

[电缆]

# 高压单芯电缆外护套烧蚀故障分析

文/国网湖南省电力公司经济技术研究院 刘顺成 王琛 李容嵩 陈国栋  
国网湖南省电力公司电力科学研究院 李欣

高压单芯电缆的接地系统一旦出现问题，其外护套将会产生环流或者悬浮电位，从而引发事故，对电缆造成严重危害。针对一起110 kV高压单芯电缆现场交接耐压试验外护套烧蚀事故，全面深入地调查事故现场，分析了外护套环流和悬浮电位放电的成因及机理，并结合现场及试验的具体数据客观剖析电缆外护套烧蚀事故的原因。考虑电缆现场交接试验及安全可靠运行的要求，提出预防高压单芯电缆接地事故的措施和建议。

电网是支撑国民经济和社会发展的基础产业，保障电网的安全稳定运行是电网不断完善发展的基础，而电力系统运行的可靠性主要取决于电气设备的工作可靠性。与架空线相比，电力电缆具有受环境影响小，传输性能稳定，安全性较高等优点，因此，在输变电线路中，高压、超高压交联电缆的使用越来越广泛，目前国内高压交联电缆通常采用单芯电缆。

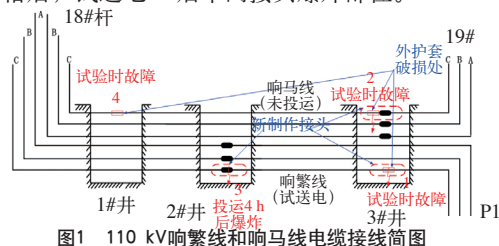
国内110 kV及以上电压等级单芯电缆的外护套一般采用交叉互联、两端接地或者一端接地的运行方式。近年来，由于高压单芯电缆接地系统被破坏而造成电缆外护套烧毁事故的报道并不少见。为保证电缆投运后能安全可靠地运行，《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》要求新竣工的电缆进行交流耐压试验，以对其敷设安装后的绝缘质量进行考核。因此，实际上外护套烧蚀事故不仅发生在运行的高压电缆上，在电缆投运前的交接试验现场也有发生。

针对高压单芯电缆外护套烧蚀问题，本文对某市110 kV响马线和响繁线电缆现场交接验收试验外护套烧蚀事故进行详细调研，进一步剖析了事故发生原因，并最终给出了此类问题预防及解决

的建议和措施。

## 事故概况

2017年7月，某市110 kV响马线18#杆至19#杆和110 kV响繁线18#杆至P1杆由架空线路改为电缆线路，电缆敷设安装结束按要求进行交接试验。试验人员在对110 kV响繁线和110 kV响马线进行交流耐压试验过程中，当电压升到128 kV并持续约10 min时，发现1#与3#电缆井内冒出大量浓烟，随即停止试验。经检查，发现110 kV响繁线C相和110 kV响马线A相外护套出现不同程度的烧损，图1为两条电缆线路的故障部位示意图。故障点1为响繁线C相耐压试验时外护套烧损部位，故障点2和4为响马线A相耐压试验时外护套烧损部位，故障点3为施工人员对响繁线C相故障处制作中间接头并且耐压试验合格后，试送电4 h后中间接头爆炸部位。



## 外护套烧毁原因分析

由于高压电缆导体截面大，绝缘层较厚，如果成缆后再加上填充及外护套，电缆整体外径及重量会非常大，不利于生产加工及运输，施工难度也会很大，故国内高压电缆普遍采用单芯结构，其主要构成包括导体、导体屏蔽、绝缘、绝缘屏蔽、缓冲阻水带、皱纹铝护套和非金属外护套（表面含半导体层），如图2所示。根据已有文献分析，电缆交接耐压试验中导致外护套烧损的原因主要有两类，下面将分别对其进行分析。

