

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.12.006

40.5 kV 气体绝缘环网柜复合套管和连接铜排区域的 电场仿真及优化

赵 晶¹, 邵梦雅¹, 梁景璇², 林 坚², 游一民¹, 谭邵峰¹

(1. 厦门理工学院电气工程与自动化学院, 福建 厦门 361024; 2. 厦门华电开关有限公司, 福建 厦门 361006)

摘要: 针对某型号 40.5 kV 气体绝缘环网柜开关室中复合套管和连接铜排区域容易发生局部放电现象, 导致柜体绝缘性能降低的问题, 采用 SolidWorks 软件对复合套管与连接铜排区域建立三维模型, 借助 Ansys Workbench 有限元分析软件对复合套管与连接铜排区域进行了电场仿真, 结果表明: 内六角圆柱头螺钉端部、引弧静触头顶端、连接铜排顶端、连接铜排折弯处的电场较为集中。在此基础上采取改变内六角螺钉的类型、在引弧静触头顶端增加均压屏蔽罩、加大连接铜排的圆角折弯半径和增加连接铜排与外壳前面板之间的距离等 4 种结构优化措施, 有效地降低了套管和连接铜排区域的电场强度。最后, 将优化后的复合套管和连接铜排进行样机组装并通过了绝缘试验验证。

关键词: 40.5 kV 环网柜; 复合套管; 连接铜排; 电场仿真; 结构优化

Electric Field Simulation and Optimization of Composite Bushing and Connecting Copper Bar Area of 40.5 kV Gas-insulated Ring Main Unit

ZHAO Jing¹, SHAO Mengya¹, LIANG Jingxuan², LIN Jian², YOU Yimin¹, TAN Shaofeng¹

(1. School of Electrical Engineering & Automation, Xiamen University of Technology, Fujian Xiamen 361024, China;

2. Xiamen Huadian Switchgear Co., Ltd., Fujian Xiamen 361006, China)

Abstract: In view of partial discharge phenomenon of composite bushing and connecting copper bar area in the compartment of a certain type of 40.5 kV gas insulated ring main unit, which leads to the reduction of the insulation performance of the ring main unit, the SolidWorks software is used to set up a three-dimensional model of the composite bushing and connecting copper bar area, and then Ansys Workbench finite element analysis software is used to simulate the electric field of the composite bushing and connecting copper bar area. The results show that the electric field is concentrated on the end of the hexagon socket cylindrical head screw, top of the stationary contact of arc initiation, top of the connecting copper bar and the bending position of the connecting copper bar. On this basis, such four structural optimization measures as change of the type of hexagon socket screw, addition of a grading shield on the top of the stationary contact of arc initiation, increase of the bending radius of the rounded corner connecting copper bar the increase of the distance between the connecting copper bar and the front panel of the enclosure are adopted to effectively reduce the electric field intensity near the composite bushing and connecting copper bar area. Finally, the optimized composite bushing and connecting copper bar are assembled and the prototype has passed the insulation test verification.

Key words: 40.5 kV ring main unit; composite bushing; connecting copper bar; electric field simulation; structure optimization

收稿日期: 2024-06-20; 修回日期: 2024-08-25

0 引言

随着新能源发电技术的不断发展,中国在东部沿海与西部地区建立了大量风力发电基地,海上风力发电取得巨大的综合效益^[1],气体绝缘环网柜作为风力发电机组塔筒舱内布置的重要电气设备,得到了广泛的运用^[2]。受安装空间和场地的限制,对环网柜的空间尺寸及占地面积提出了严苛的要求,气体绝缘环网柜正朝着小型化、紧凑化方向不断发展,环网柜的绝缘和结构设计迎来了更大的挑战^[3-9]。开关室是气体绝缘环网柜的核心部件,复合套管与连接铜排是开关室的重要组成部分,也是容易发生局部放电的区域^[10-14],因此需要对现有的复合套管与连接铜排进行电场仿真计算,研究其电场分布特性,进而改善电场分布,防止局部放电现象的发生,以提高环网柜整体的绝缘性能^[15-18]。

文中以某型号40.5 kV环网柜中的复合套管与连接铜排区域为主要研究对象,采用有限元分析软件Ansys Workbench对复合套管与连接铜排区域进行电场仿真计算,得到了其电场分布规律。基于零部件通用适配原则,同时考虑其制造经济性的情况下,对现有的复合套管与连接铜排尺寸进行优化,通过改变复合套管与连接铜排结构,有效改善了复合套管与连接铜排区域的电场强度分布。最后通过工频耐压试验与雷电冲击耐压试验验证了本次结构优化的可行性。

1 仿真建模与参数设置

1.1 建立复合套管与连接铜排区域仿真模型

首先采用SolidWorks软件对复合套管与连接铜排区域进行三维物理建模,见图1(a)。由于复合套管与连接铜排为轴对称,电场仿真分析时只需分析1/2模型,这样可以减少网格数量,降低模型的计算量,提高计算效率。导入到Ansys Workbench的实体模型见图1(b)。

