高压电缆常见绝缘缺陷成因及处置对策分析

张浩东

南水北调中线信息科技有限公司　北京　100000

摘　要：高压电缆是大型引水工程供配电系统的必要组成部分，在很大程度上决定了整个工程能否正常供水的问题。本文选取某大型引水工程供配电系统 2020—2024 年高压电缆运行情况作为研究对象，根据实际情况发生的故障以及一些常见的故障现象来探讨高压电缆绝缘缺陷产生的主要原因有五点，即绝缘老化、施工不良、过电压冲击、外力破坏以及运行环境差等。随后，从加强预防性试验检查工作、改善运行维护方法、提高接头制作质量三个方面提出解决措施。这些方法的应用使该工程高压电缆故障率从原来的 40.76% 下降到现在的 25.00%，效果明显，可以为类似工程项目高压电缆运维管理工作起到一定的指导作用。

关键词：高压电缆；绝缘缺陷；电缆接头；故障原因；运维措施

引言

某大型引水工程供配电系统以 35kV 高压电缆为主，在总干渠右岸架空敷设，同时在交叉跨越处使用阻燃交联聚乙烯绝缘、低碳钢带或细钢丝铠装高压地埋电缆。这种电缆具有良好的绝缘性能、耐温、阻燃以及防电磁干扰能力，使用寿命大于 30 年。但是实际运行过程中由于接头制作问题造成使用寿命远低于电缆本身，在地下敷设又无法直观发现内部问题[1]。特别是需要穿过建筑物处需安装较多接头的地方，发生故障的概率极大，导致密封不良，进水，减弱机械强度并且增加了查找以及维修难度。为了保证供电安全性必须加强巡视工作。根据 2020-2024 年故障情况以及典型事例进行归纳总结高压电缆常见的绝缘问题及其产生的原因提出解决方案并取得良好效果希望可以给类似工程项目带来一定帮助。

1 故障统计与问题分析

1.1 故障总体情况

根据统计，在此期间该工程供配电系统的故障停电共有 157 起，而由于高压电缆故障造成的故障停电有 64 起，占所有故障停电次数的比例是 40.76%，各年的具体情况见表 1。

表 1 ：2020—2024 年故障停电统计表

序号	年份	停电次数	电缆故障次数	电缆故障停电占比
1	2020 年	54	22	40.74%
2	2021 年	40	18	45.00%
3	2022 年	24	11	45.80%
4	2023 年	23	9	39.13%
5	2024 年	16	4	25.00%
总计		157	64	40.76%

从表 1 可以看出，在 2020 ~ 2024 年期间，高压电缆故障导致的停电次数以及所占比例逐年降低，特别是到 2024 年电缆故障所占的比例已经降低到 25.00%，说明近年来对电缆问题进行处理取得一定效果。但是从这五年的总和来看，电缆故障仍然占比较大，为 40.76%，说明高压电缆仍然是造成供电稳定性的一个重要原因，必须继续加强管理。

1.2 故障部位与类型分析

根据检测结果以及现场实际情况，导致停电事故的电缆故障种类繁多。总结了高压电缆容易出现故障的位置及其原因如表 2 所示。

表 2 ：故障详情统计表

序号	故障部位	故障次数	故障类型	故障原因	处置措施
1	高压电缆 T 型接头	4	绝缘击穿单相接地	绝缘层老化、工艺缺陷	重新制作电缆 T 型接头，无预留则更换高压电缆。某分水口因 T 型接头击穿造成高压柜损毁，重新更换高压柜和 T 型接头
2	户内终端头	9	绝缘击穿单相接地	过电压、工艺缺陷	重新制作电缆终端头，无预留则更换高压电缆

续表：

序号	故障部位	故障次数	故障类型	故障原因	处置措施
3	户外终端头	27	绝缘击穿，单相接地或两相接地	过电压、绝缘层老化、工艺缺陷	重新制作电缆终端头，无预留则更换高压电缆
4	中间接头	44	绝缘击穿，单相接地或相间短路加接地	过电压、绝缘击穿、工艺不良、电缆敷设环境恶劣造成电缆进水等	重新制作电缆中间接头，部分由于电缆无法提供足够的空间而采用热缩法或者更换电缆
5	电缆本体	3	绝缘受损击穿	外界施工机械破坏、地面沉降等地质活动	更换电缆或制作中间接头