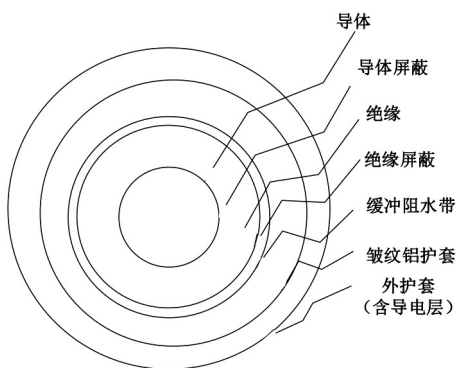


图2 单芯高压电缆结构

### 1. 外护套环流

当外护套出现多点接地，尤其在局部多点接地的外护套段表现尤为明显，此时外护套上将会流有较大环流过热导致外护套熔化和燃烧，GB 50217—2007《电力工程电缆设计规范》明确规定：交流单芯电缆线路正常感应电动势的最大值在未采取有效防止人员任意接触金属层的安全措施时，不得大于50 V。因此，在外护套上产生的电压较低，一般不会超过50 V，但由于外护套电阻较小，电流可达几十毫安甚至几百毫安，环流示意图如图3a所示。

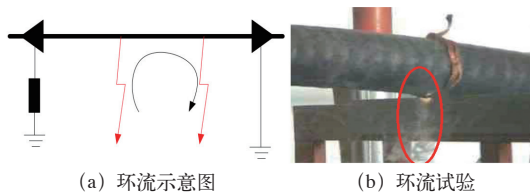


图3 外护套单端接地环流示意图

某文献通过交接现场故障以及实验室试验对电缆外护套因环流烧毁进行了试验研究，环流试验如图3b所示。研究表明：当外护套上所承受的电压为10~20 V时（此时电压远小于规范中的50 V），即可维持外护套对地放电，放电电流为15~32 mA，瞬时电流可达180 mA，击穿点不断有烟雾散出，当击穿电流较大时还会发生间歇性爆

燃，造成外护套局部烧蚀。

### 2. 悬浮放电

悬浮电位是指金属部件处于高压与低压之间，按其阻抗形成分压后的对地电位悬浮放电构成的，间隙一般比较固定。当外护套接地不良或未接地产生时将会产生悬浮电位，在外电压下，悬浮电位会造成外护套击穿对地放电，且由于外护套电阻较小，此时流过外护套的接地电流将很大，将造成外护套大面积烧损，对人身安全也会造成威胁。

#### (1) 悬浮电压的计算

电缆本身是容性负载，导体与金属护套（或金属屏蔽）可以看作电容的两个极。高压单芯电缆外护套表面均包含有半导体层，其主要作为电缆外护套绝缘试验的一个电极，电缆敷设安装后，其外护套表面半导体层与地（金属支架等）产生良好接触时，如果电缆金属护套不接地，此时导体与金属护套间、金属护套与地间形成一个串联的电容分压器，假设导体与金属护套间电容为 $C_1$ ，金属护套与地之间电容为 $C_2$ ，如果导体上施加电压为 $U$ ，则金属护套上会产生 $C_1$ 、 $C_2$ 对 $U$ 的分压 $U_1$ ，且每一点的电位相等，即悬浮电压 $U_1$ 。因此有

$$U_1 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U \quad (1)$$

式(1)即为悬浮电压计算公式。若电缆外护套表面半导体层由于各种原因与地(金属支架)未接触或接触不良时，如果电缆金属护套不接地，此时除了 $C_1$ 、 $C_2$ 外，还有金属护套与地及周围环境之间的空气杂散电容 $C_3$ ，则金属护套上产生 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 对 $U$ 的分压 $U_{11}$

$$U_{11} = \frac{C_1}{C_1 + C_x} U \quad (2)$$

此时 $C_2$ 、 $C_3$ 串联后再与 $C_1$ 串联分压，如果将 $C_2$ 、 $C_3$ 串联后的电容看作 $C_x$ ，即有式(2)。式

(1)中 $C_1$ 、 $C_2$ 根据厂家提供电缆结构参数，由电缆电容计算式(3)求取，此时电容是定量，悬浮电压主要与导体施加电压成正比。式(2)中 $C_x$ 的计算需要根据电缆敷设现场实际空间求取 $C_3$ ，此时电容是变量，计算比较复杂，而且 $C_2$ 、 $C_3$ 串联后电容变小，式(2)条件下计算出的悬浮电压数值要比式(1)条件下高。式(3)中， $D_l$ 为电缆外径， $D_c$ 为导体外径。