1.2 电场仿真参数设置

电场仿真分析需要进行参数设置^[19-21]:①计算域的气体属性为SF₆,相对介电常数为1。②模型的材料属性。环网柜开关室外壳材料及内部支架材料为不锈钢,相对介电常数为1;复合套管的外部绝缘材料为环氧树脂,相对介电常数为3.8;导电杆、连接铜排等导电部件材料为铜,相对介电常数为1。③边界条件的施加。由于导体是等电位体,导体内部不参与计算,有限元计算只提取导体表面进行电

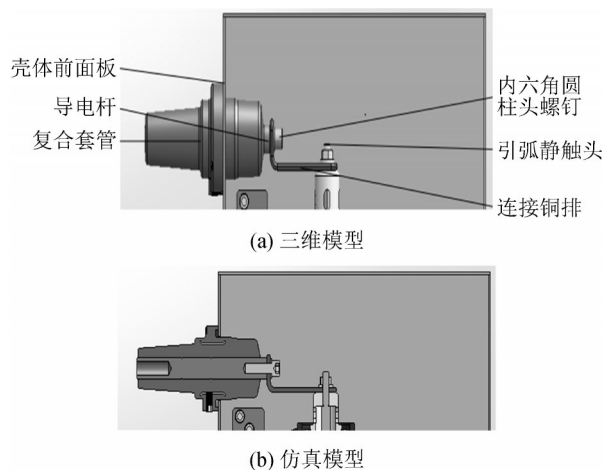


图1 复合套管和连接铜排的三维实体模型及仿真模型

Fig. 1 3D solid model and simulation model of composite bushing and connecting copper bar

位加载,所以对模型的内六角圆柱头螺钉、引弧静触头、连接铜排、导电杆施加的电压为雷电冲击电压要求的185 kV;复合套管内部接地屏蔽环、壳体、支架施加电压为零。

此外,气体绝缘性能参数对电力设备的绝缘设计具有重要意义,最具代表性的是气体临界击穿强度^[22-24]。考虑到环网柜运行环境中气体湿度和灰尘等因素对SF₆耐受电场强度的影响,生产厂家将该型号充气柜内的SF₆气体许用电场强度规定值确定为 8×10^6 mV/mm。

2 复合套管和连接铜排电场仿真

对模型进行前处理、Ansys Workbench有限元分析软件仿真计算、后处理之后得到复合套管和连接铜排、引弧静触头的外部SF₆区域电场仿真云图,见图2。内六角圆柱头螺钉表面顶端、引弧静触头顶端、连接铜排的顶端、折弯处和右端等几个部位的最大电场强度见表1。表1中数值均超过了SF₆许用电场强度规定值 8×10^6 mV/mm。这是由于内六角圆柱头螺钉、连接铜排绝缘距离短和外表面曲率半径小,导致其表面电荷密度大、电场强度大,使得局部电场强度超出要求,容易发生局部放电现象,降低开关室整体的绝缘水平。

因此,需要采取有效措施对内六角圆柱头螺钉、引弧静触头、连接铜排顶端和连接铜排折弯处这些电场强度超过规定值的零部件进行结构优化,改善其周围电场分布^[25-28],以满足环网柜开关室的绝缘要求,提高整体环网柜绝缘结构的介电强度和环网柜的使用寿命。

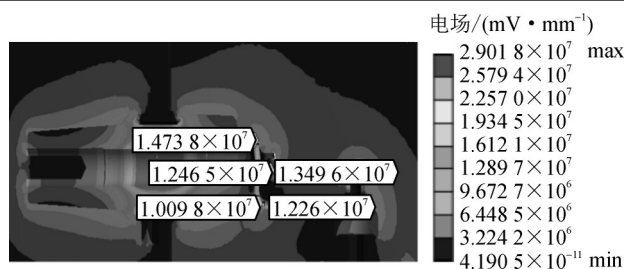


图2 复合套管气箱侧、连接铜排和引弧静触头的局部区域电场仿真云图

Fig. 2 Local area electric field simulation cloud picture of gas box side of composite bushing, connecting copper bar and arc initiating static contact

表1 不同部位的最大电场强度值

Table 1 Maximum electric field intensity of different parts

部位	最大电场强度/(mV · mm ⁻¹)
内六角圆柱头螺钉右端部	$1.246 5 \times 10^7$
引弧静触头顶端	$1.349 6 \times 10^7$
连接铜排顶端	$1.473 8 \times 10^7$
连接铜排折弯处	$1.009 8 \times 10^7$
连接铜排右端	$1.226 0 \times 10^7$

3 电场仿真分析与优化措施

3.1 改变内六角螺钉类型

连接导电杆与连接铜排的内六角螺钉端部表面的电场强度与其表面的电荷密度成正比,圆角表面电荷密度大,电力线集中。初始使用的内六角圆柱头螺钉(GB/T 70.1—2008)见图3(a)。因为内六角圆柱头螺钉端部的圆角仅有0.6 mm,为改善内六角圆柱头螺钉端部的电场分布,将其替换为内六角平圆头螺钉(GB/T 70.2—2015),见图3(b),改变了内六角螺钉类型后其端部区域电场仿真云图见图4。

