

Study on Water Tree Corrosion and Protection of Medium Voltage Cable in Power Plant

Wenxiu Song

Daya Bay Nuclear Power Operation Management Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518124, China

Abstract

The safe operation of power generation units relies on critical medium-voltage cables in power plants. Insulation failures are predominantly caused by water tree corrosion. This study investigates the corrosion mechanisms and underlying patterns of water tree formation, where moisture infiltration into insulators creates conductive pathways, accelerating insulation degradation. Through analyzing two representative failure cases, it identifies manufacturing defects in cable terminations (e.g., insufficient silicone grease application or improper sealing) as direct triggers for partial discharge and insulation moisture issues. The paper proposes comprehensive maintenance measures including optimized lifecycle supervision, standardized accessory installation protocols, and implementation of condition monitoring with aging assessments to enhance operational reliability and prevent insulation failure propagation.

Keywords

medium voltage cable; water tree corrosion; cable maintenance

电厂中压电缆水树枝腐蚀与防护研究

宋文修

大亚湾核电运营管理有限责任公司, 中国 · 广东 深圳 518124

摘要

机组安全运行离不开电厂中压电缆这一关键设备, 绝缘故障多由水树枝的腐蚀作用引起, 本文探讨了水树枝的腐蚀现象及其内在规律, 水分侵入绝缘体, 生成导电路径, 加快绝缘性能的下降步伐, 深入挖掘两起典型故障案例, 电缆头制作工艺的瑕疵 (诸如未填充硅脂膏、密封处理不当等) 直接引发局部放电和绝缘受潮问题, 提议优化电缆全生命周期监管、严格规范附件安装工艺、实施状态监测与老化评估等维护活动, 力图加强电缆运行可靠性, 遏制绝缘破坏事故的蔓延。

关键词

中压电缆; 水树枝腐蚀; 电缆维护

1 引言

电厂电缆中压作业电压设定为 10 千伏与 6.6 千伏两个级别, 交联聚乙烯电缆成为中压电缆的首选, 简记标符号, 本表述针对工业配电场合, 依据电缆芯料性质分类, 存在两种规格为 XLPE 的铜铝电缆; 电缆防护层的设计, 分为带有钢铠防护与未采用防护两种形式, 某些发电厂对电缆燃烧时产生的卤化氢气体有零容忍要求, 电缆绝缘层与护套须采用非卤素材料, 电缆的辅助性材料组合模块, 诸如包装带、填充物、内衬等组成部分, 均采用无卤素成分, 电缆的构造模式见图 1:

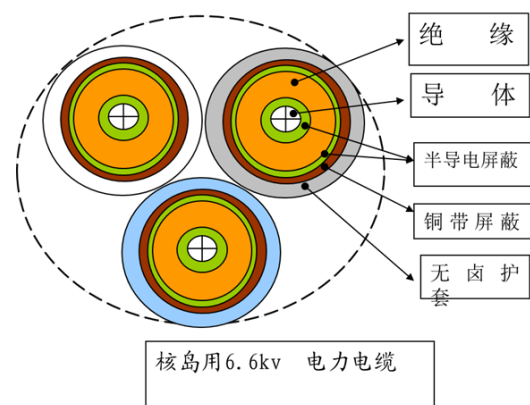


图 1 常用电缆结构图

2 电缆水树枝腐蚀原理

接地故障在电缆故障中占 80%, 多因绝缘层失效引起, 绝缘故障的主要诱因是电缆绝缘层受潮及侵蚀。

电缆绝缘受潮现象多由端部密封不严、安装超期或水

【作者简介】宋文修 (1982-), 男, 中国山东滕州人, 工程师, 从事高电压设备运维及可靠性管理研究。

分渗入引起，存在三种主要类别：

电缆接头密封层破裂，潮气潜入侵扰，破坏绝缘效力；

电缆固有缺陷暴露，电缆铝（铅）包覆阶段，出现砂眼及裂纹等缺陷；

电缆护套遭异物刺破，受化学侵蚀之苦，亦为电解性损耗，防护层失效事件^[1]。

电缆绝缘层若吸纳潮气或水分，来源端部或外护层，纵向渗透可能由绝缘铜屏蔽层缝隙与导体间隙引起，对电缆系统构成重大隐患，电缆遇水浸泡，鉴于电场效应的叠加特性，电场非均匀分布及力集中点促成水分枝状发展。

业界普遍认同，作为高分子有机绝缘物质的水树枝，含有导电的液态成分（如水），其电导性能会随时间流逝而退化，在电极与绝缘层交界区域，若存在导电液体，若此区域信号强度越过了既定界限，导电物质逐步向绝缘层内部扩散，呈现树枝与树叶般分布的渗透痕迹，水枝样式的别名词，其结构似被水填满的众多枝状细管或缝隙，业内对水树枝的描述各执一词，共识是水树枝的形成与水与电场的作用密切相关^[2]。

