

[电线电缆]

一起110 kV电缆终端故障及仿真分析

文/徐超叶婷

国网江苏省电力有限公司无锡供电分公司

针对一起110 kV电缆终端故障开展解体分析、理化性能检测及电场强度仿真等，发现电缆终端存在施工工艺缺陷，电缆应力锥部位主绝缘处打磨不平导致电缆主绝缘及电缆应力锥界面存在气隙，在运行电压作用下长期存在局部放电，导致绝缘快速老化，形成电树，最终导致击穿。研究结果对指导高压电缆施工安装、运行检测及防范该类型故障有重要参考意义。

随着城市化进程的加快，高压电缆因其美观、受环境影响小及占地少等因素，逐渐取代架空线路成为城市供电主动脉。然而，随着电缆用量的增多，电缆故障对配电网运行可靠性的影响日益加剧。由于高压电缆敷设在排管、电缆沟等地下设施中，一旦故障往往存在故障点查找困难、修复时间长及停电损失大等难题，并且容易引起爆炸、火灾等重大事件，给配电网的安全运行带来极大威胁。

电缆线路由电缆本体和电缆附件组成，电缆附件是目前高压电缆线路的最大薄弱环节，据统计，在不计外力破坏时，电缆附件故障占比高达85.5%；而对于电缆附件故障，84%以上是由于产品质量和施工安装不当引起。因此，分析电缆线路故障原因，并有针对性地提出高压电缆线路施工和运维工作建议，对于从源头上预防电缆故障的发生、提高电缆运行可靠性具有重要意义。

目前国内外的研究重点集中在电缆绝缘材料的破坏机理上，包括绝缘材料内部电树枝和水树枝老化、局部放电及空间电荷等问题，而对电缆设计缺陷与故障原因的关联分析较少。本文针对一起110 kV电缆终端故障展开分析，找出故障原因

并提出处理建议，为防范该类型故障提供借鉴和参考。

电缆终端事故概况

2019年4月18日，某110 kV高压电缆线路A相接地距离Ⅰ段、零序Ⅰ段保护动作，开关跳闸，重合不成功，故障测距为4.62 km。线路转检修后，运维人员巡线查找确认南门变进线处A相电缆终端故障。

该110 kV线路为架空-电缆混合线路，其中电缆长度为1.085 km，于2014年12月12日投运。电缆型号为YJLW03-1×800 mm²，电缆终端型号为YJZWCF4。

