

# 220 kV 高压预制式电缆中间接头故障分析与处理

刘凤莲<sup>1</sup>, 薛志航<sup>1</sup>, 邓元实<sup>1</sup>, 朱轲<sup>1</sup>, 张涵轶<sup>2</sup>, 杜颢<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 国网成都供电公司, 四川 成都 610041)

**摘要:** 以某 220 kV 高压电缆中间接头在试送电、交流耐压试验过程中多次发生绝缘击穿的异常现象为研究对象, 对比分析了接头内的放电通道和施工工艺等问题。故障接头解体后, 基于放电通道均起始于导体接续管外的半导体带边缘处, 均存在沿面放电等特征, 认为供应商在关键部位变更产品的施工工艺, 即绝缘预制件的扩径方法、导体接续管外的处理工艺, 造成产品安装后无法达到设计性能, 是造成本次事故的主要原因。

**关键词:** 高压电缆; 预制式电缆中间接头; 扩径工艺; 故障分析

中图分类号: TM854 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2018)01-0044-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.01.010

## Fault Analysis of 220 kV High-voltage Prefabricated Cable Joint and Its Treatment

Liu Fenglian<sup>1</sup>, Xue Zhihang<sup>1</sup>, Deng Yuanshi<sup>1</sup>, Zhu Ke<sup>1</sup>, Zhang Hanyu<sup>2</sup>, Du Hao<sup>2</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Chengdu Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** The insulation breakdown of 220 kV high-voltage prefabricated cable joint, which occurs several times during the trial line charging and AC voltage withstand test process, is analyzed. The comparisons of discharge channels, installation procedures etc. are done to find out the main reason of joint faults. After the disassembly of broken-down joints, similar features are found. Discharge channels starts at the edge of semiconducting band which is winded around the metal connecting pipe, and surface discharges on the main insulation of cable are found in each broken-down joint. The installation procedure in critical parts is found to be changed, such as the expanding process of prefabricated cable joint and the treatment process of metal connecting pipe. Based on these phenomena, it is concluded that the change of installation procedure in critical parts, which leads to poor performance of the prefabricated cable joint after installation, is the main reason of insulation breakdown.

**Key words:** high-voltage cable; prefabricated cable joint; expanding process; fault analysis

## 0 引言

高压电力电缆在城市地下电网、发电厂、变电站等场所应用广泛, 但近年来, 随着新建电缆工程的快速扩张, 高压电缆及接头故障频发, 严重影响了电网的安全可靠运行。历数近年的几起重大电网事故, 均由电缆故障引起, 造成的经济损失巨大、社会影响严重<sup>[1-8]</sup>。如 2013 年 6 月上海 500 kV 三静 5191 电缆线路接头发生故障击穿引起地铁停运; 2016 年 6 月陕西 110 kV 韦曲变电站 35 kV 出线电缆接头故障引起电缆沟失火; 2016 年 8 月大连 66 kV 电缆接

头故障后引起同通道内电缆烧损短路跳闸等。

由于电缆及附件的绝缘设计裕度较大而有效的检测方法少, 安装过程中产生的潜在缺陷, 通常难以通过绝缘电阻、交流耐压等常规交接试验发现, 此类高压电缆接头若运行于城市电网的重要干线中, 将严重威胁着电网的安全稳定。下面以某地由某附件供应商统一安装的 220 kV 电缆中间接头造成的多次绝缘击穿故障为研究对象, 对比分析了接头的解体情况和施工工艺等问题, 深度剖析了电缆线路的中间接头频繁出现绝缘击穿的根本原因, 以期为高压电缆的安装、管理提供借鉴参考。

## 1 电缆中间接头故障基本情况

某220 kV甲、乙电缆线路为两变电站的共通道联络线,互为备用线路,线路均敷设于隧道内,型号为YJLW02-127/220-1×2 000 mm<sup>2</sup>,各含中间接头5组以及GIS终端和户外终端各1组。

