

科技论坛

电容式电压互感器内电缆绝缘层击穿分析

陈凌欣

(国网福建省电力有限公司超高压分公司 福建省福州市 350013)

摘要: 电容式电压互感器 (Capacitive Voltage Transformer, 简称 CVT) 是一种电力测量设备, 用于测量高压电网中的电压。它是电力系统中的一种关键设备, 用于监测电压, 保护设备和确保电网的安全运行。其在电力系统中应用较为广泛, 但在实际运行时, 会受到多种因素影响, 导致外绝缘性能下降, 从而导致中间变压器出现放电现象。为了保证电气设备安全, 需要科学开展试验。文章在此结合电缆主绝缘材料老化原理开展试验, 明确电容式电压互感器内电缆绝缘层击穿原因, 并针对性提出应对方案, 旨在为提升电容式电压互感器性能提供更多借鉴。

关键词: 电容式电压互感器; 电缆; 绝缘层; 老化机理; 击穿原因; 改进策略

Abstract: A capacitive voltage transformer (CVT) is a power measurement device used to measure voltage in high-voltage power grids. It is a key equipment in the power system to monitor voltage, protect equipment and ensure the safe operation of the power grid. It is widely used in power systems, but in actual operation, it will be affected by a variety of factors, resulting in a decline in external insulation performance, resulting in discharge of intermediate transformers. In order to ensure the safety of electrical equipment, scientific experiments are required. This paper combines the aging principle of the main insulation material of the cable to clarify the cause of the breakdown of the cable insulation layer in the capacitive voltage transformer, and puts forward a countermeasure to provide more reference for improving the performance of the capacitive voltage transformer.

Key words: capacitive voltage transformer; Cable; insulation; Aging mechanism; Breakdown causes; Improve policies

引言: 电容式电压互感器是电力系统中重要的测量设备。其主要发挥测量线路和母线运行数据的作用, 如测量电压、电能等信息, 是保证电气设备运行安全的保障之一。电缆是中间变压器的重要部件之一, 其发挥绝缘防护性能, 为了满足需求, 外绝缘层一般采用复合绝缘材料进行制作, 绝缘材料性能对绝缘系统性能有直接影响, 甚至影响电压互感器的使用寿命。从实际来看, 应用过程中, 互感器的内电缆绝缘层可能会受到高电压的影响, 导致绝缘层击穿, 从而引发严重故障。且绝缘层击穿问题不仅会影响互感器的性能, 还可能危及电力系统的稳定性和安全性。因此, 文章在此从绝缘材料角度入手, 通过试验总结击穿成因, 并提出对策有现实意义。

1 研究内容阐述

传统模式下, 变压器内绝缘材料多以油纸材料为基础, 其随着变压器发展逐渐已经无法满足需求。进入 21 世纪之后, 高分子聚合物材料迅速发展, 绝缘性能更好、制造成本更低廉的绝缘材料出现, 迅速在电工技术领域得到发展应用。电缆作为电力设备重要部件, 良好的绝缘性是关键要求, 一般绝缘护套需要具备优良的电气性能、耐老化性能和耐高温性能。目前, 中间变压器内部的电缆常用绝缘材料包括硅橡胶、橡胶等, 不同的绝缘材料在实际应用过程中, 会随着时间积累出现老化现象, 此时绝缘性能下降, 当电缆绝缘层性能下降, 就很容易受到高电压等影响, 出现绝缘层击穿故障, 这一事故会影响电网运行。基于此, 文章在此通过热重分析、差示扫描热分析等, 探究电容式电压互感器 N 端电缆绝缘层老化、击穿等事故原因, 并提出改进措施, 希望为电缆绝缘性能优化提供更多参考。

2 绝缘材料老化机理

2.1 热老化

热老化 (Thermal Aging) 是指材料或物质在长时间内暴露于高温环境下, 导致其性质和性能逐渐发生变化的过程。这个过程通常伴随着分子结构的改变, 化学键的断裂和重新排列, 以及材料的物理性质的退化。绝缘材料为了发挥绝缘性能, 其化学结构具备特殊性, 然而在热量持续作用下, 化学结构会随之发生变化, 此时材料绝缘性能会不断下降, 此过程就是“热老化”。热力温度升高时, 对绝缘材料的绝缘性能要求也

会提高, 此时绝缘层的使用寿命势必会受到影响, 难以达到预期时间^[1]。

结合 Arrhenius 定律来看, 热老化可以用下述公式表示:

$$f(T) = f_e \frac{E}{KT}$$

。式中: $f(T)$ 代表老化状态物理余量; E 代表运行中能量大小, 用 J 表示; T 代表热力学温度, 单位为 °C; K 代表不同材料的老化常量; f_e 代表老化频率因数。

