

一起 500 kV 电缆外护套放电故障分析及防治措施研究

管毓瑶,刘守豹,宋佳骏,胡思宇,王晓兰

(大唐水电科学技术研究院有限公司, 广西 南宁 530007)

摘要:交联聚乙烯由于其电气性能、结构轻便等优势被广泛应用于高压交直流电缆绝缘领域,但是近年来因电缆故障导致的停电事件呈现出逐年增多的趋势。文中针对某水电厂主变压器空载充电过程中存在的 500 kV 交联聚乙烯电缆外护套对夹件间隙放电的问题。首先,利用 ATP-EMTP 仿真软件建立了全厂一次设备电磁暂态仿真分析模型,对导致电缆铝护套放电现象的故障原因进行了分析;然后,对不同种类的故障治理措施进行比较;最后,提出了针对性解决方案。

关键词:交联聚乙烯电缆;间隙放电;电磁暂态;过电压;避雷器;剩磁;励磁涌流

中图分类号:TM 855 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)04-0077-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220415

Analysis on Discharge Fault of 500 kV Cable Outer Protective Sheath and Research on Its Prevention Measures

GUAN Yuyao, LIU Shoubao, SONG Jiajun, HU Siyu, WANG Xiaolan

(Datang Hydropower Science & Technology Research Institute Co., Ltd., Nanning 530007, Guangxi, China)

Abstract: Due to the advantages of electrical performance and light structure, cross-linked polyethylene (XLPE) is widely applied in the insulation field of high-voltage AC/DC cable. However, in recent years, the number of power outages caused by cable faults has been increasing year by year. Aiming at the gap discharge problem of 500 kV XLPE cable sheath to clamp during the no-load energization of main transformer in a hydropower plant, firstly, ATP-EMTP software is used to establish the electromagnetic transient simulation analysis model of primary equipment in the whole plant. Then, the fault causes of discharge phenomenon of the cable aluminum sheath are analyzed, and the different kinds of fault treatment measures are compared. Finally, the corresponding solution is put forward.

Key words: cross-linked polyethylene (XLPE) cable; gap discharge; electromagnetic transient; overvoltage; lightning arrester; residual magnetism; excitation inrush current

0 引言

交联聚乙烯 (cross-linked polyethylene, XLPE) 由于其电气性能、耐热性能和机械性能优良、传输容量大、结构轻便等优势被广泛应用于高压交直流电缆绝缘领域^[1-3]。但是近年来因电缆故障导致的停电事件呈现出逐年增多的趋势^[4-7],其中,据相关机构调查统计,由于电缆终端或中接头环境的安装方式不合理导致了电力电缆运行中的大部分异常或故障^[8-14]。因此,针对高电压等级的电力电缆,需要

根据电缆具体参数选择合理的安装方式。

下面,结合一起 500 kV 交联聚乙烯电缆外护套放电的故障分析进行防治措施研究。首先,利用 ATP-EMTP 仿真软件建立了全厂一次设备的仿真模型,分析了电缆铝护套合闸过电压现象以及电缆铝护套过电压的影响因素;然后,分析了放电故障的原因;最后,制定了处理方案并提出了预防措施。

1 故障简介

某水电厂的 500 kV 电缆为 XLPE 电缆,导体截

面积 800 mm^2 , 于 2012 年 3 月投入运行, 用于连接主变压器高压侧至 500 kV 的气体绝缘金属封闭开关设备 (gas insulated switchgear, GIS), 如图 1 所示。

