

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.10.005

40.5 kV 双屏蔽结构触头盒三维电场仿真与优化

柯艳国¹, 蔡梦怡², 赵恒阳¹, 张国宝², 杨 为², 田 宇¹, 朱太云²

(1. 国网安徽省电力有限公司, 合肥 230061; 2. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 合肥 230601)

摘要: 针对40.5 kV触头盒绝缘问题较为突出的问题,文中以封堵式触头盒为研究对象。建立了40.5 kV空气绝缘开关柜的整体模型,充分考虑了开关柜内母排、穿柜套管、断路器等部件对触头盒电场分布的影响。计算了封堵式触头盒在工作位工况和试验位工况下的电位、电场分布,分析了双屏蔽结构对触头盒内部电场分布的影响规律,优化了触头盒内部屏蔽极板,有效改善了封堵式触头盒内部的电场分布。文中研究成果可为40.5 kV封堵型触头盒的设计、制造提供计算分析依据,提高40.5 kV开关柜运行的安全可靠性能。

关键词: 双屏蔽结构; 触头盒; 有限元法; 电场强度

3D Electric Field Simulation and Optimization of 40.5 kV Contact Box with Double Shield Structure

KE Yanguo¹, CAI Mengyi², ZHAO Hengyang¹, ZHANG Guobao², YANG Wei², TIAN Yu¹,
ZHU Taiyun²

(1. State Grid Anhui Electric Power Company Limited, Hefei 230061, China; 2. State Grid Anhui Electric Power Company Limited Research Institute, Hefei 230601, China)

Abstract: Aiming at the insulation problems of 40.5 kV contact box, this paper takes the plug-type contact box as the research object. The computation model of 40.5 kV gas insulated switchgear has been established. And the influence of busbar, cabinet bushings, circuit breakers to the electric field distribution of contact box has been considered. The potential and electric field distribution of plug-type contact box has been computed not only in working situation, but also in test situation. The influence of double shield structure on the internal electric field distribution of contact box has been investigated. The structure of double shield has been optimized and the electric field distribution that inside the 40.5 kV contact box has been effectively improved. The research results of this paper can provide computation and analysis basis for the design and manufacture of 40.5 kV plug-type contact box, and improve the safety and reliability of 40.5 kV gas insulated switchgear operation.

Key words: double shield structure; contact box; finite element method; electric field strength

0 引言

随着电网的不断发展,开关柜的用量也在迅速增加,大量使用将直接关系到电网建设和运行的可靠性、安全性和稳定性^[1-3]。近年来,由于绝缘空气净距不足、制造工艺缺陷等因素,先后发生数起开关柜设备放电故障或异常^[4-7],由此带来的停电产生了较大的经济损失和负面的社会影响^[8]。

从现场运行经验来看,在所有烧毁或基本报废的开关柜中,大多数由绝缘问题所引发,这其中又

以40.5 kV开关柜的问题比较突出^[9-10]。受柜体尺寸限制,开关柜内部往往存在着空气绝缘净距不足的问题^[11-12]。其中,触头盒作为高压开关柜内的核心元件,主要用于支撑并固定开关柜内断路器静触头,并保持其对柜体绝缘。触头盒一般由环氧树脂复合材料构成,具有绝缘强度和机械强度高优点^[13]。从运行经验来看,高压开关柜内触头盒等元件,存在着电场设计裕度偏小,屏蔽极板设置不合理以及工艺控制欠缺等问题^[14-18],由触头盒发生故障而引起的绝缘故障时有发生^[19]。

文中借助三维有限元分析软件,以封堵式触头盒为研究对象,建立了40.5 kV空气绝缘开关柜的整体模型,充分考虑了开关柜内母排、穿柜套管、断路器等部件对触头盒电场分布的影响,计算了封堵式触头盒在工作位工况和试验位工况下的电位、电场分布,分析了双屏蔽结构对触头盒内部电场分布的影响规律,优化了触头盒内部屏蔽极板,有效改善了封堵式触头盒内部的电场分布。文中的研究成果可应用于实际工程,为40.5 kV封堵型触头盒的设计、制造提供计算分析依据,提高40.5 kV开关柜运行的安全可靠性能。

