

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2021.02.021

一种12 kV双隔离干燥空气绝缘环网柜的研发

冯祥伟¹, 张永辉¹, 娄源通¹, 蒋成博¹, 朱彦卿¹, 陈 驰²

(1. 平高集团有限公司, 河南 平顶山 467001; 2. 国网南京供电公司, 南京 210000)

摘要: 为丰富环网柜主回路结构形式,满足不同用户的需求,设计一种采用双隔离主回路方案的干燥空气绝缘环网柜。该方案采用真空主开关两侧布置隔离开关,在出线侧布置接地开关的主回路结构形式。为实现零表压干燥空气下满足绝缘要求,同时结构紧凑,采用密封绝缘、均匀电场方法优化主回路结构。通过理论计算和有限元仿真,对主回路关键绝缘结构进行电场分析。研制了12 kV/630 A断路器柜和负荷开关柜样机,并完成型式试验,产品绝缘性能优良,整机局部放电量<10 pC。样机的成功研制,验证了双隔离技术方案的可行性,丰富了充气环网柜结构形式。

关键词: 环保型环网柜; 干燥空气绝缘; 双隔离

Development of 12 kV Dry Air Insulated RMU with Two-side Disconnectors

FENG Xiangwei¹, ZHANG Yonghui¹, LOU Yuantong¹, JIANG Chengbo¹, ZHU Yanqing¹, CHEN Chi²

(1. Pinggao Group Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China; 2. State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to enrich the structure form of main circuit of RMU and meet the needs of different customers, a kind of dry air insulated RMU with two-side disconnectors main circuit proposal is designed. In this proposal the main circuit structure form the disconnectors are arranged on both ends of vacuum main switch and the earthing switch is arranged at the outgoing side is adopted. For achieving to meet dielectric requirement of dry air at zero gauge pressure and compact structure at the same time, the main circuit structure is optimized by way of enclosed insulation and uniform electrical field method. The electric field of key insulation structure is analyzed through theoretical calculation and finite element simulation. The samples of 12 kV/630 A circuit breaker and load switch are developed and the type test is finished. The product has excellent dielectric performance and the partial discharge of the product is less than 10 pC. The successful development of the sample has verified feasibility of technical proposal of the two-side disconnector and enriched the structure form of the gas filling RMU.

Key words: environment friendly RMU; dry air insulation; two-side disconnectors

0 引言

10 kV 环网柜具有结构简单、体积小、价格低、方案灵活等优点,在我国供配电领域得到广泛应用。 SF_6 环网柜在所有环网柜中占比较大,因 SF_6 气体是强温室效应气体,不符合绿色环保的趋势。近年来有一些针对无 SF_6 气体的环网柜及 SF_6 替代气体的研究^[1-7]。

现有充气环网柜为简化主回路结构,多采用三工位开关+真空开关的布置方式^[8]。采用 SF_6 作为绝缘介质的环网柜多采用下三工位负荷开关,而采用环保气体作为绝缘介质的环网柜多采用上三工位开关。下三工位方案存在负荷开关和接地开关共用一个动触头,电气寿命不易同时满足;上三工位方案存在三工位机构及联锁设计难度大,接地操作不方便等缺点。为了补充环网柜主回路结构形式,克服目前环网柜三工位方案存在的上述问题,满足

收稿日期:2020-07-29; 修回日期:2020-09-27

基金项目:国家电网公司总部科技项目(一二次融合的配电设备可靠性技术研究及设备研制)资助。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(Reliability Technology Research and Development of Distribution Equipment Based on Primary and Secondary Integration).

