

交联聚乙烯水树老化电缆 电气性能与水树区域含水量的关系

李康乐, 周 凯

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 为了深入了解交联聚乙烯(XLPE)水树电缆电气性能的变化特征,利用极化-去极化电流法测量老化电缆样本不同老化时期的直流电导率和0.1 Hz介损,并使用显微镜和红外光谱仪观测老化电缆样本水树区域含水量,研究不同水树老化时期的电缆电气性能和水树生长之间的关系。研究表明,老化电缆的电气性能和水树长度不呈正相关关系,而和水树区域含水量具有密切关系。

关键词: 交联聚乙烯电缆;水树;长度;含水量;电气性能;极化-去极化电流

中图分类号:TM247 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2019)06-0001-03

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.06.001

Relationship between Electrical Properties of Water Tree Aged XLPE Cables and Water Content in Water Tree Regions

Li Kangle, Zhou Kai

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: In order to further understand the changing characteristics of electrical properties of water tree aged XLPE cables, the polarization-depolarization current (PDC) method is used to measure DC conductivity and 0.1 Hz dielectric loss of the aged samples in different aging periods, and the microscope and the infrared spectrometer (IR) are also used to observe the water content in water tree regions of the samples, thus the relationship between electrical properties of cables and the water tree propagation in different aging periods is studied. The results show that, electrical properties of the water tree aged cables has no positive correlation with the length of water tree, and they are closely related to the water content in water tree regions.

Key words: XLPE cables; water tree; length; water content; electrical properties; polarization-depolarization current (PDC)

0 引 言

水树是导致 XLPE 电缆老化的重要原因之一^[1-5]。在电缆敷设及运行过程中,在机械外力作用下电缆外护套可能发生破损,导致水分侵入电缆绝缘,并进而引发水树。如何有效诊断水树老化电缆是业界共同面临的问题。相比于传统的老化电缆介电性能测试方法,如直流成分法、直流叠加法、谐波分量法等,极化-去极化电流(polarization-depolarization current, PDC)法因其具有测试时间短、准确度高等优点,近年来在水树老化电缆诊断中得到基金项目:国家自然科学基金(51877142)

广泛应用。

已有研究表明,采用 PDC 法中不同的测量或拟合参数能够诊断出具有水树老化的电缆并且判断水树电缆老化程度。例如,文献[6]研究表明低频介质损耗谱不仅能发现桥接绝缘较长的水树老化缺陷,而且能诊断出绝缘受潮或长度较短的水树。文献[7]提出利用直流电导率和非线性系数变化判别电缆绝缘中的水树老化问题。文献[8]认为 PDC 方法获取的低频介电响应谱和电导率能较好地判定电缆绝缘状态, DONL 非线性系数能较好地分辨绝缘水树老化与受潮情况。另外,文献[9]提出利用 PDC 测量中的低频介质损耗与直流电导率非线性特性判断水树老化电缆以及判断水树长度。然而,该文献尚未研究水树含水量和水树电缆电气性能之

间的关系。水树区域含水量直接关系着水树区域的介质损耗和电导率大小,然而在水树生长过程中水树区域的含水量是如何变化的,其是如何影响水树电缆的电气性能的,值得进一步研究。

下面,为了研究水树不同生长阶段水树区域的含水量变化,通过制作A、B、C三组有针孔缺陷的XLPE电缆样本,分别对其进行为期30 d、60 d、90 d的加速水树老化。同时利用显微镜观测水树的形态及生长速度,利用红外光谱仪测量样本水树区域含水量,利用PDC测量样本不同老化时期的直流电导率和0.1 Hz介损。通过观测及测试结果,分析水树电缆电气性能和含水量之间的关系。

1 实验设置

1.1 电缆样本制作及加速水树老化实验

实验选用YJV223×95 8.7/10 kV的交联聚乙烯电缆制作实验样本。去掉电缆的外护套、钢铠、防水层、铜屏蔽层,截断成大约40 cm长的短电缆。在短电缆的一端露出大约2 cm的缆芯,同时两端约10 cm的外半导体层,以防止加压老化时出现沿面放电。在中间保留外半导体层的区域,用钢针均匀垂直扎下间隔0.5 cm、深度约3 mm的针孔。最后,套上热缩管并将其两端密封,作为容器以便储存饱和NaCl溶液。在电缆缆芯上施加有效值为7.5 kV、频率400 Hz的正弦高压对电缆样本进行加速水树老化。加速水树老化实验原理如图1所示^[1-4]。

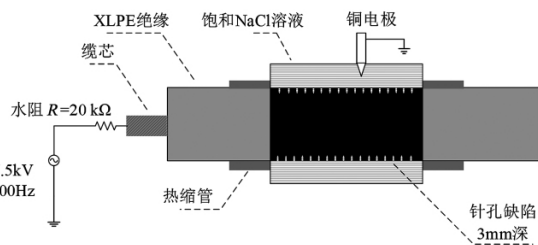


图1 加速水树老化实验原理

1.2 PDC 测试

为研究水树样本老化过程中的电气性能变化,采用PDC法对样本的0.1 Hz介质损耗和直流电导率进行测试。测试时先剥除电缆样本热缩管,之后将直流高压电极和电缆缆芯连接,并在电缆外半导体层包覆铜带接地电极进行测量。测量中极化时间和去极化时间均为90 s^[10]。

1.3 显微观测

待电缆样本老化到一定时间,随机选取实验组中的一根短电缆,将电缆绝缘切成厚度大约100 μm的薄片,在90 °C的温度下浸在亚甲基蓝溶液中染色30 min。待充分染色之后,将薄片外表擦拭干净,放置在显微镜下,使用64倍放大倍数,分别观察水树形态并统计针孔尖端最长水树长度。下面提及的水树形态和水树尺寸是将每组XLPE薄片样本上所有针孔切片后染色观察、统计分析得出的。