结合上文阐述公式分析, 如果是单一绝缘材料, 老化常量、老化频率因素均为一般参数, 运行能量大小会随着时间增加, 老化状态物理余量和热力学温度之间成反比关系, 也就是电气设备运行温度越高, 代表电缆绝缘性能越容易出现稳态。

2.2 电老化

长期电场作用下, 中间变压器的电缆外绝缘护层出现老化的现象被称为电老化。其导致电缆绝缘层击穿故障的过程如下: 一般情况下, 中间变压器内电缆绝缘层受到电场作用, 其耐电场强度与绝缘材料的本征击穿电场强度大小有直接关系, 不同类型的材料本征击穿电场强度数量级存在差异, 以复合绝缘材料为例, 其数量级较高, 但具体应用时, 由于厚度效应、杂质等影响, 多数无法达到本征击穿强度, 此时就产生电极效应, 不可避免导致电缆绝缘层出现电老化。随着电缆绝缘层电老化现象加剧, 中间变压器的内部电场强度发挥作用, 会导致电缆绝缘材料被击穿^[2]。

2.3 机械老化

电容式电压互感器运行过程中, 不可避免出现机械振动, 此时中间变压器内的电缆和电容单元末端金属部分会直接接触, 机械振动会导致电缆绝缘护套和末端金属部分产生摩擦, 随着时间积累不可避免出现机械老化现象。在机械应用影响下, 绝缘护套会不可避免出现瑕疵点, 而设备运行时, 机械应力会持续作用, 会导致产生的瑕疵点位不断扩大, 逐渐演变为大的裂缝, 此时电缆会产生局部放电现象, 从而形成机械击穿, 影响电缆绝缘性能^[3]。

3 电缆击穿原因

3.1 故障案例信息

文章以某单位某线路电容式互感器预试定检工作为研究案例,该工作在 2022 年 12 月 23 日开展。涉及的设备电缆绝缘层主要材料为耐高温硅橡胶。在试验过程中,发现存在 500kV 电容式电压互感器 B 相 N 端绝缘电阻为 0 的情况,且对中间变压器进行检查,通过对内部绝缘油成分进行检测,发现其存在低能量放电问题。为了确定事故发生原因,开展解体检查,最终确定故障成因是中间变压器内 N 端接线电缆被击穿,与电容单元末端金属绝缘层存在部分接触情况,同时,电容式电压互感器的 A 相、C 相 N 端接线电缆存在多处绝缘层开裂情况。

3.2 解体检查情况阐述

解体检查过程中,需要将出现问题的电容式电压互感器进行部分拆解,基于绝缘油检测信息等内容,确定故障主要集中在 B 相。拆解时将 B 相电容单元向上抬高至高于电磁单元,此时便可以看清楚 B 相电容单元内部情况,其中电容单元末端电缆布置图示如下图 1 所示。可以发现,电缆位于中间变压器铁芯上部,过渡板固定在中间变压器夹件上,且末端 N 端电缆和电容单元末端金属部分相接触。

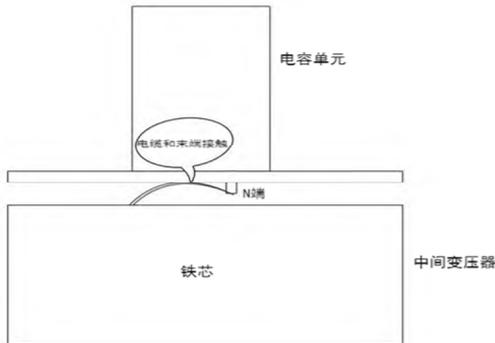


图 1 电容单元末端 (N 端) 电缆布置图示

为了更为直观确定故障发生原因,在电磁单元上部将电容分压器拆除,此时可以发现 B 相电容分压器底部明显出现放电痕迹,可以看见电缆击穿部位,电磁单元内部中间变压器顶部出现烧蚀炭黑残留,但电抗器和阻尼器并没有出现放电痕迹,绝缘电阻处于正常状态,对 A 相和 C 相进行同样操作,均没有在电容分压器底部发现放电痕迹,也没有在电缆处发现击穿部位^[4]。

将 500kV 电容式电压互感器 A、B、C 相的电容单元 N 端和过渡板之间的电缆绝缘层剥离,最终发现,一次电缆 B 相在长度方面,长于 A 相和 C 相,且在绝缘层可以发现明显的老化情况。

3.3 电缆绝缘层热重分析

该试验主要通过热重分析仪对电容式电压互感器 A、B、C 相电容单元 N 端和过渡板之间的电缆绝缘层进行热重分析,同时还需要对 C 相中间变压器的二次电缆绝缘层展开分析,最终结果如下图 2 所示。发现绝缘层的热分解温度均高于 450℃。