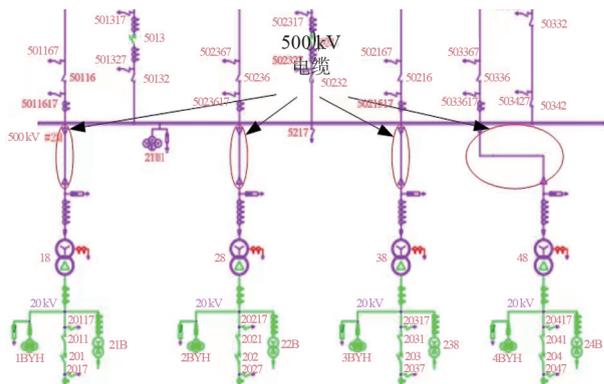


图 1 某水电厂一次接线及 500 kV 电缆位置

该水电厂的 500 kV 电缆采用平行敷设的敷设方式, 电缆最大长度为 795 m, 电缆满载电流为 770 A, 电缆敷设间距为 400 mm。电缆的主变压器侧铝护套通过电压限制器接地。电压限制器额定电压为 15 kV, 1 mA 参考电压经试验约为 22.5 kV。500 kV 电缆 GIS 侧金属护套采用直接接地方式。自设备投运以来, 在进行主变压器倒闸充电瞬间, 存在夹具对电缆外护套放电现象, 如图 2 所示。



图 2 现场放电现象

2 仿真模型建立

为了对故障原因及治理措施进行研究, 采用 ATP-EMTP 软件建立了该水电厂电磁暂态分析模型, 对不同运行方式、电压限制器和变压器铁芯非线性及剩磁情况下的电缆合闸过电压进行了量化计算。

建立全厂一次设备模型如图 3 所示, 其中电缆被分为 5 等分, 依次设置 6 个观察点。观察点 1 位于电缆与 GIS 的终端头处, 观察点 6 位于电缆与变压器高压侧相连的终端头处, 以便对合闸过程中铝护套电

压情况进行观察。GIS 管道和 500 kV 电缆采用单芯管道模拟, 主变压器高压侧入口电容为 117.5 pF , 如图 4 所示。远端线路采用标准三相电压源, 线电压幅值为 500 kV, 冲击合闸时间设置为 0.1 s。

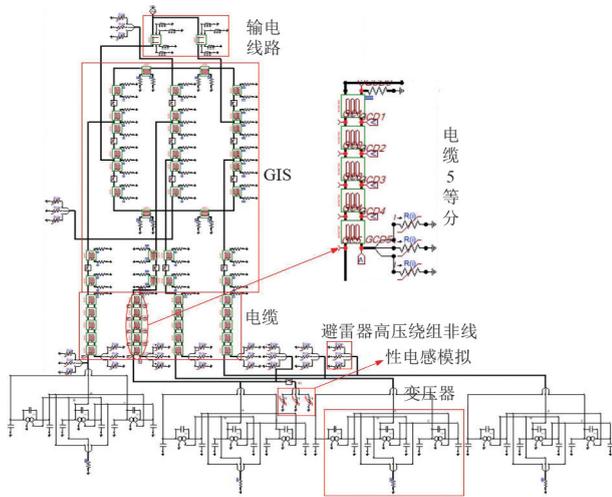


图 3 一次设备电磁暂态仿真模型

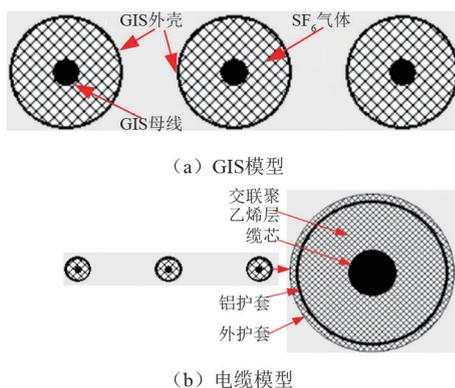


图 4 基于 ATP-EMTP 的 GIS 和电缆模型

为了考察合闸过程中主变压器高压绕组铁芯非线性及剩磁所导致的励磁涌流对电缆铝护套过电压的影响, 采用高压绕组磁滞回线, 如图 5 所示。当对某台变压器进行冲击合闸时, 对应合闸前各绕组剩磁, 按照 A 相为 1430 Wb 、B 相为 -1430 Wb 、C 相为 -1430 Wb 来设置, 其中 1430 Wb 为变压器绕组磁链稳态值。