从表 2 可见，高压电缆故障主要发生在接头、终端处。一是中间接头故障 44 次，占 68.75%，最多，主要是由于过电压、绝缘击穿或者施工不良引起，而且由于没有余量，所以修复困难，费用较高；二是户外终端头故障 27 次，占 42.19%，次之，主要是由于过电压、老化或者施工不良等原因造成的，表现为接地或者短路等；三是户内终端头故障 9 次，其中 T 型接头 4 次；虽然数量不多，但是 T 型接头故障严重，例如某分水口事件导致高压柜损坏以及损失惨重；四是电缆本身只发生 3 次故障，不到 5%，说明该电缆产品质量较好。

2 高压电缆绝缘缺陷成因分析

2.1 绝缘层老化

长期运行中交联聚乙烯发生物理形态劣化（变硬变脆、膨胀起泡）、绝缘电阻下降、介质损耗增加、机械抗拉强度以及伸长率下降；内部产生气隙或者裂缝，在高电压下产生局部放电，放电产生的热量以及化学产物促进其恶化[2]。老化是 T 型接头、户外终端头的主要原因，在中间接头中常常由过电压或者制造工艺不良引起。

2.2 施工工艺缺陷

是由于人为主观原因造成的，而以接头制作最为显著。常见问题有：半导电层剥离不当造成主绝缘有刀痕并且有杂物；主绝缘以及半导电层未倒角或者倒角不符合要求，应力锥压接位置与设计位置偏差较大，造成电场集中，产生局部放电；绝缘层包绕不紧密，存在气隙或杂物。密封不良导致接头进水受潮，在户外终端接线端子处未进行密封而导致线芯进水后沿内部进入 T 型接头发生击穿。另外就是弯曲半径过小引起机械应力集中，时间长会造成绝缘破损、屏蔽层脱离。

2.3 过电压

单相接地故障导致的过电压使场强大于设计值而对绝缘进行直接击穿或者产生局部放电、碳化分层等，在未击穿的情况下反复作用会在绝缘内部产生微小空隙（如气泡）成为隐患[3]。表 2 表明过电压是引起户内终端、户外终端以及中间接头故障的主要原因并且经过老化和工艺后会使击穿概率大大增加。

2.4 外力损伤

敷设或者检修过程中使用工具不正确、用力过大导致绝缘层被扯破或者芯线断裂；运行期间由于土建、绿化、道路建设等原因造成电缆被挖断或者碾压，从而破坏外护套及铠装。自然因素造成的例如地面下沉引起的拉伸压缩应力等。地下敷设电缆回填时有锋利石子、无细沙或者未加保护盖板，在护层损伤之后不能有效密封而进水导致生锈，从而使电缆绝缘下降。表 2 中的电缆本体故障 3 起即为此类情况。

2.5 运行环境恶劣

部分电缆未留有足够的余量，在不得已的情况下使用中间接头进行连接并埋设在地下，没有设置接头井保护，容易进水；低洼地段接头井内有积水浸泡，薄弱的防水部位受到腐蚀，水具有良好的导电性能而破坏绝缘层起到隔离作用，从而引起“进水—腐蚀—击穿”的连锁反应。如表 2 所示，“运行环境差导致电缆进水”是造成中间接头损坏的一个重要原因。

3 综合处置对策

3.1 预防性检测技术措施

在日常巡检及春检期间，运维人员借助绝缘电阻测试仪、超低频耐压试验设备、红外热成像仪、局放测试仪、超声波成像设备等仪器设备，检查电缆本体与终端头附件是否有破损、老化、龟裂或过热变色现象，检查接头处是否松动、氧化或存在放电痕迹，检查电缆本体绝缘性能是否良好，发现异常及时处理。

第一，主绝缘绝缘电阻测量。对 35kV 电缆使用 2500V 或 5000V 绝缘电阻测试仪定期测量电缆绝缘电阻，标准要求绝缘电阻值不低于 1000MΩ。依据标准包括《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》（GB50150—2016）、《电力设备预防性试验规程》（DL/T596—2021）和《供配电系统检修试验规程》（Q/NSBDJT-015025—2023）。

第二，超低频耐压试验。根据国家标准《GB50150—2006 电气设备交接试验标准》，在现场试验条件不满足时，可使用 0.1Hz 超低频高压对电气设备进行交流耐压试验。对于 35kV 电缆，交接试验时施加 3U0 电压，加

压 60 分钟；预试试验时施加 2.1U0 电压，加压 5 分钟。依据标准为《供配电系统检修试验规程》（Q/NSBDJT-015025—2023）和《华北电网电力设备交接和预防性试验规程》。

第三，局部放电检测。通过超声波局放测试仪等设备进行检测，检测目标及环境的温度宜在-10℃至+40℃范围内，空气相对湿度不宜大于 90%，室外不应在有雷、雨、雾、雪的环境下进行检测。超声波局部放电检测设备技术参数应满足测量量程在 0dB 至 55dB，分辨率优于 1dB，误差在 ±1dB 以内。检测时一般通过接触式超声波探头在电缆终端部位进行检测。依据标准为《电力电缆线路试验规程》（Q/GDW11316—2014）。