故障终端检测

1. 解体检查

故障线路电缆终端结构如图1所示。

对故障电缆终端进行解体检查，发现以下特征：

- 1) 故障终端头部接线柱长度测量为186 mm，满足施工要求，未出现电缆本体下沉情况。
- 2) 故障终端尾管铅封完整，无脱铅现象。

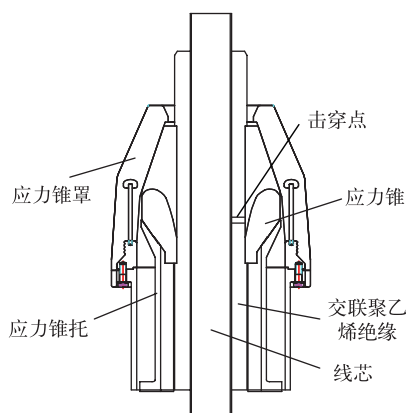


图1 电缆终端结构示意图

3) 锥托有明显放电痕迹出现部分缺损, 锥托下部弹簧有部分损坏。

4) 应力锥有明显裂痕, 部分应力锥已完全脱落。

5) 击穿点位置距离应力锥最底部105 mm, 击穿孔直径约为17 mm, 击穿点与锥托顶端处于同一水平面。

6) 应力锥内径与电缆绝缘外径尺寸配合无问题, 见表1。

表1 应力锥内径与电缆绝缘外径配合检查

类别	工艺要求	施工时记录数据	解体时测量数据
电缆绝缘外径	应力锥过盈量应为	68.3~68.4	68.28
应力锥内径	2~7 mm	65	64.84

2. 试验分析

(1) 理化性能检测

对故障电缆取样如图2所示。

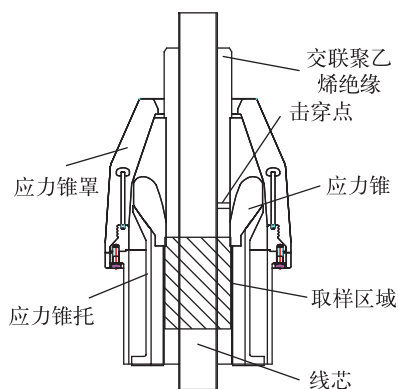


图2 取样区域示意图

在实验室对电缆主绝缘进行结构检查和绝缘机械性能(老化前)、绝缘热延伸及绝缘热收缩试

验。检测结果见表2, 结果表明电缆短样品符合GB/T 11017—2014《交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件》额定电压110 kV、 $U_m=126$ kV标准要求。

表2 电缆样品检测结果

检测项目		GB/T 18890要求	检测结果	检测结论
绝缘厚度/mm		≥ 16	17.22	合格
绝缘偏心度（%）		≤ 10	3.6	合格
绝缘抗张强度/MPa		≥ 12.5	21.1	合格
绝缘断裂伸长率（%）		≥ 200	557	合格
绝缘热延伸	负荷下最大伸长率（%）	≤ 175	55	合格
	冷却后最大永久伸长率（%）	≤ 15	－ 1.5	合格

(2) 击穿通道分析

取故障电缆终端击穿点左右10 cm的本体进行击穿通道分析, 主绝缘上击穿通道为直径约17 mm的孔洞。对击穿点附近电缆XLPE主绝缘进行高温加热, 使其呈透明状, 如图3所示, 可见电缆击穿通道1沿电缆垂直径向分布。



图3 电缆主绝缘击穿通道

(3) 电树情况分析

1) 通过上述试验, 肉眼观察到明显的电树枝, 在击穿通道周围存在大量电树枝, 靠近导体的电树枝分支较多, 靠近主绝缘外表面的电树枝分支较少, 初步断定电树枝由主绝缘外部起始向导体发展形成, 如图4所示。

