

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2022.01.027

电压互感器手车复合绝缘失效及电场分布的研究

王志川¹, 肖云¹, 丁雪峰², 杨蔚³, 刘玉华³, 姜炯挺⁴

(1. 国网四川省电力公司, 成都 610041; 2. 国网江苏南通供电分公司, 江苏 南通 226006; 3. 国网江苏盐城东台供电公司, 江苏 东台 224200; 4. 国网浙江宁波供电公司, 浙江 宁波 315000)

摘要: 复合绝缘是空气绝缘开关设备小型化设计的一种重要绝缘方式。复合绝缘结构的PT(电压互感器)柜运行情况表明,该类型产品的绝缘故障率较高,特别是在湿度和污秽联合影响下,因绝缘结构设计不当的产品很容易产生局部放电,进而引发相间短路。究其原因,绝缘隔板是相间短路的“桥梁”。文中对一起24 kV PT手车三相短路事故原因进行了详细分析,通过电场仿真结果可以看出:在复合绝缘结构中,高压对绝缘板之间的距离是复合绝缘结构设计的关键。文中的故障分析以及电场分析为新产品开发与故障诊断提供了有益的参考。

关键词: PT手车; 复合绝缘结构; 局部放电; 三相短路; 电场仿真

Study on Composite Insulation Failure and Electric Field Distribution of Potential Transformer Handcart

WANG Zhichuan¹, XIAO Yun¹, DING Xuefeng², YANG Wei³, LIU Yuhua³, JIANG Jiongting⁴

(1. Stated Power Grid Company Sichuan Province Power Company, Chengdu 610041, China; 2. State Grid Nantong Power Supply Company, Jiangsu Nantong 226006, China; 3. State Grid Dongtai Power Supply Company, Jiangsu Dongtai 224200, China; 4. State Grid Ningbo Power Company, Zhejiang Ningbo 315000, China)

Abstract: Composite insulation is an important insulation mode for compact design of air-insulated switchgears. The operation situation of PT(potential transformer) handcart with composite insulation structure shows that the insulation failure rate of this type of product is high. Specially, under the combined influence of both humidity and contamination, the product with improper insulation structure design likely leads to partial discharge, thus causing interphase short circuit. The reason for it is that the insulation barrier is the “bridge” of interphase short circuit. In this paper, the three-phase fault of one 24 kV PT handcart is analyzed in detail. It can be seen throughout electric field simulation result that in the composite insulation structure, the distance from high voltage to the insulation barrier is the key of the design of composite insulation structure. The fault and electrical field analysis in this paper can provide some useful guidance for new product development and fault diagnosis.

Key words: PT handcart; composite insulation; partial discharge; three - phases short circuit; electric field simulation

0 引言

PT手车是变电站内广泛应用的一种电气设备,该设备主要用于测量一次母线的电压。为了保护

PT免受系统过电压以及大电流所产生的危害,因此PT手车上通常还带有避雷器和高压熔断器,从而构成结构相对复杂的手车^[1-5]。近年来现场运行的实际结果表明:PT手车的绝缘故障明显高于其他开关

设备,经常发生单相对地以及相间短路故障。其原因很多:互感器本身的绝缘性能的缺陷^[1-3],互感器本身耐环境性能缺陷,手车绝缘结构设计的缺陷^[4-7],系统过电压原因^[6-12],产品安装工艺缺陷^[10]以及手车柜内发生凝露等因素。

文中针对一起典型复合绝缘结构的24 kV PT手车三相短路故障的原因进行了详细分析。

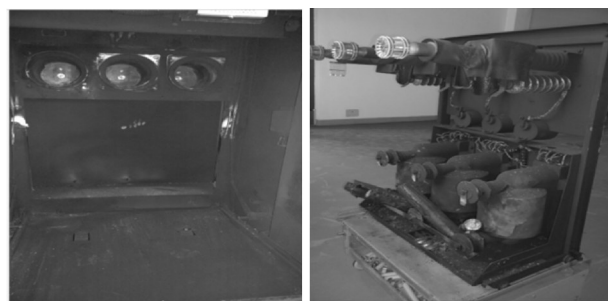
1 故障情况描述

某变电站复合绝缘结构的24 kV PT手车发生了短路事故,导致母线失压。经查询故障后台信息可知,PT手车发生了三相短路事故,故障电流达10 000 A以上,经过现场勘查,故障图片见图1、2。从图1可以看出,故障柜子的对应房顶位置被熏黑。PT柜和PT手车故障图片见图2。从图2(b)可见,PT手车上的高压熔断器被烧熔断后掉落在PT手车上,互感器外部被烧黑,但是互感器本身没有炸裂,环氧树脂内部也没有发生击穿等问题。柜内与PT手车对应的绝缘板被电弧严重烧损成灰,但柜内和PT手车上对应最近金属板都未见电弧击穿点。



