

# 高压电力电缆外护套电气绝缘特性检验的研究与分析

滕兆丰<sup>1</sup>, 夏俊峰<sup>2</sup>, 施楠楠<sup>2</sup>

(1.杭州电缆股份有限公司,浙江 富阳 311400; 2.上海电缆研究所有限公司,上海 200093)

**摘要:**对单芯高压电力电缆在产品出厂、交接试验以及预防性试验等环节对外护套的电气特性检验要求进行对比分析,结合工程检验实例,对现行电力电缆线路交接试验标准中对电缆外护套绝缘电阻试验要求的规定提出了修改建议。

**关键词:**电缆外护套; 交接试验; 绝缘电阻

中图分类号:TM247.1

文献标识码:A

文章编号:1672-6901(2021)01-0027-05

## Study on the Electrical Characteristics Test of High-Voltage Power Cable Oversheath

TENG Zhaofeng<sup>1</sup>, XIA Junfeng<sup>2</sup>, SHI Nannan<sup>2</sup>

(1. Hangzhou Cable Co., Ltd., Fuyang 311400, China; 2. Shanghai Electric Cable Research Insitute Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

**Abstract:** This paper makes a comparative analysis of the electrical characteristics test requirements of single core high-voltage power cable oversheath in product delivery, hand-over test and preventive test. Combined with the actual engineering test examples, the paper puts forward the modification suggestions for the requirements of the oversheath insulation resistance test in the current power cable line hand-over test standards.

**Key words:** cable oversheath; hand-over test; insulation resistance

## 0 引言

高压电力电缆主要是指额定电压在 110 kV 及以上的电力电缆,这类产品的结构主要为导体、三层共挤绝缘系统、缓冲阻水层、密封金属套、外护套,同时外护套表面还有导电层,典型结构见图 1。

用交叉互联的敷设方式。当电缆外护套绝缘破损,护套上感应电压出现不平衡时,交叉互联系统中三段护套感应电压无法完全抵消,金属护套上的感应电流将升高,大大增加电缆回路损耗,加速电缆主绝缘的老化,严重时还可能导致故障。

因此,高压电力电缆外护套绝缘性能好坏直接影响着电缆线路的安全经济运行和使用寿命。在电缆的出厂试验、到货检验及交接试验、周期性预防试验中都有对外护套电气绝缘性能的检测和要求。

## 1 高压电缆外护套电气特性试验要求

### 1.1 出厂试验

出厂试验是由制造商在所有制造长度电缆上进行的试验,检验是否满足规定的要求,也称为例行试验(routine test)。高压电缆的产品标准主要有 GB/T 11017.2—2014、GB/T 18890.2—2015 和 GB/T 22078.2—2008<sup>[1-3]</sup>。

关于电缆外护套的电气绝缘特性,上述标准规定的内容一致,都要求产品出厂时电缆外护套应能承受直流电压 25 kV 历时 1 min 而不击穿。

该试验通常在制造厂内使用直流耐压试验仪进行,对出厂电缆 100%进行,能够确保交货电缆外护套的电气特性。

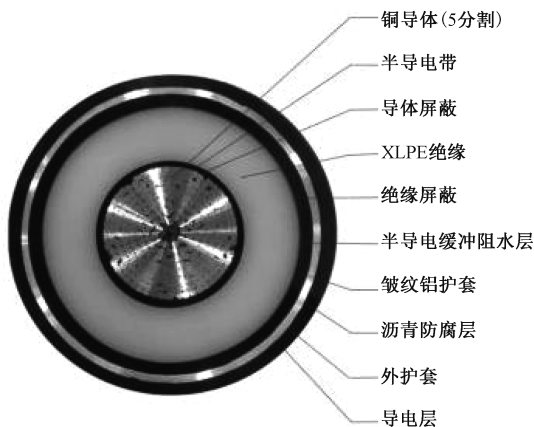


图 1 高压电力电缆的典型结构图

高压电缆线路在运行时为了减少损耗,通常采

收稿日期:2020-02-24

作者简介:滕兆丰(1977—),男,高级工程师。

作者地址:浙江杭州市富阳区高尔夫路 602 号 [311400].