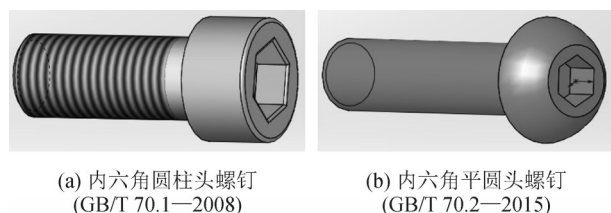


图3 内六角螺钉的类型

Fig. 3 Hexagon socket screw type

由图4可知:内六角平圆头螺钉端部区域最大场强为 $8.814 6 \times 10^6$ mV/mm,相对于图3的内六角圆柱头螺钉的最大场强降低了约29%,这是由于内六角平圆头螺钉的端部表面光滑,圆角曲率半径更大,电场分布更均匀。

3.2 引弧静触头顶端增加均压屏蔽罩

引弧静触头与地电位壳体距离较近,绝缘距离

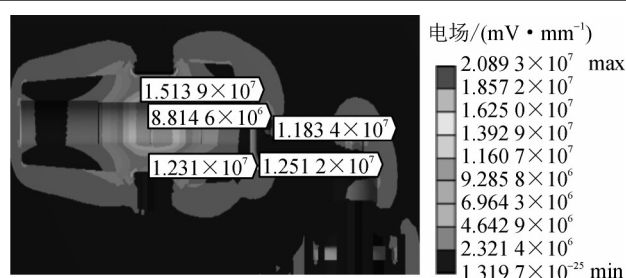


图4 采用内六角平圆头螺钉后的局部区域电场仿真云图

Fig. 4 Local area electric field simulation cloud picture with inner hexagon flat round head screw

短,同时引弧静触头顶侧有0.5 mm的圆角,电荷容易在圆角表面积累,从而造成此处电力线集中,局部场强较大。受到引弧静触头形状的限制,考虑在引弧静触头顶端增加均压屏蔽罩。均压屏蔽罩模型见图5,增加均压屏蔽罩之后的SF₆气域电场仿真云图见图6。

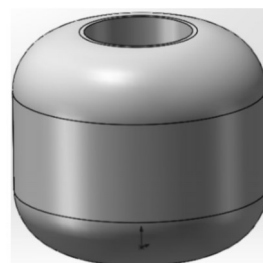


图5 均压屏蔽罩模型

Fig. 5 Equalizing pressure shield housing model

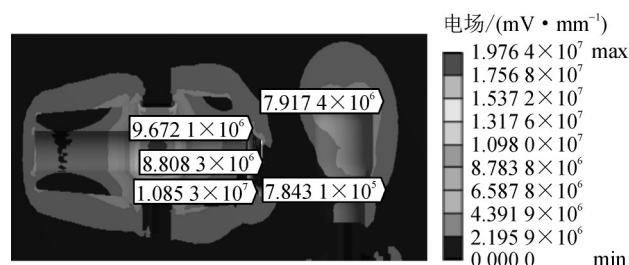


图6 增加均压屏蔽罩后,局部区域电场仿真云图

Fig. 6 Local electric field simulation cloud picture after adding the equalizing shield

由图6可知:内六角平圆头螺钉、均压屏蔽罩、连接铜排右端最大电场强度分别为 $8.808 3 \times 10^6$ 、 $7.917 4 \times 10^6$ 、 $7.843 1 \times 10^5$ mV/mm。连接铜排顶端、折弯处最大电场强度分别为 $9.672 1 \times 10^6$ 、 $1.085 3 \times 10^7$ mV/mm。对比图5、6可知,在电压相同的条件下,在引弧静触头处增加均压屏蔽罩能有效地改善引弧静触头附近的电场分布。

3.3 改变连接铜排折弯半径

经过上述零部件结构的优化,连接铜排折弯处的电场仍然较高。考虑到连接铜排折弯处表面曲率半径较小,可通过改变连接铜排折弯半径 R 的方法来降低连接铜排折弯处电场强度。连接铜排形

状见图7。将连接铜排折弯半径 R 分别设置为6、9、12、15、17、19 mm,其余条件不变再次仿真,得到连接铜排折弯处最大电场强度随折弯半径变化的关系,见图8。

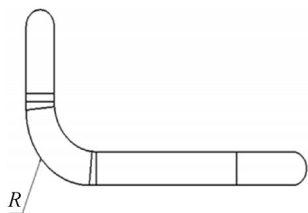


图7 连接铜排折弯半径示意图

Fig. 7 Diagram of bending radius of connecting copper bar for bushing

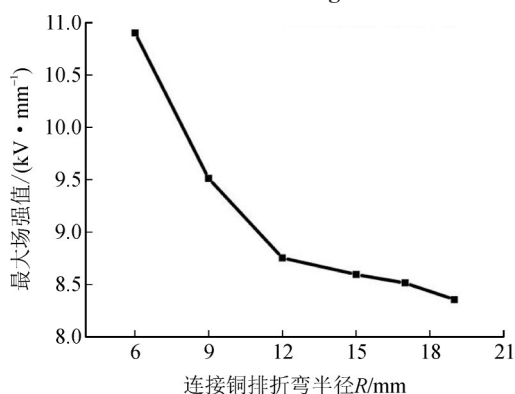


图8 连接铜排折弯处表面最大场强值随折弯半径 R 变化的曲线

Fig. 8 Curve of maximum field intensity on copper bar surface of connecting copper bar bending with the change of R