1 40.5 kV 触头盒三维仿真模型与计算方法

1.1 40.5 kV 开关柜布置与触头盒仿真模型的建立

依据触头盒等绝缘件供应商以及开关柜整机制造商提供的设计图纸,见图1。利用三维有限元分析软件建立了40.5 kV开关柜的整体三维模型。其中,40.5 kV开关柜长度为3 100 mm,宽度为1 400 mm,高度为2 600 mm。开关柜内部可分为断路器室、母线室以及电缆室等不同功能隔室,不同隔室之间通过金属板分隔。

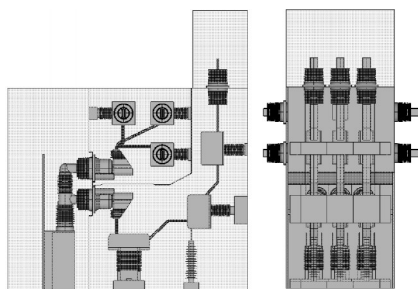


图1 40.5 kV 开关柜整体三维模型

Fig. 1 Three dimensional model for a 40.5 kV switchgear cabinet

触头盒与固封极柱区域三维模型见图2。触头盒穿过竖直金属隔板与竖直金属隔板相连。触头盒包含进线和出线触头盒(即上方触头盒和下方触头盒),上方触头盒与下方触头盒之间通过水平金属隔板隔开。触头盒尾部断路器触头出口部分位于断路器室内,上方触头盒头部母排出线部分位于母线室内,下方触头盒头部母排出线部分位于电缆室内。上方触头盒与下方触头盒内部断路器触头间的垂直距离为400 mm。同回三相触头盒之间为水平布置,相间距为300 mm。

触头盒及其内部结构的具体细节见图3。从图3可以看出该触头盒采用封堵型结构设计,触头盒内部断路器触头与母排之间通过金属嵌件连接,可实现开关柜内断路器室与母线室、电缆室之间的完

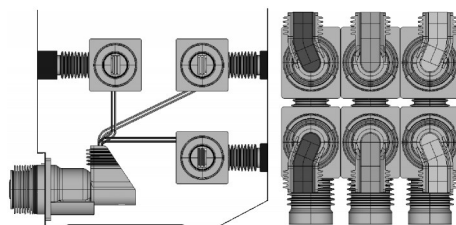


图2 触头盒与固封极柱区域三维模型

Fig. 2 Three dimensional model of spout and circuit breaker

全分隔。触头盒轴向总长为720 mm,径向直径为280 mm,触头盒尾部与绝缘安装板之间的轴向距离为200 mm。由于开关柜内母线相间距为340 mm,而触头盒内部断路器触头的相间距为300 mm,因此边相触头盒母排出口附近采用了外扩结构设计。触头盒内部采用了双屏蔽结构设计,在高压屏蔽的基础上,增加了接地屏蔽。高压屏蔽与接地屏蔽端部均采用了卷边处理以均匀端部场强。其中,高压屏蔽与触头盒内部金属嵌件相连,并延伸至触头盒尾部绝缘挂板附近;接地屏蔽通过四个金属件分别连接螺栓并与开关柜内部竖直金属隔板固定。

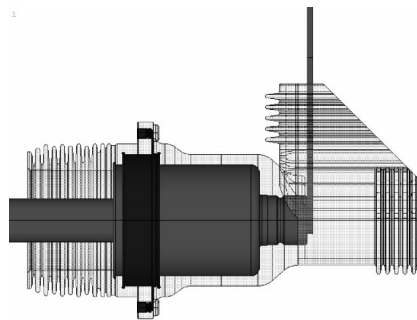


图3 封堵型触头盒内部结构

Fig. 3 Internal structure of sealed spout

1.2 有限元电场计算方法与加载方式

电磁场问题可视为由Maxwell方程组推导、由偏微分方程和边界条件所描述的边值问题^[20]。对于文中的研究对象40.5 kV开关柜,它在交流电压作用下的电磁场问题由Laplace方程描述并满足第一类边界条件,最后求解该边值问题即可。在计算时,为减小计算误差需要使网格过渡得更加自然,仿真模型网格的剖分采用2种单元结构:4面体和6面体。对于开关柜内母排等形状较规则的物体使用6面体进行扫掠剖分;对于绝缘件、金属隔板、柜体等形状不规则的物体使用4面体进行自由剖分;重点关注的地方如触头盒高压屏蔽、接地屏蔽等进行网格加密处理,整个计算模型共包含7 662 584个节点和5 346 678个单元。