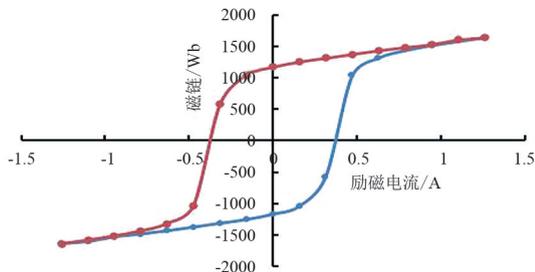
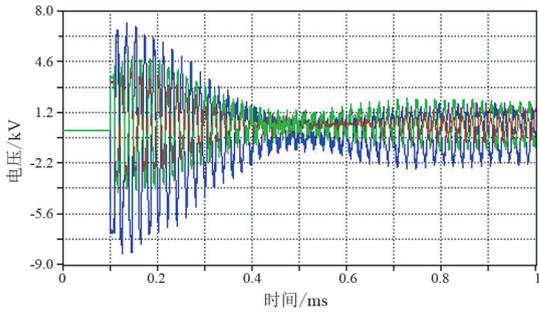


图 5 主变压器高压绕组磁滞回线

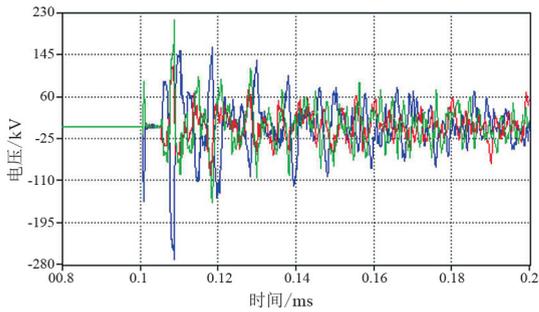
3 电缆铝护套合闸过电压分析

全厂除了 2 号发变组及其 2 号主变压器高压电缆外,其余一次设备均带电。在此运行方式下,通过 GIS 断路器在 0.1 ms 时对 2 号电缆及 2 号主变压器充电,得到电缆铝护套观察点的电压波形,如图 6 所示。图中,蓝色、红色、绿色曲线分别代表 A、B、C 三相电压波形(下同)。

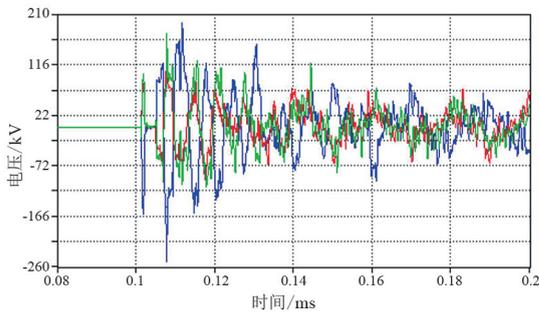
从图 6 的波形可知,除了观察点 1 因为接地点、观察点 6 因为过电压保护器使电压得到限制外,其他观察点的过电压波形均处于较高幅值。观察点 2 的 A 相过电压峰值达 270 kV,对应波形局部放大如图 7 所示,其波头时间约 1.5 μs ,波尾时间 2 μs 。