甲线3号电缆接头B相在线路新投时,发生绝缘击穿故障,接头起火,并引起临近电缆损伤。故障后,对修复后的电缆线路按照国家电网公司企业标准Q/GDW 11316-2014《电力电缆线路试验规程》的相关规定,重新进行1.7U<sub>0</sub>(216 kV)耐压试验时,甲线5号接头C相(非抢修接头)在升压至151 kV时发生绝缘击穿,A、B相电缆通过耐压试验;而乙线5号接头A相(非抢修接头)在升压至189 kV时发生绝缘击穿。甲线3号电缆接头烧损严重,已无法辨识接头内放电通道,如图1所示。



图1 甲线3号电缆接头B相烧损严重

经核对,甲、乙线电缆接头均由同一电缆附件供应商A供货,并负责安装。但甲、乙线实际采用的并不是A供应商生产的硅橡胶绝缘预制件,而是采用B供应商生产的以三元乙丙橡胶为主绝缘的预制件。

## 2 电缆中间接头的解体分析

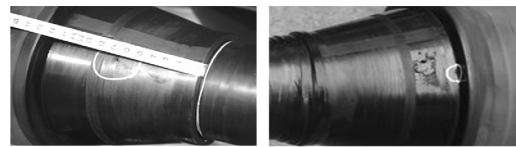
由于甲线3号故障电缆接头烧损严重,难以辨识放电通道,因此选取在耐压试验过程中发生绝缘击穿的甲线5号接头C相、乙线5号接头A相进行了对比分析。

### 2.1 电缆中间接头的击穿现象分析

解剖过程中发现,甲、乙线5号接头外观均完好,接地铜壳内防水胶未见破损,去除接地网外的绕包带材后,发现绝缘预制件半导体层断开侧的端部存在绝缘击穿点,击穿点孔径均较小,如图2所示。

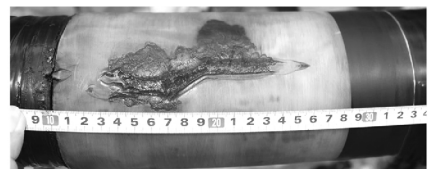
接头内电缆表面放电痕迹如图3所示。放电点均起始于电缆主绝缘断口与金属导体连接处,经绝缘预制件,沿预制件与电缆主绝缘间的界面延伸发

展,在主绝缘表面、预制件内表面均形成明显的放电发展通道。

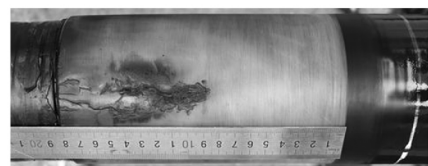


(a) 甲线5号电缆接头 (b) 乙线5号电缆接头

图2 甲、乙线耐压试验中形成的击穿点



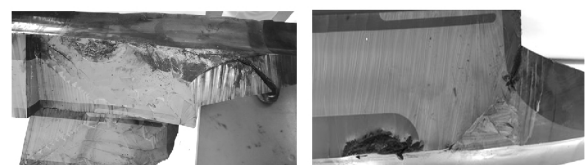
(a) 甲线5号电缆接头



(b) 乙线5号电缆接头

图3 甲、乙线故障接头内电缆表面烧损情况

对绝缘预制件放电位置进行切片观察,可见放电点均起始于高压导体连接管半导体带绕包端部与预制件内半导体屏蔽体的接触处,当电弧发展到预制件靠近零电位的端部半导体体后,由于绝缘距离不足,电弧经预制件内部的主绝缘三元乙丙橡胶,形成贯穿性放电通道,如图4所示。