图1 被烧开关柜的外部图

Fig. 1 Failure switchgear pictures



(a) 烧毁的PT柜子正视图片 (b) 被烧的PT手车图片

图2 PT柜及PT车被烧图片

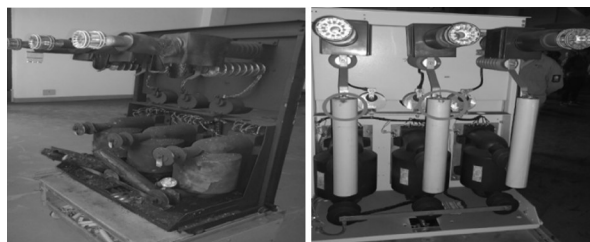
Fig. 2 Pictures of failure PT switchgear and PT handcart

2 复合绝缘结构PT手车事故原因分析

2.1 导致复合绝缘结构的PT手车烧损的可能性原因分析

经过对被烧PT手车和柜子内部仔细勘察和分析可得到如下关键性的信息,被烧毁和同一个站没

有烧毁但设计相同的PT手车与柜子正面图见图3。PT柜结构及其内部电弧通道见图4。



(a) 烧毁的PT手车高压触臂图片 (b) 未烧毁的PT手车熔管支架放电图片



(c) 熔管支架放电局部图 (d) 未烧毁的PT柜内图片

图3 烧毁的PT与未烧毁的PT及柜子图片

Fig. 3 Pictures of failure PT and good PT

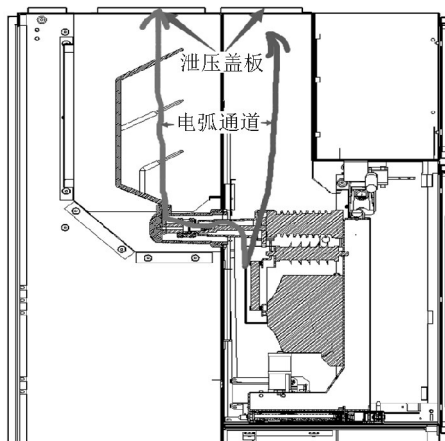


图4 PT手车柜子内部泄压通道示意图

Fig. 4 Inner pressure relief outlet schematic

结合故障图片与柜内结构可做以下可能性原因分析:

1) 母线室发生短路故障产生的电弧窜入手车室导致PT手车短路:假定是母线室发生故障波及到PT手车导致三相短路故障,应该PT手车的高压触臂前端烧毁更为严重,但从图3(a)中的图片信息可知,离母线室更近的梅花触头没有电弧烧损的任何痕迹,其电弧通道见图4,从图4中还可得知,PT手车到其顶部泄压顶盖中没有其他高压元器件,也就是说PT手车室中除PT手车本身以外,没有其他可以导致对地或相间短路电弧产生的地方;

2) PT本身对地发生击穿或者闪络事故导致三相短路:从上述故障情况描述的信息可推断不是PT本身外绝缘放电而引发的三相短路,其原因是PT手

车的金属框架以及对应柜体的金属板上都未发现电弧击穿点或熔化点;

3)PT本身内部缺陷导致的局部放电,或者热老化达到一定程度后引发的内部局部放电,严重的局部放电引起的互感器高低压侧的直接击穿,以及互感器线圈的匝间绝缘导致的长期局部放电,严重情况下导致外绝缘损坏而发生相间短路:从图2(b)故障图片可知,PT本身内部没有击穿点或者炸裂。同时,三相PT也不可能同时发生内部击穿事故;

4)PT手车的绝缘结构存在缺陷,绝缘结构缺陷引发了局部放电,在高温高湿环境下,严重的局部放电转化为对地或者绝缘板产生刷行或者闪络放电,进而演变成三相短路事故。

2.2 复合绝缘结构PT手车烧毁的真正原因分析与论证

从PT手车上所安装的部件故障情况看,PT手车上的绝缘子和避雷器都是良好的,其高压引线头没有被烧掉。因此,可以推测本次事故原因与绝缘子和避雷器无关。

在综合上述关键信息的基础上对本变电站另一台设计相同但未发生事故的PT手车与PT柜子进行停电勘察,从图3(b)、(c)、(d)图片中可以得到如下几点关键信息:

- 1) 熔管的绝缘支架上端部对SMC绝缘存在局部放电现象;
- 2) 与熔管上端部放电位置对应的柜子上的SMC绝缘板也存在被局部放电烧毁的点;
- 3) A、B、C,三相熔管上端部以及柜内对应的绝缘板上放电严重程度不一。

从未烧毁的PT手车和柜子上述3点关键信息可推出:

- 1)PT手车上的熔管绝缘支架上端部与PT柜对应位置的绝缘板本身存在小间隙放电现象(间隙过小);
- 2)PT手车上三相熔管支架不处在同一平面上(三相放电严重程度不一可以证明这一点);
- 3)在过电压情况下或者高温高湿季节局部放电严重的情况下,三相熔管的高压端部同时对PT柜内绝缘板同时放电,绝缘板就成为了相间短路的“桥梁”。

综上所述,PT手车以及柜子的复合绝缘结构设计缺陷是本次复合绝缘失效事故的真正原因:在高温高湿的环境下,空气压力相对降低,空气在同样的电场强度下更容易发生放电现象。同时,由于产品装配工艺的差异,导致了三相高压熔断器端对SMC板的距离不同,从而放电严重程度也不一样。

在实际运行中,SMC绝缘板表面积灰、凝露,三相同同时对绝缘板放电相对严重时,局部放电转化为对绝缘板发生刷行放电进而演变成相间短路^[13-19]。

为了全面分析该类型复合绝缘结构产品的电场分布特点,建立了相对应电场仿真的简化案例,见2.3节。

2.3 复合绝缘结构PT手车的电场分布研究

2.3.1 复合绝缘结构与产品装配关系

PT手车的结构原理见图5,该手车上集合了避雷器、高压熔断器、电压互感器等主要核心元件。由于电压互感器的高度尺寸较大,因此,互感器高压端子加装高压熔断器后与柜体的金属隔板之间的距离太小,为了满足绝缘性能的要求,在高压熔丝与金属隔板之间加装了一块SMC绝缘板,其隔板位置示意图见图5,其实物如图3(d)所示。

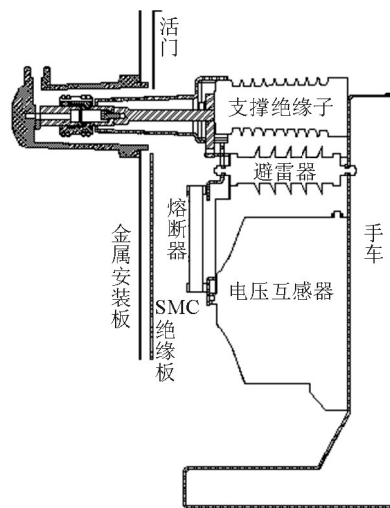


图5 故障PT手车的结构原理示意图

Fig. 5 Structure schematic of failure PT handcart

2.3.2 简化的仿真案例

根据实际产品的装配结构以及事故特征,简化的仿真案例见图6。从事故分析和设计改善两个方面建立了不同的案例,其案例的主要关键参数和区别是:

- 1)按照产品结构与装配关系建立的理想案例:垂直和水平方向分别对应图6(a)和图6(e),在仿真案例中分别用PT1和PT11表示;
- 2)按照产品实际装配关系建立的近似实际案例:三相高压熔断器端部离SMC绝缘隔板的距离不一致。对应图6(b)和图6(f),在仿真案例中分别用PT2和PT22表示;
- 3)从设计改善角度,高压熔断器端部与SMC绝缘板之间的距离增大了10 mm,其垂直与水平方向的仿真案例对应图6(c)和图6(g),在仿真案例中分别用PT3和PT33表示;

4)从设计改善角度,高压熔断器与SMC绝缘板之间的距离不变,SMC绝缘板与金属隔板之间的距离增大10 mm,其垂直与水平方向的仿真案例对应图6(d)和图6(h),在仿真案例中分别用PT4和PT44表示。