2) 肉眼发现另一个电树枝贯通路经, 如图5所示。

3) 显微镜下切片观察绝缘内部有许多细微开裂痕迹, 形成细小的通道, 中间存在放电产生的碳化痕迹, 电树枝总体呈现丛状, 轮廓与发展通道清晰, 如图6所示。

4) 在击穿通道附近直至应力锥顶部位置的主绝

缘内均存在大量电树枝现象，但其他部位未发现明显电树枝痕迹，如图7所示。

5)应力锥部位主绝缘外表面凹凸不平，判断为打磨缺陷，如图8所示。

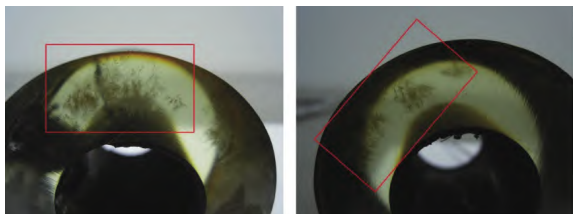


图4 电缆主绝缘电树枝分布情况

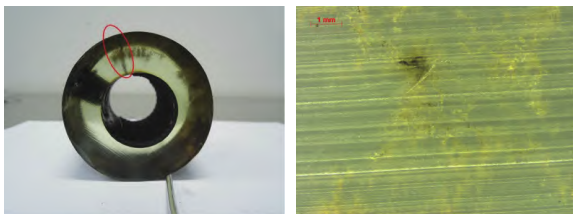


图5 电树枝贯透路径

图6 显微镜下电树枝情况

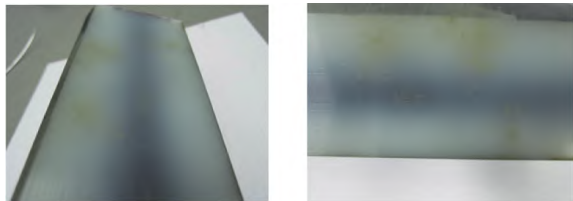


图7 应力锥主绝缘内电树枝情况，其他部位未发现电树枝

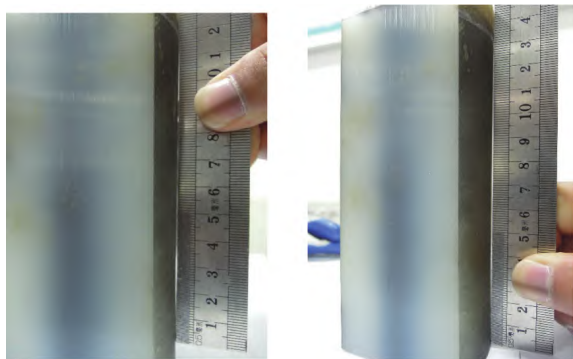


图8 应力锥部位电缆本体主绝缘外表面凹凸不平

电场强度分析

为了探究电缆终端施工缺陷对电缆电场的影响，依据终端厂家提供的110 kV YJZWCF4电缆终端图样，结合实际结构尺寸，采用有限元分析法对其进行电场仿真计算分析。

仿真结构示意图如图9所示，电场仿真计算范围取电缆终端中部的矩形区域，包括电缆附件应力锥罩、电缆附件应力锥、电缆外半导体层及电缆铜导体等结构，该区域为电场强度最高、变化最大区域。

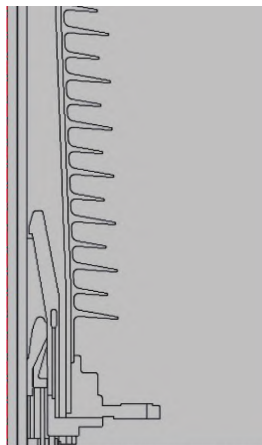


图9 仿真结构示意图

仿真过程中，对110 kV终端模型施加64 kV的电压，并依据长缆附件提供的参数，对仿真区域不同材料进行了定义。同时，针对电缆应力锥位置本体主绝缘交界面打磨良好以及打磨不平等现象分别进行电场仿真。

1. 电缆外半导体层过渡打磨良好时

此时，电缆终端应力锥与电缆主绝缘紧密贴合，电缆终端电势图如图10所示，电缆终端电势等位线图如图11所示。从图中可以发现其等位线均匀分布，未发现明显电场畸变点。

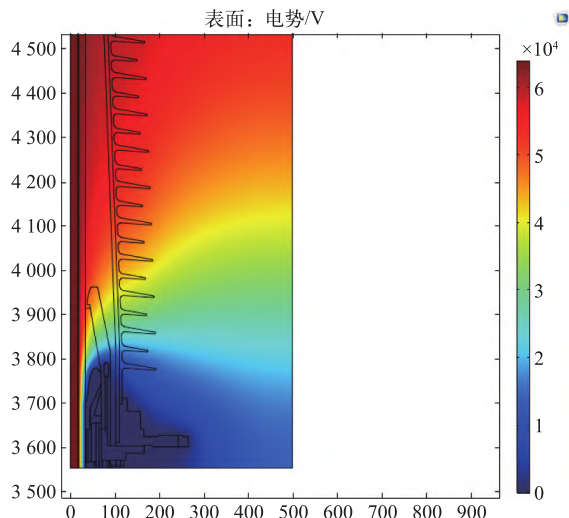


图10 电缆终端电势分布（打磨良好时）

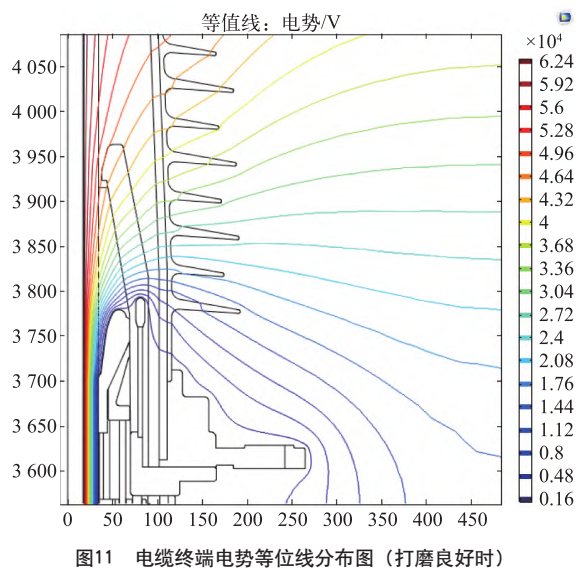


图11 电缆终端电势等位线分布图(打磨良好时)

