

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.07.013

40.5 kV 大电流固封极柱绝缘结构电场分析及优化设计

李俊豪^{1,2}, 吴小钊^{1,2}, 白维正^{1,2}, 李长鹏^{1,2}, 李 猛^{1,2}, 汤清双^{1,2}

(1. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 许昌许继德理施尔电气有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 大电流固封极柱必须大量采用软连接, 容易造成局放超标及沿面放电, 因而对其进行绝缘结构分析及优化设计具有重要意义。文中运用有限元分析方法得出了40.5 kV大电流固封极柱的电场分布云图, 并提取分布较为集中的软连接及固定螺栓周围气体域的电场分布, 指出软连接附近SF₆气体中电场畸变, 造成局放过大及沿面放电。依据复合绝缘电场理论, 提出了在软连接周边固封极柱腔体内浇筑屏蔽网, 并使屏蔽网与软连接等电位的优化方法。通过电场分析, 优化后的软连接固定螺栓附近SF₆气体电场强度由12 kV/mm降低为7.5 kV/mm, 验证了优化设计方法理论上的可行性。局放试验结果表明, 优化后的固封极柱局放量由203.98 pC降低到2.37 pC, 雷电冲击试验峰值耐受电压由优化前的162 kV提升到215 kV, 证明了提出的优化方案具备工程应用可行性, 为大电流固封极柱结构设计及高压电器实际工程中气固复合绝缘电场的优化提供了有关参考。

关键词: 固封极柱; 复合绝缘; 局部放电; 沿面放电; 电场分析; 绝缘试验; 优化设计

Electric Field Analysis and Optimization Design of Insulation Structure for 40.5 kV Large Current Solid-insulation-embedded Pole

LI Junhao^{1,2}, WU Xiaozhao^{1,2}, BAI Weizheng^{1,2}, LI Changpeng^{1,2}, LI Meng^{1,2}, TANG Qingshuang^{1,2}

(1. XJ Group Corporation, Henan Xuchang 461000, China; 2. Xuchang XJ-Driescher Wegberg Electric Co., Ltd., Henan Xuchang 461000, China)

Abstract: Large current solid-insulation-embedded poles must use soft connection. It causes partial discharge and surface discharge. So it is of great significance for the analysis and optimization design of insulation structure. The electric field distribution of 40.5 kV embedded pole is obtained by using the finite element analysis method, and the electric field concentration area's distribution of the gas domain nearby bolts and soft connection is extracted. It is obvious that the electric field distortion of SF₆ near soft connection, resulting in larger partial discharge and surface discharge. According to composite insulation electric field theory, an optimization method is proposed to cast shielding net around the soft connection in solid-insulation-embedded pole, and made shielding net and soft connection equipotential. Through electric analysis, the maximum field strength of the SF₆ gas near bolt decreased from 12 kV/mm to 7.5 kV/mm, which confirmed the theoretical feasibility of the optimization design. Partial discharge tests show that the optimized embedded pole's magnitude of partial discharge decreased from 203.98 pC to 2.37 pC. Peak withstand voltage of lightning impulse test increased from 162 kV to 215 kV, It confirmed the feasibility of the optimization measures in engineering applications, which provided reference for optimization design of large-current solid-insulation-embedded pole and high voltage apparatus composite insulation electric field.

Key words: solid-insulation-embedded pole; composite insulation; partial discharge; surface discharge; electric field analysis; insulation test; optimization design

0 引言

将真空灭弧室通过自动压力凝胶工艺包封在固体绝缘材料环氧树脂中形成固封极柱。固封极柱依其优良的绝缘及机械特性被广泛应用于柜式气体绝缘金属封闭开关(C-GIS)中,其运行的可靠性直接影响开关设备供电的稳定性。据统计,40.5 kV 高压开关运行故障中绝缘故障占30%~40%^[1-4]。随着真空灭弧技术的发展,真空灭弧室发生绝缘故障概率得到了有效控制,绝缘故障更多的集中在极柱对地之间。尤其是在2 500 A及以上的大电流C-GIS中,为了减少固封极柱主回路发热量,必须大量采用软连接,软连接由若干金属薄片压接而成,具有尖锐棱角,且距离腔体很近,存在小气体间隙且不可避免,极易引起局放超标、气体电离和爬电现象^[5-8]。目前国内外对固封极柱的研究主要集中在真空灭弧室电场分布上,鲜有研究采用软连接的固封极柱对地的爬电及局放问题报道。因而,对于采用软连接的固封极柱,极柱对地之间绝缘结构优化设计成为亟待解决的问题。