在XLPE电力电缆绝缘的生产阶段，质量瑕疵普遍存在，所指微孔、杂质及运输、敷设、安装及运行阶段遭遇的机械损伤等，此类要素使水分逐步渗入绝缘体层，水溶性导电离子充溢水体，介电电泳效应原理阐明，电场集中区域对电常数较高的液体离子产生吸引力，故水树枝尖端的电场越集中，此局部区域的高电场效应将引起电树枝的生成，电树枝一旦生成，短期内绝缘性易受破坏波及。

众多电缆铺设于含有硫化物、碱性物质、有机酸等成分的电缆沟道及地下水域，亦或直接暴露于硫化物污染的场合，水树枝引导下，硫化物渗透电缆的护套与绝缘层，导体遭遇化学反应，诸如铝导体遭受腐蚀或铜导体生成硫化铜，引发晶体析出，实现化学树枝状结构化，电缆出现化学枝状生长，绝缘效能急速减削，耐压性能衰退，绝缘阻抗下降，直流泄漏电流上升，乃至绝缘裂解。

3 电厂中压电缆故障分析

本文以某电站中压电缆为例，经统计，2009年-2024年，该电站中压电缆共发生故障8起，其中4起与中压电缆水树枝腐蚀相关，限于篇幅，本文仅介绍其中两例：

3.1 辅助变压器出线低压侧母线排支撑绝缘子放电引起三相短路事件

2009年5月该电站控制室出现报警，确认辅助变压器已经跳闸；现场发现辅变低压侧下降段有两块盖板崩开冒烟，端子排出现明火。

现场检查的故障现象如下：三相对地短路故障区域在母线端部三相支撑绝缘子处，短路电弧使得三相瓷瓶不同程度损毁，端部盖板对应三相母排处有电弧烧损痕迹，A相部位烧穿一个洞，该区域及四周有大量电弧熔融飞溅物，三相

母排下端部直角处被电弧部分烧熔；所有电缆击穿点都位于主绝缘老化发黄变色带中，而这些发黄变色带均处于半导体层断口所形成的台阶旁边，如2图所示；未发生故障的电缆和故障电缆相同的位置，在主绝缘也都有一圈不同程度黄色变色情况。

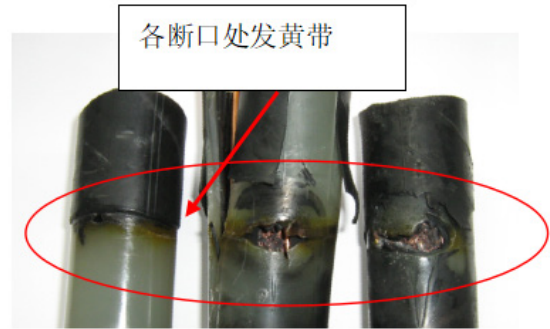


图2 现场电缆图片

通过电缆解体来看，在相距半导体层断口发黄变色带约110mm的地方，也有一圈发黄的变色带，而此位置正是应力管末端断口位置，此现象的产生与端接部位热缩密封处理不良有关。将其中一根故障电缆发黄带表面切去少许，发现发黄程度是由表及里，逐渐变浅，到更深处已无发黄状况，如图3所示。

从技术治理视角剖析，此次事故揭示了电缆附件安装阶段对关键环节监管的明显缺陷，电缆附件安装之硅脂膏非润滑成分，材料在改善电场分布、填补气隙、隔离潮气上展现出显著性能，半导体层断裂台阶的特定区域之内侧端点周边区域，电场集中度最为明显，电缆配件中最脆弱的部位。断口与应力锥间的微小间隙，高介电硅脂膏填充效果佳，遏制局部放电的萌发，执行者未依照既定规程填充硅脂膏，台阶间隙在电场强压下出现电离，引起局部放电反应，初始放电能量偏低，长期效应造成主绝缘层表面电树枝的生成，逐步向绝缘层内部延伸，形成不可逆转的恶化途径。



图3 应力管表面颜色

3.2 厂变电缆接头主绝缘层存在树枝放电痕迹事件

大修期间，在对厂变A低压侧A、C相共8根电缆进行电缆头更换制作过程中发现A0004电缆主绝缘存在树枝状的放电迹象，经进一步排查，放电痕迹分布在电缆线芯与半导体层间的绝缘表面上，如图4所示。



图4 电缆绝缘放电变色图片

通过对受损的电缆检查,其表面未发现明显机械、外力损伤的迹象;而厂变运行过程中负载无大幅度波动,运行电压稳定。因此可以判断产生放电的原因非机械或外力造成绝缘损伤或电压大幅度波动所致。

