

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.09.009

某 12 kV 真空断路器耐压故障分析及电场优化

韩筛根¹, 王涛², 魏东新³

(1. 配电变压器节能技术北京市重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京 100192; 2. 国网山东省电力公司潍坊供电公司, 山东 潍坊 261021; 3. 北京慧智神光科技有限公司, 北京 100142)

摘要: 针对某用于高海拔的 12 kV 真空断路器发生的工频耐压试验击穿故障, 采用 SolidWorks 三维建模软件建立仿真模型, 通过 Ansys Workbench 对其进行静电场仿真, 得到了断路器的等电位线分布图及电场分布云图。通过分析等电位线分布图及电场分布云图, 找到了电场集中的位置并发现该产品发生工频耐压试验击穿故障的原因: 是由于该产品绝缘拉杆与极柱伞裙设计不合理, 导致高、低压电位分布发生畸变引起。在保障设备满足安全运行和经济性最优的前提下, 提出了通过优化绝缘拉杆伞裙和极柱伞裙布置的方法增大空气净距离的优化方案, 并对优化后的模型进行仿真验证, 优化后的空气域场强最大值从优化前的 3.31×10^6 mV/mm 降低到优化后的 2.82×10^6 mV/mm, 降幅达到 14.8%; 再按照 GB/T 20635—2006《特殊环境条件高原用高压电器的技术要求》要求对优化后的设备进行绝缘耐压验证试验, 优化后的产品工频耐压水平提高到 51 kV, 完全满足海拔 2 000 m 的运行要求, 充分证明这种优化方案能有效解决该高原型 12 kV 真空断路器工频耐压试验时高压嵌件周围空气域易于被击穿的问题, 并且这种优化方案对原产品模具的结构改动最小、改造工作量最少, 改造成本最低, 对同类应用于高原地区的中压开关设备的绝缘设计具有重要参考价值。

关键词: 耐压故障; 真空断路器; Ansys; 电场优化; 绝缘拉杆

Analysis of 12 kV Vacuum Circuit Breaker About the Voltage Fault and Optimum Design

HAN Shaigen¹, WANG Tao², WEI Dongxin³

(1. Beijing Key Laboratory of Distribution Transformer Energy-saving Technology (China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China; 2. Weifang Electric Power Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Shandong Weifang 261021, China; 3. Wisest Power, Beijing 100142, China)

Abstract: In the power frequency withstand voltage test of a 12 kV vacuum circuit breaker for plateau, the airspace of coupling bolt is susceptible to breakdown. In this study, a simulation model was established by the 3-dimensional modeling software SolidWorks, and the electrostatic field was simulated by Ansys Workbench to obtain the distribution diagram of the equipotential lines of the circuit breaker and the distribution of the electric field. The concentration location of the electric field and the reason why the breakdown occurred in the voltage withstand test of the product were found by analyzing the distribution diagram of the equipotential lines and the distribution of the electric field—the unreasonable designs of the insulation rod and the pole umbrella skirts resulted in distribution distortion of high and low potentials. A method for optimizing the insulation rod and the umbrella skirts was proposed to increase the air clearance on the premise of guaranteeing safe operation of the equipment and minimum cost. Finite element simulation of the optimized model was conducted with the software ansys, and the result indicates that the maximum field strength in the air domain decreases by 14.8%, from 3.31×10^6 mV/mm to 2.82×10^6 mV/mm. According to the national standard GB/T 20635—2006 special environment condition—technical requirements of high-voltage apparatuses for plateau, insulation withstand voltage test of the optimized equipment was conducted, and the result show

收稿日期: 2018-03-20; 修回日期: 2018-05-24

基金项目: 国网公司总部科技项目资助项目。

Project Supported by Science and Technology Project Headquarters of China National Network Co., Ltd.

that the power frequency withstand voltage level gets up to 51 kV, completely meeting the operation requirements for the altitude of 2 000 m. It is proved that the proposed optimization solution can effectively solve the above breakdown problem of the 12 kV vacuum circuit breaker. And this solution needs minimal change of the original structure, least reconstruction, and lowest cost. This study may offer a reference for optimization design of insulation structure of medium voltage switchgear for plateau.