由图8可知:随着连接铜排折弯处圆角半径的增大,其最大电场强度值在不断降低,当连接铜排折弯处圆角半径增大至12 mm后,最大电场强度值降低幅度有所减小。当圆角折弯半径 $R=19$ mm时连接铜排折弯处最大电场强度达到 8.41×10^6 mV/mm,但是与 $R=12$ mm时相比,连接铜排折弯处最大电场强度只降低了3%左右,且 $R=19$ mm时连接铜排折弯的制造工艺难度大。故最终选择连接铜排的折弯半径 $R=12$ mm, SF_6 气域电场仿真云图见图9。

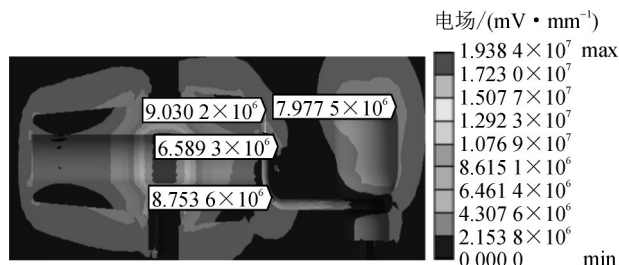


图9 连接铜排折弯半径 $R=12$ mm时,局部区域电场仿真云图

Fig. 9 Local area electric field simulation cloud picture of $R=12$ mm

由图9可知:当连接铜排折弯处圆角 $R=12$ mm时,内六角平圆头螺钉处最大电场强度和均压屏蔽罩最大电场强度分别为 6.5893×10^6 、 7.9775×10^6 mV/mm,没有超过 SF_6 气体许用电场强度规定值。而连接铜排顶端及折弯处最大电场强度分别为 9.0302×10^6 、 8.7536×10^6 mV/mm,虽然与图6相比分别降低了19.05%和10.34%,但这两处的最大电场强度还是超过了 SF_6 气体许用电场强度规定值,仍需要进一步优化。

3.4 增加连接铜排与壳体前面板间的距离

增加绝缘距离是提高绝缘强度最直接的方式^[29-34],故考虑增加连接铜排与壳体前面板的距离来进行电场优化,即增加连接铜排、螺钉与外壳前面板之间的距离 D 。综合考虑内部空间布局,在保证其他零部件尺寸位置不变的前提下,采取减小连接铜排长度 L_{cb} 、增加与其直接相连的复合套管内部导电杆的长度 L_{cr} 的方式来实现。连接铜排与前面板的距离 D 初始值为76.5 mm,以10 mm为间隔依次取值,通过多次仿真与后处理操作,得到了内六角平圆头螺钉、连接铜排顶端、连接铜排折弯处、均压屏蔽罩区域最大场强值随 D 的变化规律,并绘制成曲线见图10。

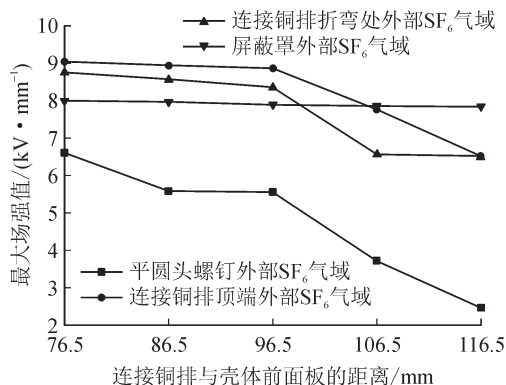


图10 各零件最大场强随连接铜排与壳体前面板间的距离 D 变化的曲线

Fig. 10 Maximum field intensity of each part varies with the change of D

由图10可知,随着连接铜排与壳体前面板间的距离增大,内六角平圆头螺钉、连接铜排端部、连接铜排折弯处、均压屏蔽罩局部区域的最大场强也随之减小。当连接铜排与壳体前面板间的距离 D 变化时,连接铜排长度 L_{cb} 从110 mm缩短至70 mm,对应导电杆长度 L_{cr} 从215 mm增加至245 mm,连接铜排顶端和折弯处对地距离增加,附近区域电场分布变得更为均匀,而均压屏蔽罩的相对位置并没有变化,导致其附近区域最大电场强度基本无变化。

