

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.04.008

干燥空气绝缘环网柜中的复合绝缘工频特性研究

徐立新¹, 周柏杰², 谭东现³

(1. 国网内蒙古东部电力有限公司, 呼和浩特 010010; 2. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 南京 211000; 3. 上海交通大学电气系, 上海 200030)

摘要: 采用干燥空气替代SF₆作为环网柜的绝缘介质满足了目前开关设备的环保型发展需求,但由于干燥空气绝缘强度远低于SF₆,需要对产品的固体—气体复合绝缘的配合进行深入研究,目前这方面的系统性研究较少。文中首先采用不同形式的基础电极,研究了电场均匀度、气压和间隙对干燥空气间隙工频特性的影响,得到了不同均匀度条件下的最大击穿电场强度数据。针对实际产品的套管位置开展了仿真和试验研究,系统性分析了复合绝缘结构对最大电场强度位置和数值的影响。结果表明,间隙下的电场均匀度与最大场强关系可作为复合绝缘耐压特性的判据,采用固体绝缘材料包覆、增大间隙以及优化电场均匀度等方法可有效提高复合绝缘的耐压特性。

关键词: 干燥空气; 环网柜; 电场分布; 复合绝缘; 最大场强

Investigations on Power Frequency Characteristics of Composite Insulation Configuration in Dry Air Insulated Ring Main Unit

XU Lixin¹, ZHOU Baijie², TAN Dongxian³

(1. East Inner Mongolia Electric Power Cooperation Limited, Hohhot 0100101, China; 2. Nari Group Corporation State Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211000, China; 3. Department of Electric Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Using dry air replace sulfur hexafluoride (SF₆) as insulation medium for ring main unit meets the requirement of environmental protection development of switch equipment. However, the much lower dielectric strength of dry air than SF₆ make the further study on the solid-gas composite insulation become necessary, on which area the systematical research work is limited. In this work, different types of fundamental electrode are used to research the influences of electrical field uniformity, gas pressure and gap distance on the power frequency characteristic. The data of maximum breakdown field strength on different field uniformity is obtained. Simulation and experimental researches are carried out on the insulation bush position of the actual product, on this basis, the influence of composite insulation structure on the position and value of maximum electric field strength is systematically analyzed. The results show that, the relationship between electric field uniformity and maximum field strength under gaps can be the criterion for the characteristics of composite insulation. Also, the voltage withstanding properties of composite insulation can be improved effectively by using solid insulation material covering, increasing distance and optimizing electric field uniformity.

Key words: dry air; ring main unit; electric field distribution; compound insulation; maximum field strength

0 引言

采用气体绝缘的开关设备,主要包括封闭式组

合电器(GIS)、气体绝缘输电线(GIL),以及柜式气体绝缘金属封闭开关设备(C-GIS)和环网柜(RMU),这些电气设备一般采用SF₆气体作为绝缘介质。这主

要是由于SF₆气体具有优异的理化特性和绝缘性能^[1-3]。

到目前为止的研究表明,采用环保型气体取代SF₆作为绝缘介质的技术方案主要包括,氮气、干燥空气及其与SF₆的混合气体^[4-8]、全氟化碳类(PFC)^[9-10]、CF₃I^[11-17]以及含氟酮类、腈类^[18-19]类等物质。基于国内目前的应用研究现状,中压领域的绝缘替代多采用氮气或干燥空气作为环保绝缘介质,相关厂家也参照干燥空气或氮气绝缘特性,开发了相应的环保型开关设备。

从目前的产品应用现状看,采用干燥空气绝缘的开关设备可能存在绝缘方面的问题有待系统性探索:①干燥空气产品的设计都基于大气环境下的绝缘特性参数,并采用一定的偏差裕度,这主要是由于针对干燥空气条件下的系统性研究数据不足造成的;②环网柜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,针对这方面的案例研究较少且没有较为成熟的设计依据。针对上述问题,开展干燥空气条件下的基础电极特性和产品关键部位复合绝缘特性的仿真与试验研究,得到关键参数对特性的影响规律和复合绝缘设计的关键判据,旨在为后续系统性环保产品的开发提供有益帮助。

1 干燥空气的绝缘特性研究

1.1 绝缘试验装置与试验步骤

为研究干燥空气的基础绝缘特性,建立了能够满足气体绝缘性能试验平台,结构示意图见图1。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。为一个内径600 mm,高760 mm的不锈钢压力容器,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,下端接地电极