Key words: voltage fault; vacuum circuit breaker; Ansys; electric field optimization; insulating rod

0 引言

真空断路器具有寿命长、无环境污染等诸多优点,广泛应用于 10 kV 电力系统中。第三代真空断路器采用 APG 工艺加工极柱,实现极柱免维护^[1]。通常海拔每升高 1 km,平均气压降低 7.7~10.5 kPa,电气设备外绝缘强度降低 8%~13%,绝缘设计直接影响高原电气设备运行的可靠性^[2]。目前,国内外在平原产品基础上,采用复合绝缘或加大产品尺寸的方法来满足不同海拔电气设备绝缘问题,ABB 高原型 VD₄就采用增加环氧绝缘套筒高度和绝缘拉杆加装热缩套方案来提高耐压水平的。但极柱修模或另外加装零件,设备造价将大幅提高。因此,断路器的绝缘结构优化设计十分重要。

仿真软件提高了电气产品优化设计的研发效率^[3-4],大量文献利用仿真计算从穿墙套管^[5]、固封极柱^[6-9]及触头盒^[10]场强方面分析开关柜局放和耐压水平,且一般采用加装屏蔽环或添加绝缘介质的方式来优化场强,但鲜有运用等电位线分布云图分析绝缘薄弱点和优化绝缘件结构的报道。

首先建立了某 12 kV 真空断路器模型,利用 Ansys Workbench 软件,通过电场分布云图和等电位线分布图分析,找出了工频耐压绝缘试验中引起击穿的薄弱点,在保障产品绝缘可靠性和尽量不修改模具的前提下,提出采用优化绝缘拉杆和固封极柱伞裙布局的方法来增加空气净距,提高其绝缘水平。然后运用静电场仿真来验证优化方案理论的可行性,并通过对比试验确定了最终技术方案。

1 绝缘击穿分析

某应用于海拔 2 000 m 的高原型 12 kV 真空断路器在运行现场进行工频耐压试验时发生击穿,将产品返回公司进行试验验证和问题分析试验过程如下:首先清洁真空断路器零部件表面,然后装配真空断路器,最后依据 GB/T 20635—2006 规定进行 12 kV 真空断路器绝缘试验。

对海拔 $H=2\ 000\text{ m}$ 的设备进行修正计算,修正

计算方法为

$$\begin{cases} U = K_a U_0 \\ K_a = e^{\frac{m(H-1000)}{8150}} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: U 为修正后电压; U_0 为工频电压; K_a 为高压设备外绝缘海拔修正因数; m 为指数。

该 12 kV 真空断路器断口的工频耐受电压为 42 kV,即 $U_0=42\text{ kV}$ 。对于断口工频耐受电压,式(1)中的指数 $m=1$,从而可以得到式(1)中的 $K_a=1.13$,修正后的工频耐受电压为 $U=47.48\text{ kV}$ 。但在低海拔对 A、B、C 三相进行 48 kV 断口绝缘耐压试验时,产品发生电击穿,击穿部位位于极柱底部嵌件附近,见图 1。

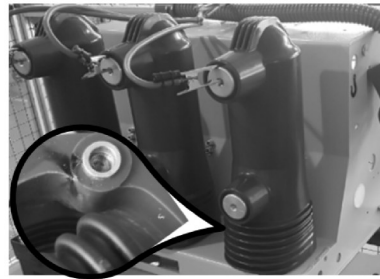


图 1 击穿位置

Fig. 1 Breakdown position

现场检查试验后的产品,三相固封极柱固定嵌件周围极柱表面都被烧黑,A相嵌件周围环氧树脂出现 2 mm 左右的击穿痕迹。初步判断分析原因如下:①嵌件附近场强分布集中,螺栓与嵌件或嵌件与极板小缝隙之间的空气局部放电发展为击穿;②嵌件与高电位之间的距离设计不合理引起击穿。

为解决这一问题,首先利用组合绝缘的理论,现场采用绝缘拉杆底部伞裙加热缩套的方法进行解决,绝缘耐压试验失败,热缩套安装位置见图 2。因此,需要进一步仔细分析导致产品击穿的真正原因,再提出解决方案^[11-13]。