电场仿真以触头盒为研究对象,分别对触头盒处于工作位和试验位两种工况下的电场分布进行

计算。当触头盒处于工作位工况下,触头盒内部动侧、静侧导体处于合位;当触头盒处于试验位工况下,触头盒内部动侧、静侧导体处于分位。当触头盒处于工作位工况时,在中相触头盒内部的导电母排以及高压屏蔽极板施加工频耐受电压 95 kV,在边相触头盒内部的导电母排以及高压屏蔽极板施加零电位;当触头盒处于试验位工况时,在中相上方触头盒内部导电母排以及高压屏蔽极板施加工频耐受电压 95 kV,在中相下方与边相触头盒内部导电母排以及高压屏蔽极板施零电位。在三相触头盒的接地屏蔽极板以及触头盒挂板处施加零电位,在开关柜柜体表面施加零电位。

黎斌编著的《SF₆高压电器设计》从长期带电运行时控制局部放电需要的角度提出了额定相电压下绝缘件内部的运行工作场强为 4 kV/mm^[21],参考开关柜的最高工作电压 40.5 kV,换算至 95 kV 工频耐压下的控制场强值为 9.38 kV/mm,同时参考触头盒绝缘件的局放试验,对环氧材料表面控制场强取为 2 kV/mm,根据以上分析对触头盒各关键位置电场强度进行控制。

2 计算结果与分析

2.1 触头盒处于工作位时的电场分布

触头盒处于工作位的电位、电场分布,见图 4。从图 4(a)、(b)计算结果看,各相触头盒表面及内部的电位、电场分布规律基本相似。在触头盒表面,断路器触头出口区域场强相对较低,在触头盒绝缘挂板与触头盒本体母排出线侧连接处附近出现了局部场强集中区域。由于中相与边相触头盒之间距离相对较近,高场强主要分布在触头盒本体的两端。图 4(c)给出了触头盒内部中心截面处的电场分布。可以看出,受触头盒内部高压屏蔽极板的影响,在触头盒内部断路器触头与高压屏蔽极板之间区域形成了低场强区域,有效降低了触头盒内部空气间隙场强。

触头盒内部积污,见图 5。从现场运行经验来看,触头盒内部在长期运行条件下,不可避免的出现积污等问题,在潮湿、凝露等环境条件下,可能会引起触头盒内部产生局部的高场强区,甚至引起触头盒内部放电现象。采用双屏蔽结构设计将高场强区引至绝缘材料内部,从而有效降低了触头盒内部空气间隙的场强。由于触头盒内部空气间隙的绝缘强度要明显低于固体绝缘材料的绝缘强度,因此,可有效降低触头盒内表面因积污等特殊环境条件引发的内表面放电风险,从而提高触头盒运行