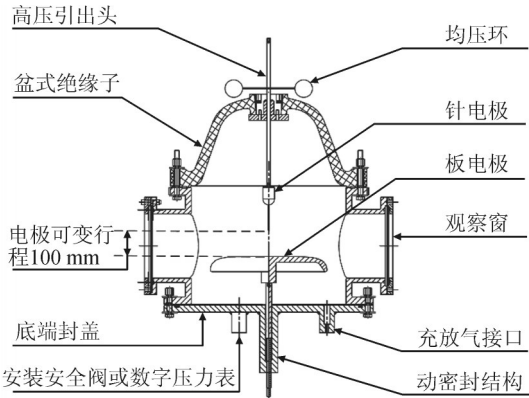


图1 气体放电腔体示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the gas discharge chamber

文中采用3种不同形式的高压电极以模拟电气设备中的电场均匀度,电极形式及关键参数见表1。采用有限元分析软件COMSOL Multiphysics 5.3进行电场分析,具体步骤包括建模和导入、材料及边界设置、加载试验获得的最大耐受电压数值等,最终获得设备中的电场分布和最大电场强度(E_m)及其位置,示例见图2。

表1 电极形式及关键参数

Table 1 Electrode form and key parameters

编号	电极形式	关键参数
1	球板电极	
2	棒板电极	
3	针板电极	

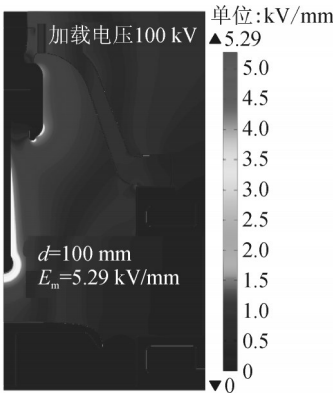


图2 基础电极的电场分布

Fig. 2 Electric field distribution of the base electrode

高压绝缘系统中的最大电场强度(E_m)、平均电场强度(E_a)和电场均匀度系数(η)按照式(1)定义。其中 E_m 由仿真计算获得; E_a 为加载电压与最小间隙之比,从而可求得 η 数值。一般认为 η 值高于0.5属于(准)均匀电场, η 在0.1~0.5范围属于不均匀电场,而低于0.1则为极不均匀电场。所研究的电极系统 η 见表2,球板电极和棒板电极所形成的电场主要是不均匀电场,这在环网开关设备中较为常见,如隔离开关、母线与壳体等位置。而针板电极所形成的极不均匀电场主要出现在产品的微小气体间隙和复合绝缘位置,也是需要重点关注的。对于均匀度大于0.5的(准)均匀电场具有足够的绝缘裕度,并非

环网开关设备的问题关键点,故不做研究。

$$\eta = \frac{E_a}{E_m} = \frac{U/d}{E_m} \quad (1)$$

表2 不同电极间隙的电场均匀度

Table 2 Electric field uniformity of different electrode gaps			
电极间隙/mm	电场均匀度 η		
	球板电极	棒板电极	针板电极
20	0.56	0.37	0.050
40	0.37	0.22	0.030
60	0.28	0.16	0.020
80	0.22	0.12	0.015
100	0.19	0.10	0.013

工频绝缘试验均在室内常温下进行,所采用的试验方法及试验步骤如下: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并进行烘干处理,确保装配后试品的表面处于清洁状态,减少固体颗粒杂质对于试验结果的影响。完成密封装配后,利用真空泵配合电阻规真空计对密封腔体抽真空至 $<10\text{ Pa}$,再充入干燥空气。实验所使用干燥空气由艾佩科(上海)气体有限公司提供,由纯度 $\geq 99.99\%$ 的高纯氮气和氧气按照体积比79:21混合制得。文中所研究的额定充气压力分别为0.10、0.15 MPa(20℃时,绝对压力)。

试验所采用的工频电源由上海佳特高压电气设备有限公司生产,型号为JTWGN-50 kVA/300 kV,其电路原理及实物见图3。其中, T_1 为调压变压器; T_2 为试验变压器,其额定容量为300 kVA,额定原边电压420 V,副边电压300 kV;电阻 R_1 和电容 C_1 构成阻容分压器用于测量击穿电压值,测量不确定度小于3%。该试验装置具有限流保护与自动记录击穿值功能,可以直接通过测量装置来读取数据。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体间隙被击穿为止。同一气体间隙下重复击穿至少5次,且每次击穿后间隔3 min再进行下一次试验以消除上次击穿对试验结果的影响。