(a) 甲线5号接头

(b) 乙线5号接头

图4 甲、乙线电缆接头故障击穿面

### 2.2 电缆及接头的施工安装工艺分析

事故发生后,根据供应商先后提供的A、B两种电缆接头安装说明书,发现甲、乙线电缆接头采用的施工工艺与供应商B的初始安装工艺存在差异,在关键部位的施工工艺存在变动。

#### 2.2.1 电缆接头关键部位的施工工艺变更

##### 1) 绝缘预制件的扩径方法不同

供应商A对供应商B生产的三元乙丙橡胶绝缘预制件扩径方法,沿用了其对硅橡胶预制件的扩径方法,即在对电缆预处理后,通过导向锥,用链条葫芦将预制件拉到电缆一侧,压接好导体接续管、包

绕导电带后,再将预制件拉到中间连接处,扩径方法如图5所示。

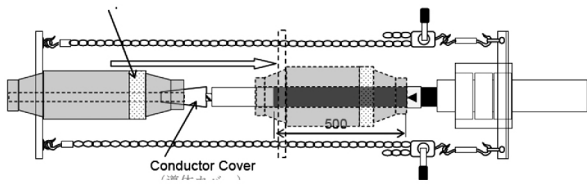


图5 供应商A对绝缘预制件的扩径方法

供应商B采用的是通过专用扩张工具对预制件预扩径后,密封保存,并于4h内使用。扩张时,沿着导引杆,套好锥头、扩张管,并把导引杆支撑固定到小车上。待处理完中间续接管后,将预扩张的绝缘套装在电缆上,定位准确后,拔出扩张管,使预制件收缩在电缆上,其扩径示意图见图6。

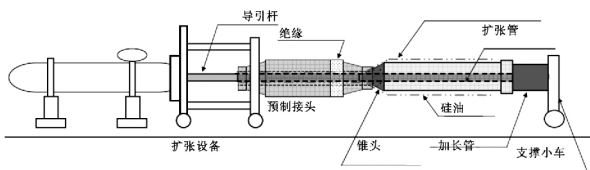
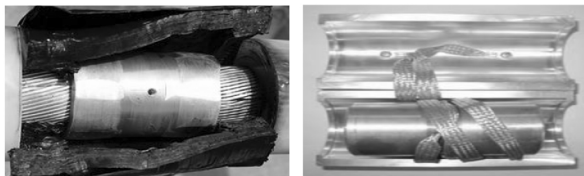


图6 供应商B对绝缘预制件的扩径方法

绝缘预制件扩径方法的差异会影响橡胶件的收缩性和受力的均匀性,且拖拉方式容易将预制件内侧未处理干净的杂质带到绝缘表面,引起沿面放电。

### 2) 金属导体接续管外的处理工艺不同

供应商A沿用其绕包带材的旧工艺,即甲、乙线电缆接头仍是在导体连接管外侧绕包导电带,如图7(a)所示。接续管外采用导电带绕包的方式对安装人员的绕包工艺要求高,若绕包不良而形成较多缝隙,则局部区域绝缘电阻偏大,会改变导电带内的电场分布,引起局部放电。而供应商B的电缆接头采用的是在高压导体连接管外安装金属屏蔽罩形成等电位空间的处理方式,工艺相对简化,如图7(b)所示。



(a) A 供应商的工艺

(b) B 供应商的工艺

图7 金属接续管外处理工艺

此外,解体中发现乙线5号接头内绕包的导电带封口处已翘起,未按工艺要求将尾端压入已缠好的导电带下方,但不排除是在预制件扩径时拖

拉过程中造成的可能性。

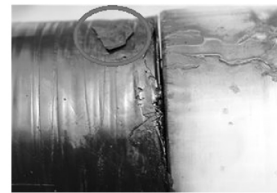
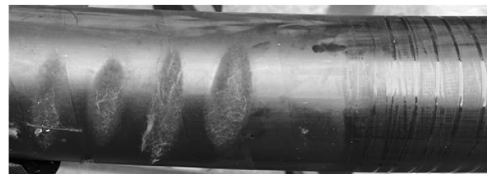