不同用户的需求,同时符合开关领域绿色环保的主流趋势,文中设计开发了一种12 kV双隔离干燥空气绝缘环网柜。

1 主回路布置与绝缘结构设计

双隔离环网柜采用干燥空气作为绝缘介质,最低功能压力0 MPa(20 ℃,表压)。相同气压条件下,干燥空气的绝缘强度大致为SF₆的1/3,而环保环网柜体积不能比SF₆环网柜体积增加过大,由此文中对双隔离干燥空气环网柜绝缘结构进行特殊设计。

双隔离环网柜主接线见图1。主母线采用顶扩方案。主开关两侧布置隔离开关,即母线侧隔离开关和出线侧隔离开关;在出线侧布置线路接地开关。主开关采用真空灭弧,隔离开关手动慢速,接地开关快动具有合能力。隔离开关和主开关纵向布置,接地开关横向布置。极柱结构见图2,气箱内部结构见图3。

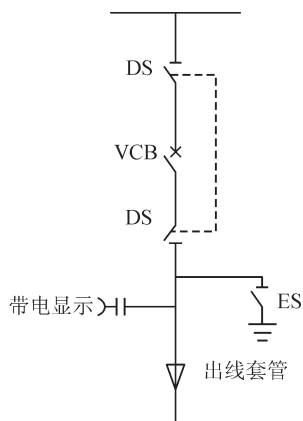


图1 双隔离环网柜断路器柜主接线图

Fig. 1 Schematic diagram of circuit breaker unit with two-side disconnectors

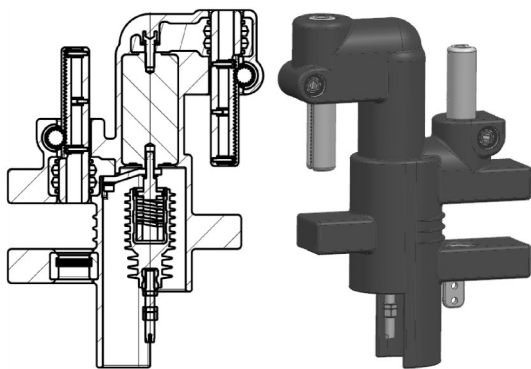


图2 极柱结构图

Fig. 2 Structure diagram of the embedded pole

主回路的核心是固封极柱。极柱融合双隔离开关和主开关。隔离开关采用圆导体,直线运动。圆导体较夹板式结构电场均匀,可以显著缩短断口气隙净距。固封式一体化设计,用固体绝缘材料将

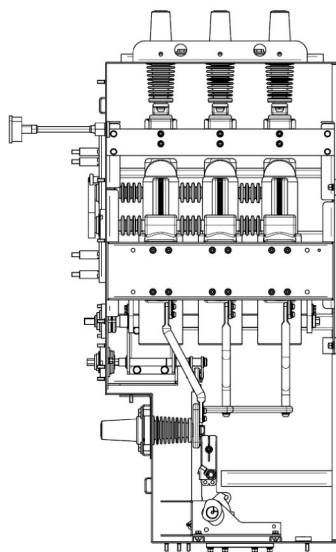


图3 气箱内部结构图

Fig. 3 Structural layout in the gas cabinet

导体包裹,避免导体尖端等电场不均匀部分外露,可以使主回路结构紧凑,同时提高绝缘强度。主开关的上出线座是上隔离开关的下静触座,主开关的下出线座是下隔离开关的上静触座。下隔离开关的下静触座浇注在极柱下端。隔离开关采用齿轮齿条传动结构,极柱上的齿轮轴驱动固定在导电杆上的齿条实现隔离分合功能。隔离开关齿轮轴相间传动由绝缘转轴完成。灭弧室动端通过软连接与下出线座相连。绝缘拉杆布置在灭弧室动端下部,高压部分完全被极柱罩住,绝缘拉杆绝缘外表面与极柱内表面留适当气隙,避免爬电发生。

气箱内部包含导体、主开关模块、接地开关等。为了均匀电场减小气隙净距,导体采用圆棒和圆角矩形排,并在切断面倒圆角。连接螺钉采用平圆头形式,避免使用螺母,以免端部螺杆伸出。

主开关模块集成化程度高,极柱、上隔离触座等纵向布置在框架上,主开关大轴布置在框架下方,地刀操作轴位于框架左侧。将主开关模块安放到气箱内,再安装导体和接地开关即可完成气箱装配。

