

40.5 kV穿墙套管绝缘故障分析

陈 玥^{1,2}, 高圣伟¹

¹天津工业大学电工电能新技术天津市重点实验室, 天津

²国网天津电力检修公司, 天津

Email: 1593097709@qq.com

收稿日期: 2020年12月17日; 录用日期: 2021年3月15日; 发布日期: 2021年3月22日

摘 要

文中对某交流220 kV变电站35 kV开关柜进行多次超声波带电检测, 发现多达19个开关柜有异常放电信号。根据持续复测结果以及个别开关柜解体情况, 认为缺陷其产生原因是由于环氧树脂穿墙套管未使用屏蔽结构而引起的空气绝缘击穿以及其带来的固体绝缘劣化。通过穿墙套管的电场分析, 确定了屏蔽体对电场分布的影响, 并通过设备解体得到验证, 同时给出进一步处理意见, 对穿墙套管的设计及安装具有重要指导意义。

关键词

开关柜, 穿墙套管, 屏蔽, 电场分布, 局部放电

Insulation Fault Analysis of Wall Bushing through 40.5 kV Cabinet

Yue Chen^{1,2}, Shengwei Gao¹

¹Tianjin Key Laboratory of Electrical and Electronic Technology, Tiangong University, Tianjin

²Tianjin Electric Power Maintenance Company, Tianjin

Email: 1593097709@qq.com

Received: Dec. 17th, 2020; accepted: Mar. 15th, 2021; published: Mar. 22nd, 2021

Abstract

In this paper, the fault of the switch cabinet in 220 kV transformer is checked. Partial discharge (PD) signals are found in 19 switch cabinets. According to the test and disintegration results, due to the lack of internal shield in epoxy insulation, a non-uniform electric field appears in the wall bushing, resulting in air-gap discharge or breakdown. If it is operated in such situation for a long period of time, the wall bushing insulation will be aged, eventually leading to insulation breakdown. The obtained analysis results may provide a reference and certain guiding significance for design and installation of the bushing and switch cabinet.

文章引用: 陈玥, 高圣伟. 40.5 kV 穿墙套管绝缘故障分析[J]. 电气工程, 2021, 9(1): 31-37.

DOI: 10.12677/jee.2021.91004

Keywords

Switch Cabinet, Wall Bushing, Shield, Electric Field Distribution, Partial Discharge

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高压开关柜的正常运行对于电力系统至关重要[1] [2] [3], 而穿墙套管又是开关柜中重要的且普遍使用的绝缘结构[4] [5] [6] [7] [8]。因穿墙套管绝缘性能下降而导致的开关柜事故多有发生[9] [10] [11] [12] [13]。

某省 2015 年 40.5 kV 开关柜穿墙套管绝缘击穿故障共 6 例, 其中因空气击穿导致母线热缩绝缘护套损伤的 2 例[14] [15] [16] [17], 套管绝缘击穿导致接地诱发相间短路的 4 例。由于环氧树脂等固体绝缘材料的相对介电常数要大于空气, 场强的分布又与相对介电常数成反比, 所以空气气隙的电场强度要大于固体绝缘内部场强。这样造成了空气气隙容易发生局部放电, 在两种介质交界面处的放电会引起固体绝缘老化, 最终导致套管整体绝缘能力降低[18]。放电继续发展会造成母排对开关柜壳体放电, 严重危害电力系统的稳定运行。本文中的 40.5 kV 穿墙套管就属于这种绝缘结构。

本文中对天津某交流 220 kV 变电站 35 kV 开关柜进行多次超声波带电检测, 发现有异常放电的开关柜多达 19 个。根据持续复测结果以及个别开关柜解体情况, 认为缺陷其产生原因是由于环氧树脂穿墙套管未使用屏蔽结构而引起的空气绝缘击穿以及其带来的固体绝缘劣化。通过穿墙套管的电场分析, 确定屏蔽体对电场分布的影响, 并给出进一步处理意见, 对穿墙套管的设计及安装具有重要指导意义。