1.2 干燥空气工频击穿特性与分析

0.10 MPa和0.15 MPa压力下干燥空气在3种电极条件下的工频击穿电压(U_{BD})与电极间隙(d)的关系曲线见图4、5。在 d 一定的条件下,球板电极 $U_{BD} >$ 棒板电极 $U_{BD} >$ 针板电极 U_{BD} ,即 η 越大,击穿电压值越高。对于12 kV电压等级而言,工频耐受电压为42 kV,0.10 MPa下40 mm的球板间隙即可满足要

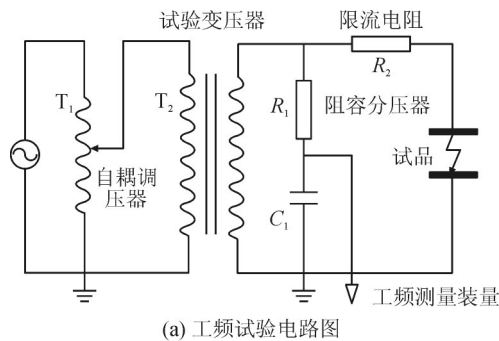


图3 工频试验电路原理及实物图
Fig. 3 Schematic diagram and the photo of the AC test circuit

求,棒板间隙须达到60 mm,而100 mm针板间隙也较难满足要求。升高电压 U_{BD} 值明显得到了提高,在0.15 MPa压力下,针板电极可满足12 kV等级的工频耐压要求。

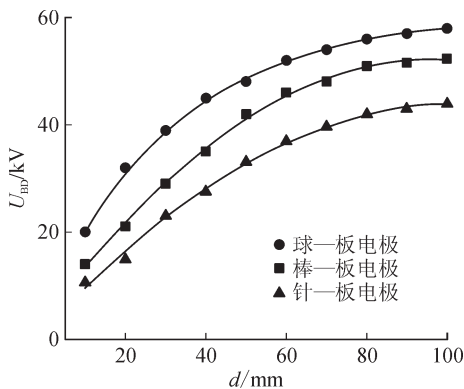


图4 不同电极在0.10 MPa干燥空气中的工频击穿电压
Fig. 4 AC breakdown voltage of different electrodes under 0.10 MPa dry air

干燥空气下的电极的 U_{BD} 数值均随 d 的增大而增大,但由于在同一形式电极条件中, η 也随 d 而变化,因此 U_{BD} 与 d 表现为非线性关系。而不同形式电极曲线的非线性度也有差异,具体而言,0.10 MPa下针板、棒板电极的线性度要高于球板电极,0.15 MPa下,上述现象依然存在,且针板电极时该曲线的线性度又显著高于棒板电极。

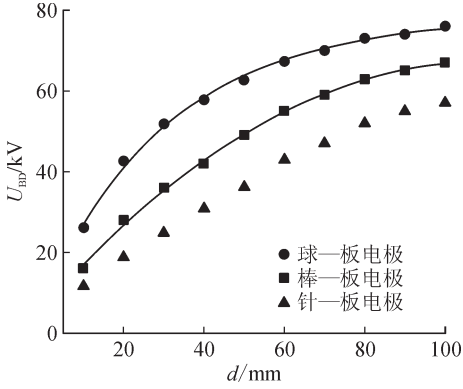


图5 不同电极在0.15 MPa干燥空气的工频击穿电压
Fig. 5 AC breakdown voltage of different electrodes under 0.15 MPa dry air

这种现象主要是由于电晕作用引起的,可以定性的阐述如下:在(准)均匀电场中不存在稳定的电晕放电,一旦出现局部放电,将直接导致整个气体间隙的击穿。因此,可以认为(准)均匀电场电晕放电的起始值也是其最大击穿场强,即只要在(准)均匀电场中的 E_m 值大于临界值的情况,气体间隙就会被击穿^[13]。这一数值只与气压和电极形状有关,与放电间隙的大小无关。而在(极)不均匀电场中,一般会存在局部稳定的放电现象,但整个气体间隙并未形成贯穿性的放电通道。此时,局部放电条件下由气体离子和电子组成的电晕对电场起到一定的畸变作用,在一定程度上可均匀电场分布,提高整体气体间隙的耐受电压。由于电晕稳态作用^[20]在均匀度较好的球板电极中所发挥的效果远远低于棒板、针板电极,因此球板电极的 U_{bd} 随 d 的饱和趋势更加显著。