当 $D \leq 86.5$ mm时,以上局部区域的最大场强值

变化并不明显,改善效果不佳;当 $D \geq 106.5$ mm后,局部区域的最大场强值小于 SF_6 气体的许用电场强度规定值。为了简化连接铜排与其余零件装配,同时使连接铜排折弯更易进行,最终选择 $D=106.5$ mm,即连接铜排 $L_{\text{cb}}=80$ mm、导电杆长度 $L_{\text{cr}}=235$ mm的方案。连接铜排位置及尺寸优化前后对比示意图,见图11。将优化后的方案再次进行电场仿真得到 SF_6 气域电场仿真云图见图12。

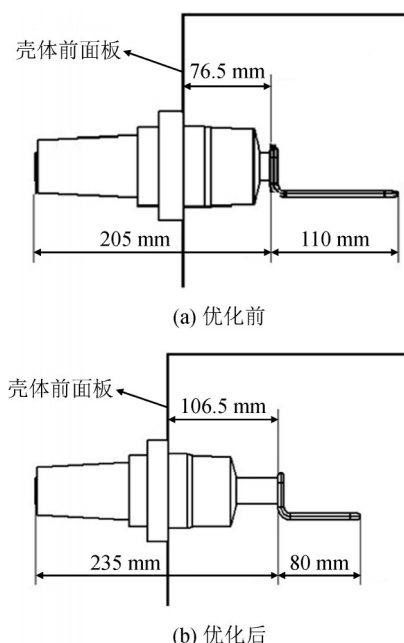


图11 连接铜排位置及尺寸优化前后对比

Fig. 11 Before and after optimization of position and size of connecting copper bar

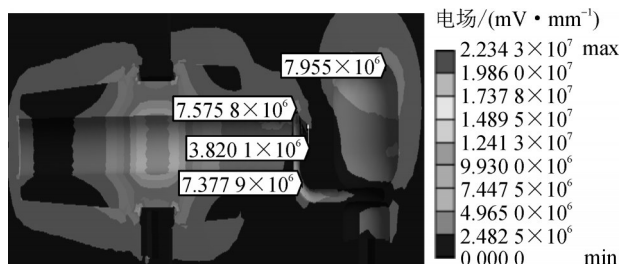


图12 $D=106.5$ mm时,局部区域电场仿真云图

Fig. 12 Local area electric field simulation cloud picture of $D=106.5$ mm

由图12可知:内六角平圆头螺钉与均压屏蔽罩最大电场强度为 3.8201×10^6 、 7.955×10^6 mV/mm,连接铜排端部与折弯处电场分别为 7.5758×10^6 、 7.3779×10^6 mV/mm,都没有超过 SF_6 气体许用电场场强规定值,符合要求。此外,与图2对比,采用优化方案后的复合套管与连接铜排临近区域中其他电场集中处的场强也呈现出明显下降。

4 试验

各种电气产品、电器元件、绝缘材料等进行绝

缘水平考核一般是通过工频耐压试验和雷电冲击耐压试验来进行的,可用于发现被试品的绝缘缺陷^[35-36]。基于优化后的方案,设计并制造了连接铜排与复合套管的实际样件(包括均压屏蔽罩),最终装配后的实物见图13。



图13 优化零件的实物装配图

Fig. 13 Optimize the physical assembly drawing of parts

根据国家标准 GB/T 11022—2020 型式试验的要求,对研制的新零件样机进行了额定短时工频耐受电压试验和额定雷电冲击耐受电压试验^[37],试验结果见表2、3(表2、3中:试验部位均为相间及对地,其中A、B、C为被试部位一侧端子端;a、b、c为被试部位另一侧端子端;F为壳体)。试验结果表明:结构优化后的复合套管与连接铜排的额定短时工频耐压试验与额定雷电冲击耐压试验无击穿,符合有关国家标准的要求,达到了提升环网柜柜体绝缘性能的目的。

表2 额定短时工频耐受电压试验结果

Table 2 Results of rated short time power frequency withstand test

加压部位	接地部位	试验要求值 电压/kV	实测 电压值/kV	加压 次数	击穿 次数
Aa	BCbcF	95	94.8	1	0
Bb	ACacF	95	94.9	1	0
Cc	ABabF	95	94.9	1	0

5 结论

文中利用SolidWorks软件建立了40.5 kV SF_6 气体绝缘环网柜复合套管与连接铜排的三维模型,基于所承受的雷电冲击电压工况,采用有限元软件对复合套管与连接铜排及其附近区域进行了电场强度仿真分析,得到了电场强度分布云图和各零部件最大场强值,并依据仿真结果对零部件结构进行优化改进。结果表明:

1)通过Ansys Workbench有限元软件对复合套管与连接铜排的电场强度分布进行计算,发现连接复合套管与连接铜排的内六角圆柱头螺钉端部、连接铜排顶端与折弯处、引弧静触头顶端等区域存在