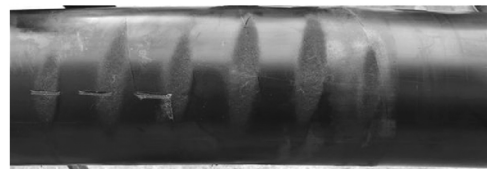
图8 乙线5号接头内导电包带封口翘起

### 2.2.2 电缆封铅工艺差引起本体灼伤

在乙线5号电缆接头解体过程中发现,接头两侧封铅处的电缆本体上均有铝护套压成的凹痕,电缆本体严重烧伤,见图9。烧灼现象说明接头安装人员对封铅工艺控制不佳,封铅时间过长,导致电缆过热、灼烧,长期运行后可能会引起本体击穿故障。



(a) 靠近长端侧电缆本体



(b) 靠近短端侧电缆本体

图9 乙线5号电缆接头封铅处电缆本体上烧灼痕迹

除以上问题外,经核对,甲、乙线5号接头的安装尺寸均在厂家工艺要求范围内,绝缘预制件均与电缆本体有效搭接,未见明显异常。

## 3 电缆接头产品设计、质量分析

在甲、乙线5号接头解体过程中,发现绝缘预制件中部和端部的半导电体与绝缘体的交界面情况不同。端部的绝缘材料与半导电体交界面为平直过度,用万用表粗测,绝缘材料电阻为 $\infty$ ,半导电材料电阻约为1~20 k $\Omega$ ,两种材料分界明显;而预制件中部的交界处基本平直,但表层略呈灰色波纹状,交界处的电阻约为2~30 M $\Omega$ ,介于半导电体与绝缘体之间,为生产过程中打磨所致。打磨处理后,若残留碎屑未清理干净,容易在预制件扩张的拖、拉过程中将导电颗粒等杂质带到电缆绝缘表面,引起沿面放电。

在事故的后续分析处理中,尝试对绝缘预制件

材料进行检测,但由于三元乙丙橡胶材料性质偏硬、颜色较深,通过切片等进行材料分析的效果不佳。虽材料性能检测受限,但结合 B 供应商生产的电缆接头在国内电网运行多年故障发生率较低、总体运行情况较好的客观事实,基本可排除该产品在设计、质量方面的问题。

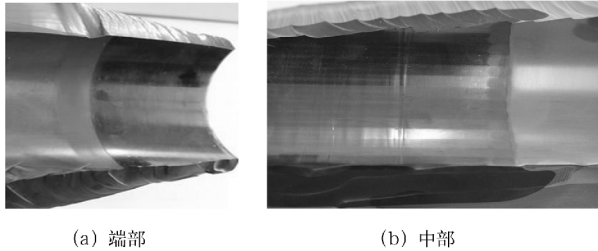


图 10 乙线接头内部绝缘材料与半导体界面

#### 4 电缆及接头故障的主要原因分析

根据两个电缆接头的解体情况,绘制对应的放电击穿通道示意图如图 11 所示。放电点均起始于高压导体连接管半导体带端部与预制件内半导体屏蔽接触处,高压电位经半导体屏蔽引至圆弧形端部后,沿预制件与电缆本体间的界面形成沿面放电。当电弧发展到预制件靠近零电位的端部半导体后,由于绝缘距离不足,电弧经预制件内部的主绝缘三元乙丙橡胶,形成贯穿性放电击穿通道。

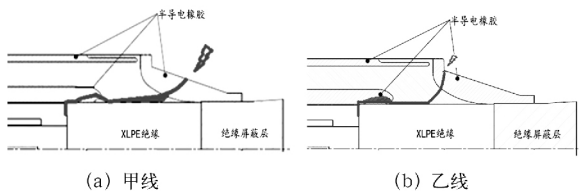


图 11 甲、乙线 5 号电缆接头击穿通道示意图

故障接头解体后,发现击穿后的接头内部现象类似,放电通道类似,在电缆本体表面和预制件内形成的烧蚀痕迹也类似,因此判断事故为同一原因引起。基于放电均起始于导体接续管外半导体带边缘处、电缆主绝缘表面均存在沿面放电的特征,认为绝缘预制件的扩径方法、导体接续管外的工艺变更与接头多次在耐压试验中发生击穿有主要关系。

