱进线套管附近的复合绝缘配合示意图,见图 7。由于固定的需要和装配的方便,母线由套管进入气箱后,通过螺栓与 C 型母排相连接,C 型母排再连接软连接将高压引入真空灭弧室。绝缘固定板(图 7 中灰色板件)、C 型母排以及套管在局部区域内形成较为复杂的绝缘配合,以此为基础建立基本模型进行仿真计算对比和局部工频绝缘特性研究。

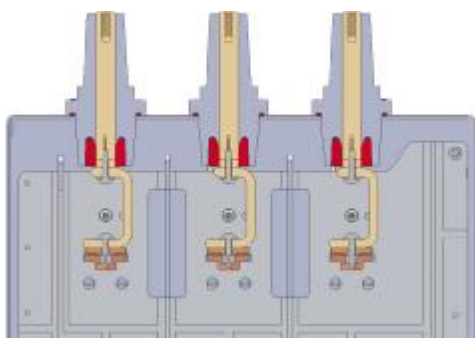


图 7 套管部件附近绝缘配合示意图

Fig. 7 Insulation coordination near the busbar bushing

2.2.2 套管伞裙长度仿真对比

考虑到该绝缘件按照 SF_6 绝缘特性设计,且发生工频击穿的部位为套管内部伞裙的外壁,在仿真模型上对套管伞裙的长度进行修改,从而考察不同情况下的电场强度。原始尺寸、伞裙长度加长 25 mm 仿真结果和伞裙长度加长 50 mm 的套管截面场强分布图见图 8。

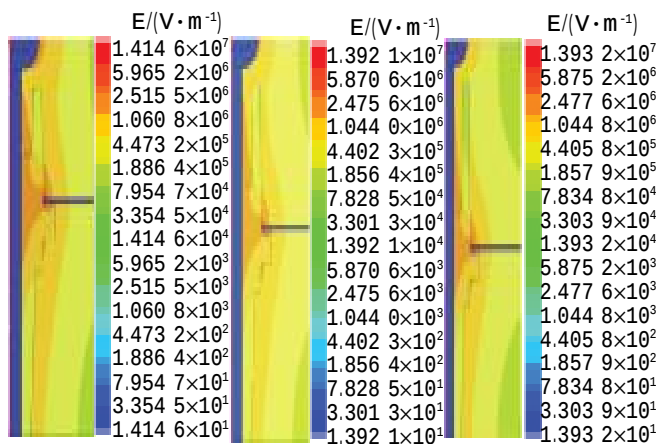


图 8 套管 2D 电场强度仿真分析

Fig. 8 2D electric field simulation of the busbar bushing

从图 8 中可以看出,最大场强出现的位置在套管法兰位置,但实际产品中该位置一般都添加接地屏蔽网,该处的场强极大值可以忽略。气体中较大的场强位置主要包括:①导电杆附近的条状区域,场强值约为 1.4 kV/mm,该处高场强的数值与面积随着高压导杆与接地板件间隙的接近而不断加大。当伞裙长度的增加 25 mm 后,该区域的面积也在增大,

且场强值并未降低;当伞裙长度增长 50 mm 后,伞裙底部的高场强区域被显著降低;②C 型母排拐角处也是场强集中区域,随着伞裙长度的加大,弯折处场强显著降低。

综上所述,伞裙长度的增加无法减小导电杆附近的场强数值和高场强区面积,但可有效降低伞裙端部的场强,同时 C 型母排拐角处场强亦显著降低。

2.2.3 套管与绝缘固定板绝缘配合仿真对比

由于套管附近较高电场强度和较近对地间隙,需要考虑附近固体—气体复合绝缘对电场强度的影响。故进行了 3D 仿真模型的计算,见图 9。对比图 8、9 可知,前者的场强值相对较高。这是由于对于 2D 模型沿第 3 轴直线拉伸后形成的 3D 模型的场强分布与 2D 模型的计算结果一致,这与实际的 3D 模型的气体间隙有较大差别,前者的间隙相对较小且均匀,故 2D 的场强值相对较小。

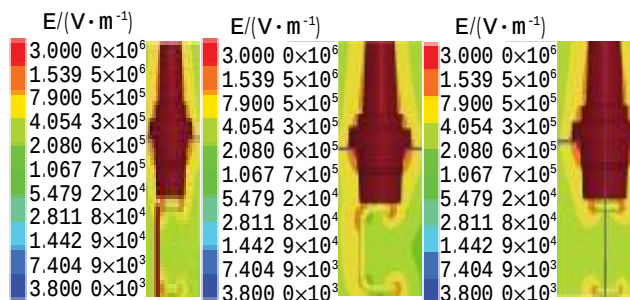


图 9 套管 3D 电场强度仿真分析

Fig. 9 3D electric field simulation of the busbar bushing

由图 9 结果可见,高场强区域集中于 C 型母排的弯折和倒角附近,该出的场强值与 2D 结果中的数值较为接近。随着绝缘隔板的加入,高场强区域的面积被显著拉伸、变大,使得绝缘隔板附近的电场强度也明显变大,此处场强超过 1.8 kV/mm 临界值,有可能发生局部放电和击穿。另外此处由于高场强所产生的气体带电粒子(电子崩)由于绝缘隔板作用相比于纯气体空间较难扩散,也容易造成空间电荷的积累和场强的畸变形成击穿触发点。