接地开关采用分体式结构,外形复杂电场不易均匀的动刀头接地,静刀头与下分支导体一体式设计。静刀头及与分支排连接处尽量增大圆角,避免尖端。

气箱内部布置清楚,结构简单,装配方便。

2 绝缘结构分析

双隔离干燥空气环网柜关键绝缘结构有:①气隙绝缘。包括:母线之间,母线对接地金属体,隔离开关导电杆之间,隔离开关导电杆对接地金属体,隔离开关断口;②沿面绝缘。包括:绝缘转轴、套管。

2.1 气隙绝缘分析

2.1.1 干燥空气绝缘特性

电场的均匀程度对干燥空气的耐受电压影响较大。

2.1.1.1 稍不均匀电场中气隙耐受电压

对于电场不均匀系数 $f \leq 4$ 的稍不均匀电场电极, 可以通过式(1)计算耐受电压 $U^{[9-10]}$ 。

$$U = E_0 \frac{d}{fk} \quad (1)$$

式(1)中: U 耐受电压, kV, 峰值; d 电极气体间隙, cm; E_0 气体击穿场强, kV/cm, 典型球—板、球—球、柱—板、柱—柱、同轴圆柱、同心球和球—球电极的空气击穿场强 E_0 见文[9-10]。

对于平行圆柱电极和圆柱—板电极, E_0 可按式(2)计算

$$E_0 = 30.3\delta(1 + 0.298/\sqrt{r\delta}) \quad (2)$$

式(2)中: r 为圆柱半径, cm; δ 为空气相对密度。标准大气压下, 半径 0.5、1.25、2 cm 电极的气隙击穿场强分别为 43、38.4、36.7 kV/cm。

f 电场不均匀系数, $f = E_{\max}/E_{\text{av}}$ 。可通过文 [9-10] 查图得。

K 可靠系数, 综合考虑 50% 击穿电压的 10%~20% 变换系数, 电场分布, 安装环境。根据经验和制造精度, 一般取值 1.2~1.5。

由式 1 知, 增加净距 d 和降低电场不均匀系数 f 均可提高气隙击穿电压。在相同的气隙净距下, 适当增加圆角半径, 使用对称电极结构都可以减小电场不均匀系数 f , 提高耐受电压。

2.1.1.2 极不均匀电场中气隙耐受电压

电场不均匀系数大于 4 的电场属极不均匀电场。此种情况下, 对称电极的击穿电压可参考棒—棒电极的数值, 不对称电极的击穿电压可参考棒—板电极的数值^[11]。在 10 cm 范围内, 棒—板和棒—棒空气间隙雷电冲击 50% 击穿电压相差不大, 保守设计均按棒—板间隙估算击穿电压。

$$U = \frac{U_{50\%}(d)}{k_1} \quad (3)$$

式(3)中: $U_{50\%}$ 为棒—棒或棒—板电极在间隙为 d 时的正极性雷电冲击 50% 击穿电压, kV; k_1 为可靠系数, 意义和取值同 K 。

SF₆ 环网柜主母线一般采用(40×8) mm²的全圆角矩形铜排, 相间距为 150 mm。其相间电场不均匀系数为 4.6, 属极不均匀电场, 须用式(3)计算气隙耐受电压。

2.1.2 主母线、分支母线相间、对地气隙绝缘

在满足绝缘情况下, 缩短气隙净距, 主母线、分支母线电场应尽量均匀。

上分支母线选用(40×8) mm²圆角矩形铜排, 下分支母线 1 选用 $\phi 25$ mm 铜棒, 下分支母线 2 选用(30×15) mm²半径 5 mm 的圆角矩形铜排见图 4。3 种母线基本参数及满足雷电冲击耐受电压 75 kV 的净距见表 1, 可靠系数取 1.2。相间电极类型为平行圆柱, 平行圆角棱柱。相地电极类型为圆柱—板, 圆角棱柱—板^[9-10]。