文中运用电磁场数值分析理论建立固封极柱的静电场分析数学模型,采用有限元软件对固封极柱进行电场仿真分析,得到了固封极柱的电场分布。提取软连接及固定螺栓附近电场分布,依据复合绝缘理论,找出了局放超标及爬电问题的根源。在不改变固封极柱模具的前提下,提出了在固封极柱腔体软连接周围浇筑一圈屏蔽网的优化措施,并使屏蔽网与软连接保持等电位,最后通过电场仿真分析及实际试验验证了优化模型在理论及工程上的实际可行性。

1 固封极柱结构及静电场分析数学模型

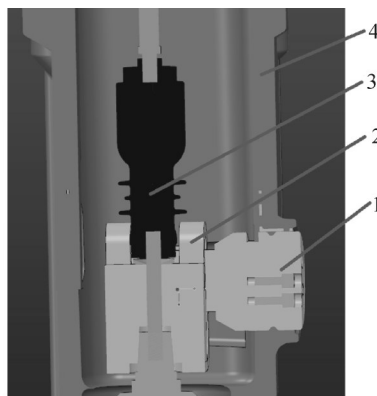
1.1 固封极柱结构

所研究的40.5 kV C-GIS的固封极柱主要包括下出线、软连接、绝缘拉杆、环氧树脂腔体等,由于软连接由若干很薄的金属薄片压接而成,网格划分效率低且质量不高,为了方便建模及提高电场分析网格划分质量,用外形与软连接等效的金属块代替,具体结构示意图1。

1.2 模型分析方法及边界条件

软连接及和软连接相连的出线母线、屏蔽网均由金属导体制成,为等电位,据此可以得到固封极柱的电场偏微分方程及相应的边界条件^[9-11]。

1)计算场域电位函数满足Laplace方程^[8],即



1—下出线; 2—软连接; 3—绝缘拉杆; 4—环氧树脂体。

图1 固封极柱结构图

Fig. 1 Configuration of embedded pole

$$\partial(r\partial\varphi/\partial r)/(r\partial r) + \partial^2\varphi/\partial z^2 = 0 \quad (1)$$

对应的等价变分为

$$\begin{cases} I[\varphi] = \frac{1}{2} \iint \varepsilon [\nabla\varphi]^T [\nabla\varphi] r dr dz = \min \\ \varphi|_{\Gamma_1} = \Phi(r, z) \end{cases} \quad (2)$$

2)在软连接和SF₆气体及SF₆气体和环氧树脂腔体交接面上应满足

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_2 \\ \varepsilon_1 \frac{\partial\varphi_1}{\partial n} = \varepsilon_2 \frac{\partial\varphi_2}{\partial n} \end{cases} \quad (3)$$

3)对于下出母线、软连接及其连接件,满足 $\varphi|_{L=U(l)}$, $U(l)$ 为已知电位。

2 固封极柱的电场仿真分析

2.1 电场分析参数设置

1)根据固封极柱各零部件的实际材料组成,从Ansys材料库中选择,软连接及下出线设定为copper;环氧树脂腔体为epoxy;求解域为SF₆,绝缘拉杆为nylon。

2)设定各材料介电常数,epoxy为4;SF₆为1.002,nylon为3.8^[12-15]。

3)C-GIS箱体完全封闭,外壳接地,因此将外壳设定为0电位,作为分析的边界条件。

4)40.5 kV C-GIS极柱对地工频耐压为95 kV,雷电冲击峰值为185 kV^[16],按照最严酷情况,仿真分析中对下出线和软连接设定185 kV电压。

5)雷电冲击电压下SF₆气体击穿场强按工程经验公式计算出来数据作为判据。经验公式^[17]为: $E_{th} = 75(10p)^{0.75}$ 。其中, p 为气体压力,MPa。可得出0.13 MPa下SF₆临界击穿场强为9.1 kV/mm。