2 模型建立与电场分析

2.1 模型建立

该 12 kV 真空断路器采用固封极柱结构,包括



图2 绝缘拉杆伞裙热缩套安装位置

Fig. 2 The location of heat shrinkable in insulated rods
极柱、上出线端、硅橡胶缓冲层、真空灭弧室、下出线端、弹簧杯、绝缘拉杆和下安装板等,其简化后的仿真模型结构见图3^[14-16]。

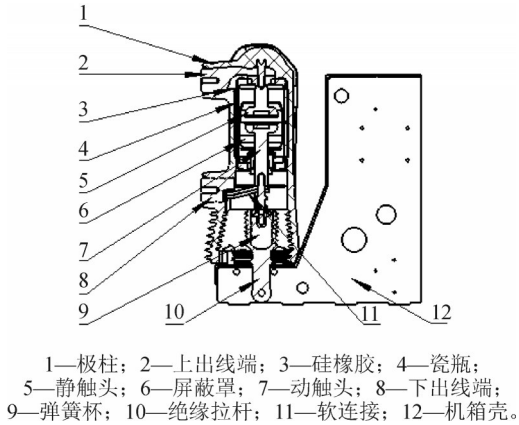


图3 12 kV真空断路器结构简图

Fig. 3 Structural diagram of 12 kV vacuum circuit breaker

2.2 电场分析

12 kV 真空断路器绝缘材料主要包括环氧树脂、硅橡胶、尼龙、陶瓷、空气和真空。在相邻介质分界面上,静电场边界值条件^[15-8]为

$$\begin{cases} \Delta^2 \varphi = 0, \Omega_1 \cup \Omega_2 \\ \varepsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \varepsilon_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} \\ \varphi_1 = \varphi_2 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: Δ 为拉普拉斯算子; φ 为电位; Ω_1, Ω_2 为介质区域; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 为介质的介电常数; n 为介质分界面外向的法向量。

其中边界值有两种情况:①给定边界上的值 f_1, f_2 为仿真模型的高电压或0;②相邻介质边界上法向导数的值 $f_2(p) = \partial \varphi / \partial n$ (是边界上的点)。则式(2)的等价条件为

$$F(\varphi) = \sum \left[\frac{1}{2} \int_{\Omega} (\varepsilon |\nabla \varphi - 2\rho \varphi|^2) d\Omega + \frac{1}{2} \int_{\Gamma} \varepsilon f_1(p) \varphi^2 d\Gamma + \frac{1}{2} \int_{\Gamma} \varepsilon f_2(p) \varphi d\Gamma \right] \quad (3)$$

式(3)中: $F(\varphi)$ 为 φ 的函数; Ω 为介质区域; Γ 为 Ω 的闭合边界; p 为边界上的点; ρ 为自由电荷密度。

$$F'(\varphi) = 0 \quad (4)$$

由式(2)-(4)可得

$$K\varphi = 0 \quad (5)$$

式(5)中: K 为刚度矩阵; φ 为电位列向量。再利用加强的边界条件,就可求出 φ ,即每个节点的电位。

将12 kV 断路器三维仿真模型(分闸位置)导入 Ansys Workbench 有限元软件计算,下出线端和动触头设定峰值电压为 $48 \times 1.414 \text{ kV} = 67.872 \text{ kV} = 6.7872 \times 10^7 \text{ mV}$,嵌件、金属板和静触头设定电压为0 mV,得到12 kV 真空断路器静电场仿真结果,场强分布及等电位分布云图见图4、5。