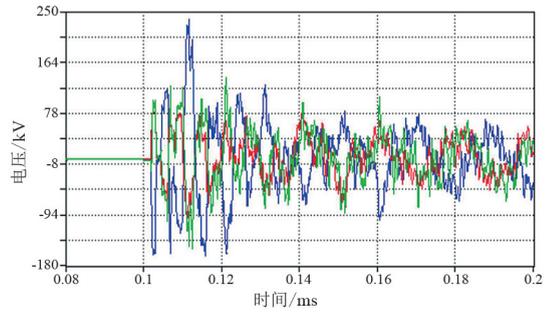
(a) 观察点 1



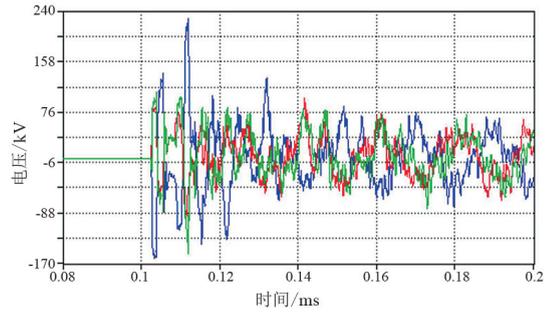
(b) 观察点 2



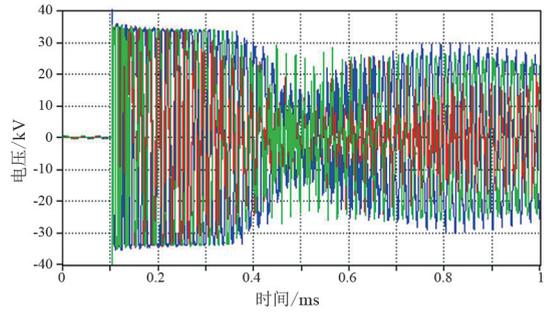
(c) 观察点 3



(d) 观察点 4



(e) 观察点 5



(f) 观察点 8

图 6 合闸过程中电缆铝护套电压波形

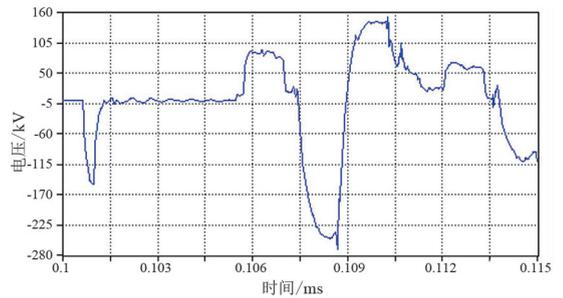


图 7 观察点 2 A 相电压局部放大

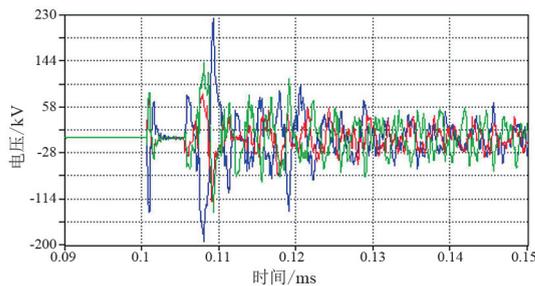
4 电缆铝护套过电压影响因素分析

对电缆铝护套放电原因开展的研究,集中在电厂运行方式、电缆电压限制器参数、主变压器高压绕组剩磁 3 个方面,下面对这 3 个可能因素进行定量分析。

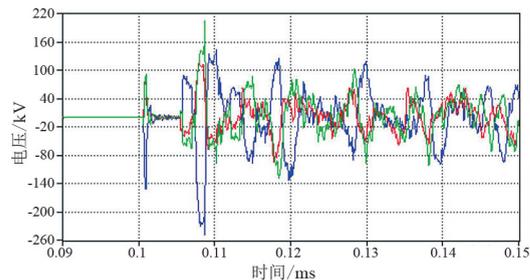
4.1 电厂运行方式的影响

分别在全厂仅 GIS 带电时对 2 号电缆及 2 号主变压器充电,以及在 GIS、1 号和 3 号电缆主变压器带电时对 2 号电缆和 2 号主变压器充电两种情况进行分析。为了便于比较,以观察点 2 的电压作为比较标准,得到两种情况下的电压波形,如图 8 所示。

将图 8 与图 7 比较可知,这 3 种运行方式下的过电压峰值分别为 228 kV、248 kV、270 kV。从整体上看,运行设备越多,对应合闸导致的电缆铝护套过电压幅值越大,但增加幅值并不明显。



(a) 仅GIS带电对2号电缆及2号主变压器充电



(b) GIS、1号和3号电缆及主变压器带电对2号电缆和2号主变压器充电

图 8 不同运行方式下电缆铝护套过电压波形

4.2 电缆电压限制器参数的影响

以全厂除了 2 号发变组及其 2 号主变压器高压电缆外其余一次设备均带电(第 3 章运行方式)时对 2 号电缆和主变压器合闸充电作为分析对象。将电压限制器从 HC15 型替换为 HC5 型,HC15 的直流 1 mA 参考电压比 HC5 大三倍,HC5 的伏安特性曲线比 HC15 的伏安特性曲线低,如图 9 所示。