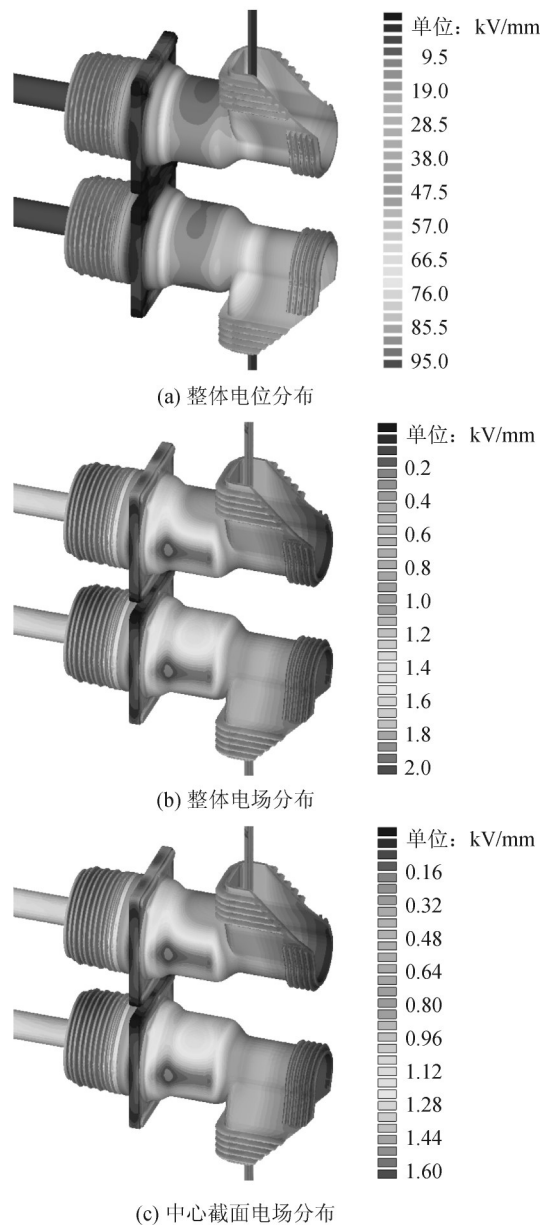


图 4 工作位时触头盒电位、电场分布

Fig. 4 Potential and electric field distribution of middle phase spout in working situation

的安全可靠性。



图 5 触头盒内部积污

Fig. 5 Contamination in spout

但在触头盒绝缘件内部接地屏蔽与高压屏蔽之间则形成了高场强区,高压屏蔽极板以及接地屏蔽极板端部场强相对较高。触头盒内部屏蔽极板

表面电场分布见图6。图6给出了触头盒内部高压屏蔽极板以及接地屏蔽极板表面的电场分布。从计算结果来看,接地屏蔽极板表面最高场强为8.17 kV/mm,高压屏蔽极板表面最高场强为9.37 kV/mm,均低于9.38 kV/mm的控制要求,触头盒表面最高场强为1.71 kV/mm,低于2 kV/mm,满足场强控制要求。

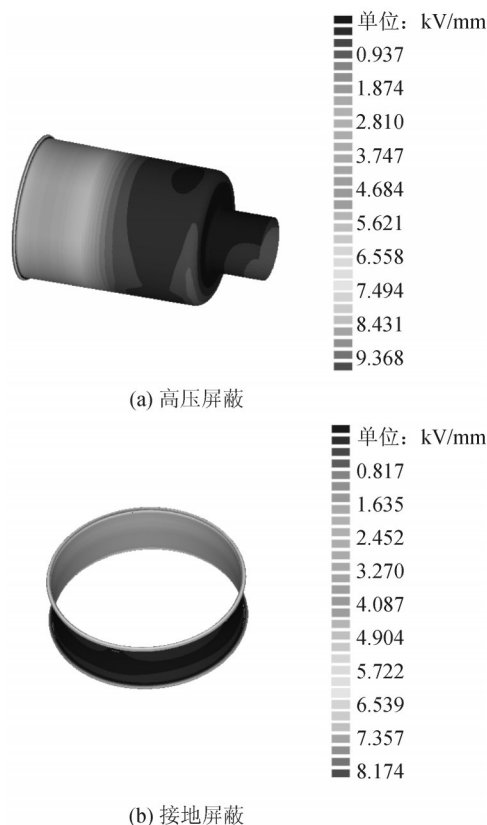


图6 触头盒内部屏蔽极板表面电场分布

Fig. 6 Electric field distribution on the surface of shield plate inside the spout

2.2 触头盒处于试验位时的电场分布

触头盒处于试验位时的整体电位、电场分布见图7。在试验位工况下,断路器触头与触头盒分离,上方触头盒与母线室内高电位母排相连,下方触头盒接地。从计算结果看,试验位工况下上方触头盒各关键位置的电场分布要比工作位工况下略微严酷。其中,触头盒内接地屏蔽极板表面最高场强为8.17 kV/mm,低于9.38 kV/mm,满足场强控制要求。但高压屏蔽极板表面最高场强达到了9.78 kV/mm,已经超过了9.38 kV/mm的场强限值。触头盒绝缘件表面最高场强为1.81 kV/mm,相比于工作位工况下的1.71 kV/mm,略有增大,但仍满足2 kV/mm的场强控制要求。