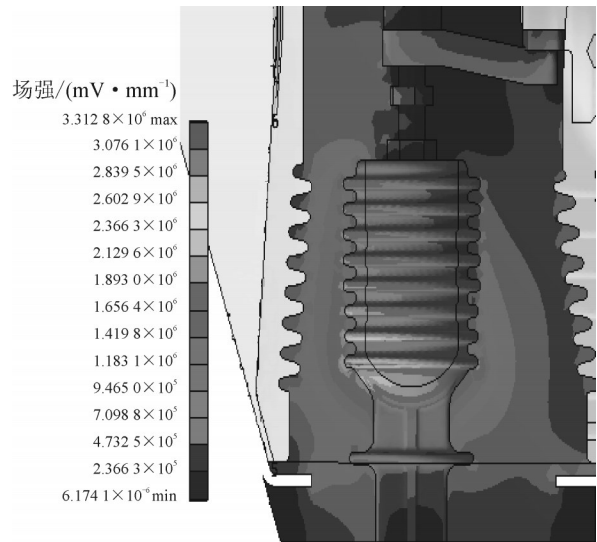


图4 场强分布

Fig. 4 Diagram of electric field

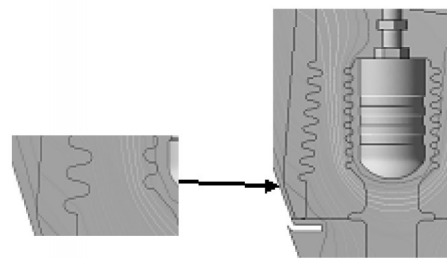


图5 等电位分布

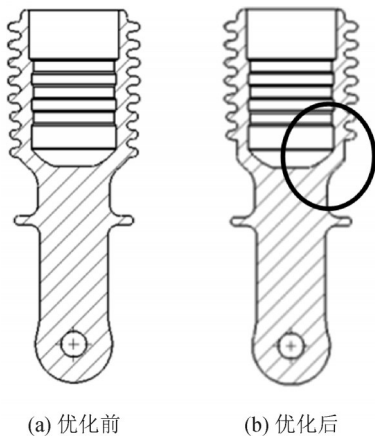
Fig. 5 Diagram of equipotential distribution

通过图4场强分布云图分析可知,电场集中的主要位置是绝缘拉杆伞裙周围,最大场强为 $3.31 \times 10^6 \text{ mV/mm}$,超出了空气介质在标准大气压下的耐受电场强度 $3 \times 10^6 \text{ mV/mm}$,超出幅值达10.3%。

通过图5等电位分布图,可以明显观察到等势线在绝缘拉杆与极柱的伞裙处有凸起,尤其最后一个伞裙处。绝缘拉杆与极柱的最后一个伞裙分别将等势线拉高,缩短了弹簧杯(高电位)与嵌件(地电位)之间空气距离,从而发生击穿。由此可见,绝缘件(极柱和绝缘拉杆)伞裙设计不合理,弹簧杯底端对地空气净距不足是引起击穿的根本原因。

3 结构优化

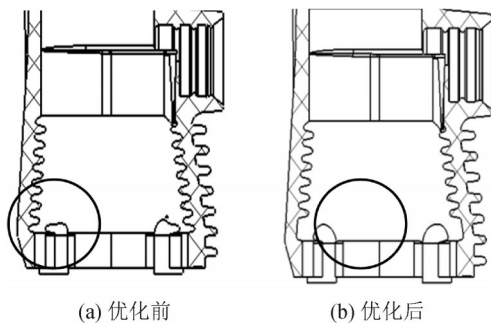
为改善该 12 kV 真空断路器场强分布, 提高产品绝缘耐压水平, 根据之前的电场分布云图和等电位线分布图, 提出通过优化伞裙的结构方法来增加空气净距, 降低绝缘拉杆最底端伞裙附近空气域场强, 满足绝缘拉杆的电气特性和机械特性。因为固封极柱的模具费很高, 为尽可能减少模具加工损失, 选择采用删除绝缘拉杆和极柱的最后一个伞裙的方法来改善绝缘拉杆附近的等电位线的分布, 从而改善绝缘拉杆和极柱伞裙附近空气域场强, 优化前后的示意图见图 6、7^[17-18]。



(a) 优化前 (b) 优化后

图 6 绝缘拉杆

Fig. 6 Diagram of insulated rods



(a) 优化前 (b) 优化后

图 7 极柱

Fig. 7 Diagram of solid seal pole

3.1 单独优化绝缘拉杆伞裙

由图 5 可以发现, 电位线在绝缘拉杆最后一个伞裙处有明显突出。如删除绝缘拉杆模型最底端一个伞裙, 通过仿真分析, 场强最大值降到 2.91×10^6 mV/mm, 仿真结果见图 8。