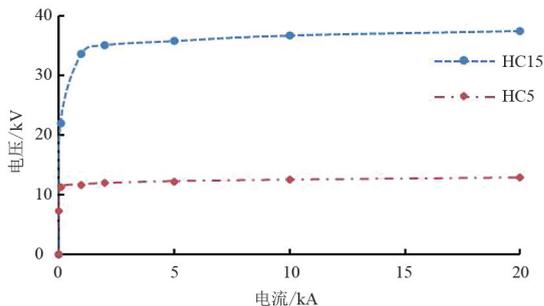
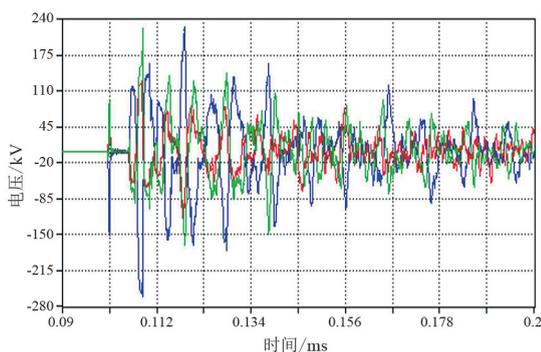
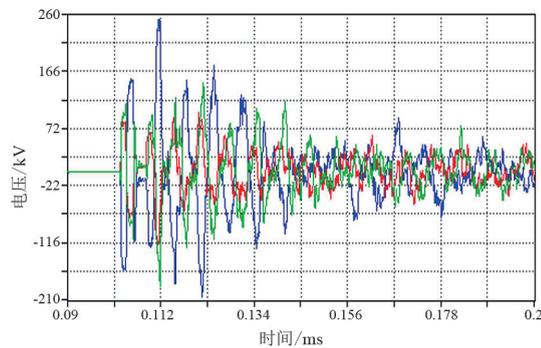


图 9 HC15 型、HC5 型电压限制器伏安特性曲线

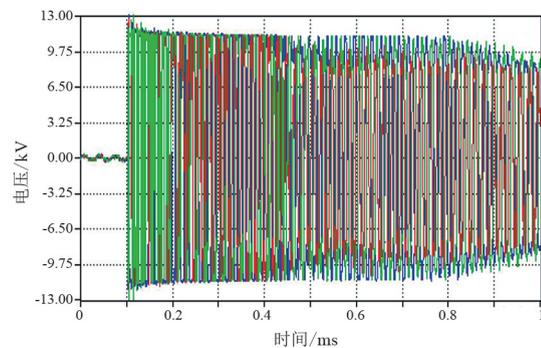
采用 HC5 过电压限制器情况下,观察点 2、观察点 5 和观察点 6 的电压波形如图 10 所示。



(a) 观察点 2



(b) 观察点 5



(c) 观察点 6

图 10 采用 HC5 过电压限制器时的电压波形

通过对比图 6 和图 9 可知,在降低过电压限制器的伏安特性曲线之后(动作电压和残压降低),观察点 6(过电压限制器安装点)的电压明显降低,观察点 2 的电压几乎没有变化,观察点 5 的电压反而有所上升。

4.3 主变压器高压绕组剩磁

第 3 章中的过电压分析结果是在 2 号主变压器铁芯最大剩磁情况下得到的。对变压器高压绕组零剩磁情况进行计算,得到观察点 2 电压波形如图 11 所示。

对比图 6(b) 和图 11 可知,变压器铁芯是否有

剩磁对电缆铝护套过电压基本无影响。这是因为合闸过程中电缆铝护套过电压和变压器绕组励磁涌流的时间为两个不同的数量级。以最大剩磁情况下的合闸过程(第 3 章运行方式)为例,对应的励磁涌流电压波形和观察点 2 A 相电压波形如图 12 所示。