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon}{\ln \frac{D_l}{D_c}} \quad (3)$$

通过计算可以发现,决定悬浮电压值大小的因素有导体与金属护套间电容 $C_1$ 、金属护套与地之间电容 $C_2$ 以及空气杂散电容 $C_3$ 有关,而 $C_1$ 、 $C_2$ 决定于电缆线芯的截面、紧压系数、绝缘层厚度,即电缆结构影响悬浮电压的大小。

### 3. 事故原因分析

为理清电缆交接耐压试验过程中外护套烧毁事故原因,对事故现场情况进行了详细的调查。

#### (1) 电缆参数

110 kV响繁线和响马线电缆台账信息如下表所示。电缆外护套为聚氯乙烯(PVC)材料,主要有机械防护功能和绝缘功能,此材料塑料味较重,密度大,硬度低,吸水性比较高,长期运行后的绝缘性能较聚乙烯(PE)护套差,更易发生击穿。

表1 110 kV响繁线和响马线电缆参数

| 名称            | 电缆<br>起止点     | 线路<br>长度<br>/m | 型号                                           |
|---------------|---------------|----------------|----------------------------------------------|
| 110 kV<br>响繁线 | 18#杆<br>至P1杆  | 3×680          | YJLW02-64/110 kV-1<br>×500 mm <sup>2</sup>   |
| 110 kV<br>响马线 | 18#杆<br>至19#杆 | 3×620          |                                              |
| 中间接头          | 1#和2#<br>电缆井内 | \              | CDYJJJM2 64/110 kV-1<br>×500 mm <sup>2</sup> |

#### (2) 电缆线路现场

图4为响繁线和响马线电缆线路终端#18杆,杆上直接接地箱未设专门接地线,与GB 50168—2006《电气装置安装工程电缆线路施工及验收规范》要求不符。图5a、图5b为#1、#3电缆井,井内存在大量积水,部分电缆及接头浸入水中,电缆布置较乱。



图4 18#终端杆



(a) 1#电缆井 (b) 3#电缆井

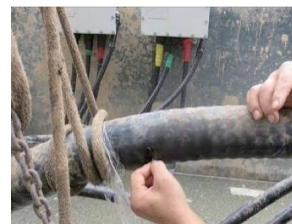
图5 事故电缆线路现场

#### (3) 故障点情况

图6为3个故障点的外护套故障情况。从图中可以看出,图6a和图6b中电缆外护套击穿,对支架有明显放电点,图6c中电缆外护套表面过热烧损严重,半导体层脱落,露出浅红色的PVC。



(a) 故障点1



(b) 故障点2



(c) 故障点4

图6 外护套故障点

对3个外护套烧毁故障点进行解体检查,发现外护套存在两处明显击穿点,其中一点的外护套存在划痕损伤,长约10 cm,金属护套上存在印迹;两处击穿点对应位置的金属护套内壁光滑,未见放电痕迹,图7为故障外护套解体实物图。



图7 故障外护套

#### (4) 接地方式检查

现场检查110 kV响繁线和响马线外护套接地方式如图8所示。该接地方式与GB 50217—2007《电力工程电缆设计规范》要求不符。当线路不长，且外护套感应电压满足一定要求时，外护套应采用图9a或图9b的接地方式。相关文献研究也表明：护层保护器装在线路侧时，护层所受冲击电压比保护器装在负荷侧略低，更有利于保护外护套。