3.2 单独优化极柱伞裙

由图 5 还可以发现, 电位线在极柱最后一个伞裙处有明显突出。如果压缩极柱模型最底端伞裙, 通过仿真分析, 场强最大值降低到 3.07×10^6 mV/mm

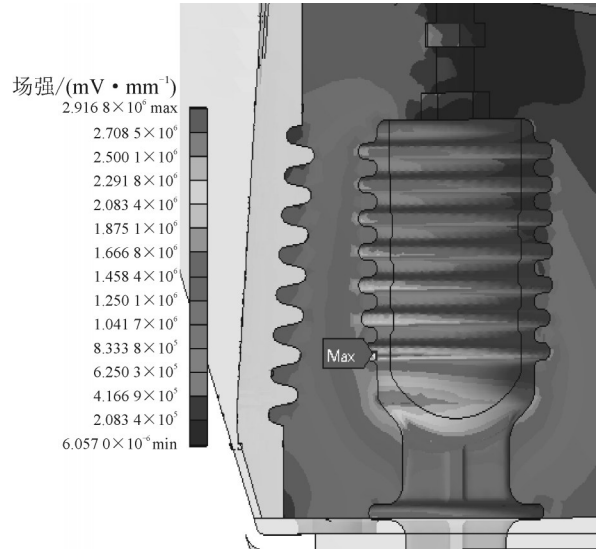


图 8 优化绝缘拉杆伞裙

Fig. 8 Optimization of umbrella skirt of insulated rods

仿真结果见图 9。

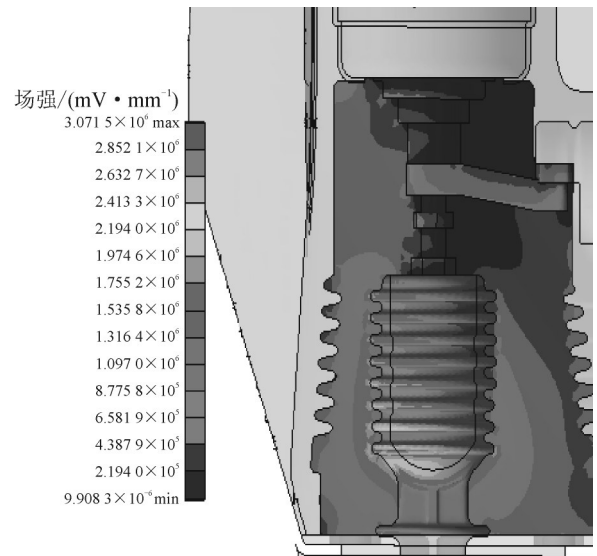


图 9 优化极柱伞裙

Fig. 9 Optimization of umbrella skirt of solid seal pole

3.3 同时优化绝缘拉杆和极柱伞裙

同时修改优化绝缘拉杆和极柱模型, 分别从最底端删除一个伞裙, 再进行仿真分析, 场强最大值则降低到 2.82×10^6 mV/mm, 仿真结果见图 10。

从图 8-10 可以看出, 绝缘拉杆伞裙周围空气域场强分布得到明显改善, 场强最大值下降, 优化伞裙前后最大场强值见表 1。

从表 1 可以看出, 单独删除绝缘拉杆最底端伞裙的方案, 能够有效的提高产品耐压水平, 且无需改动固封极柱模具, 成本最低, 最大场强下降到 2.91×10^6 mV/mm, 能有效提高断路器在高原型恶劣环境下的运行可靠性。

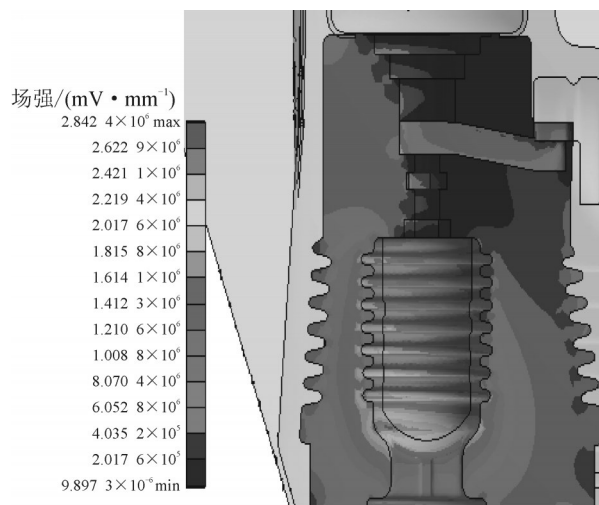


图10 优化绝缘拉杆和极柱伞裙

Fig. 10 Optimization of umbrella skirt of insulated rods and solid seal pole

表1 优化伞裙前后电场计算分析比较表

Table 1 Comparison chart of electric field before and after optimization

项目名称	最大场强/ ($mV \cdot mm^{-1}$)	下降百 分比/%
优化前模型	3.31×10^6	—
仅优化绝缘拉杆伞裙	2.91×10^6	12.0
仅优化极柱伞裙	3.07×10^6	7.2
同时优化绝缘拉杆和极柱伞裙	2.82×10^6	14.8