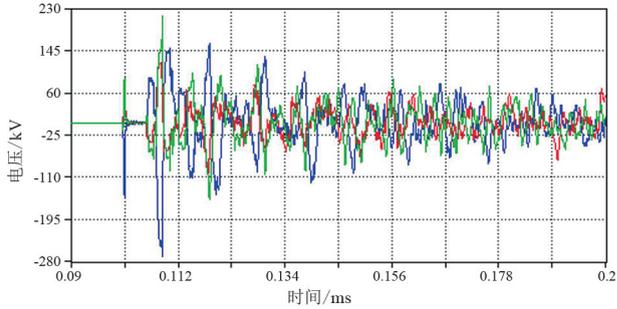
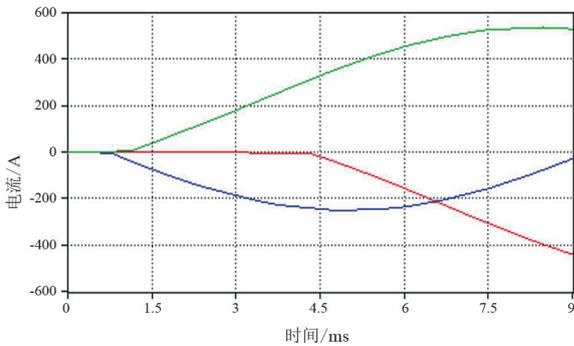
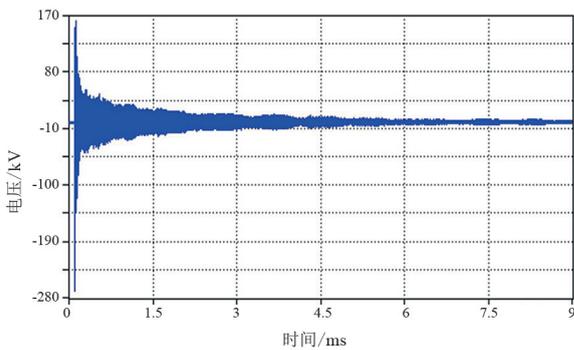


图 11 2 号主变压器铁芯剩磁为 0 时观察点 2 电压波形



(a) 2 号主变压器高压绕组励磁涌流电流波形



(b) 观察点 2 A 相电压波形

图 12 励磁涌流波形和观察点 2 A 相电压波形

从图 12 可知:励磁涌流是一个缓慢的过程,它是由电感决定的,由于电感具有阻碍电流变化的特性,因此其过渡过程是以基波为时间尺度的;电缆的过电压是由分布电容决定的,电容对瞬态电压具有导通作用,所以其过渡过程是以微秒为时间尺度的。

4.4 小结

就电厂运行方式、电缆电压限制器参数、变压器高压绕组剩磁 3 种因素对电缆铝护套合闸过电压的影响分析得出如下结论:

1) 电缆铝护套合闸过电压主要受系统参数,尤其是其自身分布电容参数的影响,运行方式对其影响不大;

2) 过电压限制器对电缆铝护套合闸过电压的影响集中在安装点附近,对于其他部分基本起不到限制过电压的功效;

3) 励磁涌流和过电压是两个时间尺度的变化量,变压器是否存在剩磁对电缆铝护套过电压没有影响。

5 放电原因分析及处理措施

5.1 放电原因分析

该水电厂 500 kV 电缆夹具实际安装形式如图 13 所示,其内部橡胶垫不是全包裹形式,采用的是两个不能紧密配合的不完整半圆组合而成,导致电缆外护套表皮与金属夹件之间存在空气间隙。在系统侧给电缆冲击合闸的过程,实际上是电荷在系统-电缆-变压器中重新分布的过程,在合闸的瞬间电荷分布是动态波动到逐步平衡的。在合闸瞬间,通过电容分压电缆芯线-屏蔽层-外套均能够感应电荷,这些电荷无法在合闸瞬间被接地线疏导进入大地,将产生过电压,其中屏蔽层过电压峰值达 270 kV。半导体层电位受屏蔽层影响也将达到 270 kV 的幅值,最终导致夹件空气间隙击穿。

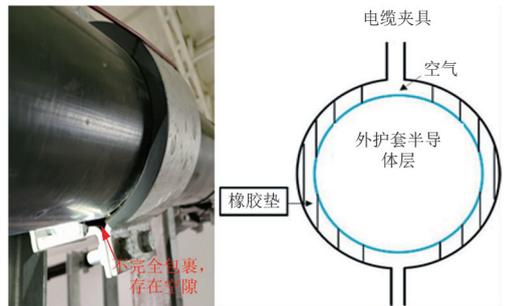


图 13 该水电厂 500 kV 电缆金属夹具安装情况

电缆铝护套在合闸冲击时刻的最大过电压可到达 270 kV,对于夹具和电缆外护套之间的空气间隙(约 1 cm)被击穿是必然的。就放电过程而言,其本质上是一种电容分压导致的感应放电,由于能量较低,不会对电缆外护套造成明显破坏。