## 1.2 交接试验

电缆线路交接试验通常指电力电缆线路安装完成后,为了验证安装质量对电缆线路开展的各种试验,也称为安装后试验(test after installation)。

关于电力电缆线路的交接试验项目,GB 50150—2016《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》<sup>[4]</sup>中对单芯高压电力电缆外护套电气特性的规定主要有两条:(1)电缆外护套绝缘电阻不应低于0.5 MΩ/km。绝缘电阻测量宜采用500 V兆欧表,耐压试验前后无明显变化。(2)外护套应能承受直流电压10 kV历时1 min而不击穿。

国家标准GB 50168—2018《电气装置安装工程电缆线路施工及验收标准》<sup>[5]</sup>在9.0.3条中规定,电缆线路施工完成后应按照GB 50150的规定进行电气交接试验。

行业标准DL/T 1253—2013《电力电缆线路运行规程》<sup>[6]</sup>对单芯高压电力电缆外护套电气特性的规定与GB 50150的要求相同。

电缆产品标准GB/T 11017.2—2014、GB/T 18890.2—2015和GB/T 22078.2—2008中对电缆

线路安装后电缆外护套的电气绝缘特性试验规定外护套应能承受直流电压10 kV历时1 min而不击穿。

国家电网企业标准Q/GDW 11316—2014《电力电缆线路试验规程》<sup>[7]</sup>关于交接试验中单芯高压电力电缆外护套电气特性试验规定为:(1)电缆外护套绝缘电阻不应低于0.5 MΩ·km。绝缘电阻测量宜采用1000 V兆欧表,耐压试验前后无明显变化。(2)外护套应能承受直流电压10 kV历时1 min而不击穿。

南方电网企业标准Q/CSG 1205019—2018《电力设备交接验收规程》<sup>[8]</sup>对交接试验中单芯高压电力电缆外护套电气特性试验规定为:(1)电缆外护套绝缘电阻不应低于0.5 MΩ/km且试验段绝缘电阻不小于50 MΩ。绝缘电阻测量采用500 V兆欧表,护套直流耐压试验前后绝缘电阻值无明显变化。(2)外护套应能承受直流电压10 kV历时1 min而不击穿。

交接试验外护套电气特性试验规定汇总见表1。

表1 交接试验中的外护套电气特性试验规定

标准规范	外护套绝缘电阻	兆欧表	外护套直流耐压	与前版标准对比
GB 50150—2016	不低于0.5 MΩ/km 耐压试验前后无明显变化	宜采用500 V	10 kV、1 min	与2006版相同
GB 50168—2018	不低于0.5 MΩ/km 耐压试验前后无明显变化	宜采用500 V	10 kV、1 min	2006版无此要求
DL/T 1253—2013	不低于0.5 MΩ/km 耐压试验前后无明显变化	宜采用500 V	10 kV、1 min	与2006版相同
GB/T 11017.2—2014 GB/T 18890.2—2015 GB/T 22078.2—2008	不规定	不规定	10 kV、1 min	与前版相同
Q/GDW 11316—2014 (国网企标)	不低于0.5 MΩ·km 耐压试验前后无明显变化	宜采用1 000 V	10 kV、1 min	—
Q/CSG 1205019—2018 (南网企标)	不低于0.5 MΩ/km 试验段不小于50 MΩ 直流耐压试验前后无明显变化	采用 500 V	10 kV、1 min	—

## 1.3 预防性试验

电缆线路的预防性试验是指为了发现运行中电缆的隐患,预防发生事故或设备损坏,对电缆线路设备进行的检查、试验和监测。在某些规范中,这些试验也称为运行线路例行试验。

关于电力电缆线路的预防性试验项目,DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》<sup>[9]</sup>中对单芯高压电力电缆外护套电气特性的规定主要

有两条:(1)电缆外护套每千米绝缘电阻值不应低于0.5 MΩ,绝缘电阻测量采用500 V兆欧表。该要求仅适用于三芯电缆。(2)交叉互联系统(含外护套)应能承受直流电压5 kV历时1 min而不击穿。