采用仿真计算方法,在特定的电极形式和间隙条件下,加载其击穿电压 U_{bd} ,从而获得在击穿电压下的最大电场强度,即最大击穿电场强度(E_{mBD}),见表3。由表3数据可见,随着气压和间隙的增加,3种电极形式下 E_{mBD} 均有所提高加,而增幅随着电场均匀度的降低而显著增大。这说明了极不均匀电场条件具有更强的电晕稳定作用,使得其 E_{mBD} 值远远大于其他情况。

仔细观察数据不难发现,在电晕稳定作用下 η 和 E_{mBD} 数值具有一定的关联性,见图6。随着 η 的提高, E_{mBD} 值非线性下降,两者近似于反比关系。由以上分析可知,这主要是由(极)不均匀电场条件下电晕稳定作用造成的,但其作用的效果受到电压极性、气体分子特性、等离子分布和运动特征等多因素的影响^[20-21],难以进行定量分析,故该结论仅作为经验性结论为产品设计提供依据。

表3 不同电极形式及间隙下的 E_{mBD} 数值列表
Table 3 Values of E_{mBD} under different electrode forms and gap distances $kV \cdot mm^{-1}$

间隙/mm	0.15 MPa			0.10 MPa		
	球板	棒板	针板	球板	棒板	针板
20	3.7	3.8	20.1	2.8	2.9	15.8
40	3.9	4.7	29.4	3.0	3.4	26.2
60	4.0	5.8	37.5	3.1	3.9	28.4
80	4.1	6.4	44.4	3.2	4.7	35.9
100	4.1	6.6	45.7	3.1	5.7	35.3

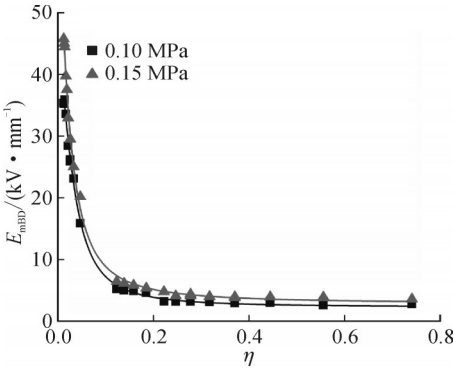


图6 最大击穿场强 E_{mBD} 与电场均匀度 η 的关系曲线
Fig. 6 The curve of E_{mBD} versus η

另外,值得提出的是,在开关设备中除了对耐受电压提出一定要求外,对于产品的局部放电同样有一定要求,产品需要保证在1.1倍额定电压下局放量小于5 pC。文献研究结果表明,最大局放起始电场强度(E_{PDIE})的数值不受电场均匀度的影响,对于0.10 MPa的干燥空气,约为3.5 kV/mm^[22-23]。以12 kV等级环网开关设备中40 mm间隙为例,加载13.2 kV工频电压, E_m 不应超过3.5 kV/mm,则 η 值不应低于0.09,即产品中不允许存在极不均匀电场。

2 干燥空气绝缘环网柜中复合绝缘的研究与分析

2.1 气箱的整体尺寸设计

根据上述的基础数据,参照SF₆环网柜气箱的基本结构,设计的相间或对地的最小气体间隙为60 mm,通过仿真计算可知,采用SF₆环网开关中常用的连接母排(截面的宽度×厚度为40 mm×10 mm),圆角半径为5 mm,相间及对地的 η 值为0.22和0.29,属于不均匀电场,且电场优于相同间隙下的棒板电极。基础数据表明在0.10 MPa气压下,该间隙的电场可满足工频耐受电压的要求,且有一定的安全裕度,所设计的气箱结构示意图,见图7。

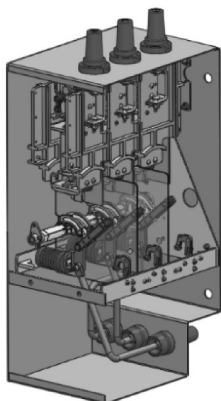


图7 干燥空气绝缘环网柜气箱三维结构

Fig. 7 Three-dimensional structure of dry air insulated cabinet

即使在保证了安全裕度的条件下,气箱设计中也需要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^[24-25],包括隔离开关、连杆拐臂等位置都进行了一定的均压处理设计,有效降低局部场强的集中。