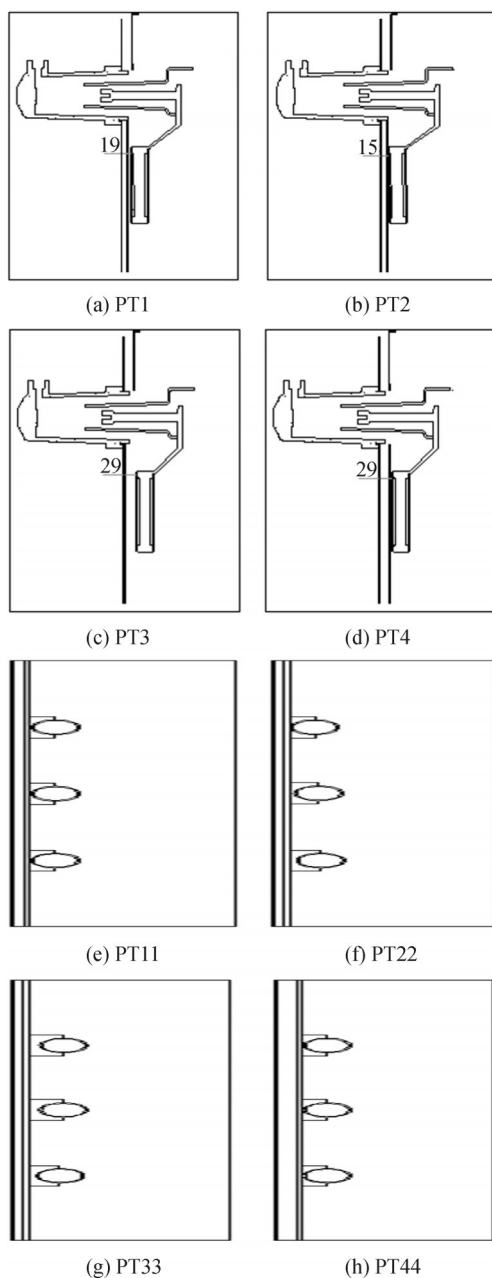


图6 简化的仿真案例

Fig. 6 Simplified simulation model

2.3.3 PT手车复合绝缘结构的电场分析结果

为了确保各种不同案例仿真结果具有可比性,仿真案例和案例剖分采用相同的条件:

- 1)只体现产品本身结构关系的设计和装配差异,但所有案例的整体求解区域大小保持一致;
- 2)所有案例剖分时采用相同的单元边长度,确保剖分的基本一致性。

垂直方向的仿真案例电场仿真结果见图7-10。

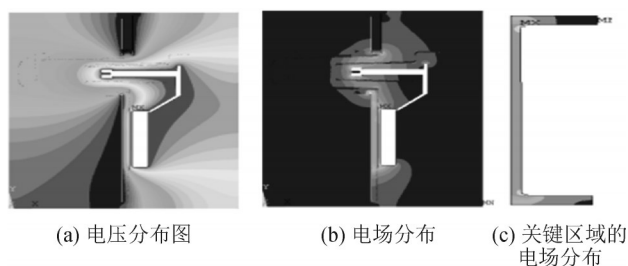


图7 垂直方向案例PT1案例的电场仿真结果

Fig. 7 Electric field simulation results of PT1 case on vertical direction model

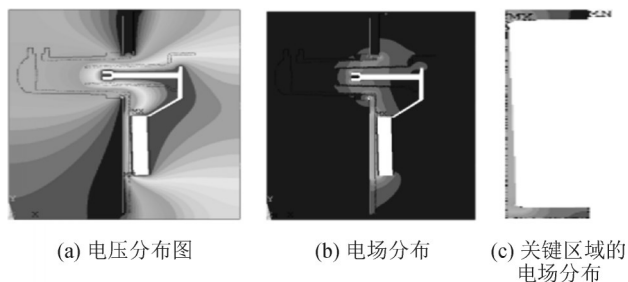


图8 垂直方向案例PT2案例的电场仿真结果

Fig. 8 Electric field simulation results of PT2 case on vertical direction model

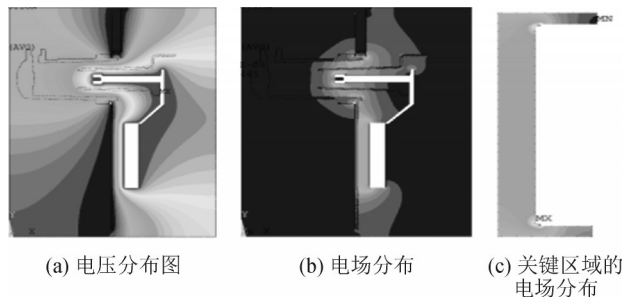


图9 垂直方向案例PT3案例的电场仿真结果

Fig. 9 Electric field simulation results of PT3 case on vertical direction model

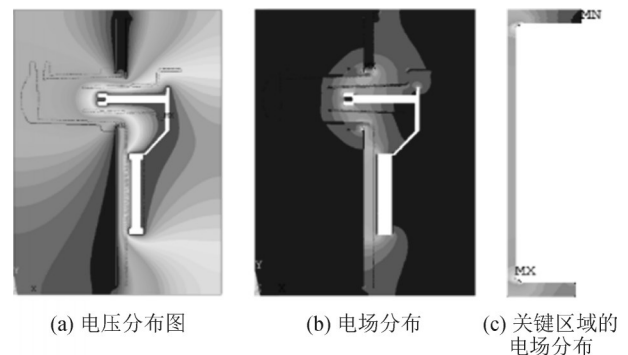


图10 垂直方向案例PT4案例的电场仿真结果

Fig. 10 Electric field simulation results of PT4 case on vertical direction model

对应PT1,PT2,PT3及PT4的水平方向案例电场仿真结果见图11-14。

3 结果分析与产品复合绝缘结构设计改善

3.1 电场仿真结果及分析

从第2.3.3节中的仿真结果中概括出不同仿真

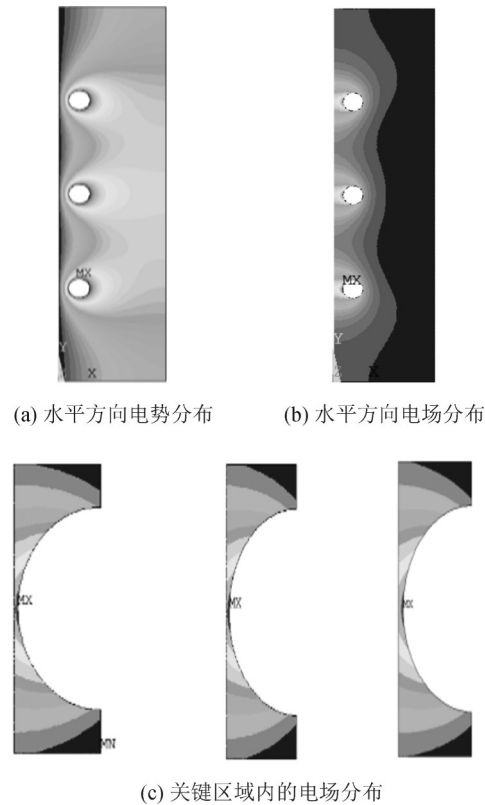


图 11 水平方向案例 PT11 案例电场仿真结果
Fig. 11 Electric field simulation results of PT11 case on horizontal direction model

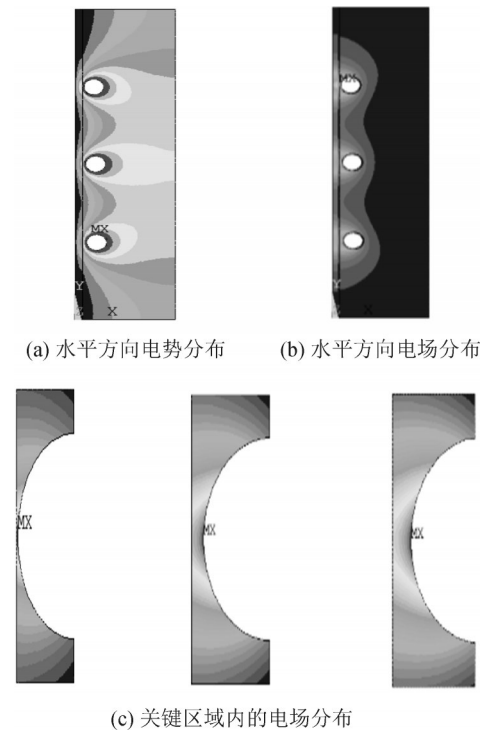


图 12 水平方向案例 PT22 案例电场仿真结果
Fig. 12 Electric field simulation results of PT22 case on horizontal direction model