2.2 极柱对地电场仿真分析

利用有限元分析软件Ansys对固封极柱对地进

行静电场仿真,电场分布云图见图2。

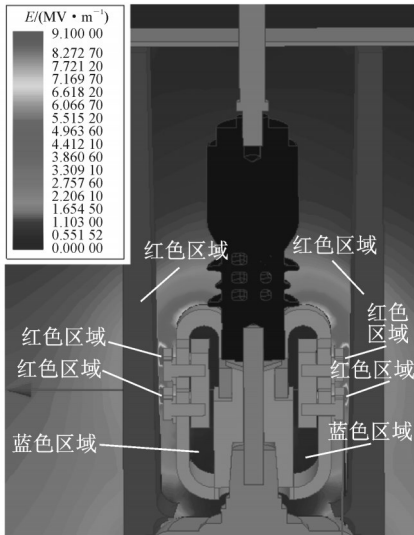


图2 电场强度分布

Fig. 2 Distribution of electric field intensity

由图2电场分布云图可以看出,软连接棱角及固定螺栓附近电场强度最大。40.5 kV C-GIS 多在气箱压力 0.13 MPa 下运行,将 0.13 MPa 下 SF₆ 临界击穿场强 9.1 kV/mm 作为云图分布上限值,红色区域代表场强较大,蓝色区域代表场强较小。

由图2还可以,看出软连接固定螺栓超过 9.1 kV/mm 而出现严重红色区域,为了得出软连接固定螺栓附近具体的电场值大小,判断固封极柱是否满足局放及绝缘要求,需要提取该区域电场分布曲线图。

2.3 极柱对地关键部位电场分布

提取分布云图中螺栓附近电场分布云图,并在螺栓附近做轨迹线,见图3。求得该轨迹线上电场值曲线图,见图4。从图4可以看出,软连接附近电场最大值达到 12 kV/mm,远超 SF₆ 气体的击穿场强 9.1 kV/mm,而距离软连接较远地方及环氧树脂腔体内电场很小,SF₆ 和环氧腔体分界面电场分布变化十分明显。该固封极柱在实际工频实验中未能通过试验,发生爬电,且局放超标。分析其原因主要有:①固封极柱为了提升导电能力,大量采用软连接,造成距离环氧腔体距离太近,存在小气体间隙;②软连接及固定螺栓棱角尖端处电场极易发生畸变,其附近电场超过 SF₆ 临界击穿场强 9.1 kV/mm,造成附近 SF₆ 气体电离,产生电晕,进而引发固封极柱沿着腔体爬电,严重影响绝缘性能。因而控制该部分区域电场强度成为解决绝缘问题的关键。

3 固封极柱优化设计

3.1 模型优化

根据复合绝缘理论,不同绝缘介质中,按照电



图3 Maxwell 3D 示意图

Fig. 3 Maxwell 3D design

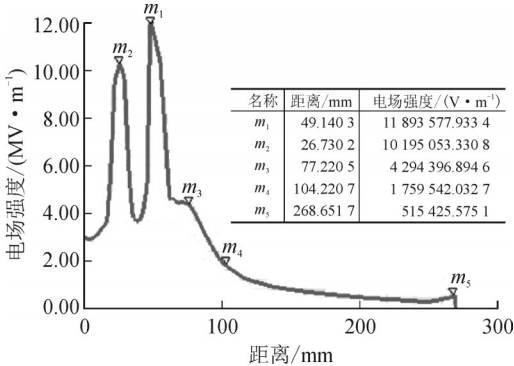


图4 软连接附近电场分布图

Fig. 4 Distribution of electric field near the soft connection

场强度沿介质分界面的折射规律,介电常数小的绝缘介质电场容易畸变,承受较高的场强^[18-19],环氧树脂的介电常数是 SF₆ 的 3~4 倍,且环氧树脂的临界击穿场强远大于 SF₆ 气体。因此可以利用环氧树脂的优异绝缘性能,在软连接周围的现有固封极柱中紧贴下出线浇筑一圈屏蔽网,由于屏蔽网和软连接等电位,消除了软连接和固封极柱腔体之间小气体间隙的场强,该处场强变得极小,用绝缘性能优异的环氧树脂承受了高场强,采用该方法,在不更改固封极柱模具情况下,大大降低软连接周围气体场强,避免发生局部放电及爬电事故,优化后的三维模型见图5。