三元乙丙橡胶绝缘预制件的生产过程中,由于材料较硬,成型后存在的毛边需打磨处理。若打磨后的残留碎屑未清理干净,容易在预制件扩张的拖、拉过程中将半导体颗粒等杂质带到电缆绝缘表面,

引起沿面放电。因此接头产品的生产工艺须与其安装方法相匹配,在未经供应商 B 或其他正规检测机构认可的情况下,随意变更电缆接头的关键施工工艺,无法保证绝缘预制件安装后仍能达到设计性能。

根据 GB/T 18890-2015《额定电压 220 kV ( $U_m = 252$  kV) 交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件》的相关要求,当包含附件安装工艺在内的制造工艺发生改变,且这种改变可能会对产品性能产生不利影响时,应对电缆系统重新进行型式试验,否则不应直接应用于电缆工程。

#### 5 结 论

1) 220 kV 甲、乙线电缆接头故障率高,解体现象类似,放电击穿通道一致。基于放电均起始于导体接续管外半导体带边缘处、均存在沿面放电的特征,认为供应商 A 在关键部位随意变更供应商 B 的施工工艺,即绝缘预制件的扩径方法、导体接续管外的处理工艺,造成产品安装后无法达到设计性能,是造成本次事故的主要原因。

2) 电缆接头的生产工艺须与其安装方法匹配,当包含附件安装工艺在内的制造工艺发生改变,且这种改变可能会对产品性能产生不利影响时,应对电缆系统重新进行型式试验,否则不应直接应用于电缆工程。

3) 建议尽快建立健全电力行业内电缆接头制作的培训、取证、认证等系列管理模式,加强对接头制作工艺过程的有效监督管理,从源头降低电缆接头故障发生率。

4) 鉴于本次电缆接头故障引起同通道内其他邻近电缆线路烧损,建议在多回高压电缆运行的电缆通道内,完善防火防爆措施,对在建、新建、迁改的高压电缆线路,在投运前应同步完成通道内防火防爆措施的全覆盖。此外,建议在物质采购环节,增加在高压电缆接头内须使用非可燃性填充胶的要求,从源头降低电缆及通道内火灾风险,避免电缆群伤。

#### 参考文献

[1] 段肖力,汤美云,林峰,等. 220 kV 电缆中间接头主绝缘击穿事故分析[J]. 高压电器, 2009, 45(16): 142-144.

[2] 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.

[3] 杨代勇,刘俊博,张益云,等. 66 kV 电缆中间头击穿故障诊断及电场仿真分析[J]. 吉林电力, 2016, 44(5): 45-47.

[4] 姜芸,闵红,罗俊华,等. 220 kV 电缆接头半导体尖端缺陷的局部放电试验[J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2657-2661.

[5] 何泽斌,熊俊,王晓兵,等. 一起 220 kV 交联聚乙烯电缆中间接头故障原因分析及运行建议[J]. 广东电力, 2011, 24(4): 87-89.

[6] 黄顺涛. 一起电力隧道中 220 kV 电缆接头爆炸机理的研究及应对措施[J]. 企业技术开发, 2015, 34(36): 82-85.

[7] 申积良,罗俊华,汤美云,等. 110 kV 电缆终端头爆炸

(上接第 38 页)

式同相供电系统的基本结构和原理的基础上,对交-直-交变流器展开了研究,得到以下结论:

1) 采用载波移相 SPWM 的交-直-交变流器的贯通式同相供电系统能够彻底取消分区所的电分相环节,改善了传统牵引供电系统中存在的电能质量问题,有利于高速铁路的发展;

2) 在同样容量的交-直-交变流器中,载波移相 SPWM 技术可以降低对电力电子器件耐压等级的限制,以达到节省成本的目的。

#### 参考文献

[1] B. Busco, P. Marino, M. Porzio, et al. Digital Control and Simulation for Power Electronic Apparatus in Dual Voltage Railway Locomotives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(5): 1146-1157.

