

深圳地区10 kV退役电缆理化性能分析及与状态评估结果的对比研究

对深圳地区退役的10 kV电缆进行材料理化性能分析,包括XLPE绝缘层羰基指数的测量,绝缘层内水树枝的观察,以及外半导体屏蔽与绝缘层之间剥离强度的测量。将检测结果与采用CIGRE TB 358状态评估方法的技术得分进行对比,显示二者间具有良好的一致性,说明材料分析结果基本可反映电缆老化状态,同时也验证了修正后的CIGRE TB 358状态评估方法部分的可靠性,可为完善配电电缆绝缘状态的综合评估方法及其资产管理的方法提供参考。

黄慧山¹ 霍小晶⁴ 张弘³ 邱铨¹ 徐阳²/1.深圳供电局有限公司
2.西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室 3.上海国缆检测中心有限公司 4.国网四川省电力公司成都供电公司

0 引言

电力电缆作为城市输配电的重要电力设备,其需求在不断增大。随着深圳地区配电网的迅速发展,电缆的使用量和负荷水平大幅度增加,配电电缆故障也随之增多。近年来深圳地区电网发生的电缆类故障已经占总故障比例的50%,其中建筑施工、安装工艺不当、主绝缘老化及材质问题是电缆发生故障的主要原因,由此引起电缆线路的运行维护需要投入的人力、财力显著增加^[1]。那么合理地安排预防性试验,进行电缆等级的分类,从而促进电缆维护的有序进行,优化电缆资产管理策略,成为越来越被关注的方向。

早在1980年初,一些发达国家就开始对交联聚乙烯(XLPE)电缆的老化评估进行研究,尝试建立状态维护体系^[2]。国家电网公司和南方电网公司近年来也分别发布相应的配电网设备状态评价导则^[3-4]。但是国内的这种打分评估主要

是从电缆运维技术方面入手,没有涉及到经济及策略的影响。2008年,国际大电网(CIGRE)技术工作组提出了综合考虑技术、经济和策略三方面因素的现役地下电缆剩余寿命管理方法,经过修改后尝试运用于深圳地区10 kV电缆的状态评估是较为合适的^[5-6],但该CIGRE TB 358的方法在提出过程中尚未经过真实电缆材料的实验分析验证。随着电缆运行年限的增加,电缆材料在电、热、力学和环境应力下逐渐发生劣化老化已经被证实,因此有必要进一步通过实验室的材料分析结果来验证该评估方法与结果可靠与否。

本文挑选深圳地区经过状态评估的六段10 kV退役电缆样段,进行实验室材料理化性能分析,实验科目包括XLPE绝缘材料羰基指数的测量,绝缘外半导体屏蔽与绝缘层剥离力的测量和绝缘层内水树枝的观察。将材料分析结果与状态评估结果对比分析,验证状态评估结果的可靠性。

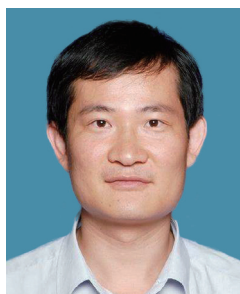
1 试样及实验方法

1.1 试样

挑选经过状态评估的六段试样进行材料理化性能分析,如表1所示。其中,

表1 10 kV退役电缆试样

试样编号	年限	截面积/mm ²	试样说明
1 [#]	15年	300	5 m带接头
2 [#]	15年	300	2 m本体
3 [#]	16年	240	2.5 m带接头
4 [#]	19年	300	6 m带铠装接头
5 [#]	19年	300	6 m带铠装接头
6 [#]	20年	300	2 m靠近接头部位