110 kV终端电场强度示意图如图12所示,从仿真结果中可以发现,电场强度最大点位于电缆本体主绝缘中,值为5.2 kV/mm,小于GB/T 11017—2014《交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件》额定电压110kV $U_m=126$ kV标准规定的交联聚乙烯击穿场强22 kV/mm。应力锥绝缘中电场最大值为2.4 kV/mm,小于长缆附件提供的三元乙丙材料的击穿场强32 kV/mm。

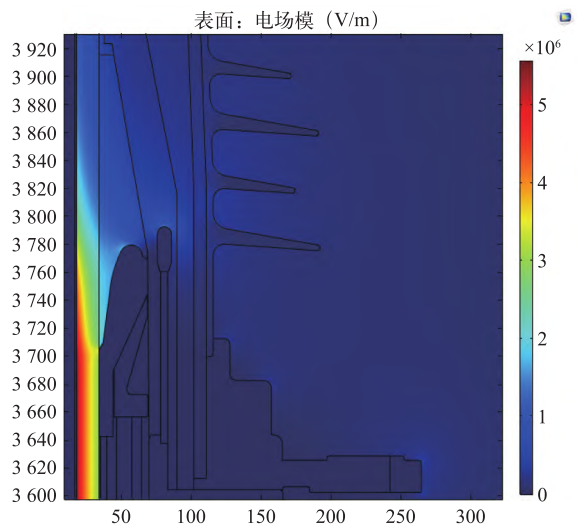


图12 电缆终端电场强度分布图(打磨良好时)

2. 电缆外半导体层过渡打磨不良时

此时,电缆终端应力锥与电缆本体主绝缘贴合不良,会在电缆本体主绝缘与应力锥绝缘交界面存在微小气隙。此时电场强度如图13所示,在气隙处电场强度最大,为5.3 kV/mm,大于空气击穿场强

会导致局部放电出现。

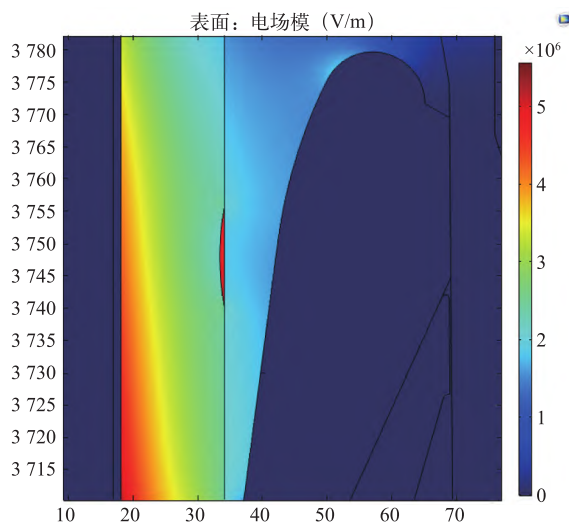


图13 电缆终端电场强度分布图(打磨不良时)

故障原因分析

故障电缆性能检测结果表明电缆主绝缘性能符合标准要求,解体过程中仅仅在应力锥部位的电缆本体主绝缘内发现大量电树枝现象,另外发现在施工过程中,应力锥部位电缆本体主绝缘存在打磨缺陷,出现凹凸不平情况。当电缆应力锥部位电缆本体主绝缘存在打磨不平时,会导致电缆应力锥与主绝缘交界面存在气隙,在运行电压作用下长期存在局部放电,导致绝缘快速老化,形成电树,最终导致击穿。