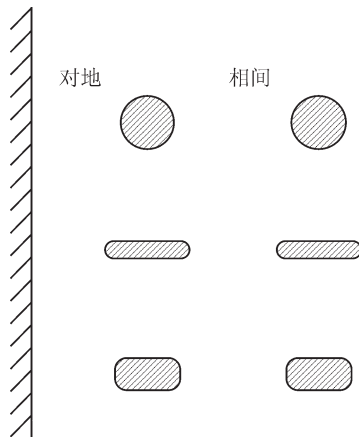


图 4 3 种导体相间及对地布置图

Fig. 2 The layout of three kinds of conductors between each other and to the ground

表 1 3 种母线基本参数及电气净距要求

Table 1 Three kinds of busbar basic parameters and electrical gas distance

序号	类型	截面积/mm ²	最小相间净距/mm	最小相地净距/mm
1	40×8	306.3	87	87
2	$\phi 25$	490.6	35	55
3	30×15	428.5	55	80

环网柜主母线、分支母线相间、对地气隙净距大于最小净距, 满足绝缘要求。

2.1.3 隔离开关相间、对地气隙绝缘分析

隔离开关导电杆相—地电极类比于圆柱—板电极, 相间电极类比于平行圆柱电极, 利用式(1)计算, 直径 40 mm 导体耐受 75 kV 雷电冲击耐受电压的最小相—地气隙为 45 mm, 最小相间气隙为 30 mm。隔离开关在合闸位置导电杆对地, 由于齿条的存在破坏了导电杆整圆结构, 但齿条整体低于导电杆过度圆弧, 导电杆对齿条有屏蔽作用, 在雷电冲击电压作用下的场强分布见图 5。

由图 5 知, 在气隙净距 45 mm 工况下, 导电杆圆弧过度处场强最大为 3.5×10^6 V/m, 气隙平均场强为 1.67×10^6 V/m, 电场不均匀系数为 2.1, 属稍不均匀电场。参考直径 4 cm 圆柱—板电极, 气隙击穿场强为 3.67×10^6 V/m。最大场强小于击穿场强。齿条的尖端被导电杆很好的屏蔽掉。

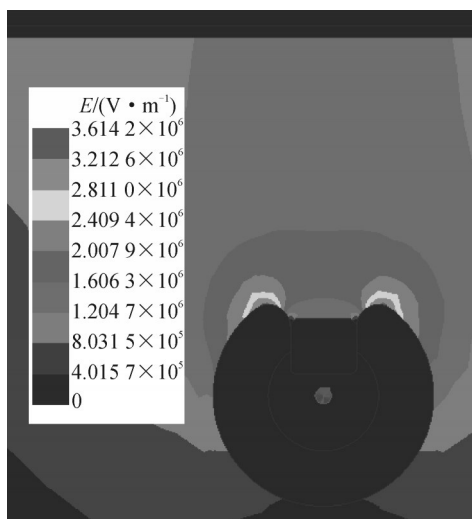


图5 导电杆—地场强分布图

Fig. 5 Electric field distribution between contacts to ground

在相同气隙净距情况下,相间电极电场较相—地电极电场分布均匀。相间需要较小的净距即可满足绝缘要求。隔离开关相间、对地实际气隙净距受相间距等因素限制,但均满足上述要求。

2.1.4 隔离开关断口气隙绝缘分析

隔离开关动导体为圆导电杆,静导体为空心圆柱,电极导体本身电场就比较均匀,加之固体绝缘材料的电场屏蔽作用,可以缩短气隙净距。在隔离开关分闸位置,导电杆退回到与环氧树脂面平,其端部不均匀电场可部分被静触座和环氧树脂屏蔽。静触座金属部分低于环氧树脂部分,其过度部分不均匀电场可被固体绝缘材料屏蔽。隔离开关断口电极类比于平行圆角棱柱电极,在不考虑固体绝缘材料屏蔽作用下,计算保证隔离断口雷电冲击耐受电压 85 kV 的最小气隙为 50 mm。SF₆ 环网柜摆刀式隔离开关采用夹板式动触头,静触头为铜块,电场较不均匀。