[2] K. Hung-Yuan, C. Tsai-Hsiang. Rigorous Evaluation of the Voltage Unbalance Due to High-speed Railway Demands [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1998, 47(4): 1385-1389.

[3] R. A. Otto, T. H. Putman, L. Gyugyi. Principles and Applications of Static, Thyristor-controlled Shunt Compensators [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1978, PAS-97(5): 1935-1945.

[4] 王晖,吴命利. 电气化铁路低频振荡研究综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17): 70-78.

[5] 许志伟,罗隆福,张志文,等. 一种新型电气化铁道电能质量综合补偿[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 265-272.

[6] 游广增,马斌,朱毅. 牵引变压器接线方式对谐波和负序的影响研究[J]. 电气技术, 2014(3): 14-18.

[7] 李群湛,贺建闽. 电气化铁路的同相供电系统与对称补偿技术[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(4): 9-11.

[8] 李群湛. 同相供电系统的对称补偿[J]. 铁道学报, 1991, 13(s1): 35-43.

事故分析[J]. 高电压技术, 2005, 31(11): 74-75.

[8] 段建家,陈细玉,韦文榜,等. 110 kV 电缆接头故障分析及试验研究[J]. 湖南电力, 2017, 37(1): 63-65.

[9] GB/T 18890.1-2015, 额定电压 220 kV ( $U_m = 252$  kV) 交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件 第 1 部分: 试验方法和要求[S].

[10] 徐应麟. 电线电缆手册第 2 册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

作者简介:

刘凤莲(1986), 工程师, 主要从事电力电缆绝缘性能检测、状态评估、故障分析等工作。

(收稿日期: 2017-11-04)

[9] 贺建闽,李群湛. 用于同相供电系统的对称补偿技术[J]. 铁道学报, 1998, 20(6): 47-51.

[10] 吕晓琴,张秀峰. 基于有源滤波器的 V/x 结线的同相牵引供电系统[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(6): 73-78.

[11] 张睿. 贯通式同相供电系统电能变换器的研究[J]. 电气化铁道, 2012(4): 19-22.

[12] 常非,冯金博,赵丽平. 同相贯通牵引供电系统综合潮流控制器设计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(1): 54-58.

[13] Minwu Chen, Qun-zhan Li, Guang Wei. Optimised Design and Performance Evaluation of New Cophase Traction Power Supply System [C]. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC) 2009: 1-6.

[14] Zhao Y, Zhao L, Li Q. Some Key Problems on Cophase Traction Power Supply Device [C]. International Forum on Information Technology and Applications, IEEE Computer Society, 2010: 444-449.

[15] Shu Z, Xie S, Li Q. Single-Phase Back-To-Back Converter for Active Power Balancing, Reactive Power Compensation, and Harmonic Filtering in Traction Power System [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(2): 334-343.

[16] 王冬梅,王晨. 基于单台 YN,d11 变压器的同相 AT 供电系统[J]. 电气技术, 2014, 15(7): 18-21.

[17] 卓放,胡军飞,王兆安. 采用多重化主电路实现的大功率有源电力滤波器[J]. 电网技术, 2000, 24(8): 5-7.

[18] 林飞,杜欣. 电力电子应用技术的 MATLAB 仿真[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[19] 李群湛,贺建闽,解绍锋. 电气化铁路电能质量分析与控制[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2011.

作者简介:

郭晓宇(1970), 本科、高级工程师, 主要从事铁道供电相关研究工作。

(收稿日期: 2017-09-04)