2.3 触头盒优化方案下的电场分布

通过对触头盒初步方案进行计算分析,发现触头盒在试验位工况下,其内部高压屏蔽极板表面最高场强超过了9.38 kV/mm的控制值,触头盒的初步

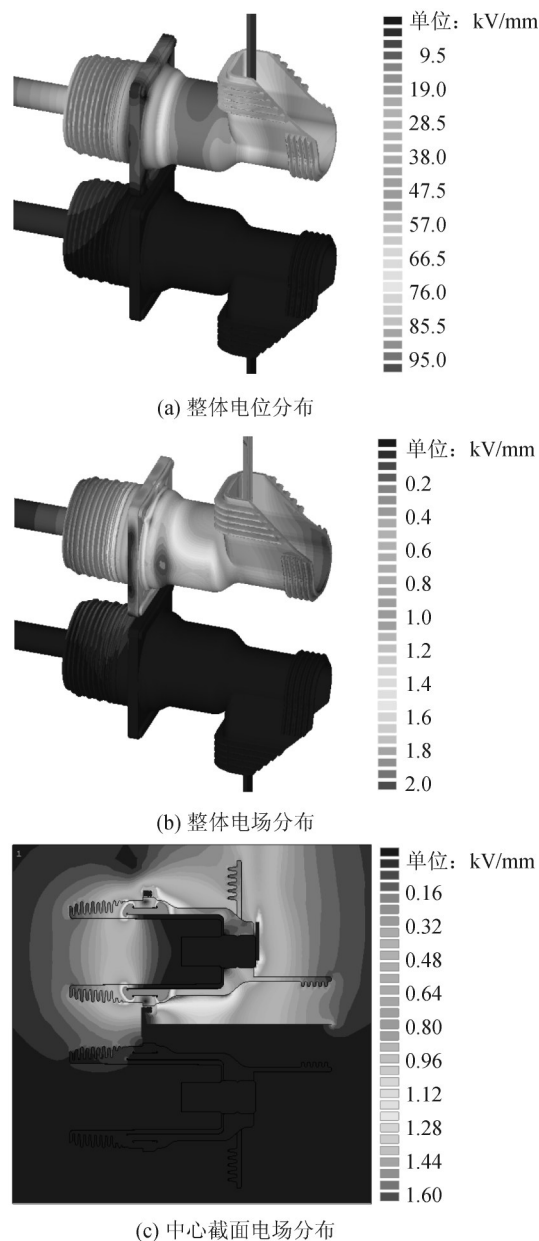


图7 试验位时触头盒电位、电场分布

Fig. 7 Potential and electric field distribution of middle phase spout in testing situation

方案有待优化。通过调节触头盒绝缘件内部屏蔽极板的尺寸参数,可在一定程度上优化触头盒内部及表面的电场分布。触头盒屏蔽极板优化示意图见图8。在初步方案的基础上,将高压屏蔽极板的罩入深度增加10 mm。

优化方案下触头盒各关键位置最高场强,见表1。表1给出了优化方案下,触头盒各关键位置在工作位工况以及试验位工况下的最高场强值。随着触头盒绝缘件内部高压屏蔽极板罩入深度的增加,高压屏蔽极板与接地屏蔽极板端部之间的距离随之增大,接地屏蔽极板表面场强出现一定程度的增大,工作位工况下其端部最高场强由8.17 kV/mm增大至9.25 kV/mm;而高压屏蔽极板表面场强出现一