案例中的整个求解区域内以及关键区域中最大电场值见表 1。从表 1 中的数据可以看出,无论是垂直方向案例还是水平方面案例得出的电场仿真结果,

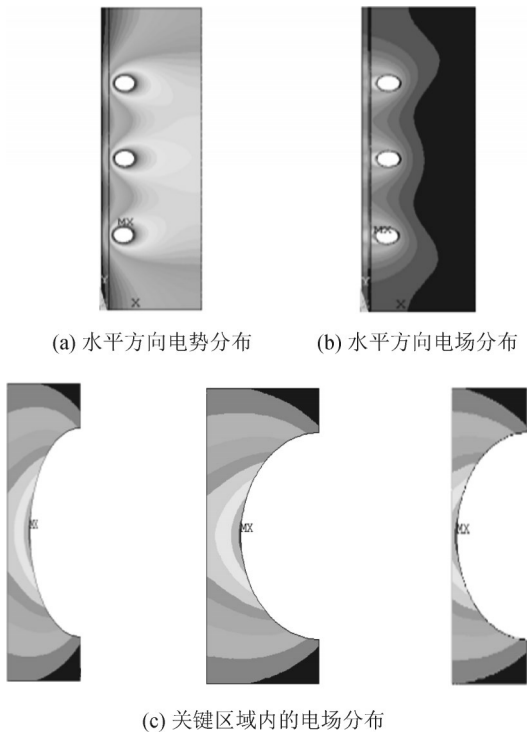


图 13 水平方向案例 PT33 案例电场仿真结果
Fig. 13 Electric field simulation results of PT33 case on horizontal direction model

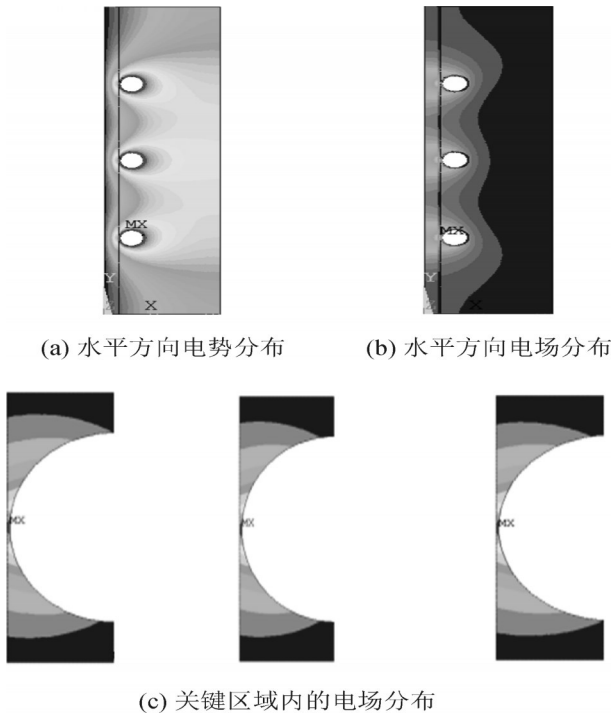


图 14 水平方向案例 PT44 案例电场仿真结果
Fig. 14 Electric field simulation results of PT44 case on horizontal direction model

由于其对绝缘板之间的电气间隙较小,高压熔断器端部周围空气中(关键区域)的电场值都是最大的。PT22 案例的仿真结果可以看出,三相高压熔断器端部离 SMC 隔板之间的电气间隙不同时,其关键部位的最大电场强度明显不一样,其值分别为 2.65、1.72、

表1 不同案例的电场仿真结果
Table 1 Simulation results of electric field on different model

案例	整个求解区域内的 电场最大值/ (kV·mm ⁻¹)	关键区域内的电场最大值/(kV·mm ⁻¹)		
		A相	B相	C相
PT1	2.22	2.22	—	—
PT2	3.25	3.25	—	—
PT3	2.02	1.59	—	—
PT4	2.02	1.67	—	—
PT11	1.41	1.24	1.24	1.32
PT22	2.65	2.65	1.72	1.49
PT33	1.40	1.21	1.22	1.21
PT44	1.76	1.73	1.76	1.76

1.49 kV/mm。该仿真结果与该站另一台未发生绝缘故障的PT手车以及对应柜子上SMC板上放电严重程度相一致。反应了产品装配差异对产品电场分布的影响(产品装配原因导致的同一产品三相高压端部对SMC绝缘之间的距离不一样),更为重要的是影响了实际产品的运行可靠性。

表1中的电场仿真结果与变电站中未发生故障的PT手车上放电位置与严重程度具有良好的一致性:电场值大的相放电严重,电场值小的相放电轻微。因此,PT手车柜中复合绝缘结构设计与产品安装工艺对产品绝缘性能具有关键性的影响。