黄慧山/高级工程师

关键词/Keywords

配电电缆·
羰基指数·
剥离强度·
水树枝·
状态评估·

1[#]~3[#]试样运行年限为15~16年,4[#]~6[#]试样运行年限为19~20年。同时,因6[#]试样材料有限,仅进行了绝缘切片水树枝观察实验。

1.2 实验

(1) XLPE绝缘材料羰基指数的测量

采用IRPrestige-21型傅里叶变换红外光谱仪测量XLPE绝缘材料切片的羰基指数,波数范围为400~4 000 cm⁻¹。羰基指数常用来表征材料热氧老化的严重程度,其值可表示为

$$R = \frac{A_{1720}}{A_{2010}} \quad (1)$$

式中,R为羰基指数; A_{1720} 为羰基吸收峰的面积; A_{2010} 为不随氧化变化的吸收峰的面积。

(2) XLPE绝缘层水树枝的观察

在水树枝观察实验中,沿电缆径向切取试样,厚度控制为0.8~1.0 mm,每种电缆取样30片。水树枝染色液的配置如下。A溶液:2.5 g亚甲基蓝+1 000 mL蒸馏水;B溶液:4.0 g氢氧化钠+100 mL蒸馏水。将这A、B两种溶液充分混合搅拌制成水树枝染色溶液。在70 ℃水浴中,持续染色48 h后进行观察。观察使用的仪器为BX51-P偏光显微镜,采用透射光式,温度为室温,放大倍数为40~400倍。

(3) 半导体外屏蔽与绝缘层之间剥离强度的测量

按照GB/T 12706.2—2008的规定,从电缆上取下长度为300 mm的绝缘线芯,使用JSL-500N电子拉力机测量外屏蔽层与绝缘层之间的剥离强度,实验步骤如下。

1) 在试样的挤包绝缘层屏蔽表面上从试样的一端到另一端向绝缘纵向切割成两道彼此相隔(10 mm±1 mm)相互平行的深入绝缘的切口。

2) 沿平行于绝缘线芯方向(剥离角近似于

180°)拉开长50 mm、宽10 mm的条形带后,将绝缘线芯垂直地装在拉力机上,用一个夹头夹住绝缘线芯的一端,而10 mm条形带加载另一个夹头上。

3) 施加使10 mm条形带从绝缘分离的拉力,剥离速度为300 mm/min,拉开至少100 mm的距离。

最后记录外屏蔽层与绝缘层之间的剥离强度(粘贴在一起的材料,从接触面进行单位宽度(cm)剥离时所需要的最大力,单位为N/cm)。

2 实验结果分析与对比研究

2.1 实验结果及分析

(1) XLPE绝缘材料羰基指数的测量

羰基指数的测量结果如图1所示,结果表明1[#]、4[#]和5[#]试样的羰基指数大于2[#]、3[#]试样,说明1[#]、4[#]和5[#]试样的热氧老化情况较2[#]和3[#]严重。

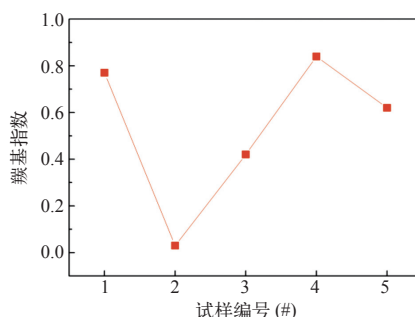


图1 10 kV退役电缆绝缘层羰基指数测试结果

(2) XLPE绝缘层水树枝的观察

限于篇幅,图2举例给出退役电缆绝缘层典型的水树枝观察结果。在放大40倍的情况下,1[#]、2[#]试样水树枝数量和尺度均较小(见图2a);3[#]~6[#]试样水树枝较为密集,尺度也较大(见图2b、图2c)。

为了定量分析水树枝观察结果,本文统计了

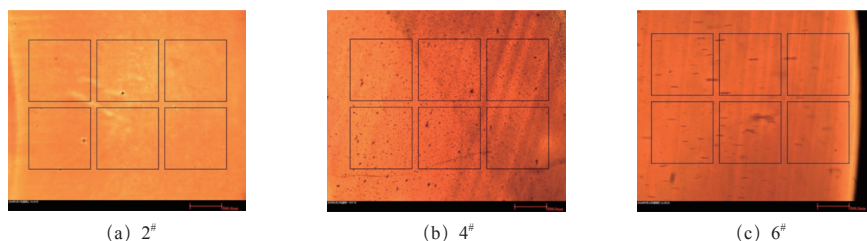


图2 放大40倍下10 kV退役电缆绝缘切片内的水树枝

1[#]~6[#]试样的水树枝密度 x_1 ，水树枝最大长度 x_2 以及观察范围内的水树枝平均长度 x_3 ，如表2所示。其中水树枝密度的计算方法如图2所示。在观察视野范围内自左上至右下选取6个边长为1 mm的正方形框，计算方框内单位面积内水树枝数量（大于10 μm ）。水树枝平均长度为所有方框内水树枝的平均长度。