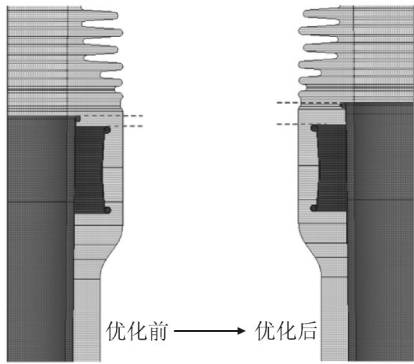


图8 触头盒屏蔽极板优化示意图

Fig. 8 Optimization diagram of spout shield plate

定程度的降低,工作位工况下其端部最高场强由 9.37 kV/mm 降至 7.7 kV/mm。

表1 优化方案下触头盒各关键位置最高场强

Table 1 Maximum electric field strength of each key

position of spout under the optimized scheme		kV/mm	
位置	接地屏蔽极板表面	高压屏蔽极板表面	绝缘件表面
工作位	9.25	7.70	1.79
试验位	9.23	8.82	1.79

触头盒绝缘件内部高压屏蔽极板罩入深度的增加对绝缘件表面场强影响较小,工作位工况下绝缘件表面最高场强由 1.71 kV/mm 略微增大至 1.79 kV/mm。经过优化,触头盒绝缘件内部高压屏蔽极板、接地屏蔽极板表面在工作位工况以及试验位工况下的最高场强均低于 9.38 kV/mm,可以满足控制要求;绝缘件表面在工作位工况以及试验位工况下的最高场强均满足 2 kV/mm 的场强控制值。

3 结论

1)触头盒采用双屏蔽结构设计有效改善了触头盒内部空气间隙场强,可降低触头盒内部因积污等特殊环境条件引发的局部放电风险,提高触头盒运行的安全可靠。

2)在初步方案下,当触头盒处于工作位工况时,触头盒内部最高场强为 9.37 kV/mm,触头盒表面最高场强为 1.71 kV/mm,均满足场强控制要求。当触头盒处于试验位工况时,触头盒内部最高场强为 9.78 kV/mm,超过了 9.38 kV/mm 的场强限值;触头盒表面最高场强为 1.81 kV/mm,满足场强控制要求。

3)在优化方案下,当触头盒处于工作位工况时,触头盒内部最高场强为 8.101 kV/mm,触头盒表面最高场强为 1.682 kV/mm,均满足场强控制要求。当触头盒处于试验位工况时,触头盒内部最高场强为 8.099 kV/mm,触头盒表面最高场强为 1.684 kV/mm,均满足场强控制要求。

参考文献:

[1] 黄琮鉴. 基于超高频法的高压开关柜局部放电在线监测的研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
HUANG Congjian. Study on partial discharge on-line monitoring of high voltage switchgears based on ultral-high-frequency method[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.

[2] 吴子杰. 输变电设备可靠性评估方法研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.
WU Zijie. Study on reliability assessment for transmission and transformation equipment[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.

[3] 侯慧,曾金媛,陈国炎,等. 配电开关设备及其控制器可靠性研究综述[J]. 武汉大学学报(工学版),2018,51(7): 627-633.
HOU Hui, ZENG Jinyuan, CHEN Guoyan, et al. Review of reliability research on power distribution switchgears[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(7): 627-633.

[4] 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.

[5] 严丹昭,岑旭,陈晶. 10 kV 环网柜电缆终端故障原因解析及改进措施[J]. 电气应用,2012,31(10): 66-69.
YAN Danzhao, CEN Xu, CHEN Jing. Failure analysis and improvement measures of 10 kV RMU cable terminal[J]. Electrical Applications, 2012, 31(10): 66-69.

[6] 印华,王勇,王谦. 12 kV 开关柜内部放电的分析与处理[J]. 高压电器,2006,42(5): 395-396.
YIN Hua, WANG Yong, WANG Qian. Analysis and disposal of the discharging in 12 kV switch cubicle[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(5): 395-396.

[7] 王琪,李秋香,王晓健,等. 开关柜放电原因分析与治理[J]. 山东电力技术,2014,41(3): 40-43
WANG Qi, LI Qiaoxiang, WANG Xiaojian, et al. Cause analysis and treatment of switchgear discharge[J]. Power Technology of Shandong, 2014, 41(3): 40-43.

[8] 徐建源,任春为,司秉娥,等. 40.5 kV SF₆ 充气式开关柜三维电场分析[J]. 中国电机工程学报,2008,28(15): 136-140.
XU Jianyuan, REN Chunwei, SI Bing'e, et al. Three dimensional electric field analysis of 40.5 kV SF₆ cubicle gas-insulated metal-enclosed switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(15): 136-140.