表3 额定雷电冲击耐受电压试验结果

Table 3 Results of rated lightning impulse withstand voltage test

加压 部位	接地 部位	极性	实测电压值/kV														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Aa	BCbcF	+	184.9	185.0	184.6	185.6	184.6	184.4	184.8	185.0	184.5	185.0	185.6	184.2	185.3	184.6	184.6
		-	184.6	184.2	184.5	184.7	184.9	185.5	184.1	184.4	185.9	185.6	184.4	186.1	184.2	185.7	185.6
Bb	ACacF	+	184.4	186.0	185.7	184.4	184.8	185.8	184.5	184.9	185.5	185.0	186.1	184.8	184.2	185.2	186.1
		-	184.3	184.3	186.0	185.0	186.0	186.1	185.3	185.1	184.7	184.6	185.6	184.4	184.2	185.3	184.2
Cc	ABabF	+	185.3	184.5	185.0	184.8	184.4	186.1	184.2	185.5	184.2	185.1	185.7	184.7	184.2	185.2	184.7
		-	184.4	184.9	185.3	184.6	184.6	184.1	185.6	184.3	184.8	185.8	184.5	185.0	184.7	185.4	185.6

注:试验要求电压值为185 kV;击穿次数为0。

电场强度超过SF₆气体许用电场强度规定值的情况,是绝缘击穿的潜在区域。

2)通过改变内六角螺钉类型、在引弧静触头上端增加均压屏蔽罩,调整连接铜排折弯半径大小以及增加连接铜排与外壳前面板之间的距离这4种优化措施,最后选取的优化设计方案下的最大场强在许用电场强度规定值以内。

3)根据优化后方案,选用内六角平圆头螺钉和制作均压屏蔽罩、复合套管、连接铜排零部件,将其组装到环网柜进行额定短时工频耐受电压试验与额定雷电冲击耐受电压试验。试验结果表明:优化零部件结构后的产品绝缘性能可以满足40.5 kV电压等级气体绝缘环网柜的绝缘要求。

文中的研究成果可应用于实际工程,为40.5 kV环网柜中复合套管与连接铜排的设计、制造提供计算分析依据,有效提高40.5 kV环网柜运行的安全可靠。

参考文献:

[1] 宋育章. 浅析海上风力发电的现状 & 展望[J]. 中国设备工程, 2021(21): 258-259.
SONG Yuzhang. Analysis of the current situation and prospect of offshore wind power generation[J]. China Plant Engineering, 2021(21): 258-259.

[2] 韩云. 40.5 kV 带开关电缆分支箱结构优化及电场分析[J]. 电气技术, 2016(10): 65-68.
HAN Yun. 40.5 kV with switch cable branch box structure optimization and electric field analysis[J]. Electrical Engineering, 2016(10): 65-68.

[3] 贾勇勇, 杨景刚, 高山, 等. 高压开关柜内部电场仿真及其影响因素分析[J]. 高压电器, 2017, 53(6): 154-160.
JIA Yongyong, YANG Jinggang, GAO Shan, et al. Simulation of internal electric field of high-voltage metal-enclosed switchgear and influencing factors[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(6): 154-160.

[4] 郭黎黎, 王平, 韩辰光, 等. 12 kV 氮气绝缘开关柜中真空灭弧室外绝缘结构的电场优化设计[J]. 高压电器, 2020, 56(11): 152-159.
GUO Lili, WANG Ping, HAN Chenguang, et al. Optimal design of electrical field for external insulation of vacuum interrupter in 12 kV nitrogen insulated switchgears[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 152-159.

[5] 杨代勇, 刘赫, 林海丹, 等. 电力设备外绝缘放电声—光协同检测及诊断技术[J]. 电瓷避雷器, 2023(6): 209-218.
YANG Daiyong, LIU He, LIN Haidan, et al. Acoustic-optical collaborative detection and diagnosis technology for external insulation discharge of power equipment[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(6): 209-218.

[6] 张养库, 古王荣, 孙晓丁, 等. 一种新型12 kV 交流固体绝缘开关设备的结构设计[J]. 科技与创新, 2021(8): 57-59.
ZHANG Yangku, GU Wangrong, SUN Xiaoding, et al. Structure design of a new 12 kV AC solid-insulation switchgear[J]. Science and Technology & Innovation, 2021(8): 57-59.

[7] 黎斌, 王日新, 王君, 等. 对中压配电柜各种主绝缘的思考—兼评抽出式紧凑型空气绝缘环网柜的特点[J]. 高压电器, 2016, 52(8): 7-13.
LI Bin, WANG Rixin, WANG Jun, et al. Thoughts on various kinds of main insulation of medium voltage distribution cabinet - comment on the characteristics of withdrawable compact air-insulated RMU[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(8): 7-13.

[8] 韩筛根, 王涛, 魏东新. 某12 kV 真空断路器耐压故障分析及电场优化[J]. 高压电器, 2018, 54(9): 52-57.
HAN Shaigen, WANG Tao, WEI Dongxin. Analysis of 12 kV vacuum circuit breaker about the voltage fault and optimum design[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(9): 52-57.