2. 穿墙套管故障简述

2.1. 检测对象

2019 年 1 月 11 日对天津某变电站 35 kV 甲、乙开关室进行带电检测, 其中 35 kV-41、35 kV-42 母线位于甲室, 35 kV-43、35 kV-44 母线位于乙室。图 1 为该变电站 35 kV 侧一次系统图。

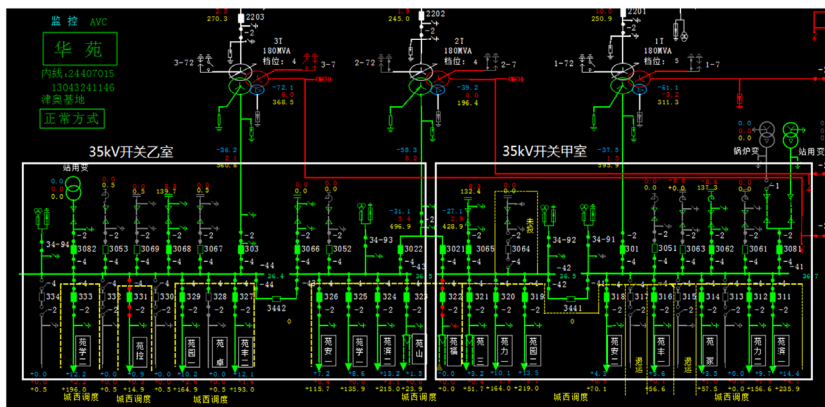


Figure 1. Primary system diagram of 35 kV side of a substation

图 1. 某变电站 35 kV 侧一次系统图

被检测开关柜来自两个不同生产厂家, 主要技术参数如表 1 所示:

Table 1. Parameters of switch cabinet**表 1.** 开关柜参数

开关柜运行编号	型号	生产厂家	生产日期	投运时间
3053/3067/3068/3069/303/327/328/329/331/333	KGN-40.5	山东某电气有限公司	2009-12-01	2010-06-29
其余间隔开关柜	KGND-40.5	沈阳某能源公司	2007-06-01	2007-10-15

2.2. 检测项目

检测项目以及仪器如表 2 所示:

Table 2. Tests and instrument**表 2.** 检测项目及仪器

检测项目	仪器名称	型号
超声波局放检测	EA 超声波局放检测仪	UTP1

2.3. 检测结果

1) 开关室放电

开关柜前中部开关室柜缝处检测到超声信号且有明显放电声的间隔有 8 个(全部为沈阳某能源设备制造有限公司同批次设备), 检测结果见表 3。

Table 3. Test results of bushing discharge in switch room (Background -5 dB)**表 3.** 开关室套管放电检测结果(背景-5 dB)

间隔号	3312	3313	3314	3332	33022	33082	334-94	33442-44
超声波幅值(dB)	44	15	11	20	14	16	15	10

2) 母线室放电

开关柜后上部母线室柜缝处检测到超声信号并有明显放电声的间隔有 2 个(全部为沈阳某能源设备制造有限公司同批次设备), 检测结果见表 4。

Table 4. PD test results of bushing in bus house**表 4.** 母线室套管放电检测结果

间隔号	3082	332
超声波幅值(dB)	20	22

3) 电缆室放电

开关柜后下部电缆室柜缝处检测到超声信号并有明显放电声的间隔有 8 个(328 为山东某电气有限公司设备, 其余为沈阳某能源设备制造有限公司同批次设备), 检测结果见表 5。