2.2.4 工频绝缘试验结果分析

套管局部绝缘配合试验照片见图 10。气箱中的局部绝缘配合实验包括套管、C 型母排和绝缘隔板 3 部分,涉及 3 个间隙距离:①C 型母排上沿平面与套管下沿平面垂直间隙设为 A(通过添加金属垫片增加 C 性母排的对地间隙);②隔板与套管最下沿垂直间隙为 B;③隔板与 C 型母排的水平距离为 C。考察不同间隙情况下的工频耐压特性。

调整 A、B、C 3 个间隙距离后进行的工频耐压实验数据见表 2、3。表 2 数据表明,随着 C 型母排上端面的对地间隙的加大工频耐压值明显提高,较大



图 10 套管局部绝缘配合试验照片

Fig. 10 Photos of the insulation coordination near the busbar bushing

的 C 型母排倒角也可显著提升工频耐压数值。采用大弧度处理后的 C 型母排, 在无绝缘隔板的情况下, A 值只要达到 11.5 mm 即可满足 12 kV 开关柜工频耐压要求, 即传统的 SF₆ 气箱用套管结构尺寸可直接在 N₂ 气箱中使用。当然为了保证较大的安全裕度, 可适度增加弹片以增加间隙距离。实验现象表明, 该出发生放电的触发点为 C 型母排的倒角部位, 而固体由于较为平滑的大伞群结构保证了较为均匀的电场分布, 这与上一部分的仿真结果相一致。

表 2 不同倒角母排及对地间隙情况下的工频耐压数据(无绝缘隔板)

Table 2 Power frequency data in different condition of angles and gap to the ground(without insulator plane)

参数	A 值/mm			
	11.50	14.50	17.50	20.00
C 型母排 R=4 mm	40.5	41.5	42.5	43.0
C 型母排 R=12 mm	44.8	45.8	47.1	47.5

表 3 C 型母排(R=12 mm)与绝缘隔板不同间隙情况下的工频耐压数据(A= 11.5 mm)

Table 3 Power frequency voltages with different gap between C busbar(R=12 mm)and insulator plane(A= 11.5 mm)

B 值/mm	C 值/mm			
	0	10	15	20
0.00	40.0	42.1	42.8	43.2
10.00	40.5	42.8	43.5	44.0
15.00	41.2	43.6	44.2	44.6

表 2 数据表明, 绝缘隔板与 C 型母排的距离对该部分绝缘配合的工频耐压有较大影响, 随着两者之间间隙的放大, 工频耐压值有所提升。在 A 值为 11.5 mm 的正常间隙下, 将隔板与母排无间隙贴合工频耐压由 45.0 kV/mm 骤降至 40.0 kV/mm, 而随

着绝缘隔板与母排间隙距离的加大, 绝缘耐压逐渐恢复无绝缘隔板的水平。绝缘隔板距离母排的间隙需要保证在 10 mm(垂直和水平)以上才能保证满足 12 kV 的工频耐压要求。

实验结果配合仿真分析可知, 由于气—固绝缘介质拥有不同的介电常数, 离地电位附近的高压导体附近气体的高场强区域面积扩大; 同时由于固体材料阻挡电子崩的扩散, 加重局部的电场畸变, 由此引起工频耐压强度的显著降低。

3 结论

1)产品中的设计值与基础实验中得到的数据差距较大, 这是因为存在绝缘配合的问题。对于中压绝缘气箱的设计最好参照极不均匀场的数值, 以便为产品留有足够的安全裕度;

2)解决局部场强过高最有效的手段是增加间隙和改变导体附近的电场均匀度。本文中的不对称设计会导致问题的复杂化, 需要在关键部位进行细化仿真与实验验证;

3)对地间隙较小的高压端添加固体绝缘件会引起较为明显的电场畸变, 尤其会增加导体附近不均匀场的面积, 这时需对电极进行特殊处理并保证两者的合理间隙, 而隔板的添加需要较为谨慎, 除了上述原因外, 较大面积的固体绝缘可能造成局部带电粒子的扩散问题。

志谢

感谢国家电网公司科学技术项目《环境友好型中压开关绝缘技术研究》。

参考文献:

[1] 罗学琛. SF₆ 气体绝缘全封闭组合电器(GIS)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
LUO Xuechen. Gas insulated metal-enclosed switchgear[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.