通过图9的PT3、图10的PT4以及对应的图13的PT33和图14的PT44电场仿真结果可以发现:通过加大高压对地的距离时,电场强度最大值都有效地降低,垂直方向的最大值由2.22 kV/mm分别降低到1.59 kV/mm和1.67 kV/mm。同时,在对地距离相同的情况下,高压对绝缘板之间的距离大小是决定关键区域内电场最大值的决定性因素,从PT33和PT44案例电场仿真结果可以看出,离绝缘板距离越近,即气隙距离越小,电场值越大^[20-22]。

3.2 复合绝缘结构设计改善

通过上述事故原因分析以及电场仿真结果可以得到如下产品结构改善建议:

1)尽量加大高压熔断器与柜体金属隔板之间的电气间隙,可以有效降低高压熔断器端部周围空气中的电场强度,从而有效降低局部放电几率;

2)在高压熔断器到柜体金属隔板之间的电气距离一定时,高压熔断器端部到中间SMC绝缘隔板之间的电气间隙成为影响绝缘性能的决定性因素,尽量使高压导体与SMC绝缘板保持合理的电气间隙;

3)从事故图片与仿真结果都可以看出,当高压

与柜体金属隔板之间的SMC绝缘隔板为整体一块的情况下,高压熔断器端部与SMC绝缘隔板之间的电气间隙更要妥当设计,尽量加大高压熔断器与SMC绝缘隔板之间的空气间隙,防止在潮湿、污秽环境下,高压熔断器端部对绝缘板放电,严重时导致相间闪络而短路事故。

4 结论

通过对复合绝缘结构的PT手车绝缘失效原因和该类型绝缘结构电场分布特征进行详细分析,得出了该类型产品复合绝缘结构设计的共性特点和结论:

1)采用绝缘板来增强三相对地绝缘能力时,绝缘板与三相高压导体之间的空气距离是设计的关键,设计过小时,高压导体周围的空气容易产生局部放电,特别是在环境湿度和污秽影响下,局部放电加剧,引起绝缘板表面老化、碳化,严重情况下,碳化后的绝缘板表面成为相间短路的“桥梁”。

2)从电场仿真结果可以看出:整个求解区域内的电场最大值受高压对地距离大小影响,增大对地电气间隙可以有效降低最大电场强度;进而降低局部放电几率。

3)高压导体周围关键区域内空气中电场强度最大值主要受高压导体到绝缘板之间电气间隙大小的影响较大。在对地距离相同的情况下,该空气距离越大,其关键区域内电场值可以显著降低,可以有效防止局部放电的发生,提高产品运行可靠性。

文中的分析和仿真对产品事故分析、以及复合绝缘结构的新品开发具有理论和实际指导意义。

参考文献:

- [1] 谭东现,王志川,毛文奇.不同标准体系下空气绝缘金属封闭开关设备环境适应性的要求与绝缘性能评估[J].高压电器,2020,56(10):1-7.
TAN Dongxian, WANG Zhichuan, MAO Wenqi. Environmental adaptability requirements and insulation performance evaluation of air-insulated metal enclosed switchgear in different standard systems[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10): 1-7.
- [2] 谭东现,黄晨奔,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.
- [3] 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 Yiling, LIN Jun, et al. Investigation on insulation characteristics of 12 kV composite insulated switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(4): 28-33.