5.2 处理措施

参考某水电厂 500 kV 电缆金属夹具安装方式,

如图 14 所示,可知其外护套与金属夹具之间采用直接接触方式。由于外护套外皮采用的是导电层,因此冲击合闸过程中电缆外护套表面的感应放电直接以紧密接触传导的方式释放,不会出现可见火花。



图 14 某水电厂 500 kV 电缆金属夹具安装情况

参考其他电厂 500 kV 电缆金属夹具安装形式,结合该水电厂实际情况,为了消除冲击合闸过程中存在的火花放电现象,在不对现有安装方式进行大改变的前提下,可通过在夹件空气间隙处填充软质导电橡胶或塞入铝箔纸的方式,实现夹具与电缆外护套的紧密电气连接,将冲击合闸过程中产生的感应电荷及时释放。

6 结 论

1) 对于单端接地的高压短距离电缆,空载冲击合闸过程中在铝护套上产生较高的过电压是由于电缆自身结构固有的分布电容决定的。采取改善接地或改变电压限制器难以降低铝护套上最大过电压幅值。

2) 该水电厂电缆外护套放电的原因在于采用了不合适的金属夹具安装方式,其橡胶垫片未能对电缆外护套进行全包裹,使得外护套与金属夹具之间的空气间隙在合闸过程中承受了过电压而发生空气击穿。

3) 建议在高压电缆安装过程中,采用导电橡胶作为金属夹具垫片,在柔性固定电缆的同时起到释放感应电荷的作用。

参考文献

- [1] 杜伯学,韩晨磊,李进,等.高压直流电缆聚乙烯绝缘材料研究现状[J].电工技术学报,2019,34(1):179-191.
- [2] 朱晓辉,杜伯学,周风争,等.高压交联聚乙烯电缆在线监测及检测技术的研究现状[J].绝缘材料,2009,42(5):58-63.

- [3] 吴洋,朱庆东,高路,等.高压直流系统电缆接头中空间电荷与电场分布的仿真计算[J].山东电力技术,2021,48(5):23-28.
- [4] 官志民.电力电缆绝缘击穿问题原因分析及探讨[J].科技资讯,2019,17(33):55-57.
- [5] 田巍.35 kV 电缆突发绝缘击穿事故分析及防范措施[J].电世界,2021,62(1):29-30.
- [6] 张志芳.一起 110 kV 高压电缆异常的分析及处理[J].绝缘材料,2010,43(4):70-73.
- [7] 赖嘉豪.10 kV 交联电缆线路的故障分析及处理措施[J].科技与创新,2016(18):123-124.
- [8] 郑必成,顾蔚泉.一起 220 kV 交联聚乙烯电缆中间接头击穿故障原因分析及措施[J].电工技术,2021(9):99-100.
- [9] 刘凤莲,朱军,卢金奎,等.一起由接地工艺引起的 220 kV 高压电缆故障分析[J].四川电力技术,2019,42(3):64-67.
- [10] 边航,王金锋,杨大渭,等.一种容易被误判的 XLPE 电缆附件故障机理[J].电线电缆,2016(6):30-32.
- [11] 刘作鹏,丁亮,吴琼,等.一起 66 kV 电缆中间接头局部放电故障的检测与分析[J].东北电力技术,2020,41(6):50-52.
- [12] 项恩新,杨能,王科,等.110 kV 电缆中间接头半导体层缺陷局部放电测试技术研究[J].云南电力技术,2019,47(3):44-47.
- [13] 刘凤莲,邓元实,薛志航,等.110 kV 高压电缆中间接头系列故障分析[J].电线电缆,2017(6):36-40.
- [14] 徐虹,黄丽秋,娄建勇.35 kV XLPE 电缆中间接头典型缺陷三维电场仿真分析[J].浙江电力,2020,39(10):9-13.

作者简介:

管毓瑶(1996),女,硕士,从事电气设备试验工作;

刘守豹(1983),男,博士,研究方向为电力系统暂态分析及工程电磁场数值计算;

宋佳骏(1995),男,硕士,从事电气设备试验工作;

胡思宇(1996),女,硕士,从事电气设备试验工作;

王晓兰(1995),女,硕士,从事电气设备试验工作。

(收稿日期:2021-12-25)