4 试验验证及结果评估

依据以上的仿真分析结果,修改模型后,进行绝缘拉杆和极柱样品制作,装配4组样机,依据GB/T 20635—2006规定进行12 kV真空断路器绝缘试验测试。绝缘试验的内容为1 min工频耐压试验^[19-20]。试验结果见图11。

4组对比试验,结果如下:

1)优化前模型结构,试验电压48.24 kV,持续50 s后,击穿;

2)单独优化绝缘拉杆后,试验电压50.3 kV持续60 s通过试验;试验电压升高到51.23 kV持续60 s通过试验,连续进行3次均通过,但局放声音很大。试验电压升高到52.2 kV时,立即击穿。故单独优化绝缘拉杆可以将耐压临界提高到51 kV;

3)单独优化极柱后,试验电压维持在48.37 kV持续60 s通过试验,试加电压升高到50.28 kV时,12 s击穿。单独优化极柱,可以通过48 kV耐压,但不能提升耐压临界值;

4)极柱和绝缘拉杆同时优化后,试验电压维持在50.25 kV持续60 s通过试验,试验电压升高到

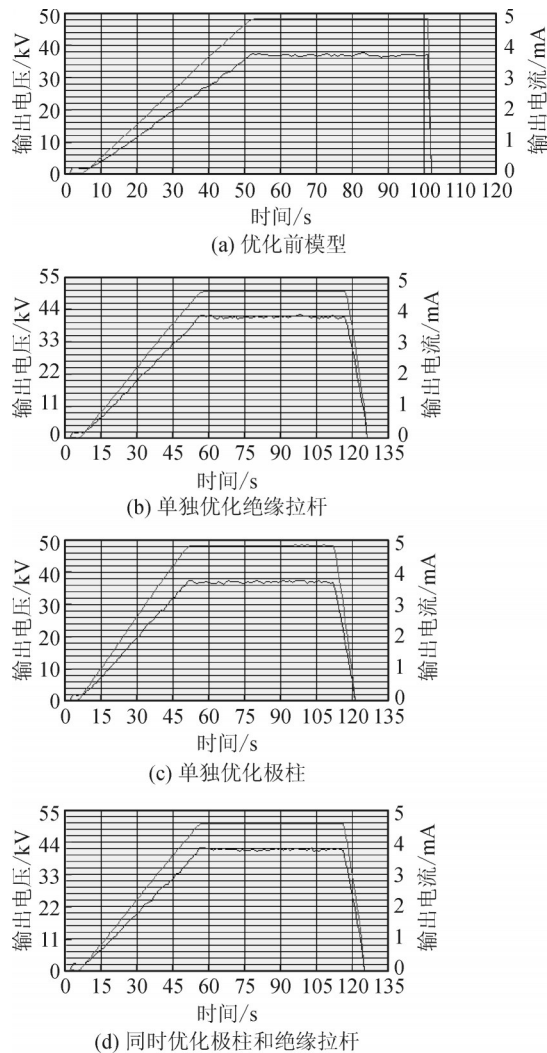


图11 绝缘耐压试验结果

Fig. 11 The results of insulation withstand voltage test

51.29 kV持续60 s通过试验,连续进行3次均通过,试验电压升高到51.96,试验持续1 s击穿。故同时优化极柱和绝缘拉杆,也只能将耐压临界提升至51 kV。

通过4组对比试验结果可以看出,采用单独删除绝缘拉杆底端一个伞裙结构的效果与同时优化极柱和绝缘拉杆的效果相当,但该方案简单有效,无需对固封极柱模具进行大改,仅仅对绝缘拉杆模具稍作修改,模具改造费用最低,并能有效保障产品运行的可靠性,是最佳方案。