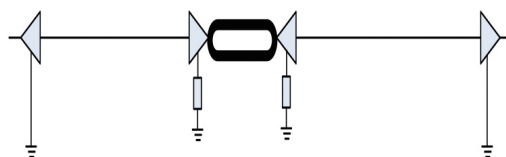
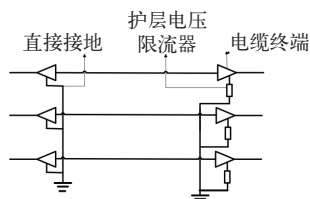
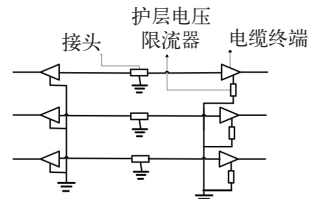


图8 外护套现有接地方式



(a) 线路一端单点直接接地



(b) 线路中央部位单点直接接地

图9 标准规定外护套接地方式

#### (5) 事故原因

综合现场调查情况，本次两回电缆外护套故障中，外护套仅为局部段烧蚀，每段约20~50 cm，未发生大面积损伤，可排除由于悬浮放电造成外护套损伤的可能；故障段外护套表面存在明显烧蚀痕迹，两故障点间的金属护套内壁光滑，无放电点，可排除金属护套缺陷而导致外护套烧蚀的可能；对事故现场电缆进行相关试验，测得响繁线和响马线电缆的外护套绝缘电阻为零，且外护套故障定位仪无法定位，可见外护套存在多点接地。综上所述，外护套烧蚀的主要原因是电缆外护套存在多点接地，在耐压试验时，外护套对地放电，并在金属护套内形成较大环流，造成金属护套发热，进而导致烧蚀外护套。

根据外护套材质、现场运行、损伤部位、试验和解体等情况，进一步分析造成电缆外护套多

点接地的原因。

1) 聚氯乙烯(PVC)外护套硬度较聚乙烯(PE)低，且电缆外护套有划痕，存在电缆在运输、敷设中不规范行为造成外护套损伤的可能性。

2) 电缆敷设完毕后，相关施工单位并未进行外护套相关试验，存在外护套本身具有局部损伤的可能性。

3) 聚氯乙烯(PVC)外护套吸水性强，现场运行环境差，电缆井内存在大量积水，部分电缆段浸泡其中，存在外护套进水受潮和外部损伤的可能性。

#### 结束语

鉴于高压单芯电缆接地系统破坏后所带来的巨大危害，故相关人员在施工现场必须利用交流耐压试验，严格做好电缆交接验收把关。避免高压单芯电缆出现因外护套多点接地或者悬浮放电等接地故障造成外护套烧蚀，电缆本体击穿，甚至对人身安全造成威胁。有以下几个方面的建议。

1) 当高压单芯电缆安装的外部环境较恶劣时，如电缆通道地势较低，电缆井内可能会出现大量积水，物资招标管理的相关技术人员应按照《电力工程电缆设计规范》的相关要求，尽可能选用聚乙烯外护套电缆而避免使用聚氯乙烯外护套电缆，同时电缆管道应采用隧道设计，否则应选用海底型电缆。

2) 电缆外护套接地状况直接影响悬浮电压值，其接地方式应按相关规范要求进行设计。在进行现场交接试验或者投运前，必须对外护套的接地情况进行认真检查，确保接地牢靠，电缆直接接地箱应设计专用的接地部位。另外，由于铝芯电缆端子容易氧化，会导致端头接触电阻变大，应避免使用铝芯电缆作为接地线。

3) 加强电力电缆的专业技术管理，提升电缆管理质量。电缆现场到货后，应进行详细验收。验收后，应严格按照《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》的相关要求，进行完整的交接试验。

4) 加强电缆敷设过程管理，严格进行技术交底，履行监理旁站制度，保证安装的规范性，避免电缆外护套在安装中损伤。EA

(收稿日期：2018.03.03)

(编辑：朱金凤)