电缆产品标准不涉及运行线路中的预防性试验的内容。

国家电网企业标准Q/GDW 11316—2014在运

行电缆线路的例行试验中对单芯高压电力电缆外护套电气特性试验的规定为:(1)电缆外护套绝缘电阻不应低于 $0.5\text{ M}\Omega\cdot\text{km}$ 。主绝缘交流耐压试验前后绝缘电阻值无明显变化。绝缘电阻测量宜采用 $1\ 000\text{ V}$ 兆欧表。(2)交叉互联系统(含外护套)应能承受直流电压 $5\text{ kV}$ 历时 $1\text{ min}$ 而不击穿。

南方电网企业标准 Q/CSG 1206007—2017《电力设备检修试验规程》<sup>[10]</sup>在运行电缆线路的例行试验中单芯高压电力电缆外护套电气特性试验规定为:(1)电缆外护套每千米绝缘电阻值不应低于 $0.5\text{ M}\Omega$ ,绝缘电阻测量采用 $500\text{ V}$ 兆欧表。(2)交

叉互联系统(含外护套)应能承受直流电压 $5\text{ kV}$ 历时 $1\text{ min}$ 而不击穿。

类似于电力电缆线路的预防性试验,DL/T 393—2010《输变电设备状态检修试验规程》<sup>[11]</sup>中对单芯高压电力电缆外护套电气特性的规定主要有:(1)当外护套绝缘电阻与被测电缆长度(km)的乘积小于 $0.5$ 时,应采取措施判断护套是否进水。(2)交叉互联系统(含外护套)应能承受直流电压 $5\text{ kV}$ 历时 $1\text{ min}$ 而不击穿。

预防性试验中外护套电气特性试验规定汇总见表2。

表2 预防性试验中的外护套电气特性试验规定

标准规范	外护套绝缘电阻	兆欧表	交叉互联系统(含外护套)直流耐压	备注
DL/T 596—1996	每千米不应低于 $0.5\text{ M}\Omega$ <sup>①</sup> ,低于时应采取措施判断护套是否进水	采用 $500\text{ V}$	$5\text{ kV}$ 、 $1\text{ min}$	预防性试验
DL/T 393—2010	当外护套绝缘电阻(M $\Omega$ )与被测电缆长度(km)的乘积小于 $0.5$ 时,应采取采取措施判断护套是否进水	采用 $500\text{ V}$	$5\text{ kV}$ 、 $1\text{ min}$	运行线路例行试验
Q/GDW 11316—2014	不低于 $0.5\text{ M}\Omega\cdot\text{km}$ 主绝缘交流耐压试验前后无明显变化	宜采用 $1\ 000\text{ V}$	$5\text{ kV}$ 、 $1\text{ min}$	运行线路例行试验
Q/CSG 1206007—2017	每千米不应低于 $0.5\text{ M}\Omega$	采用 $500\text{ V}$	$5\text{ kV}$ 、 $1\text{ min}$	运行线路试验

①该要求仅适用于三芯电缆

## 2 电缆外护套绝缘电阻规定的分析

### 2.1 绝缘电阻的概念

绝缘电阻是衡量一个部件或系统绝缘水平的指标,与多种因素有关,包括材料(体积电阻率)、结构形状等,与温度、湿度等环境条件也有一定关系。绝缘电阻的单位是 $\Omega$ 。材料的体积电阻率是绝缘材料的一个基本参数。GB/T 31838.2<sup>[12]</sup>规定了不同固体材料体积电阻率的测量方法,体积电阻率的单位是 $\Omega\cdot\text{m}$ 。高压电力电缆外护套材料主要有聚氯乙烯、聚乙烯和阻燃聚烯烃。

对于单芯高压电力电缆,其外护套的绝缘电阻 $R$ 可以由式(1)给出:

$$R = \frac{\rho_i}{2\pi L} \ln \frac{D_i}{D_e} \quad (1)$$

式中: $\rho_i$ 是护套材料体积电阻率( $\Omega\cdot\text{m}$ ); $L$ 是电缆长度(m); $D_i$ 是电缆护套外径; $D_e$ 是电缆护套内径。