2.2 复合绝缘试验及其仿真分析

上述产品的整体尺寸的控制直接参照基础试验的耐压特性数据,并顺利通过试验,但在局部复合绝缘位置仍然出现了绝缘问题。由于固体绝缘材料(如环氧)的耐压强度高,在电场强度较为集中区域多被采用,起到力学支撑和承受高电场的作用。同时也有采用绝缘材料包覆导体的处理方式,可有效避免强电场电离周围的绝缘气体^[26-31]。

当然固体绝缘的使用不当也可能造成绝缘问题^[24, 26]。以文中样机的套管部件为例,阐述了固体—气体复合绝缘的具体问题,并提出了具体分析和处理的方案。试验样机采用的绝缘套管为SF₆气箱中常用标准件,而市面上目前并没有较为成熟的适于12 kV干燥空气绝缘开关设备的专用套管,故对此开展了仿真和设计优化研究。原套管的仿真见图8。气体中的最大电场出现在套管伞裙内侧,数值为3.61 kV/mm。高压导体对地最小间隙约为40 mm,最大场强的数值超过了相同间隙下棒板的 E_{mBD} (3.43 kV/mm)数值,存在绝缘击穿风险,而产品试验也证明该部件不能耐受额定工频耐受电压,试验时的表面闪络痕迹见图9。

结合仿真结果和实际产品沿面闪络现象,初步认为该套管产品局部最大场强过高,沿面爬电距离偏小,为此设计了3种不同形式的套管见图10。1号为原套管,2号为增加爬电距离而增加了伞裙长度和数量,1-1号在1号套管的基础上将底部伞裙改为实心而不改变爬电距离,2-1号套管在2号套管的基

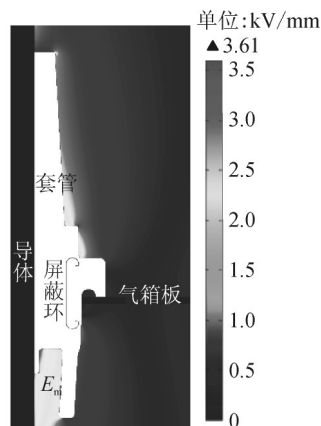


图8 原套管电场分布(加载工频电压42 kV)

Fig. 8 Electric field distribution of the original insulation bush (loaded AC voltage 42 kV)

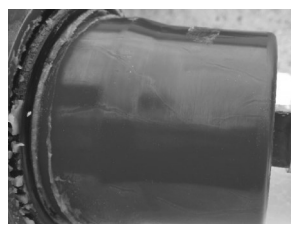


图9 发生闪络击穿后的套管照片

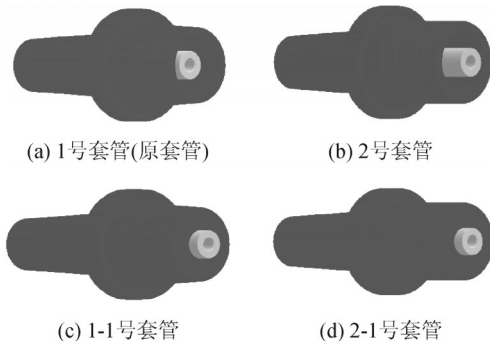
Fig. 9 The photo of the insulation bush after a flashover
础上将底部伞裙改为实心而不改变爬电距离。

图10 不同形式的绝缘套管

Fig. 10 Different types of insulation bush

对不同形式的3种套管进行了电场仿真计算,结果见图11。2号方案的 E_m 位置并未改变且数值未大幅降低,同时在靠近箱板的伞裙附近出现了另一个电场集中点;1-1号套管由于将底部改为实心,原最大电场位置被环氧固体绝缘材料包覆,气体中的 E_m 数值大幅降低为2.04 kV/mm;2-1号套管采用实心结构也避免了原最大场强的出现,但在靠近箱板的伞裙附近仍出现了高达3.16 kV/mm的电场集中,这虽然可能不会直接被击穿,但仍存在局放超标的风险。最终采用方案1-1的绝缘套管,见图12。