[9] 孙华, 王宾. 基于分合闸电气量的真空断路器灭弧能力在线检测研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 102-109.
SUN Hua, WANG Bin. Arc-quenching ability detection of a high voltage vacuum circuit breaker based on switching

- and closing current[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 102-109.
- [10] 庞凯歌, 牛哲荟, 王永亮, 等. 双通套管电场仿真及结构优化研究[J]. 电器与能效管理技术, 2018(19): 22-25.
PANG Kaige, NIU Zhehui, WANG Yongliang, et al. Research on electric field simulation and structural optimization of double-pass casing[J]. Electrical & Energy management Technology, 2018(19): 22-25.
- [11] 郑含博, 敬佳兴, 罗晓庆, 等. 基于多源融合的油纸绝缘套管缺陷辨识及绝缘状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(20): 119-128.
ZHENG Hanbo, JING Jiaying, LUO Xiaoqing, et al. Defect identification and insulation condition assessment of an oil-immersed paper insulation bushing based on multi-source fusion[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 119-128.
- [12] 侯春光, 李秋红, 高有华. 12 kV 涂敷屏蔽层的固体绝缘环网柜局部放电分析与结构设计[J]. 高压电器, 2018, 54(6): 241-247.
HOU Chunguang, LI QiuHong, GAO Youhua. Partial discharge analysis and structure design of solid-insulated ring main units with 12 kV coated shield[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6): 241-247.
- [13] 杨 帆, 李雅海, 卢文斌, 等. 高压电气设备局部放电过程超高频信号监测方法[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(11): 55-60.
YANG Fan, LI Yahai, LU Wenbin, et al. Ultra - high frequency signal monitoring method for partial discharge process of high - voltage electrical equipment[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(11): 55-60.
- [14] 魏 彬, 王 欣, 杜岳凡, 等. 开关柜局部放电分析定位[J]. 电工电气, 2021(9): 50-53.
WEI Bin, WANG Xin, DU Yuefan, et al. Analysis and location of partial discharge of switchgear[J]. Electrotechnics Electric, 2021(9): 50-53.
- [15] 黄晶晶, 种佳丽. KYN61-40.5kV 开关柜穿墙套管的电场仿真及结构优化[J]. 高压电器, 2021, 57(1): 68-74.
HUANG Jingjing, CHONG Jiali. Electric field simulation and structure optimization for wall bushing of KYN61 - 40.5kV switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(1): 68-74.
- [16] 蔡梦怡, 赵恒阳, 杨 为, 等. 40.5 kV 开关柜穿柜套管电场分析与屏蔽极板结构优化[J]. 高压电器, 2020, 56(10): 13-17.
CAI Mengyi, ZHAO Hengyang, YANG Wei, et al. Electric field analysis and shielding plate structure optimization for bushing in 40.5 kV switchgear cabinet[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10): 13-17.
- [17] 曾令文. 110 kV 穿墙套管有限元三维电场分析[J]. 科技风, 2021(7): 185-186.
ZENG Lingwen. Finite element three-dimensional electric field analysis of 110 kV wall casing[J]. Technology Wind, 2021(7): 185-186.
- [18] 谢志成, 张晋寅, 潘志城, 等. 800 kV 对接式直流穿墙套管缺陷分析及应对策略研究[J]. 变压器, 2022, 59(1): 22-27.
XIE Zhicheng, ZHANG Jinyin, PAN Zhicheng, et al. Research on defect analysis and optimal measure of 800 kV butt-type DC wall bushing[J]. Transformer, 2022, 59(1): 22-27.
- [19] SHI Zongqian, ZHANG Yingkui, WANG Qiaosen, et al. Numerical investigation on residual axial magnetic field in vacuum interrupter in DC interruption based on artificial current zero[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(4): 1915-1923.
- [20] LIN Renjie, WANG Lijun, SHI Weixin, et al. Experiment investigation on triggered vacuum arc and erosion behavior under different contact materials[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, 46(8): 3047-3056.
- [21] 李徽胜. 10 kV SF₆ 气体绝缘环网柜建模与仿真方法[J]. 江西电力, 2021, 45(4): 31-35.
LI Huisheng. Modeling and simulation method of 10 kV SF₆ gas - insulated ring - network cabinet[J]. Jiangxi Electric Power, 2021, 45(4): 31-35.
- [22] LI Xingwen, ZHAO Hu, MURPHY A B. SF₆-alternative gases for application in gas-insulated switchgear[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(15): 153001.
- [23] 黄青丹, 刘 静, 曾 炼, 等. 气体介质临界击穿电场强度计算方法综述[J]. 电器与能效管理技术, 2019(12): 1-7.
HUANG Qingdan, LIU Jing, ZENG Lian, et al. Review on calculation methods of critical breakdown electric field intensity in gases[J]. Electrical & Energy management Technology, 2019(12): 1-7.
- [24] 李文涛, 孙 勇, 陈 禾, 等. 浸油绝缘纸击穿场强测量及其击穿机理探究[J]. 变压器, 2022, 59(4): 65-70.
LI Wentao, SUN Yong, CHEN He, et al. Measurement and mechanism analysis of oil - impregnated paper breakdown voltage[J]. Transformer, 2022, 59(4): 65-70.
- [25] 朱志豪, 朱彦卿, 范钦晓, 等. 40.5 kV 触头盒电场分析与绝缘结构优化[J]. 高压电器, 2020, 56(11): 65-70.
ZHU Zhihao, ZHU Yanqing, FAN Qinxiao, et al. Electric field analysis and insulation structure optimization of the contact box for 40.5 kV air insulated switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 65-70.
- [26] 李红梅, 王志川, 刘玉春. 40.5 kV 高海拔穿墙式固封极柱电场分析与结构优化[J]. 高压电器, 2020, 56(10): 18-22.
LI Hongmei, WANG Zhichuan, LIU Yuchun. Electric field analysis and structural optimization of 40.5 kV high - altitude through-wall solid - insulation - embedded poles[J].