- [4] 刘玉春,郎福成,谭东现,等. 40.5 kV 套管事故分析及结构优化[J]. 电瓷避雷器,2015(12):39-42.
LIU Yuchun, LANG Fucheng, TAN Dongxian, et al. Fault-analysis and structure optimization of 40.5 kV wall bushing [J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(12):39-42.
- [5] 李红梅,薄博,史振朋,等. 环氧树脂交联固化条件对耐电蚀痕影响的影响[J]. 高压电器,2020,56(10):29-33.
LI Hongmei, BO Bo, SHI Zhenpeng, et al. Study on the influence of cross-linking and curing conditions of epoxy resin on tracking and erosion[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10):29-33.
- [6] 牛勃,吴旭涛,张国勇,等. 一起系统间歇性接地导致电磁式电压互感器的分析及改进措施[J]. 高压电器, 2020, 56(10):70-74.
NIU Bo, WU Xutao, ZHANG Guoyong, et al. Analysis and improvement measures of inductive voltage transformer fault caused by intermittent grounding[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10):70-74.
- [7] 由志勋,刘楠. 水电站内部铁磁谐振及抑制措施仿真研究[J]. 高压电器,2019, 55(1):128-134.
YOU Zhixun, LIU Nan. Simulation study on ferroresonance and its suppression measures in hydropower station [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1):128-134..
- [8] 申文伟,何峰,鲍新. 中性点非有效接地系统电压互感器故障分析与治理措施研究[J]. 高压电器,2018, 54(7):200-205.
SHEN Wenwei, HE Feng, BAO Xin. Study of potential transformer fault and mitigation measures in power system with non-direct grounding neutral point[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(7):200-205.
- [9] 杨成,苏凤,张晗飞,等. 基于耐电痕分析的防污闪涂料耐候性研究[J]. 高压电器,2020, 56(11):16-20.
YANG Cheng, SU Feng, ZHANG Hanfei. Study on weather resistance of the anti-pollution flashover coatings based on analysis of the electrical tracking and erosion test [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11):16-20.
- [10] 刘方文,吴启富. 10 kV 手车式开关柜事故分析及改造方案探讨[J]. 高压电器,1994,30(3):37-40.
LIU Fangwen, WU Qifu. Failure analysis and rebuilding solution discuss on 10 kV handcart-type switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 1994, 30(10):37-40.
- [11] 尧广,曾明贵,李盛涛,等. 35 kV 电磁式电压互感器连续爆炸事故探讨[J]. 高压电器,2012,48(10):114-119.
YAO Guang, ZENG Minggui, LI Shengtao, et al. Analysis of successive explosions of a 35 kV electromagnetic potential transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10):114-119.
- [12] 林莉,王军兵,唐凤英,等. 10 kV 电压互感器损坏的仿真计算研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(9):52-56.
LIN Li, WANG Junbing, TANG Fengying, et al. Simulation and computational analysis on potential transformer damage in 10 kV system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9):52-56.
- [13] 林君. JDZX10-10型电压互感器烧毁事故分析[J]. 电气制造,2012(1):64-66.
LIN JUN. Failure analysis on JDZX10-10 potential transformer[J]. Electrical Equipments Manufacturing, 2012(1):64-66.
- [14] 穆应东. 不接地电力系统中电磁式电压互感器的故障探讨[J]. 电力设备,2007,8(10):48-49.
MU Yingdong. Discussion on fault of electromagnetic voltage transformer in ungrounded power system[J]. Electrical Equipment, 2007, 8(10):48-49.
- [15] 全先德,卢垠西. 电压互感器二次开口三角短路故障分析[J]. 变压器,2012,49(9):63-67.
QUAN Xiande, LU Yinxi. Analysis of short circuit fault in open-delta of voltage transformer secondary side[J]. Transformer, 2012, 49(9):63-67.
- [16] 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 counter-measures[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(7):90-93.
- [17] 曾权赋. 手车式母线电压互感器柜安全隐患及技术改造方案[J]. 华中电力,2011, 24(4):83-85.
ZENG Quanfu. Busbar voltage transformer cabinet of handcart type security risks[J]. Central China Electric Power, 2011, 24(4):83-85.
- [18] 李强. 中性点不接地系统电磁式电压互感器问题综述[J]. 华东电力,2011,39(9):1549-1553.
LI Qiang. Problem summary of electromagnetic potential transformer in neutral non-grounding system[J]. East China Electric Power, 2011, 39(9):1549-1553.
- [19] 徐近龙,张劲松,王建刚,等. 中性点经相控式消弧线圈接地电压互感器损坏事故分析[J]. 电力与能源,2015, 36(5):676-681.
XU Jinlong, ZHANG Jinsong, WANG Jiangang, et al. Analysis of PT damage accident of neutral point via the phase controlled arc suppression coil grounding system[J]. Power and Energy, 2015, 36(5):676-681.
- [20] SWIFT D A, SPELLMAN C, HADDAD A. Hydrophobicity transfer from silicone rubber to adhering pollutants and its effect on insulator performance[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(4):820-829.
- [21] HERGERT A, KINDERSBERGER J. Transfer of hydrophobicity of polymeric insulating materials for high voltage outdoor application[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(2):1057-1067.
- [22] ANSORGE S, SCHMUCK F, PAPAILIOU K O. Improved-silicone rubbers for the use as housing material in composite insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(1):209-217.

王志川(1983—),男,工学硕士,高级工程师,主要从事高压开关运检管理(E-mail:zhichuan@outlook.com)。

肖云(1985—),男,高级工程师,主要从事高压断路器运检管理。

丁雪峰(1985—),男,高级技师,国网技能专家,主要从事变电检修工作。