从式(1)可知,护套绝缘电阻与材料的体积电阻率成正比,与受试电缆护套长度成反比。材料的体积电阻率越高,绝缘电阻越大。对于材料和结构

相同的电缆,长度越长,则绝缘电阻越小,理论上当长度无限长时,绝缘电阻趋近于零。对于不定长度的电缆线路来说,外护套绝缘电阻的测试结果,通常不能直接作为考核参数。

绝缘电阻的测量一般采用施加一定的直流电压(几十到数千伏特),通过测到的泄漏电流对比或计算得到电阻值。常用的设备为手摇式兆欧表以及数字式欧兆表,见图2。

### 2.2 交接试验中外护套绝缘电阻要求分析

电缆线路交接试验(安装后电气试验)中对电缆外护套的电气性能,主要是规定了绝缘电阻和直流耐压两个项目,其中直流耐压试验在各个标准规范中的要求均为 $10\text{ kV}$ 、 $1\text{ min}$ ,但是对绝缘电阻要求的表述各个标准规范之间存在明显差异。

从表1可以看出,GB 50150—2016、GB 50168—2018、DL/T 1253—2013和Q/CSG 1205019—2018都规定电缆外护套绝缘电阻不应低于 $0.5\text{ M}\Omega/\text{km}$ 。只有Q/GDW 11316—2014规定电缆外护套绝缘电阻不应低于 $0.5\text{ M}\Omega\cdot\text{km}$ 。

如果绝缘电阻考核值的单位为 $\text{M}\Omega/\text{km}$ ,就需要对交接试验时使用兆欧表测量到的绝缘电阻值除以

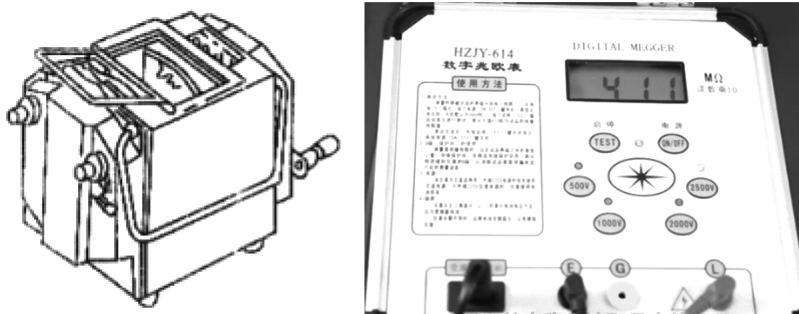


图2 兆欧表(左图为手摇式,右图为数字式)

线路长度作为折算结果。如果绝缘电阻考核值的单位为  $M\Omega \cdot km$ , 折算结果则是用兆欧表的测量值乘以线路长度。举例来说, 假设一条高压电力电缆线路在进行外护套绝缘电阻交接试验时, 线路长度为 3.5 km, 绝缘电阻实测值为 1.0  $M\Omega$ 。则护套绝缘电阻的折算值分别为 0.3  $M\Omega/km$ 、3.5  $M\Omega \cdot km$ 。

根据式(1)可知, 在其他条件(材料、结构和外界环境)不变时, 电缆外护套绝缘电阻与线路长度成反比, 线路越长则绝缘电阻越小。对于上文中电缆线路, 如果取 0.5 km 线路来测试, 那么兆欧表的测试结果是 7.0  $M\Omega$ , 绝缘电阻的折算值分别为 14  $M\Omega/km$ 、3.5  $M\Omega \cdot km$ 。从折算值的结果可以看到, 采用  $M\Omega/km$  单位的两次测试的折算值结果不同。同一条线路仅仅由于测量长度不同, 导致了完全不同的折算结果, 显然是不合适的。在实际工程现场也出现过类似情况, 对于几公里的高压电缆线路外护套绝缘电阻现场测试结果不符合 GB 50150—2016 的规定, 但是对同线路几十米短样的复测结果却远高于 GB 50150—2016 的规定。