第四，红外热成像检测。电缆线路红外测温部位通常为电缆终端以及电缆导体与外部金属连接处，电缆中间接头具备检测条件的可以开展红外热成像带电检测，不具备条件的可以采用其他检测方式代替。判定标准为：电缆导体与外部金属连接的同部位相间温度差超过 6K 应加强监测，超过 10K 应停电检查；终端本体同部位相间温度差超过 2K 应加强监测，超过 4K 应停电检查。依据标准为《带电设备红外诊断应用规范》（DL/T664—2016）和《电力电缆线路试验规程》（Q/GDW11316—2014）。

3.2 运行维护技术措施

第一，做好电缆敷设环境巡视工作。定时观察电缆敷设路径附近有无机械设备，有无外力开挖迹象。下雨后注意检查电缆接头井内水位，对电缆井进行防水处理并及时排水。

第二，改善电缆敷设条件。新换的地埋电缆严格按照要求施工，在整个过程中做好保护工作，防止过度弯折或者受到外力破坏。对埋设在地下的电缆中间接头进行改造，增加电缆接头井，提高电缆中间接头的运行环境。

第三，改善接头防水条件。对于潮湿或者易积水的电缆井，在电缆井内设置桥架，让电缆中间接头距地面有一定高度，避免水浸；在新做电缆接头处做好防水工作，可以使用电缆接头注胶盒，保证电缆接头良好防水性能。

第四，提高接头制作水平。严格按照技术要求及工艺规程制作电缆接头，在预处理、绝缘处理、密封防水、屏蔽恢复四个主要方面，按工艺规定做到每一步都细致认真。需将压接管压接后形成的突出部位锉掉，以免划伤绝缘层或者产生应力集中而使接头不合格。

4 治理成效

以上一系列技术和方法的应用，取得良好的效果，在巡视以及定期检查过程中，红外测温和局部放电测试成为查找问题的有效工具，运行人员巡视时，通过对预防性试验、红外测温、局部放电测试等进行分析比较找出问题及时处理，在此期间，共发现并消除高压电缆绝缘老化、放电严重的隐患 96 起，制作新的户外电缆终端头 97 只、电缆中间接头 5 只、户内电缆终端头 16 只，更换高压电缆 24 根。采用新技术、提高运维质量和管理水平等一系列措施后，高压电缆故障率从以前的 40.76%降低到 2024 年的 25.00%，电缆安全性得到很大提高，供电可靠性也不断提高，对整个供配电系统的安全稳定运行起到重要的作用。

5 经验总结

电缆故障预防的关键是保证接头工艺质量和做好防水密封工作，从根本上减少设备故障发生的几率，在此基础上进行定期巡视检查，“预防为主，发现及时，处理迅速”的原则十分重要[4]。在技术方法上，红外测温应以电缆终端和导体连接处为首选部位，在电缆井中或者可以看见的地方中间接头可以用红外测温进行检测，在无法准确定位局部放电位置的情况下可用超声波成像仪进行检测，提高故障查找的速度以及精度。

结束语

高压电缆绝缘缺陷是由诸多方面原因共同导致的，而接头处工艺问题以及环境影响是主要原因。结合某大型引水工程项目供配电系统 2020-2024 年实际情况及发生故障情况，分析造成绝缘老化、工艺缺陷、过电压冲击、外力损伤、运行环境恶劣五方面原因，并提出以提高接头质量为重点，以定期检查为先兆，以改善工作环境为辅助的一系列措施。实施后，该方案对减少高压电缆故障起到一定作用，使其由原来的 40.76%降至现在的 25.00%，大大提高了电力供应稳定性。这些经验教训值得类似高压电缆项目管理者学习与应用。

参考文献

[1] 周凯, 李天华, 杨帆, 等.XLPE 电缆绝缘老化机理及诊断技术研究综述 [J]. 高电压技术,2022,48(5):1689-1702.

[2] 刘刚, 王有元, 陈伟根, 等. 基于超低频介损的 XLPE 电缆绝缘老化评估方法研究 [J]. 电工技术学报,2021,36(12):2514-2523.

[3] 赵学风, 李鹏, 张乔根, 等. 高压电缆局部放电检测与绝缘状态评估技术进展 [J]. 电网技术,2023,47(2):678-689.

[4] 陈维江, 韩彬, 李国富, 等. 电力电缆接头故障机理与防护技术研究 [J]. 高电压技术,2022,48(11):4256-4267.