表2 10 kV退役电缆绝缘切片内的水树枝统计结果

试样编号	水树枝密度 $x_1/(1/\text{mm}^2)$	水树枝最大长度 $x_2/(\mu\text{m})$	水树枝平均长度 $x_3/(\mu\text{m})$
1 [#]	1.50	148.90	56.20
2 [#]	0.83	64.60	10.44
3 [#]	6.00	155.60	109.13
4 [#]	5.83	100.40	80.94
5 [#]	5.17	237.50	66.54
6 [#]	6.17	425.50	126.15

主成分分析法是将多指标化为少数几个综合指标的一种统计分析方法。为了确定 x_1 、 x_2 和 x_3 三个因素在判断水树枝情况时所占权重的大小，使用Minitab软件进行主成分分析计算权重，发现前两个主成分的累积贡献率已经达到96.7%。若用一个参数 X 来表示电缆试样的水树枝情况，基于主成分分析法确定 x_1 、 x_2 和 x_3 的权重系数后表达为

$$X = 0.19x_1 + 0.50x_2 + 0.31x_3 \quad (2)$$

依据式（2）计算出图3所示的六种试样的水树枝情况 X 。可看出1[#]、3[#]、5[#]和6[#]试样较2[#]、4[#]试样水树枝情况较严重；其中6[#]试样尤其显著，主要因素有三点，即取自接头部位、运行年限大于20年及大小驳接可靠性差。3[#]试样虽然运行年限较4[#]~6[#]试样短，但其敷设方式为直埋敷设，深圳为多雨潮湿地区，绝缘层更易进水，进而使得水树

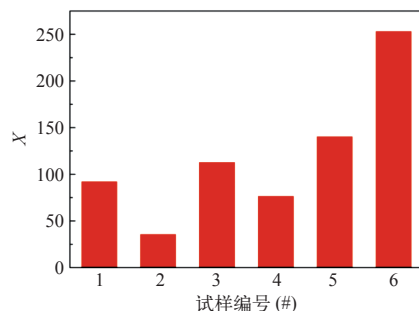


图3 各电缆绝缘层试样水树枝情况比较

枝现象严重。

(3) 半导体外屏蔽与绝缘层之间剥离强度的测量
剥离强度的结果如表3所示，符合GB/T 12706.2—2008规定。老化前后，剥下挤包半导体屏蔽的剥离力应在4~45 N之间。结果显示，4[#]、5[#]试样的剥离强度为1[#]~3[#]试样的一半，说明长年限运行对电缆绝缘层与绝缘屏蔽之间的剥离力有较大的影响。

表3 10 kV退役电缆绝缘外屏蔽与绝缘层之间的剥离强度

试样编号	剥离强度/(N/cm)
1 [#]	21.67
2 [#]	35.50
3 [#]	25.50
4 [#]	8.33
5 [#]	12.17

2.2 实验结果与状态评估结果对比分析

使用CIGRE TB 358经过修正后的电缆状态评估方法在对1[#]~5[#]配电电缆状态作出评判时综合考虑了技术指标、经济指标和策略指标三个方面的内容，对所考虑对象的三个指标分别设置相关问题进行各指标的评判后，使用加权平均的方法计算出最终分数 Y ，即

$$Y = \frac{(aA + bB + cC)}{(a + b + c)} \quad 0 \leq Y \leq 1 \quad (3)$$

式中， A 、 B 和 C 分别为技术、经济和策略指标的分数； a 、 b 和 c 分别为三项指标的权重因子。最终分数 Y 越高，代表其状态越差，反之良好。最终评估得分如表4所示。详细的评分方法介绍见前述文章《基于CIGRE TB 358的配电电缆状态评估与寿命管理方法研究》。考虑到实验测试结果是针对技术评估方面的内容，主要对比实验结果与技术

表4 依据修正后CIGRE TB 358方法的10 kV退役电缆状态评估结果

试样编号	年限	技术得分 (A)	最终评估得分 (Y)
1 [#]	15年	0.29	0.30
2 [#]	15年	0.35	0.26
3 [#]	16年	0.22	0.45
4 [#]	19年	0.37	0.38
5 [#]	19年	0.37	0.38