因此, 建议在交接试验(安装后电气试验)中对护套绝缘电阻的要求应以  $M\Omega \cdot km$  为单位或表述为绝缘电阻( $M\Omega$ )与被测电缆长度(km)的乘积。

另外还需指出的是, 随着近年来高压电缆工程对电缆阻燃要求的日益提高, 导致阻燃型外护套高压电缆使用越来越多。对于高阻燃等级的高压电力电缆外护套, 如果在潮湿环境下测试或者电缆浸水环境下施工后再测量护套绝缘电阻的话, 结果将很难达到 50  $M\Omega$  的要求(南方电网企标规定)。

### 2.3 预防性试验中外护套绝缘电阻要求分析

电缆线路预防性试验(运行线路例行试验)中对电缆外护套的电气性能, 规定了绝缘电阻和交叉互联系统直流耐压两个项目, 其中耐压试验在各个标准规范中的要求均为 5 kV、1 min, 但是对绝缘电阻要求的表述各个标准规范之间存在明显差异。

从表 2 可以看出, DL/T 596—1996 和 Q/CSG

1206007—2017 规定电缆外护套绝缘电阻每千米不应低于 0.5  $M\Omega$ , DL/T 393—2010 规定外护套绝缘电阻( $M\Omega$ )与被测电缆长度(km)的乘积不小于 0.5, Q/GDW 11316—2014 规定电缆外护套绝缘电阻不应低于 0.5  $M\Omega \cdot km$ 。DL/T 393—2010 和 Q/GDW 11316—2014 的规定相同。

根据前述分析, 由于在其他条件(材料、结构和外界环境)不变时, 电缆外护套绝缘电阻与线路长度成反比, 线路越长则绝缘电阻越小。同样建议在电缆线路预防性试验(运行线路例行试验)中对电缆外护套绝缘电阻的要求应以  $M\Omega \cdot km$  为单位或表述为绝缘电阻( $M\Omega$ )与被测电缆长度(km)的乘积。

### 3 结论

本文汇总分析了高压电力电缆在产品出厂、线路交接试验以及线路预防性试验各个环节相应的标准规范中对外护套电气特性的检验要求, 从理论和现场工程实际研究了护套绝缘电阻的特性, 提出了如下建议:

(1) 对电缆线路交接试验中电缆外护套绝缘电阻的性能要求, 建议规定为“电力电缆外护套的绝缘电阻不应低于 0.5  $M\Omega \cdot km$ ; 主绝缘耐压试验前后绝缘电阻无明显差异”。

(2) 对运行电缆线路预防性试验和例行试验中电缆外护套绝缘电阻的性能要求, 建议规定为“电力电缆外护套的绝缘电阻不应低于 0.5  $M\Omega \cdot km$  或者外护套绝缘电阻( $M\Omega$ )与被测电缆长度(km)的乘积不低于 0.5; 主绝缘耐压试验前后绝缘电阻无明显差异”。

#### 参考文献:

[1] 全国电线电缆标准化技术委员会. 额定电压 110 kV ( $U_m = 126$  kV) 交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件第 2 部分 电缆: GB/T 11017.2—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.

(下转第 38 页)

未用铝焊条打底,尾管和金属护套之间亦未加装铜编织线,且220 kV某乙线A相终端尾管铅封处存在漏油情况,随即决定对此11只电缆终端进行解体检查,检查铜网、电缆绝缘有无放电痕迹等,未发现明显异常。最后对受损的避雷器和支撑绝缘子及引线进行更换,并在封铅过程中加装铜编织线连接尾管和金属护套,确保安装工艺符合标准要求。

#### 4 结论与建议

通过分析总结本起故障的发生原因,可以发现,电缆附件的安装质量直接影响其运行能力。因此,查找出电缆附件安装过程中存在的弊端,进一步规范和强化相应的管理措施,成为提高电缆供电可靠性,降低高压电缆故障率的一项迫切的任务。基于这一目标,提出以下建议:

(1)推行高压电缆施工人员考核准入制度。加强高压电缆附件安装人员的资格审查,必须持证上岗,对附件安装人员进行安装工艺水平的现场考核。

(2)加强电缆附件施工工艺质量管控。严格按照电缆施工作业规范、作业指导书开展电缆附件制作,做好施工安装过程监督验收,对安装作业过程全程记录,建立附件制作人档案,附件制作应现场视频监控,可以实时上传至线路监控室,视屏资料建议保存半年。这起事故,线路只投运3个月,施工、验收环节把关不严,积累视频资料也有利于快速准确查找事故点,分析事故原因。

(3)提升电缆运维管理人员专业水平,加强运维环节管控,定期开展紫外成像、红外测温、涡流探伤、局部放电等带电检测,不断强化带电检测在电缆

运维环节的应用。

(4)深入推进电缆附件全寿命周期管理,全程追踪入网电缆附件设备安装及运行全过程,针对可能存在家族性缺陷的电缆附件进行追踪,降低因产品质量或安装工艺问题带来的运行设备安全隐患。

#### 参考文献:

- [1] 李浪.高压电力电缆故障原因分析和试验方法的研究[D].成都:西南交通大学,2013.
- [2] 邢海文.电力电缆故障诊断技术的研究[D].南宁:广西大学,2005.
- [3] 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):44-50.
- [4] 谢以生.高压电缆故障定位系统的研究和开发[D].成都:电子科技大学,2016.
- [5] 郭希义.一起110 kV电缆终端故障原因分析及改进措施[J].黑龙江科技信息,2013(21):53-53.
- [6] 张鸿,梁汉宗.一起110 kV电缆终端故障产生的原因分析及处理[J].房地产导刊,2013,23(2):149-150.
- [7] 吴明祥,毛琳明.一起220 kV电缆终端击穿故障原因分析[J].浙江电力,2012,31(9):10-12.
- [8] 曹京荣,查显光,陈杰,等.220 kV电缆线路终端故障及仿真分析[J].电力工程技术,2018,37(6):151-153.
- [9] 孙永辉,王馥珏,韩宇泽.高压电缆终端击穿故障的分析与处理[J].兵器装备工程学报,2019,40(8):207-211.
- [10] 高青松,杨靖.电力电缆故障诊断研究综述[J].贵州电力技术,2016,19(5):54-57.
- [11] 国家电网有限公司.关于印发十八项电网重大反事故措施(修订版)的通知[Z].北京.2018.
- [12] 中国电力企业联合会.66~220 kV交联聚乙烯绝缘电力电缆户外终端安装规程:DL/T 344—2010[S].北京:中国电力出版社,2010.

#### (上接第30页)

- [2] 全国电线电缆标准化技术委员会.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2部分 电缆:GB/T 18890.2—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [3] 全国电线电缆标准化技术委员会.额定电压500 kV( $U_m = 550$  kV)交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件第2部分 额定电压500 kV( $U_m = 550$  kV)交联聚乙烯绝缘电力电缆:GB/T 22078.2—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [4] 住房和城乡建设部.电气装置安装工程电气设备交接试验标准:GB 50150—2016[S].北京:中国计划出版社,2016.
- [5] 住房和城乡建设部.电气装置安装工程电缆线路施工及验收标准:GB 50168—2018[S].北京:中国计划出版社,2018.
- [6] 国家能源局.电力电缆线路运行规程:DL/T 1253—2013[S].北京:中国电力出版社,2013.

- [7] 国家电网公司.电力电缆线路试验规程:Q/GDW 11316—2014[S].
- [8] 中国南方电网有限责任公司.电力设备交接验收规程:Q/CSG 1205019—2018[S].
- [9] 电力工业部.电力设备预防性试验规程:DL/T 596—1996[S].北京:中国电力出版社,1995.
- [10] 中国南方电网有限责任公司.电力设备检修试验规程:Q/CSG 1206007—2017[S].
- [11] 国家能源局.输变电设备状态检修试验规程:DL/T 393—2010[S].北京:中国电力出版社,2010.
- [12] 全国电气绝缘材料与绝缘系统评定标准化技术委员会.固体绝缘材料介电和电阻特性第2部分 电阻特性(DC方法)体积电阻和体积电阻率:GB/T 31838.2—2019[S].北京:中国标准出版社,2019.