考虑到实际产品中连接母线与套管导体的连接为平面与平面连接,连接后形成了圆盘状且突起的电极形状,故进行了该处圆盘状电极与套管配合

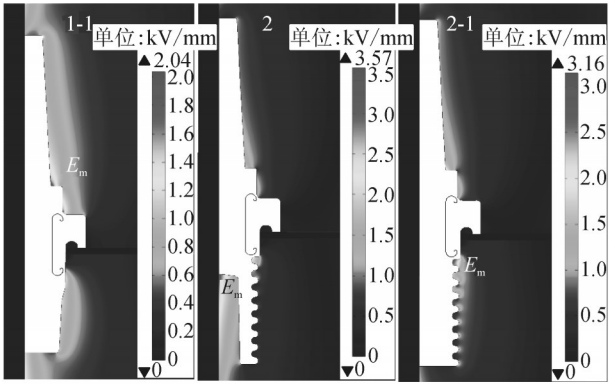


图 11 不同形式绝缘套管的电场分布
(加载工频电压 42 kV)

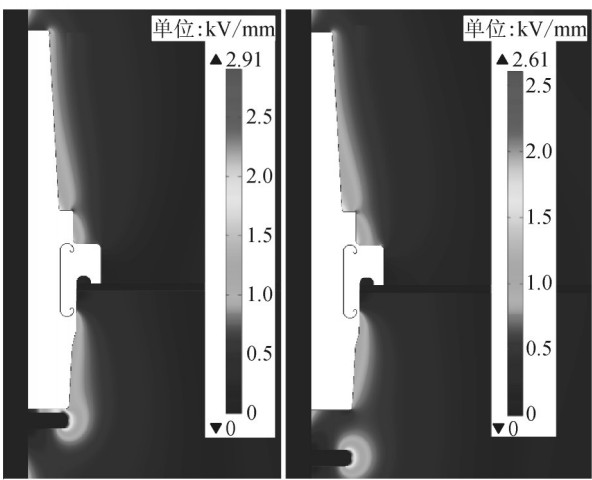
Fig. 11 The electrical field distribution of the new designed insulation bushes (loaded AC Voltage 42 kV)



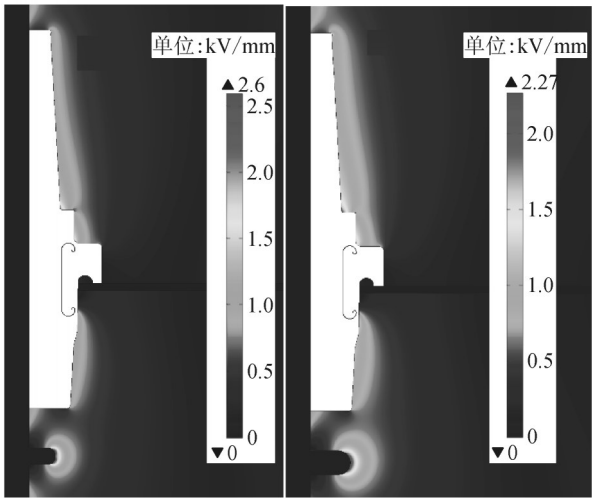
图 12 干燥空气绝缘的套管

Fig. 12 The insulation bush used in dry air insulation product

关系的仿真研究。采用了优化设计后的 1-1 号套管,改变圆盘状电极与环氧树脂表面的间隙 δ 、圆盘状电极的半径 r 和边缘圆角参数 R ,形成 4 种不同设计方案,各自的电场分布见图 13。该结构中的 E_m 位置出现在圆盘状电极的边缘倒角 R 处,不同方案参数和 E_m 统计见表 4。方案的圆盘状电极与套管端部的环氧表面的间隙极小,其 E_m 数值最高,这一方面是由于圆盘状电极接近地电位造成的,另一方面由于存在固体—气体—导体介电常数的突变造成了电场的集中,这也是气—固—导体 3 界面结合点最为常见的现象。方案 2 增加了圆盘状电极—套管环氧表面的气体间隙,使 E_m 大大降低;方案 3 在方案 4 基础上减小圆盘状电极的半径(间接增加了对地间隙),但 E_m 并未明显降低;方案 4 在方案 2 方案基础上增加了圆盘状电极的倒圆半径 R ,进一步降低了 E_m 值。按照仿真得到的最佳方案 4,在 0.10 MPa 干燥空气环境下进行局部复合绝缘工频耐压试验,顺利通过了耐压考核。



(a) 方案1 (b) 方案2



(c) 方案3 (d) 方案4

图 13 连接母线与套管导体在连接处不同参数配合时的电场分布

Fig. 13 The electrical field distribution of different composite insulation structures