考虑一定的裕度,断口气隙净距取 60 mm,在雷电冲击耐受电压 85 kV 作用下,采用二维轴对称电场分析模型,并对实物进行适当简化,隔离断口场强分布见图 6。导电杆头部过度圆弧处场强最大,两绝缘件圆角过渡处次之。场强最大值为 2.45×10^6 V/m,小于 3.0×10^6 V/m,满足要求。进一步分析断口净距对场强的影响,断口净距 50、70 mm 时场强最大值分别为 3×10^6 、 2.2×10^6 V/m,综合考虑偏差、裕度等因素,断口净距取 60 mm 比较合适。

2.2 沿面绝缘分析

环网柜中沿面电场为极不均匀电场。分为沿面电场具有强垂直分量和具有弱垂直分量两种情况。套管属于第 1 种情况,绝缘转轴属于第 2 种情况。

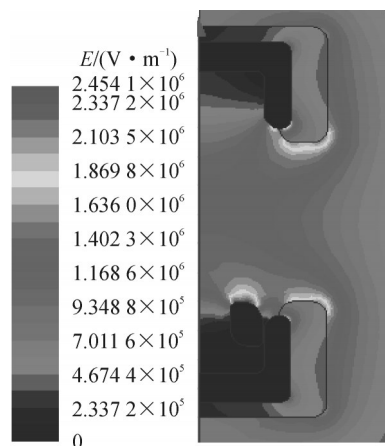


图6 隔离断口场强分布图

Fig. 6 Electric field distribution between isolation contacts

相间绝缘转轴绝缘结构设计。此种工况下,电场线平行于介质表面,设计方法是优化电极外形,降低沿面电场强度,改善电压分布^[12]。文中根据环氧树脂浇注要求,适当增加嵌件根部圆角半径,同时调整伞裙与嵌件距离,从而减小最大沿面场强,实现转轴全长 82 mm 即可满足 12 kV 级绝缘要求。

套管类绝缘结构设计。此种工况下,电场线与介质表面垂直,套管表面电场分布很不均匀,特别是中间法兰处。常用处理方法是在套管中间法兰环氧树脂内部增加环形屏蔽网,减小介质表面场强^[13-15]。文中设计时优化低压屏蔽伸进气箱的距离,增加伞裙气隙与低压屏蔽的距离,从而减小法兰根部及第一个伞裙沿面场强,提高闪络电压。

最终设计的相间绝缘转轴和套管电场分析结果见图 7-8。

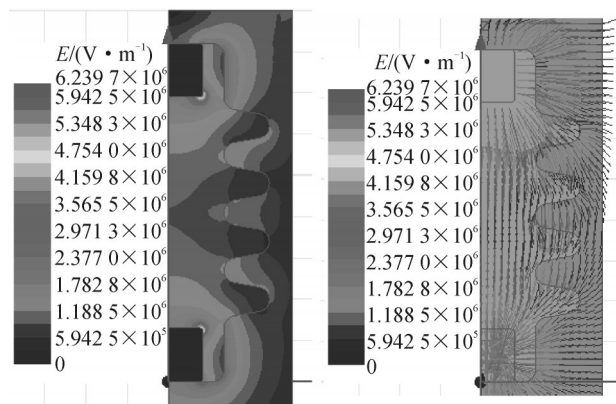


图7 相间绝缘转轴场强分布图

Fig. 7 The electric field of the insulation shaft

由图 7 知,相间绝缘转轴电场线主要平行于介质表面。在雷电冲击电压作用下,绝缘转轴两端嵌件圆角处场强最大为 6.2×10^6 V/m。嵌件圆角处被固体绝缘材料包裹,虽然场强较大,但小于固体绝缘材料的击穿场强,不会击穿。相间绝缘转轴沿面