结束语

电缆终端存在施工工艺缺陷,电缆应力锥部位主绝缘处打磨不平导致电缆主绝缘及电缆应力锥交界面局部放电现象增加、绝缘性能下降,从而导致电树枝形成,进而导致击穿。

建议加强电缆终端制作单位工艺技术水平,切实提高电缆附件现场制作质量;加强电缆终端制作现场技术监督工作,仔细核查电缆外半导体层及主绝缘过渡平整性等关键技术参数。建议针对同批次在运电缆终端进行排查,采用电缆局放重症监护等装备进行局部放电情况实时监测,发现局放量有增大趋势时,应及时进行更换。**EA**

(收稿日期: 2021-09-05)

(下转第59页)

和输出频率成反比，在运用V/f控制方法进行控制时，要注意输出的频率，该方式主要以控制输出频率实现微电网控制，要确保输出频率在控制范围内，当微电网中的频率或电压发生变化时，可以通过V/f方式调节，实现电网的稳定运行，提供更加安全可靠电能。

2. PQ控制

该控制模式与V/f控制模式类似，以控制有效功率为主，达到微电源并网的控制目的。在整个控制过程中，操作人员需要具备较高的操作技术及专业能力。在进行控制时，必须要提前做好对无功功率及有功功率数值的设定，采取这种措施是为了减少微电网在运行中产生的数据报错问题。当然在微电网运行中，不仅要关注内部系统运行变化，还要关注外部控制系统状态，使外部控制系统达到可控范围，与实际情况相差不大，为相关人员提供重要的控制依据，更好地运用电流调节器控制微电网。在整个控制模式中，能够有效控制功率值，所以在进行电流调节器控制时，需要做好对轴的分量配备工作。

结束语

在当前社会发展下，电能资源已成为推动社会发展的保障，现如今，微电源技术不断改革创新，

全面提高了微电源并网的安全性和可靠性，这种技术的创新能够全方位降低环境污染和能源消耗问题，是符合我国当前发展的重要举措，因此，在微电源并网过程中，需要做好并网控制，全面提高电网运行稳定性，从而推动我国电力事业的长足发展。**EA**

(收稿日期：2022-07-20)

参考文献

- [1] 陈萌. 新能源电网中微电源并网的控制方法[J]. 河南科技, 2019(29): 3.
- [2] 蔡嘉隽, 薛景, 黄志芳, 等. 新能源电网中微电源并网的控制方法探讨[J]. 产业与科技论坛, 2017, 16(17): 2.
- [3] 杨曦, 石梦雪. 浅谈新能源电网关于微电源并网控制的相关策略思考[J]. 中国战略新兴产业, 2018(30): 50.
- [4] 罗微, 谭锡林, 蔡莹, 等. 面向智能电网的自适应调度管理机制研究[J]. 电气应用, 2021, 40(12): 56-60, 65.
- [5] 戴志辉, 鲁浩, 刘媛, 等. 含多微电网的主动配电网多层多时间尺度能量管理综述[J]. 电气应用, 2020, 39(7): 12-23, 30.

(上接第49页)

参考文献

- [1] 罗俊华, 杨黎明, 姜芸, 等. 电力电缆运行故障及试验综述[J]. 电力设备, 2004, 5(8): 4-8.
- [2] 魏前虎, 陈腾彪, 罗智奕, 等. 多起 220 kV 电缆中间接头故障分析[J]. 电缆技术, 2015(2): 34-38.
- [3] 罗俊华, 邱毓昌, 杨黎明. 10 kV 及以上电力电缆运行故障统计分析[J]. 高电压技术, 2003, 29(6): 14-16.
- [4] 王东海, 吴健. 高压电缆接地线安装质量引起的故障分析[J]. 电线电缆, 2005(1): 34-35.
- [5] 惠宝军, 傅明利, 刘通, 等. 110 kV 及以上电力电缆系统故障统计分析[J]. 南方电网技术, 2017, 11(12): 44-49.
- [6] 周远翔, 聂琼, 姜绿先, 等. 针尖曲率半径对硅橡胶电树枝老化特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 27-32.
- [7] 陈向荣, 徐阳, 王猛, 等. 高温下 110 kV 交联聚乙烯电缆电树枝生长及局部放电特性[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 645-654.
- [8] 贾欣, 刘英, 曹晓珑. XLPE 电缆缺陷尺寸分布对电树枝起始的影响[J]. 高电压技术, 2003, 29(10): 7-8, 43.