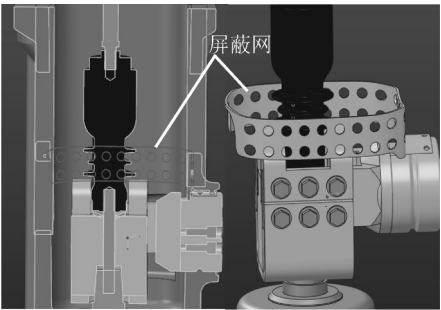


图5 优化后的固封极柱模型图

Fig. 5 Model of the optimized embedded pole

为了验证优化措施所添加的屏蔽层的可行性,对添加屏蔽层后的模型重新进行电场仿真分析,材料属性及电压激励大小参照文 2.1 节。

3.2 极柱对地电场仿真分析

添加屏蔽网优化后的固封极柱模型电场分布云图见图6。

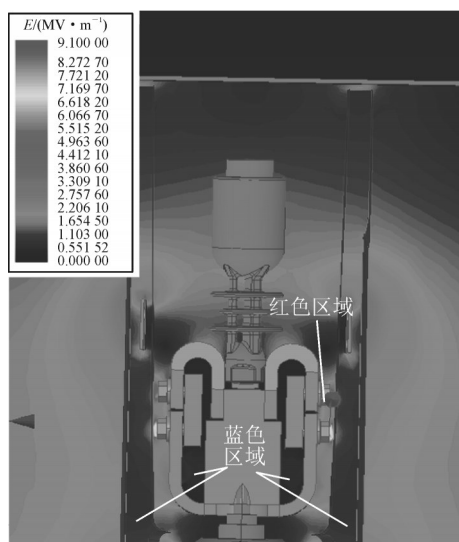


图6 优化后电场强度分布

Fig. 6 Distribution of electric field intensity after optimization

从图6可以看出,软件界周围红色褪去,电场明显变小,整个腔体内部呈现大片蓝色,这是由于屏蔽罩通过和固封极柱下出线相连接,和软连接为等电位,消除了二者之间SF₆气体的电场强度。让绝缘性能优良的环氧树脂去承担高场强这是比较安全且合理的。为了对比分析,需要提取软连接及固定螺栓周围SF₆气体电场具体值,以确定优化方案的效果及可行性。

3.3 优化前后关键部位电场分布

所提出的浇筑屏蔽网优化方案目的是为了解决软连接及固定螺栓附近SF₆气体的电离引起的局放及爬电问题。优化后的模型是否能满足此要求,需要深入研究分析关键部位电场分布,在软连接及固定螺栓做轨迹线见图7。求该轨迹线上电场分布曲线图,见图8。由图8可知,软连接固定螺栓附近气体最大场强值仅7.5 kV/mm,小于0.13 MPa下SF₆气体击穿场强9.1 kV/mm,优化前该部位最大场强达12 kV/mm,通过添加屏蔽网,局部场强下降了4.5 kV/mm,降低了37.5%。优化后模型最大场强比该压力下SF₆气体击穿场强小1.6 kV/mm,裕量充足。



图7 Maxwell 3D示意图

Fig. 7 Maxwell 3D design

4 试验验证

4.1 局部放电试验

为了验证优化方案工程上的可行性,对优化前后的模型分别进行了局部放电对比试验,对比试验

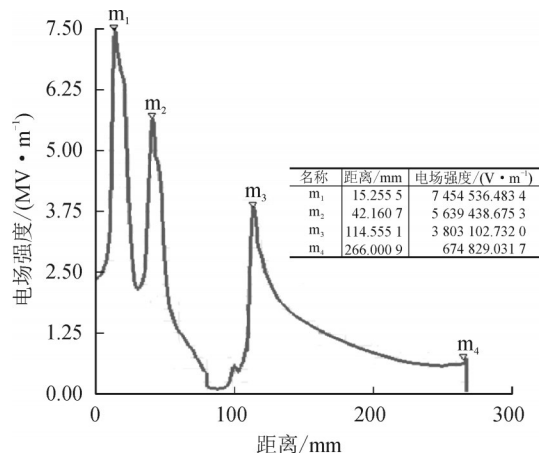


图8 优化后软连接附近电场分布图

Fig. 8 Distribution of electric field near the soft connection after optimization

是在空气中进行,空气绝缘性能不如SF₆,空气中局放若合格,SF₆中一定合格且局放更小。为了提高对比性,严格控制试验环境一致:电压上升速度保持一致,试验室温度、湿度、气压、电压波形、频率、峰值尽量一致^[20]。根据国标要求,1.1倍额定电压下,局放不应超过5 pC^[21],该试验严格按照国标要求进行,电压加到45 kV,优化前局放图谱见图9,优化后局放图谱见图10。优化前局放量203.98 pC,优化后局部放电量仅为2.37 pC,达到了国标要求,证实了优化方法的可行性。