5 结论

1)由于绝缘拉杆与极柱的最后一个伞裙间距设计不合理,缩短了极间空气距离,影响了附近的等电位的分布,导致产生局部电场集中,降低了产品的绝缘性能是造成绝缘击穿的主要原因。

2)采用电场分布云图与等电位线分布图结合分析的方法,有利于找出产品中的绝缘薄弱点,加上

仿真计算,可有效解决因绝缘件周边空气域场强过高导致的绝缘击穿问题。

3)为了降低绝缘拉杆和固封极柱固定嵌件附近空气域场强,提出优化绝缘拉杆和固封极柱伞裙的方法。分别比较了单独去除绝缘拉杆底端伞裙、单独去除固封极柱底端伞裙以及同时去除绝缘拉杆和固封极柱底端伞裙3种优化方式的效果,场强相比优化前模型均有所降低,采用单独去除绝缘拉杆底端伞裙方案的效果最佳,绝缘拉杆伞裙周围空气域最大电场值从 3.31×10^6 mV/mm降低到 2.91×10^6 mV/mm,效果最佳。优化电场后,耐压临界值提升至51 kV,相当于高原海拔提升至 $H=2\ 650$ m。

4)改进后的对比试验表明,采取删除绝缘拉杆底端伞裙的方案,不仅绝缘拉杆伞裙周围空气域最大电场值降低最明显,还可以避免极柱再次开模或修模的费用,缩短研发周期,经济成本也最低,是最佳方案,该方案对其他类似的高原型中压开关设备的绝缘优化设计具有重要的参考借鉴作用。

参考文献:

- [1] 徐国政,张节容,钱家骊,等. 高压断路器原理和应用[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
XU Guozheng, ZHANG Jierong, QIAN Jiali, et al. Principles and applications of high voltage circuit breakers[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [2] 纪江辉,张杰,王小丽,等. 40.5 kV 固封极柱的设计及工艺优化[J]. 电工电气, 2016(12):52-55.
JI Jianghui, ZHANG Jie, WANG Xiaoli, et al. Design and process optimization of 40.5 kV solid-insulation-embedded poles[J]. Electrical & Electronics, 2016(12):52-55.
- [3] 张润理,阎涛,李逸飞,等. 固封极柱用环氧树脂固化物开裂问题研究及预防措施[J]. 高压电器, 2014, 55(5): 126-133.
ZHANG Runli, YAN Tao, LI Yifei, et al. Analysis and prevention of cracking of cured epoxy resin for embedded pole[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 55(5): 126-133.
- [4] 王磊,赵现平,董俊,等. 2 000 m海拔35 kV开关柜母排结构安全净距试验研究[J]. 高压电器, 2013, 49(4): 66-70.
WANG Lei, ZHAO Xianping, DONG Jun, et al. Experimental study on net safety distance of 35 kV switchgear bus structure in 2 000 meters altitude[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(4): 66-70.
- [5] 王栋,阮江军,杜志叶,等. 并行求解含有电位悬浮导体的静电场数值问题[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6):131-136.
WANG Dong, RUAN Jiangjun, DU Zhiye, et al. Parallel numerical computing of electrostatic field model of conductors with floating potentials[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 131-136.
- [6] 张施令,彭宗仁,杜进桥,等. RBF神经网络与NSGA-II混合算法用于 $\pm 1\ 100$ kV穿墙套管3维电场模拟及内屏蔽结构优化[J]. 高电压技术, 2014, 40(6):1847-1857.
ZHANG Shiling, PENG Zongren, DU Jinqiao, et al. Three-dimensional electric field simulation and inner shielding structure optimization of $\pm 1\ 100$ kV wall bushing with RBF neural network and NSGA-II algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6): 1847-1857.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] DULLNI E. A vacuum circuit break with permanent magnetic actuator for frequent operation[C]//18th International Symposium on Discharges & Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). Eindhoven, the Netherlands: IEEE, 1998: 688-691.
- [10] 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 contactor box[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(12): 63-65.
- [11] 李秀卫,王庆玉,毛惠卿,等. 一起组合电器内部绝缘故障综合分析[J]. 高压电器, 2012, 48(8):99-102.
LI Xiuwei, WANG Qingyu, MAO Huiqing, et al. Comprehensive analysis of an insulation fault in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(8): 99-102.
- [12] 朱根良. 浅议中压开关柜事故调查中的故障分析[J]. 高压电器, 2002, 38(5):62-63.
ZHU Genliang. Simple explanation of faults analysis in incident investigation of medium voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(5): 62-63.
- [13] QI B, LI C R, HAO Z, et al. Surface discharge initiated by immobilized metallic particles attached to gas insulated substation insulators: process and features[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(3):792-800.
- [14] 何建. 中压开关设备运行中存在的主要问题分析及对策[J]. 高压电器, 2005, 41(5):385-387.
HE Jian. Analysis and treatment for the problems in the operation of medium voltage switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2005, 41(5): 385-387.