Table 5. PD test results of bushing in cable joint house**表 5.** 电缆室套管放电检测结果

间隔号	311	319	320	321	323	325	326	328
超声波幅值(dB)	23	10	10	6	13	15	16	15

4) 母线桥放电

开关柜上方母线桥通风孔处检测到超声信号并有明显放电声的间隔有 3 个, 检测结果见表 6。

Table 6. PD test results of bus bar bridge

表 6. 母线桥放电检测结果

位置	3022 上方-43 母线	332 上方-44 母线	303 上方-44 母线
超声波幅值(dB)	23	20	25

35 kV 开关乙室母线有明显放电声, 超声幅值在母线桥与下方开关柜连接位置通风孔处最大, 怀疑此处测量到的信号是 44 母线相关气室的放电信号。

3. 穿墙套管介质电场的计算

在进行电场的计算过程中, 如果说整个导体等电位时, 那么电极之间的静电场可以用拉普拉斯方程来计算。可将穿墙套管等效成无限大平行板模型及无限长同轴圆柱的模型如图 2 所示, 可用严格解法来计算电场的分布。对于当两极板之间施加大小为 U 的电压时, 其内部的电场强度能够按式 $U = \int E dx$ 来计算。根据公式推导得出, 在多层介质的情况下, 可以得出第 K 层介质中的 E_K ,

$$E_K = U / \left(\frac{\varepsilon_k * d_1}{\varepsilon_1} + \frac{\varepsilon_k * d_2}{\varepsilon_2} + \frac{\varepsilon_k * d_3}{\varepsilon_3} + \dots + \frac{\varepsilon_k * d_n}{\varepsilon_n} \right)$$

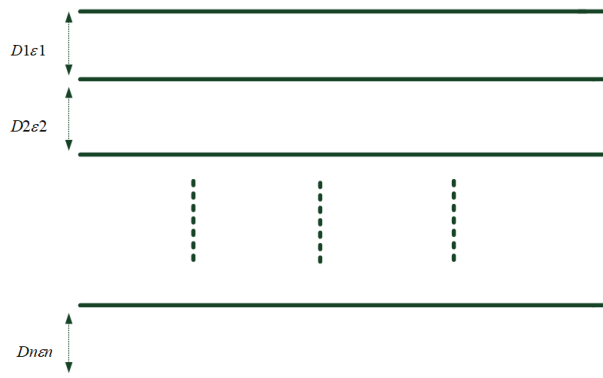


Figure 2. Multi medium parallel plate model

图 2. 多介质平行板模型

4. 套管屏蔽问题

测量到有异常信号的间隔均安装了无屏蔽结构的沈阳某能源穿墙套管, 而采用其他厂家套管的间隔都没有测到放电信号(除了 328 开关柜)。因此, 考虑放电可能与套管绝缘性能有关。

目前, 40.5 kV 环氧树脂穿墙套管主要有两种类型: 一种是双层金属屏蔽层结构, 另一种是不带屏蔽层结构。不带屏蔽层的穿墙套管在 2010 年之前使用较为广泛, 其结构简单、制作快捷, 只通过改变伞裙个数调节电场分布, 但是容易造成套管法兰附近电场分布不均匀, 空气气隙承受了极大场强, 容易造成气隙处放电。

本文中采用该站备用穿墙套管, 套管尺寸为长 450 mm, 直径 260 mm, 主母线规格为 100 mm × 10 mm × 2 为试验对象, 在母排上施加 40.5 kV 电压分别对无屏蔽穿墙套管以及有屏蔽穿墙套管进行电场仿真。

无屏蔽层套管的绝缘结构及电场分布如图 3 所示[19]。图 3(a)中套管主要由母排、热缩套管、限位板、安装板以及环氧树脂构成。

无屏蔽套管电场仿真结果如图 3(b)所示:

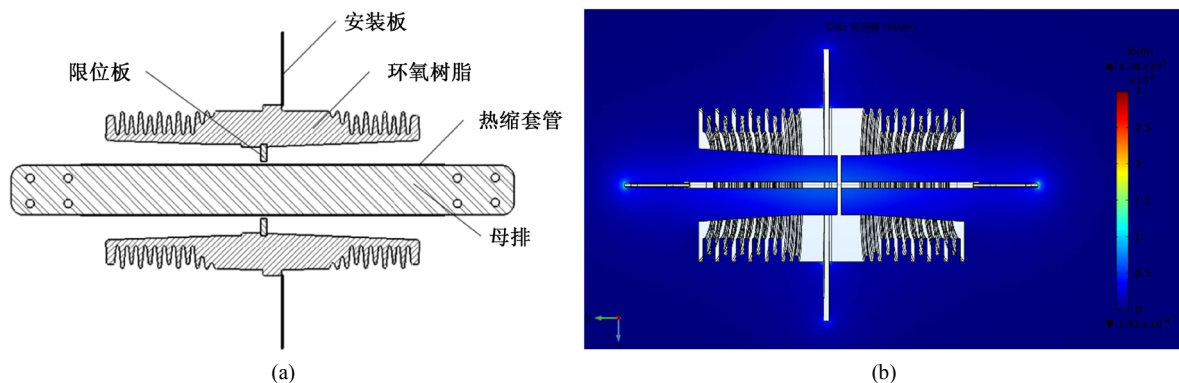


Figure 3. (a) Structural drawing of wall bushing without shield; (b) Electric field distribution of wall bushing
图 3. (a) 不带屏蔽层穿墙套管; (b) 套管空气域电场分布图

图 3(b)显示在母排与法兰接触点附近的空气场强可以达到 4.76 kV/mm, 大于空气击穿场强 3 kV/mm。

带双屏蔽套管的绝缘结构如图 4 所示[14]。图 4(a)中包含高电位屏蔽(内屏蔽)、地电位屏蔽(外屏蔽)、等电位连接线及环氧套管。等电位连接线使得内屏蔽与母排具有相同电位, 外屏蔽通过等电位连接线与安装螺母连接实现地电位。

双屏蔽套管仿真结果如图 4(b)所示, 可以得出最大场强出现在内、外屏蔽层的拐角处, 最大值为 4.46 kV/mm。小于环氧树脂的耐受电场场强(30 kV/mm), 避免了局部放电的[19]。而母排附近气隙的电场场强 2.61 kV/mm 也小于空气耐受击穿场强 3 kV/mm。

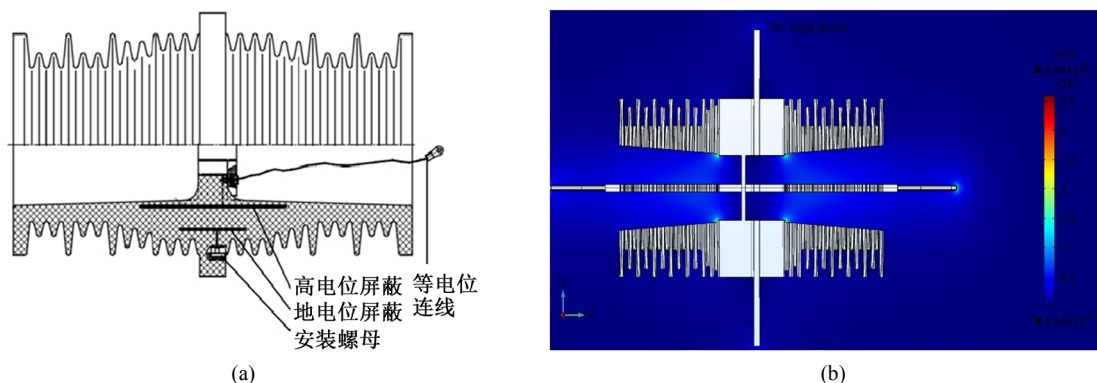


Figure 4. (a) Structural drawing of wall bushing with shield; (b) Electric field distribution in air region of bushing
图 4. (a) 带屏蔽层穿墙套管; (b) 套管空气域电场分布图