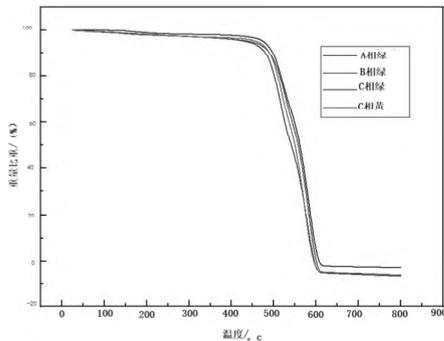


图 2 一次电缆 (C 相) 绝缘层的热重曲线图示

为了进一步确定故障原因,对橡胶垫片、硅橡胶和电缆外护套均进行热重分析,将其结果和中间变压器内电缆绝缘层进行比较,最终结果如下图 3 所示。

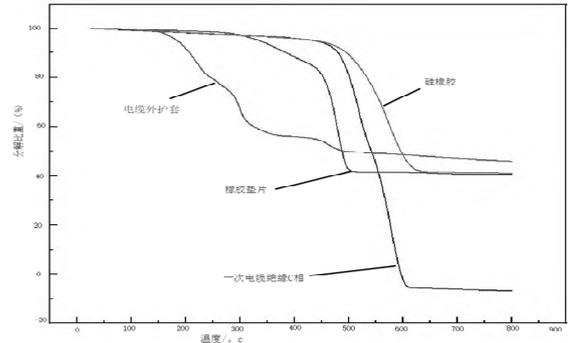


图 3 电缆绝缘层、外护套、橡胶垫片和硅橡胶热重曲线图示

结合图 3 来看,电缆绝缘层和硅橡胶稳定性较强,其热分解温度均在 450℃ 以上,电缆绝缘层在 600℃ 时才会被完全分解,此时硅橡胶并没有完全分解,说明其耐高温性更强,电缆外护套热稳定性相对较差,在 100℃ 就出现分解现象,但在 600℃ 时仍没有完全分解。橡胶垫片稳定性处于中间位置,在 300℃ 左右出现分解。从中可知,一次电缆绝缘层并非为硅橡胶材料组成。

3.4 电缆绝缘层差示扫描热分析

该试验是借助差示扫描仪完成分析。借助设备对研究的电容式电压互感器 A 相、B 相、C 相电容单元和过渡板之间的电缆绝缘层进行分析,统计样品的熔融温度,样品包括三相电容单元 N 端和过渡板之间的一次电缆绝缘层 (绿色) 和 C 相电磁单元二次电缆绝缘层 (黄色)。最终结果如下图 4 所示。

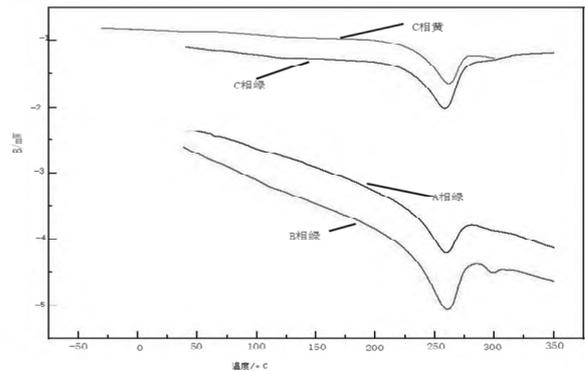


图 4 一次电缆、二次电缆 (C 相) 绝缘层的差示扫描曲线图示

结合图 4 来看,电容单元 N 端和过渡板之间一次电缆绝缘层和电磁单元二次电缆绝缘层在 260℃ 时出现吸热峰,此时并没有发现玻璃化转变温度,这可以证明,两种样品为同一种复合材料制成。

3.5 原因总结

综合上文分析结果来看,该故障成因如下:第一,电压互感器 B 相电容单元 N 端和过渡板之间的电缆较长,容易出现电缆和电容单元金属接触的现象。当设备运行时,由于机械振动,不可避免产生摩擦,会导致绝缘护套出现磨损老化,此时绝缘性能势必受到干

扰⁵。第二,电压互感器电容单元和过渡板之间的电缆位于铁芯上部,运行温度升高,会导致绝缘层出现热老化现象,逐渐失去绝缘性能。第三,中间变压器电场强度作用下,再加上热老化和机械老化影响,电缆绝缘层电子数量等不断增加,出现电老化现象。

4 改进策略

结合上文分析,对研究案例中的电缆绝缘层击穿现象产生原因更深入了解,明确该类型电容式电压互感器内电缆设计存在的不足。针对原因,从实用性角度,提出以下几点改进策略。

第一,生产方在生产过程中,可以进一步优化电容式电压互感器电容单元N端和过渡板之间一次电缆主绝缘层的材料,采取具备耐高温性能更好、抗老化性能更佳、弹性更优良的硅橡胶材料制作绝缘层,且将原本的电缆布置方式用螺旋上升方式进行取代,从而避免其处于中间变压器铁芯上部⁶。