[9] 黎刚,毛文奇,黎治宇. KYN61-40.5 型高压开关柜存在

- 问题与对策[J]. 湖南电力 2012, 32(4): 36-39.
- LI Gang, MAO Wenqi, LI Zhiyu. Problems and countermeasures of KYN61-40.5 high voltage switchgear[J]. Hunan Electric Power, 2012, 32(4):36-39.
- [10] 潘益伟, 陈建胜, 林坚, 等. 一起 40.5 kV 开关柜放电的原因分析及处理[J]. 浙江电力, 2014(3): 35-37.
- PAN Yiwei, CHEN Jiansheng, LIN Jian, et al. Cause analysis and treatment on discharging of 40.5 kV switch cabinet[J]. Zhejiang Electric Power, 2014(3): 35-37.
- [11] 苏剑, 朱迎阳, 赵继东. KYN-40.5 开关柜绝缘结构的改进[J]. 电气开关, 2011(1): 41-43.
- SU Jian, ZHU Yingyang, ZHAO Jidong. Improvement of model KYN-40.5 switchgear cabinet insulation structure[J]. Electrical Switchgear, 2011(1):41-43.
- [12] 叶成刚. 35 kV 在役开关柜绝缘结构改进研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- YE Chengang. Research on insulation structure improvements of 35 kV in service switchgear panel[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2012.
- [13] 王海燕, 陈硕, 朱志豪, 等. 固体开关柜环氧树脂材料绝缘特性研究[J]. 绝缘材料, 2019, 52(2): 35-40.
- WANG Haiyan, CHEN Shuo, ZHU Zhihao, et al. Insulation characteristics of epoxy resin material for solid switchgear[J]. Insulation Materials, 2019, 52(2): 35-40.
- [14] 高杨, 周岩, 刘婷婷, 等. 高压开关柜的三维电磁场数值仿真[J]. 信息与电子工程, 2009, 7(6): 540-544.
- GAO Yang, ZHOU Yan, LIU Tingting, et al. 3-D numerical simulation of electromagnetic field in HV switchgear cabinet[J]. Information and Electronic Engineering, 2009, 7(6):540-544.
- [15] 宁慧英. 高压开关柜三维电场的计算与分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2007.
- NING Huiying. Calculation and analysis of 3 - dimension electric field for high voltage switchgear[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2007.
- [16] ZENG Xiaosong. Agile design system development for switch cabinet[C]/IEEE Industrial Electronics and Applications. Harbin:IEEE, 2007: 1678-1680.
- [17] PIHLER J, TICAR I. Design of systems of covered overhead conductors by means of electric field calculation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 807-814.
- [18] 王佳颖, 方春恩, 戴玉松, 等. 35 kV 触头盒电场计算及优化设计[J]. 高电压技术, 2007, 33(12): 63-65.
- WANG Jiaying, FANG Chun'en, DAI Yusong, et al. Electric field calculation and optimal design of 35 kV spout[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(12):63-65.
- [19] 潘长明, 刘刚, 熊炬, 等. 高压开关柜绝缘事故的分析及防范措施[J]. 高压电器 2011, 47(7): 90-93.
- PAN Changming, LIU Gang, XIONG Ju, et al. High voltage switchgear insulation accident's analysis and countermeasures[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(7):90-93.
- [20] POLYCARPOU A C. Introduction to the finite element method in electromagnetic[M]. San Rafael: Morgan & Claypool Publishers, Intercollege Cyprus, 2006: 3-22.
- [21] 黎斌. SF₆ 高压电器设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- LI Bin. SF₆ high voltage electrical appliance design[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2019.
- 柯艳国(1978—), 男, 高级工程师, 本科, 长年从事变电专业管理工作, 主要研究方向为变电设备运维检修技术、标准规范修制订等(E-mail: 7548004@qq.com)。
- 蔡梦怡(1992—), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要从事高压开关设备专业管理的研究(E-mail: 1992128@sina.com)。

版权声明:

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我编辑部上述声明。

《高压电器》编辑部