通过现场检查发现的主绝缘上端部、适配器的半导体部分出现明显的电树枝痕迹,并结合电缆剖面结构分析,正常情况下,当适配器和主绝缘间充满硅脂时,可以有效防止空气或水分的进入,同时由于硅脂的介质强度较高,不会发生放电现象,如其它7个T型接头的主绝缘及各层外观均良好,故未发现放电的迹象。当硅脂未填满间隙,使相对介电系数较低的空气和水分进入适配器和主绝缘之间,当畸变电场中电场强度达到或超过空气和水分的击穿场强时,该区域会出现局部放电现象,使得自半导体层断面至主绝缘端部范围内的绝缘层颜色由青色变成淡黄色。由于畸变电场在主绝缘上端部、半导体层断面、适配器的半导体部分和绝缘部分附近存在场强集中,所以在对应上述位置的应出现明显的电树枝痕迹,与现场检查情况相符。

3.3 电缆水树枝腐蚀案例综述

通过分析电缆的事故原因,树枝化是导致中高压电缆绝缘破坏的主要原因之一。其中水树枝是树枝化的一种,在运行过程中一旦生成水树枝,其在生长过程中会随着其尖端场强的不断集中而转化为电树枝,而电树枝则可能使电缆绝缘层在短期内被击穿,从而发生事故。

电缆中间接头、终端头是故障较常发生的部位。电缆头导致的电缆绝缘降低主要原因是电缆头的电场分布要比电缆本体复杂的多。电缆绝缘内,径向电场分布是不均匀的,轴(纵)向电场分布基本上是均匀的。如下图2所示。因此电缆终端头制作工艺要求较高,以免电场过于集中。电缆终端头的制作和人员的技能及认知息息相关,且在是在现场手工操作完成的,其环境亦不如在工场内机器生产的电缆优越,以上几个因素导致电缆头的故障居高不下。

4 电缆的维护策略分析:

4.1 现阶段电缆维护策略

大亚湾基地中压电缆的主要负荷是配变变压器及电机类负荷,因此电缆的检修一般跟随下游设备的检修窗口而进行。目前采用的方法包括:

预防性检修项目主要是连同下游负荷进行主绝缘电阻的测量及端子紧固性的检查。

日常性巡检项目主要在电缆的运行期间,定期对电缆

接头进行测温,对电缆端子处的温度进行趋势跟踪,发现异常温度后进行干预。

由于对电缆检查的手段比较单一,对电缆的状态缺少预判,以停留在定期检查和故障后维修的局面为主,缺乏有针对性的测试和维护。因此,在后续工作中应加强电缆头制作、户外防护及性能评价。

4.2 后续电缆管理建议

加强并加强电缆头制作工艺质量控制。因电缆头制作对环境、工艺细节要求较高,因此在进行电缆头制作时一方面要进行电缆头制作关节技术点的质量控制,同时也要加大对电缆头制作检修工艺从理论到实践方面的培训。

加强电缆分级管理,重视户外电缆运行检查。近几年的电缆故障多数发生在户外电缆。户外电缆由于运行条件所限,很容易导致潮气进入,所以有必要对中压电缆要进行分级管理,对中户外电缆重点管理,加强电缆技术管理,比如备件储备,及加强运行中的巡视。

加强电缆护层防护,完善电缆检查项目。电缆护层是覆盖在电缆绝缘外面的保护层。其作用是阻止水分、潮气和其它有害物质侵入绝缘层,以确保绝缘性能不变。护层的状态直接关系到电缆的使用寿命。尤其处于海边、户外及廊道里的电缆,电缆长期处于湿热环境中,且户外电缆长期遭受日照,根据绝缘老化机理可知,此类环境加速电缆护层的光老化、热老化、主绝缘的水树老化。因此有必要加强对电缆外层的的管理,定期测量电缆护层的绝缘,检查护层的状态,完善电缆检修项目。

加强对电缆护层修复后的状态检查,必要时进行更换。电缆护层受损后往往通过热缩管进行修复,因安装工艺控制不当及老化原因,热缩管密封性能下降,潮气易由热缩管处进入电缆内部,尤其是户外电缆,最终导致主绝缘的水树老化。

加强对电缆进行老化检测,当电缆运行时间逐渐到达电缆寿命,电缆老化检测“四联”法可对电缆状态进行跟踪分析,随着电缆运行时间加长,定期对电缆进行老化试验并跟踪趋势,可提前预估电缆老化状态,以便制定更换或修复的策略,变被动为主动^[1]。

5 结语

电缆局部放电在线测量可以提前发现电缆绝缘缺陷。目前电缆的局放试验的检测技术日臻成熟,且在供电部门已得到应用。我们电站在电缆管理上还处于事后处理的被动局面,有必要开展在线局放检测技术的研究,吸收及引进,以提升电缆运行的可靠性。

参考文献

- [1] 刘熹,崔永恒.电力电缆故障检测方法的分析[J].集成电路应用,2024,41(08):108-109.
- [2] 孙辉,喻岩珑,王伟,等.交联聚乙烯电缆中水树枝诊断的研究现状[J].电网与清洁能源,2011,27(06):40-42.
- [3] 张大兴,黄泽荣,李贤靓,等.基于FPGA的电缆绝缘老化检测系统设计[J].工业控制计算机,2023,36(06):120-122.