- jing:China Machine Press,1990.
- [16] 苑 舜. 高压断路器液压操动机构[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- YUAN Shun. High voltage circuit breaker with hydraulic operating mechanism[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [17] 刘 伟,徐 兵,杨华勇,等. 高压断路器液压操动机构特性分析[J]. 机械工程学报,2010,48(10):148-155.
- LIU Wei, XIU Bing, YANG Huayong, et al. Characteristic analysis of high voltage circuit breaker with hydraulic operating mechanism[M]. Journal of Mechanical Engineering, 2010,48(10):148-155.
- [18] 牛晓靖. 高压断路器液压操动机构关键技术研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2015.
- NIU Xiaojing. Research on key technology of hydraulic actuator of high voltage circuit breaker[D]. Fuxin:Liaoning Technical University, 2015.
- [19] 周仙娥,陈保伦,苟 轲. 高压断路器配液液压操动机构分闸速度特性优化[J]. 电气时代,2015(7):92-97.
- ZHOU Xian'e, CHEN Baolun, GOU Ke. High voltage circuit breaker with hydraulic actuator brake speed characteristic optimization[J]. Electric Age, 2015(7):92-97.
- [20] 陈保伦. HMB—4型液压弹簧机构的特点、操作使用及故障处理[J]. 电气制造,2009(5):66-69.
- CHEN Baolun. HMB—4 type hydraulic spring mechanism characteristics, operation and troubleshooting[J]. Electrical Manufacturing, 2009(5):66-69.
- [21] 王永良,彭新奇,程铁汉,等. 传动机构对高压断路器动作特性的影响分析[J]. 高压电器,2015,51(8):200-204.
- WANG Yongliang, PENG Xinqi, CHENG Tiehan, et al. Influence of transmission mechanism on operation characteristics of high voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8):200-204.

高群伟(1983—),男,工程师,主要研究方向为智能高压开关设备关键技术研究及应用。

(上接第57页)

- eration of medium-voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(5): 385-387.
- [15] 张洪铁,姜冠玉,冯祥伟. 一种固封极柱出线结构的改进[J]. 电工电气,2014(12):51-53.
- ZHANG Hongtie,JIANG Guanyu,FENG Xiangwei. Improvement of a kind of solid-insulation-embedded pole outlet line structure[J]. Electrical & Electronics, 2014(12):51-53.
- [16] 李 丹,葛乐矣,王中宇. 小型中压固体绝缘开关柜关键技术及其发展[J]. 电工电气,2013(12):1-4.
- LI Dan, GE Leyi, WANG Zhongyu. Key technology and its development of miniaturized and medium-voltage solid insulated switchgear[J]. Electrical & Electronics, 2013(12):1-4.
- [17] IEEE substations committee working group K4. Partial discharge testing of gas insulated, substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, (2):499-506.
- [18] 徐建源,路 璐,林 莘. 110 kV GIS 隔离开关的电场数值计算与分析[J]. 高电压技术,2008,34(10):2102-2106.
- XU Jianyuan, LU Lu, LIN Xin. Numerical analysis of electric field of 110 kV disconnecter in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(10): 2102-2106.
- [19] 李建明,朱 康. 高压电气设备试验方法[M]. 北京:中国电力出版社,2001.
- LI Jianming, ZHU Kang. High-voltage electrical equipment test method[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [20] 高压开关设备和控制设备标准的共用技术条件:DL/T 593—2006[S]. 2006.
- High voltage switchgear and control equipment standard common technical conditions:DL/T 593—2006[S]. 2006.
- 韩筛根(1967—),男,硕士,高级工程师,长期从事配电设备研发与质量监督测试工作。