性得分之间的关系。结果显示其技术性得分1[#]~3[#]试样低于4[#]和5[#]试样。

羰基指数,水树枝情况与外屏蔽剥离力可以反映老化程度,最终技术性得分与实验结果都如式(4)所示,以其单项结果最大值为基准归一化。然后计算1[#]~3[#]各项结果平均值和4[#]~5[#]各项结果平均值,最终对照结果如图4所示。运行了20年左右的电缆(4[#]、5[#])相比运行了15年左右的电缆(1[#]~3[#]),其技术性得分较高,其各项实验指标均要略差一些,羰基指数较高,水树枝情况较严重,外屏蔽剥切力较小。

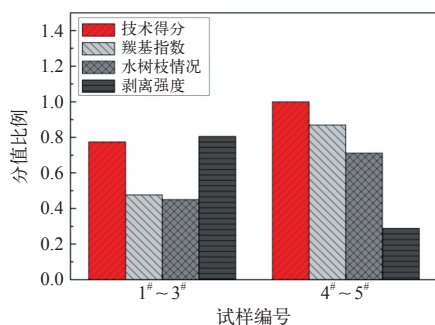


图4 技术性得分与实验结果对照

$$\text{分值比例} = \frac{\text{结果}}{\text{单项结果最大值}} \quad (4)$$

4[#]、5[#]试样的羰基指数较1[#]~3[#]高一些,与其运行年限有一定正相关性。但是并非完全与运行年限相关,例如1[#]试样运行15年,但是羰基指数处于较高的水平,说明电缆的老化状态不仅与运行年限相关,与其长年运行的环境、敷设方式和负荷情况都有关系。

剥离力测试结果显示年限对于电缆的绝缘层与屏蔽层之间的粘合性是有很大影响的,运行年限越久,剥离强度越小。

水树枝可以反映配电电缆运行过程中电缆的绝缘进水情况严重与否,从而反映其绝缘状态的好坏,3[#]~6[#]试样水树枝状况严重,绝缘状态较差,而2[#]试样水树枝观察结果显示其绝缘进水较少,其绝缘状态较为优良,1[#]试样水树枝密度虽然较小,但是其尺度并不小,整个水树枝情况略严重,与其羰基指数结果一致。

实验结果在反映老化情况的同时也验证了评

估结果的可靠性,建议未来可考虑将其纳入技术评估指标的范畴。

4 结束语

从深圳地区10 kV退役电缆材料的理化性能分析入手,分析了XLPE绝缘材料的羰基指数,绝缘层水树枝情况,外半导体屏蔽层与绝缘层之间的剥离强度,通过以上三个参数计算电缆老化状态的实验评估分值,并与之前的CIGRE TB 358状态评估技术部分分值结果作了对比分析,得出以下结论。

1) 五段电缆的修正后CIGRE TB 358方法状态评估结果中技术得分与实际退役电缆样本实验结果基本一致,运行了20年左右的电缆(4[#]、5[#])相比运行了15年左右的电缆(1[#]~3[#]),其各项实验指标均要略差,相应的修正后CIGRE TB 358技术得分也略高。

2) 本文中退役电缆,XLPE绝缘层羰基指数,绝缘层内部的水树枝情况,外屏蔽层与绝缘层之间的剥离强度都可以从不同的方面反映电缆绝缘老化的状态。

参考文献

- [1] 深圳福田电缆故障分析报告[R]. 深圳供电局有限公司, 2010.
- [2] 速水敏幸. 电力设备的绝缘诊断[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] 国家电网公司科技部. Q/GDW 645—2011 配网设备状态评价导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [4] 广东电网公司设备状态评价与风险评估技术导则[R]. 广东电网公司生产技术部, 2010.
- [5] CIGRE TB 358 Remaining life management of existing AC under-ground lines[R]. Report of CIGRE WG B1-09, 2008.
- [6] 皮昊书, 霍小晶, 邱铨, 等. 基于CIGRE TB 358的配电电缆状态评估与寿命管理方法研究[J]. 电气应用, 2017, 36(11): 80-84.

(收稿日期: 2017-02-10) EA