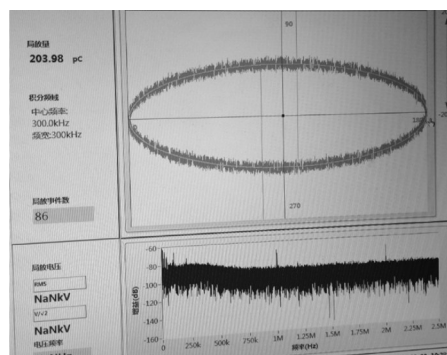


图9 优化前局部放电图

Fig. 9 Partial discharge diagram before optimization

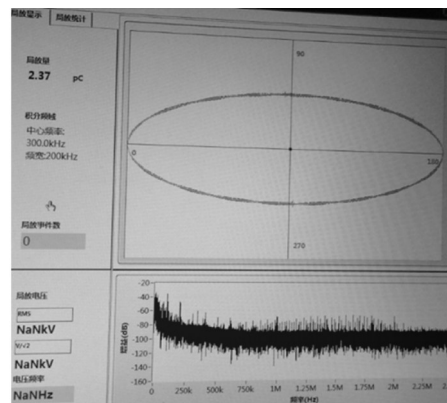


图10 优化后局部放电图

Fig. 10 Partial discharge diagram after optimization

4.2 雷电冲击试验

将固封极柱安装到C-GIS开关柜中,内充0.13 MPa SF₆气体,进行雷电冲击试验,优化前固封极柱试验时出现SF₆电离,进而引起沿着固封极柱腔体爬电现象,绝缘试验失败。具体实验结果见图11,优化前正极性雷电冲击最大值达到162 kV/mm,负极性雷电冲击最大值为160 kV/mm;达不到国标要求的185 kV,添加屏蔽网后,固封极正极性雷电耐受峰值达到215 kV,负极性雷电冲击耐受峰值达到213 kV,远超国标规定的185 kV,设计余量充足,满足40.5 kV C-GIS绝缘要求。

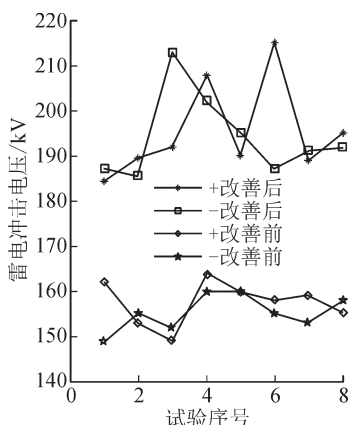


图11 雷电冲击试验数据折线图

Fig. 11 Line chart of lightning impulse test data

5 结论

通过电场分析软件Ansys对采用软连接的40.5 kV固封极柱进行极柱对地电场分析及优化设计,结合实际局放及雷电冲击试验,得出如下结论:

1)固封极柱软连接及固定螺栓距离环氧腔体太近,存在小气体间隙,该区域为复合绝缘,软连接及固定螺栓附近介电常数较小的SF₆电场畸变,出现电离,这是引起局放及沿面放电事故的根源。

2)为降低该处电场强度,提出在软连接附近的固封极柱中浇筑屏蔽网的优化措施,屏蔽网紧贴固封极柱的下出线,和屏蔽网等电位,消除了软连接和固封极柱腔体之间小气体间隙的场强。通过对比优化前后该区域的场强分布,证实了该优化方案理论上的可行性。

3)局放试验及雷电冲击试验结果表明优化方案的有效性及应用于实际工程的可行性,为大电流采用软连接的固封极柱绝缘结构设计提供了设计参考。

4)文中所提出的固体绝缘件内浇筑屏蔽网优化方法,对所有气固复合绝缘中不可避免的存在小气体间隙的结构具有通用性,为高压电器实际工程中

气固复合绝缘电场的优化提供了有关参考。

参考文献:

- [1] 袁大陆. 全国电力系统高压开关设备10年运行状况述评[J]. 电力设备, 2005, 1(1): 29-34.
YUAN Dalu. Commentary on the state of HV switchgear in the national electricity system for ten years[J]. Electrical Equipment, 2005, 1(1): 29-34.
- [2] 勾国营, 杨娇龙, 骆常璐, 等. 基于Ansys有限元的接地回路电力分析与优化[J]. 高压电器, 2017, 53(8): 106-108.
GOU Guoying, YANG Jiaolong, LUO Changlu, et al. Analysis and optimization of electrodynamic force of grounding loop based on ansys finite element method[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(8): 106-108.
- [3] 杜彦明, 顾霓虹. 国内配电开关设备现状及事故情况[J]. 电网技术, 2002, 26(2): 70-76.
DU Yanming, GU Nihong. Present situation and accidents analysis of distribution switchgear in domestic power systems[J]. Power System Technology, 2002, 26(2): 70-76.
- [4] 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.
- [5] VOETEN S J, BECKERS F, VAN HEESCH E, et al. Optical characterization of surface dielectric barrier discharge[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(11): 2142-2143.
- [6] 李清泉, 许光可, 房新振, 等. 沿面型介质阻挡放电的数值仿真计算[J]. 高电压技术, 2012, 38(7): 1548-1555.
LI Qingquan, XU Guangke, FANG Xinzhen, et al. Numerical simulation of surface dielectric barrier discharge[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(7): 1548-1555.
- [7] 周泽存, 沈其工, 方瑜, 等. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版, 2007: 62-92.
ZHOU Zecun, SHEN Qigong, FANG Yu, et al. High voltage engineering[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007: 62-92.
- [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] 潘俊, 方志. 多脉冲均匀介质阻挡放电特性的仿真及实验研究[J]. 高电压技术, 2012, 38(5): 1132-1140.
PAN Jun, FANG Zhi. Simulation and experimental research on characteristics of multi-pulse uniform dielectric barrier discharge[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38

- (5):1132-1140.
- [10] AN J T, SHANG K F, LU N, et al. Oxidation of mercury by active species generated from a surface dielectric discharge plasma reactor[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2014, 34(1):217-228.
- [11] 王巧红,王占杰,孙玉洲,等. 基于Ansys的1 120 kV直流隔离开关的电场仿真[J]. 高压电器, 2017, 53(6):37-39.
WANG Qiaohong, WANG Zhanjie, SUN Yuzhou, et al. Electric field simulation of the 1 120 kV DC disconnecter based on Ansys[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(6): 37-39.
- [12] IEEE Substations Committee Working Group K4. Partial discharge testing of gas insulated substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(2):499-506.
- [13] 包 博,谢天喜. 750 kV 高压电抗器笼式出线结构均压特性研究[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 232-236.
BAO Bo, XIE Tianxi. Voltage sharing characteristics of cage outgoing line structure for HV reactors in 750 kV power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 232-236.
- [14] 洪国耀,赵羲英,陈 冰. 小型化 SF₆ 气体绝缘金属封闭开关设备的研究开发[J]. 高压电器, 2012, 48(10):78-82.
HONG Guoyao, ZHAO Xiying, CHEN Bing. Research and development of the optimized & miniaturization GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10):78-82.
- [15] BIGANZOLI I, BARNI R, RICCARDI C, et al. Optical and electrical characterization of a surface dielectric barrier discharge plasma actuator[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2013, 22 (2):1-9.
- [16] 张强华,谭 燕,邬建刚. 40.5 kV 无 SF₆ C—GIS 开关柜研究[J]. 高压电器, 2011, 47(6): 29-38.
ZHANG Qianghua, TAN Yan, WU Jiangang. Research of 40.5 kV non SF₆ C—Gis[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(6):29-38.
- [17] 潘 浩,殷庆铎,高文胜. 固体绝缘中气隙尺寸对局部放电过程的影响[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 458-461.
PAN Hao, YIN Qingduo, GAO Wensheng. Influence of void dimensions on partial discharge in solid insulation[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3) : 458-461.
- [18] 林 莘,刘志刚. ICCG 算法在 SF₆ 罐式高压断路器三维电场有限元计算中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2):21-24.
LIN Xin, LIU Zhigang. The application of ICCG algorithm in the three dimensional electric field calculation of SF₆ tank-type circuitbreaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (2):21-24.
- [19] 张文凯,吴小钊,郑亚利,等. 基于静电场分析的固封极柱局部放电研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3858-3865.
ZHANG Wenkai, WU Xiaozhao, ZHENG Yali, et al. Research on embedded pole partial discharge based on electrostatic field analysis[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11):3858-3865.
- [20] 杨敬华,范承勇. 40.5 kV 真空断路器绝缘结构电场分析及优化设计[J]. 电网技术, 2011, 35(12):146-152.
YANG Jinghua, FAN Chengyong. Electric field analysis and optimization design of insulation structure of 40.5 kV vacuum circuit-breaker[J]. Power System Technology, 2011, 35(12):146-152.
- [21] 高压开关设备和控制设备标准的公用技术要求: GB11022—1999[S].1999.
Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards:GB 11022—1999[S].1999.
- 李俊豪(1987—),男,硕士,工程师,主要从事高压电器及电磁场数值仿真分析技术研究。
吴小钊(1979—),男,硕士,工程师,长期从事于中压开关设计开发工作。

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