[2] COOK E. Lifetime commitments: Why climate policy-makers can't afford to overlookfully fluorinated compounds[M]. Washington: World Resources Institute, 1995.

[3] RIGBY M, MÜHLE J, MILLER B R, et al. History of atmospheric SF₆ from 1973 to 2008[J]. Atmos. Chem. Phys., 2010, 10(21):10305-10320.

[4] KLINE L E, DAVIES D, CHEN C, et al. Dielectric properties for SF₆ and SF₆ mixtures predicted from basic data [J]. Journal of Applied Physics, 1979, 50(11):6789-6796.

- [5] YAMAMOTO O, TAKUMA T, HAMADA S, et al. Applying a gas mixture containing C_4F_8 as an insulation medium[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(6): 1075-1081.
- [6] 周泽存, 沈其工, 方瑜, 等. 高电压技术[M]. 第 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2004: 29-35.
ZHOU Zecun, SHEN Qigong, FAN Yu, et al. High voltage technology[M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 29-35.
- [7] YANNICK K, FRANÇOIS B, PHILIPPE P, et al. SF_6 alternative development for high voltage switchgears[C]// 2015 IEEE PES general meeting. Denver: IEEE Power & Energy Society, 2015.
- [8] 钱立骁, 陈慎言. 12~24 kV 氮气绝缘环网柜的研制[J]. 高电压技术, 2014, 40(12): 3717-3724.
QIAN Lixiao, CHEN Shenyan. Research and design of 12~24 kV nitrogen insulated ring main unit[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(12): 3717-3724.
- [9] MANTILLA J D, GARIBOLDI N, GROB S, et al. Investigation of the insulation performance of a new gas mixture with extremely low GWP[C]// Electrical Insulation Conference, IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society. Philadelphia, USA: [s.n.], 2014: 302-306.
- [10] 邓云坤, 肖登明, 陈炯. $\text{CF}_3\text{I}-\text{N}_2$ 混合气体作为 SF_6 替代气体用于 GIS/C-GIS 的绝缘性能分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(9): 2288-2293.
DENG Yunkun, XIAO Dengming, CHEN Jiong. Insulation performance of $\text{CF}_3\text{I}-\text{N}_2$ gas mixtures as alternative for SF_6 in GIS/C-GIS[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(9): 2288-2293.
- [11] 邓云坤. 环保型绝缘气体 CF_3I 在电气设备中的应用基础研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
DENG Yunkun. Basic research of the environmentally friendly insulating gas CF_3I for its application in electric power apparatus[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [12] TAKEDA T, MATSUOKA S, KUMADA A, et al. Sparkover characteristics in CF_3I gas and $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ gas mixture under non-uniform field gaps[J]. IEEE Transactions on Power and Energy, 2010, 130(9): 813-818.
- [13] KASUYA H, KAWAMURA Y, MIZOGUCHI H, et al. Interruption capability and decomposed gas density of CF_3I as a substitute for SF_6 gas[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(4): 1196-1203.
- [14] CRESSAULT Y, CONNORD V, HINGANA H, et al. Transport properties of CF_3I thermal plasmas mixed with CO_2 , air or N_2 as an alternative to SF_6 plasmas in high-voltage circuit breakers[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2011, 44(49): 495202.
- [15] HYRENBACH M, HINTZEN T, MULLER P, et al. Alternative gas insulation in medium-voltage switchgear[C]// 23rd International Conference on Electricity Distribution. Lyon: IEEE, 2015: 1033-1035.
- [16] SIMKA P, RANJAN N. Dielectric strength of C_8 perfluoroketone[C]// The 19th International Symposium on High Voltage Engineering. Pilsen, Czech Republic: [s.n.], 2015: 803-808.
- [17] LIM S B. Study on oxygen/nitrogen gas mixtures for the surface insulation performance in gas insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(3): 1567-1576.
- [18] KIM J Y, KIM Y M, SEOK B Y, et al. A study on the lightning impulse breakdown characteristics of dry air for design of eco-friendly electric power apparatus[C]// 18th International Symposium on High Voltage Engineering. Seoul, Korea: ISH, 2013: 1691-1694.
- [19] 成俊奇. SF_6 、 N_2 和合成空气中绝缘子沿面闪络性能的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
CHENG Junqi. Study on flashover performance of insulators in N_2 , SF_6 and synthetic air[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008.
- [20] 王新新, 刘微粒, 王强, 等. 绝缘子表面电场及电荷的测量[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 732-738.
WANG Xinxin, LIU Weili, WANG Qiang, et al. Measurements of electric field and charge on insulator surface[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 732-738.

周柏杰(1983—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事电气设备绝缘技术研究。

谭东现(1976—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事电气设备绝缘结构与故障分析方面的工作。