第二,生产方在生产过程中,可以对电容单元N端结构进行调整,促使N端引线向下向外侧移动一定范围,增大电缆和中间变压器铁芯之间的距离,也可以有效避免其接触⁷。

第三,对于已经投入使用的电容式电压互感器,应结合实际运行情况,适当缩短运维巡视周期,并在中间变压器位置设置红外测温装置,实时监测温度,避免出现热老化现象,在停电检修时,应规范进行绝缘油色谱分析,杜绝敷衍了事。

第四,对于运行的电容式电压互感器相关单位需要重视其运行安全监测和低压端对地绝缘电阻试验等开展情况,一旦发现存在异常,需要立即停止设备运行,并采取解体检测方式深入进行检查。

结语

本研究通过理论分析和实验研究,深入探讨了电容式电压互感器内电缆绝缘层击穿的问题。文章以实际案例为研究基础,结合该案例,通过热重分析试验和差示扫描热分析试验,对电容式电压互感器内电缆绝缘层击穿故障进行分析,总结发生成因,并围绕成因,提出四点具有实用价值的改建建议。希望文章研究,可以为我国电力安全运行提供更多参考。

参考文献:

- [1]王俊娜,谢励耘,李晟元,等.220kV 电容式电压互感器常见缺陷综述[J].变压器,2022,59(12):73-75.
- [2]陈一棕,刘坤雄,冯雅琳,等.电容式电压互感器谐波监测技术综述[J].电力电容器与无功补偿,2022,43(5):70-75.
- [3]林根德,黄继来,刘茂集,等.电容式电压互感器发热故障诊断与分析[J].电力安全技术,2022,24(8):60-62.
- [4]杨昊,汪洋,刘炬,等.电容式电压互感器绝缘击穿故障处理及防范措施[J].东北电力技术,2022,43(6):29-32+35.
- [5]李瑞.牵引变电所电容式电压互感器检测方法的研究[J].湖南工业职业技术学院学报,2022,22(3):6-9.
- [6]韩流芳.电容式电压互感器试验数据异常处理方法研究[J].轻工科技,2022,38(3):51-53.
- [7]朱家林.500kV 输电线路电容式电压互感器故障分析及处理方法研究[J].广东科技,2022,31(5):70-72.

(上接第 99 页)

容,提高教学质量。邀请企业专家参与学校课程设置、教学内容设计等工作,使课程内容更加贴近实际,提高学生的就业竞争力。学校与企业共同开展实习就业一体化工作,为学生提供实习和就业机会,帮助学生顺利实现从学校到企业的过渡。学校可以邀请企业开展讲座、培训等活动,让学生了解企业文化,提高学生的职业素养。通过以上措施,学校与企业实现资源共享,有利于提高教育质量,培养出更多符合社会需求的电工电子人才。

七、结语和未来发展方向

随着科技的发展和产业结构的调整,电工电子行业对技术人才的需求也在不断变化。高职电工电子教学改革势在必行,以适应这一变化。本文提出的高职电工电子教学改革创新发展路径,包括理论与实践相结合,整合教学内容,优化教学手段,增加实验环节,优化考核方式,以及加强校企合作等方面的措施,旨在提高教学质量,培养出更多符合社会需求的电工电子人才。

未来发展方向上可以深化理论与实践相结合的教学模式,进一步加强理论知识与实践操作的结合,提高学生的实践能力和创新能力。完善整合教学内容,根据行业发展需求,及时更新教学内容,确保教学与行

业需求的同步。创新教学手段,利用现代教育技术,如网络教学、虚拟现实等,提高教学手段的多样性和有效性。增加实验环节,进一步加大实验教学比重,提高学生的实验能力和创新能力。优化考核方式,结合实际工作需求,设计更加合理的考核方式,既考查学生的理论知识,又考查其实际操作能力和创新能力。加强校企合作,深化校企合作,实现资源共享,为学生提供更多的实习和就业机会。注重学生综合素质培养,在提高学生专业技能的同时,注重培养学生的团队协作能力、沟通能力和创新能力等综合素质。总之,高职电工电子教学改革是一个长期、系统的过程,需要学校、企业和社会的共同努力。只有不断创新教学模式,才能培养出符合社会需求的高素质电工电子人才。

参考文献:

- [1]刘潇.高职电工电子教学改革创新发展路径探究[J].山东商业职业技术学院学报,2020,20(06):61-64.
- [2]张登高.高职电工电子教学存在的问题和改革策略探讨[J].知识窗(教师版),2021(09):34-35.
- [3]王斌.行动导向教学模式在高职院校电工电子教学中的运用与分析[J].科技资讯,2022,20(19):139-142+243.