通过 COMSOL 软件仿真屏蔽层对套管电场分布的影响, 可以看到双屏蔽层的存在优化了空气-环氧树脂套管绝缘体系内的电场分布[6], 提高了运行可靠性。

套管等电位线安装问题

测试期间发现 328 开关柜也存在放电信号, 此间隔所用套管为山东某电气有限公司制造, 考虑为个别设备偶然性缺陷, 造成原因认为可能有两点: 1) 套管在浇筑时内部存在气隙, 气隙无法承受环氧

树脂内部的高场强导致放电的发生[15] [16] [17]; 2) 等电位线的接触方式与材质问题。屏蔽环与等电位线两种不同材质导体的接触会形成电位差带来电离氧化或者是安装过程中施工人员的操作工艺等均影响到等电位线与屏蔽环接触的可靠程度, 这些都可能引起接触不良。在此情况下, 随着运行时间的增加, 将出现悬浮放电, 具体原因需解体后进一步验证。

5. 穿墙套管检查情况

对发现有超声放电信号的两个开关柜(同为沈阳某能源设备制造有限公司同批次设备)进行停电解体检修。其中一个开关柜开关室 C 相套管解体结果如图 5 所示, 发现套管内部均存在明显放电烧蚀痕迹。

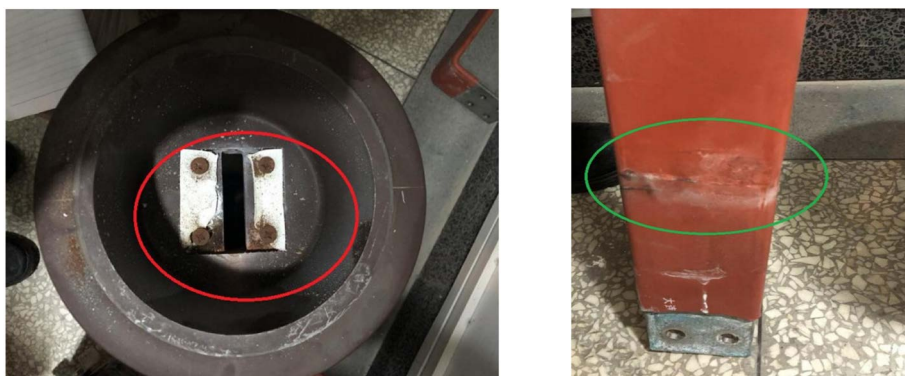


Figure 5. Ablation marks of bushing and wire row in switch room of 325 switch cabinet
图 5. 325 开关柜开关室套管及线排烧蚀痕迹

解体当日, 公司安排检修人员对这两个间隔套管进行了整体更换, 更换为带屏蔽套管, 送电后放电信号消失。

2019 年 1 月 11 日测量到有放电信号的间隔(除了 328)均采用与上述解体间隔同一厂家同批次套管, 内部结构相同, 未采用屏蔽结构。认为引起放电的主要原因是该套管未采用屏蔽结构, 内部电场强度分布不均匀, 存在悬浮电位, 引发绝缘损坏。

综上所述, 结合理论分析和现场验证, 认为此次发现缺陷的产生原因是: 由于环氧树脂穿墙套管未使用屏蔽结构而引起空气绝缘击穿, 气隙放电或击穿引起的绝缘劣化变性造成环氧绝缘损坏。

6. 缺陷处理措施及后续工作建议

- 1) 建议安排该变电站 35 kV 开关柜停电计划, 对全部开关柜排查, 更换为带有屏蔽结构的套管。
- 2) 入场验收阶段, 对于 40.5 kV 高压开关柜绝缘距离的要求应参照 DL/T404-2007 中 5.106 的相关说明, 相间和相对地不小于 30 厘米, 带电体至门不小于 33 厘米。
- 3) 相间加装绝缘隔板应注意的问题。带电体与绝缘隔板之间的空气间隙要超过 6 厘米[20]。绝缘材料建议采用片状模塑料, 避免使用容易吸附水分的绝缘介质, 如酚醛树脂、聚氯乙烯与聚碳酸酯等。在设备运行过程中, 水分会加速热效应对绝缘材料会的劣化作用, 同时容易吸附水分的绝缘介质也容易携带静电荷, 在两相绝缘交界面引起电场畸变, 运行时容易发生局部放电现象。