场强整体比较均匀,最大值为 2.9×10^6 V/m,且有一定的爬电距离,绝缘件试模时工频和冲击耐压均能满足要求。

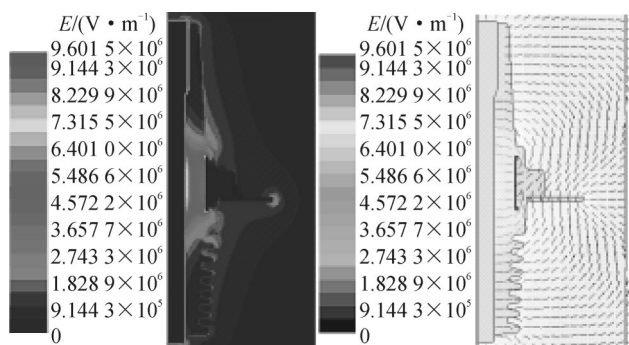


图8 套管场强分布图

Fig. 8 The electric field of the bushing

由图8知,套管电场线主要垂直于介质表面。在雷电冲击电压作用下,套管导体与低压屏蔽间及第1个伞裙沿面场强较大。低压屏蔽位于固体绝缘材料中,虽然场强较大,但小于环氧树脂的临界场强,不会通过此处击穿。套管第1个伞裙沿面场强较大,其他伞裙沿面场强较均匀,最大值未超过 3×10^6 V/m。原设计第1个伞裙距低压屏蔽距离为 7 mm,沿面场强最大值为 5×10^6 V/m,通过调整将距离增大到 17 mm 沿面场强最大值减小到 2.85×10^6 V/m,绝缘件试模时工频和冲击耐压均能满足要求,见图9。

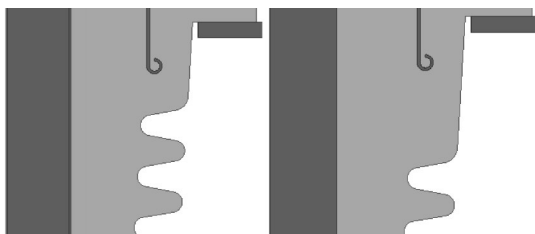


图9 优化前后套管伞裙气隙位置

Fig. 9 The position of the gap in bushing

3 试验验证

在对绝缘结构分析计算的基础上,开发了固封极柱、绝缘转轴、出线套管关键绝缘件,完成了 12 kV 双隔离干燥空气绝缘环网柜的研发,通过了包括绝缘试验在内的型式试验。样机外形尺寸(宽×深×高)为 $0.45 \text{ m} \times 0.9 \text{ m} \times 1.7 \text{ m}$,在干燥空气零表压下满足绝缘要求,整机局放 $< 10 \text{ pC}$ 。

4 结论

12 kV 双隔离干燥空气绝缘环网柜已完成研发,绝缘设计和结构被试验验证,形成以下结论:

1)文中提出的以真空灭弧为核心,采用母线侧和线路侧双隔离开关加独立快速接地开关的主回路布置方式,技术上可行,绝缘性能好,整机局放 $< 10 \text{ pC}$,结构新颖,较好的补充了现有环网柜结构,可以满足不同用户对主回路的需求;

2)主开关和隔离开关采用固封一体化设计,绝缘性能优良,结构紧凑,装配简便;

3)密封气箱内的沿面绝缘,通过优化电极外形,加大屏蔽金属网与伞裙气隙的距离,比单纯增加爬电距离和气隙净距更有效;

4)在设计阶段,根据干燥空气的绝缘特性对绝缘结构进行分析计算,随后的样机试验环节验证了分析计算的正确性。

参考文献:

- [1] 徐立新,周柏杰,谭东现. 干燥空气绝缘环网柜中的复合绝缘工频特性研究[J]. 高压电器,2019,55(4): 52-59.
XU Lixin, ZHOU Baijie, TAN Dongxian. Investigations on power frequency characteristics of composite insulation configuration in dry air insulated ring main unit[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4): 52-59.
- [2] 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.
- [3] 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 Shenyang. Research and design of 12~24 kV nitrogen insulated ring main unit[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(12): 3717-3724.
- [4] 邓 虎. 12 kV 环保型环网柜与中置柜关键部件绝缘特性的研究[D]. 厦门: 厦门理工学院,2016.
DENG Hu. The key component insulating properties research on environment-friendly RMU and medium voltage metal-clad switchgear[D]. Xiamen: Xiamen University of Technology, 2016.
- [5] 周文俊,郑 宇,杨 帅,等. 替代SF₆的环保型绝缘气体研究进展与趋势[J]. 高压电器,2016,52(12): 8-14.
ZHOU Wenjun, ZHENG Yu, YANG Shuai, et al. Research progress and trend of SF₆ alternative with environment friendly insulation gas [J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(12): 8-14.
- [6] 崔文军,张交锁. 无SF₆气体绝缘开关设备中干燥空气作为绝缘介质的使用[J]. 高压电器,2016,52(12): 221-226.
CUI Wenjun, ZHANG Jiaosuo. Dry air as insulation gas in SF₆-free gas insulated switchgears[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(12): 221-226.

- [7] 周柏杰,谭东现,韩冬,等. 氮气环网柜中复合绝缘的工频特性研究[J]. 高压电器, 2017, 52(12): 80-86.
ZHOU Baijie, TAN Dongxian, HAN Dong, et al. Investigation into the characteristics of composite insulation in nitrogen insulated ring main unit[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 52(12): 80-86.
- [8] 王承玉. 环网柜中隔离接地三工位开关布置方式[J]. 高压电器, 2018, 54(8): 242-245.
WANG Chengyu. Discussion on arrangement of three-position disconnecting and earthing switch in ring main unit[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(8): 242-245.
- [9] 严璋,朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
YAN Zhang, ZHU Deheng. High voltage insulation technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [10] 吴广宁. 高电压技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
Xu Guangning. High voltage technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [11] 钱家骊,袁大陆,杨丽华,等. 高压开关柜—结构、计算、运行、发展[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
QIAN Jiali, YUAN Dalu, YANG Lihua, et al. Structure, calculation, functioning, development of high voltage metal-enclosed switchgear[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [12] 谭东现,黄晨奕,田阳,等. 传感器绝缘子的结构分析与爬电距离设计[J]. 高压电器, 2020, 56(10): 7-12.
TAN Dongxian, HUANG Chenyi, TIAN Yang, et al. Structure analysis and creepage distance design of sensor insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10): 7-12.
- [13] 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.
- [14] 柯艳国,蔡梦怡,赵恒阳,等. 40.5 kV 双屏蔽结构触头盒三维电场仿真与优化[J]. 高压电器, 2020, 56(10): 23-28.
KE Yanguo, CAI Mengyi, ZHAO Hengyang, et al. 3D electric field simulation and optimization of 40.5 kV contact box with double shield structure[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10): 23-28.
- [15] 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.

冯祥伟(1987—),男,硕士研究生,主要从事中压开关设备方面的研究工作(通信作者)(E-mail:446443174@qq.com)。

《高压电器》2021年2期广告单位

彩色广告

封一:莱茵技术(上海)有限公司

封二:西安高压电器研究院有限责任公司(认证中心)

封三:史陶比尔(杭州)精密机械电子有限公司

封四:上海乐研电气有限公司

前插1:北京京东方真空电器有限责任公司

前插2:浙江雅博自动化设备有限公司

前插3:成都凯赛尔电子有限公司

前插4:江苏现代电力科技股份有限公司

前插5:陕西斯瑞新材料股份有限公司

前插6:征稿启示

前插7:征稿启示

前插8:西安高压电器研究院有限责任公司(业务)