- High Voltage Apparatus, 2020, 56(10): 18-22.
- [27] 尹昊阳, 李文栋, 王超, 等. 介电功能梯度绝缘子设计中的电场优化方法对比[J]. 高压电器, 2021, 57(4): 105-111.
- YIN Haoyang, LI Wendong, WANG Chao, et al. Comparison of electric field optimization method in the design of dielectric functional gradient insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(4): 105-111.
- [28] 吴君鹏, 唐少博, 李相磊, 等. 一种改进的基于卷积神经网络的绝缘子检测算法研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(5): 116-122.
- WU Junpeng, TANG Shaobo, LI Xianglei, et al. Research on an improved insulator detection algorithm based on convolutional neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(5): 116-122.
- [29] 牛万宇, 周鸿, 李敏. ± 110 kV 直流穿墙套管户外侧外绝缘长度设计[J]. 电气技术, 2020, 21(4): 71-75.
- NIU Wanyu, ZHOU Hong, LI Min. Design of outdoor side outer insulation length of ± 110 kV DC wall bushing[J]. Electrical Engineering, 2020, 21(4): 71-75.
- [30] 曾中伟, 康吉义. 低温下油浸纸式套管绝缘局部放电发展规律及识别方法[J]. 变压器, 2022, 59(5): 43-51.
- ZENG Zhongwei, KANG Jiyi. Development law and identification method of pd of oil-impregnated paper bushing insulation at low temperature[J]. Transformer, 2022, 59(5): 43-51.
- [31] 罗志峰, 曹欣, 王波勇, 等. 10 kV 开关柜套管内壁沿面场强计算及结构优化[J]. 南昌大学学报(工科版), 2021, 43(2): 191-196.
- LUO Zhifeng, CAO Xian, WANG Boyong, et al. Surface field strength calculation and structure optimization of the inner wall of bushing for 10 kV switchgear[J]. Journal of Nanchang University(Engineering & Technology), 2021, 43(2): 191-196.
- [32] 杨锡清, 潘志城, 张晋寅, 等. 基于局放量传递比的直流穿墙套管局部放电定位方法研究[J]. 变压器, 2023, 60(9): 61-64.
- YANG Xiqing, PAN Zhicheng, ZHANG Jinyin, et al. Research on partial discharge location method of DC wall bushing based on partial discharge transfer ratio[J]. Transformer, 2023, 60(9): 61-64.
- [33] 聂卫兵. 工频交流耐压试验的现场应用及计算验证[J]. 机械管理开发, 2020, 35(9): 172-174.
- NIE Weibing. Field application and calculation verification of power frequency AC voltage resistance test[J]. Mechanical Management and Development, 2020, 35(9): 172-174.
- [34] 杨在葆, 梁红胜, 刘永, 等. 换流变压器阀侧交流外施耐压试验故障的分析与判断[J]. 变压器, 2023, 60(5): 42-47.
- YANG Zaibao, LIANG Hongsheng, LIU Yong, et al. Analysis and judgment of failure of AC external pressure test on valve side of converter transformer[J]. Transformer, 2023, 60(5): 42-47.
- [35] 李智勇, 周华. 关于开关柜内部绝缘缺陷的检测与研究[J]. 科技创新与应用, 2020(12): 77-78.
- LI Zhiyong, ZHOU Hua. On the switch cabinet internal insulation defect detection and research[J]. Technology Innovation and Application, 2020(12): 77-78.
- [36] 郭志伟, 徐子涛, 刘波, 等. 基于最优特征量选取的开关柜故障判别方法研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(8): 85-91.
- GUO Zhiwei, XU Zitao, LIU Bo, et al. Research on switchgear fault judgment method based on optimal feature quantity selection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(8): 85-91.
- [37] 孙标. 高海拔高污秽套管绝缘结构设计及电场分析[J]. 电气传动自动化, 2021, 43(1): 13-16.
- SUN Biao. Design and electric field analysis of high pollution bushing insulation structure at high altitude[J]. Electric Drive Automation, 2021, 43(1): 13-16.
- 赵晶(1974—), 女, 博士, 教授, 主要从事人工智能、电气智能化、电网智能监测与控制、在线检测及故障预测诊断技术的研究(E-mail: ztulipwork@139.com)。
- 邵梦雅(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事高压电器开发设计及仿真研究。
- 梁景璇(1971—), 男, 高级工程师, 主要从事高压电器开发设计。
- 游一民(1963—), 女, 教授级高级工程师, 主要从事智能输配电、高压电器开发设计。