表 4 母线连接部件与固体绝缘配合参数及最大场强
Table 4 The parameter and maximum field strength of different composite insulation structures

编号	设计参数 / mm			$E_m / (\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1})$	参数位置示意图
	δ	r	R		
1	1	20	3	2.91	
2	20	20	3	2.61	
3	20	10	3	2.60	
4	20	20	6	2.27	

由上述复合绝缘的仿真和试验对比分析可以看出,在复合绝缘结构的设计中应尽量避免极不均匀电场,设计结构的 E_m 值不能高于相同间隙下棒板电极的 E_{mBD} 数值。在复合绝缘位置增加伞裙长度和爬距的主要作用是增加在污秽情况下的沿面闪络距离,而对于改善局部电场的作用并不显著,处理

不当有可能造成局部电场的集中,在洁净气体环境中处理电场集中问题宜采用固体包封、电场均匀化等有效手段。另外,高压导体与绝缘固体之间不宜留有较小的气体间隙,设计装配时应留有一定距离,同时改变导体的边缘圆角可有效改善电场分布。

3 结论

文中研究了干燥空气条件下电场均匀度、电极间隙和气体压力对工频耐压特性的影响,在此基础上针对产品的复合绝缘结构开展了优化设计的仿真计算和工频耐压试验研究,得到了以下结论:

1)随着电极间隙、电场均匀度和气压的增加,间隙的击穿电压显著提高。受到电晕作用的影响,较均匀电场击穿电压随电极间隙增加的饱和现象较为明显。不同均匀度电场的最大击穿场强数值差异显著,两者呈近似反比关系,该内在联系可为产品设计提供经验性依据。

2)套管复合绝缘结构的仿真和试验表明,最大电场强度数值超过基础试验分析得到的数值即发生局部击穿。采用增加伞裙长度和数量的方法增加沿面爬距不能有效改善电场集中问题,宜采用固体包封、电场均匀化等方法有效降低最大电场的数值和位置。

3)对于接近地电位附近的高压导体、绝缘件、气体的3个交界区域,装配时需要留有一定气体间隙,以防止微小气体间隙带来的电场集中,同时改变该处的导体边缘圆角可有效改善电场,从而为产品提供足够的安全裕度。

参考文献:

- [1] CHRISTOPHOROU L G, VAN BRUNT R J. SF_6 insulation: Possible greenhouse problems and solutions[M]. Gaithersburg, USA: NIST, 1995: 3-10.
- [2] COOK E. Lifetime commitments: Why climate policy-makers can't afford to overlook fully fluorinated compounds [M]. Washington: World Resources Institute, 1995.
- [3] RIGBY M, MÜHLE J, MILLER B R, et al. History of atmospheric SF_6 from 1973 to 2008[J]. Atmosphere Chemical Physics, 2010, 10(21):305-320.
- [4] KLINE L E, DAVIES D, CHEN C, et al. Dielectric properties for SF_6 and SF_6 mixtures predicted from basic data[J]. Journal of Applied Physics, 1979, 50(11): 6789-6796.
- [5] 蔡凡一, 薛健. 球板电极下 N_2 的绝缘特性以及水分的影响[J]. 高压电器, 2016, 52(12):87-92.
CAI Fanyi, XUE Jian. Insulation characteristics of N_2 in sphere-plate electrodes and the effect of humidity[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(12):87-92.
- [6] 周柏杰, 谭东现. 氮气环网柜中复合绝缘的工频特性研究[J]. 高压电器, 2016, 52(12): 80-86.
ZHOU Baijie, TAN Dongxian. Investigation into the characteristics of composite insulation in nitrogen insulated ring main unit[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(12): 80-86.
- [7] 薛健, 周柏杰. 氮气气压和电场分布变化下的绝缘子沿面闪络特性[J]. 高压电器, 2016, 52(12): 71-79.
XUE Jian, ZHOU Baijie. Surface flashover characteristics of insulator under nitrogen pressure and electric field distribution[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(12): 71-79.
- [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] YAMAMOTO O, TAKUMA T, HAMADA S, et al. Applying a gas mixture containing $\text{c-C}_4\text{F}_8$ as an insulation medium [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(6):1075-1081.
- [10] ZHAO X L, JIAO J T, LI B, et al. The electronegativity analysis of $\text{c-C}_4\text{F}_8$ as a potential insulation substitute of SF_6 [J]. Plasma Science and Technology, 2016, 18(3), 292-298.
- [11] 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, 2015:379-383.
- [12] 邓云坤, 肖登明, 陈炯. $\text{CF}_3\text{I-N}_2$ 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 $\text{CF}_3\text{I-N}_2$ gas mixtures as alternative for SF_6 in GIS/C-GIS[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(9): 2288-2293.
- [13] 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.
- [14] TAKEDA T, MATSUOKA S, KUMADA A, et al. Spark-over characteristics in CF_3I gas and $\text{CF}_3\text{I/N}_2$ gas mixture under non-uniform field gaps[J]. IEEE Transactions on Power and Energy, 2010, 130(9): 813-818.
- [15] 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 Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(4): 1196-1203.
- [16] CRESSAULT Y, CONNORD V, HINGANA H, et al. Transport properties of CF_3I thermal plasmas mixed with