7. 结论

- 1) 套管 - 空气交界面处放电主要原因是等电位屏蔽悬浮或者缺失, 造成母排窄面周围气隙电场严重畸变, 超过空气耐受场强。

2) 屏蔽结构可以有效优化套管体系内部电场分布, 提高体系绝缘强度。

3) 气隙放电会导致固体绝缘劣化, 但要进一步引起套管整体击穿需要一段时间的发展。可以缩短运维人员检测周期来加强对缺陷发展的监测。

4) 开关柜入场安装前需要从开关柜尺寸、内部相间及对地绝缘距离、绝缘隔板材料、套管绝缘结构等多方面对其进行验收合格后, 方可入场安装。

基金项目

天津市科技计划项目(20YDTPJC01520); 国家自然科学基金(51807139)。

参考文献

- [1] 彭晶, 王科, 谭向宇, 等. 开关柜内环氧树脂浇筑穿墙套管绝缘分析[J]. 云南电力技术, 2015, 43(6): 24-28.
- [2] 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, 33(3): 35-37.
- [3] 彭晶, 赵现平, 王科, 等. 有限元分析 40.5 kV 穿墙瓷套管绝缘故障研究[J]. 云南电力技术, 2014, 42(3): 39-42.
- [4] 郝放, 滕振业. 绝缘套管放电原因分析与对策[J]. 科技世界, 2012, 38(12): 59, 100.
- [5] 孔丽. 穿墙套管放电原因分析及消除措施[J]. 山西电力, 2016, 20(1): 20-22.
- [6] 邓虎, 彭彦卿, 游一民, 等. 穿墙套管的屏蔽仿真及优化设计[J]. 厦门理工学院学报, 2015, 23(5): 41-45.
- [7] 宋杲, 顾霓鸿. 高压开关设备运行及故障分析[J]. 供用电, 2007, 24(1): 6-9, 19.
- [8] 刘玉春, 郎福成, 谭东现, 等. 40.5 kV 穿墙套管事故分析及其结构优化[J]. 电瓷避雷器, 2015, 10(6): 39-42.
- [9] 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, 166.
- [10] 吐松江·卡日, 藺红, 希望·阿布都瓦伊提. 中压开关柜三维电场有限元分析[J]. 计算机仿真, 2015, 32(8): 166-170.
- [11] 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.
- [12] 侯春光, 陈程, 曹云东. 固体绝缘材料局放特性与电场分布关系研究[J]. 智能电网, 2016, 4(8): 754-759.
- [13] 孙强, 黄宗君, 韩绍周, 等. 一起 800 kV 高压套管绝缘故障的原因分析[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(3): 12-15.
- [14] 杨定乾, 陈赞, 丁杨, 等. 典型 40.5 kV 穿柜套管绝缘击穿案例仿真和分析[J]. 高压电器, 2017, 53(12): 221-228, 235.
- [15] 齐玉. 高压复合绝缘穿墙套管和电缆终端电场仿真及优化设计[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2004.
- [16] 王隽. 中压开关柜绝缘方式和绝缘事故分析[J]. 绝缘材料, 2008, 41(3): 15-17, 20.
- [17] 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.
- [18] 王文峰, 张清杰, 蒋立齐. 40.5 kV 开关柜穿墙套管电场分析与优化设计[J]. 华电技术, 2011, 33(2): 20-21, 26.
- [19] 张成凯. 40.5 kV 穿墙套管的绝缘性研究[D]: [硕士学位论文]. 厦门: 厦门理工学院, 2018.
- [20] 庞先海, 冀立鹏, 景皓, 等. 40.5 kV 高压开关柜绝缘故障原因分析及处理[J]. 河北电力技术, 2017, 36(3): 31-33.