- CO₂, air or N₂ as an alternative to SF₆ plasmas in high-voltage circuit breakers[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2011, 44(49):5202.
- [17] HYRENBACH M, HINTZEN T, MULLER P, et al. Alternative gas insulation in medium-voltage switchgear[C]//23rd International Conference on Electricity Distribution. Lyon: [s. n.], 2015: 1-5.
- [18] 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. Philadelphia, PA: IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society, 2014: 1-5.
- [19] SIMKA P, RANJAN N. Dielectric strength of C₅ perfluoroketone[C]//19th International Symposium on High Voltage Engineering. Pilsen, Czech Republic: [s. n.], 2015: 203-209.
- [20] 文 韬, 张乔根, 郭 璨, 等. 冲击电压下 SF₆ 棒—板间隙放电极性效应的反转现象[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 275-281.
- WEN Tao, ZHANG Qiaogen, GUO Can, et al. Reversal phenomenon of discharge polarity effect in SF₆ rod-plate gap under impulse voltages[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 275-281.
- [21] TAKAHASHI T, HAYAKAWA N, YUASA S, et al. Space charge behaviour and corona stabilization effect in SF₆ gas viewed from sequential generation of a dc partial discharge [J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2001, 34(18): 78-84.
- [22] 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.
- [23] SHINJ S, NAOAKI I, MASAHIRO A, et al. Development of compressed air insulation technology for C-GIS[J]. IEEJ Transaction on Power and Energy, 2004, 124(9): 1132-1138.
- [24] 谭东现, 贺弋玲, 林 钧, 等. 12 kV 复合绝缘开关设备的绝缘特性研究[J]. 高压电器, 2018, 54(4): 28-33.
- TAN Dongxian, HE Yeling, LIN Jun, et al. Investigations on insulation characteristics of 12 kV composite insulated switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(4): 28-33.
- [25] 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: 1-4.
- [26] 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.
- [27] 齐 波, 陈义龙, 李成榕, 等. 交直流复合非均匀电场下油纸绝缘界面电荷的特性[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 241-249.
- QI Bo, CHEN Yilong, LI Chengrong, et al. Characteristics of interface charge on oil-impregnated pressboard under non-uniform AC/DC combined electric field[J]. Proceeding of the CSEE, 2013, 33(34): 241-249.
- [28] 谢竞成, 胡 军, 何金良, 等. 非线性复合材料对不均匀电场的改善效果仿真分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 741-750.
- XIE Jingcheng, HU Jun, HE Jinliang, et al. Simulation analyse of modification effect of nonlinear composites on non-uniform electric fields[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3): 741-750.
- [29] TAN D X, LI H M, XIAO D M. Analysis on failure causes of bushing used in 40.5 kV metal enclosed air insulation switch-gear[C]//2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED2014). Shenzhen: [s. n.], 2014: 23-26.
- [30] 段大鹏, 赵承楠, 詹花茂, 等. 252 kV GIS 盆式绝缘子金属法兰开孔的电场分析及优化设计[J]. 高压电器, 2013, 49(9): 74-79.
- DUAN Dapeng, ZHAO Chengnan, ZHAN Huamao, et al. Electric field simulation and optimization design of metal flange pouring hole of basin-type insulator in 252 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(9): 74-79.
- [31] 王铁街, 丁中民, 李光范, 等. 棒—板油纸复合绝缘的电场数值计算[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 809-813.
- WANG Tiejie, DING Zhongmin, LI Guangfan, et al. Numerical computation of electric field of rod-plane oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 809-813.

徐立新(1966—),男,硕士,高级工程师,主要从事电力系统设备制造及管理工作。