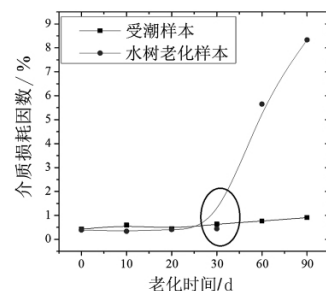
1.4 红外光谱仪测试

为了研究电缆样本水树区域的含水量,水树老化结束后对三组老化样本分别进行红外检测。检测过程如下:利用切片器在垂直于样本表面的方向上沿针孔边缘将电缆切为薄片,在针孔正前方水树区域取点进行红外光谱(infrared spectrometer,IR)分析,得到样本的红外光谱。

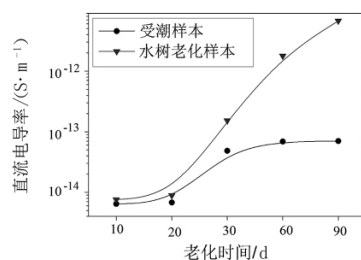
2 实验结果

2.1 PDC 测试结果

样本的PDC测试结果如图2所示,水树老化30 d以前,样本介质损耗因数较低,约为0.5%,而在老化30 d后样本介质损耗因数开始快速上升;类似地,



(a) 介质损耗因数



(b) 直流电导率

图2 样本电气性能变化

老化30 d前水树老化样本和受潮样本(仅浸泡在水中)的直流电导率基本相同,而在30 d后水树老化样本的直流电导率显著高于受潮样本。上述结果说明,

水树老化 30 d 后样本的电气性能开始显著下降。

2.2 水树分析

A、B、C 三组样本(分别对应 30 d、60 d、90 d)中的水树形态如图 3 所示。由水树形态统计水树尺寸,三组样本中的水树尺寸及生长速率统计结果如图 4 所示。

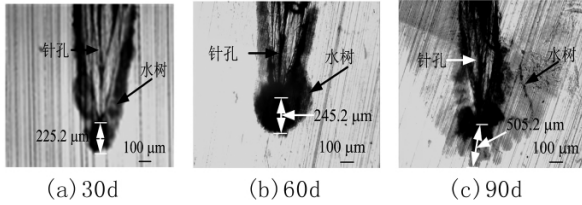


图 3 三组样本水树观测

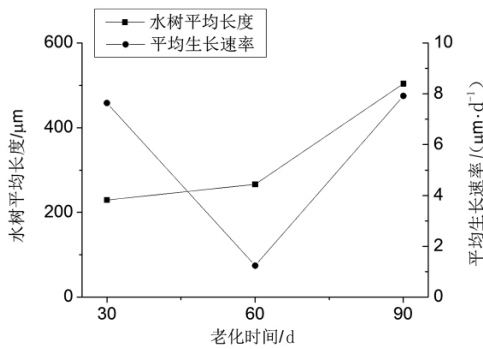


图 4 三组样本水树尺寸及生长速率变化

由图 3 和图 4 可知:老化 30 d 时水树长度为 229.2 μm,水树生长速率较高,达到了 7.64 μm/d。老化 30~60 d,水树生长速率显著降低,仅为 1.24 μm/d。水树长度基本维持不变,但水树染色加深。老化 60~90 d,水树生长速率再次加快,为 7.92 μm/d,老化 90 d 时水树长度显著增加至 504 μm。

2.3 IR 检测结果

三组样本的 IR 检测结果如图 5 所示。根据 IR 谱图中 3400 cm⁻¹ 水分吸收特征峰统计三组样本水树区域含水量^[11]。统计结果如表 1 所示。由表 1 可知,老化 30 d 时水树区域含水量较低,而老化 60 d 后水树区域含水量显著增加。

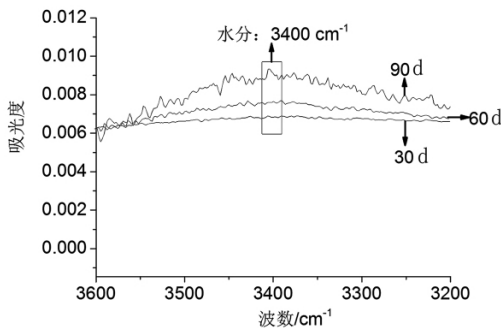


图 5 三组样本水树区域 IR 结果

表 1 三组样本水树区域含水量统计

组别	水分吸光度
A 组	0.000 4
B 组	0.001 6
C 组	0.002 7

2.4 实验结果分析

从以上试验可以看出:

A 组:水树老化 30 d 以前,虽然水树平均长度较长(229.2 μm),但水树区域染色较浅,含水量较小(0.000 4),因而此时样本的介质损耗因数和电导率较小,由图 2 可见。

B 组:水树老化至 60 d 时,虽然水树长度增加不多(增加至 266.4 μm),但水树区域染色明显变深,含水量显著增加(从 0.000 4 增加至 0.001 6),因而此时样本的介质损耗因数和电导率显著增加,分别增加至 5.5% 和 2.0 × 10⁻¹² S/m。

C 组:水树老化至 90 d 样本水树长度(504 μm)和染色深度进一步增加,水树区域含水量(0.002 7)继续增加,因而样本的介质损耗因数和电导率继续增加,分别达到 8.1% 和 7.0 × 10⁻¹² S/m。

由此可见,水树老化电缆的电气性能和水树长度不呈正相关关系,而和水树区域含水量具有密切关系。当水树区域含水量较低时,电缆电气性能较好,而当水树区域含水量显著增加时,电缆电气性能将显著降低。

3 结 语

前面通过电缆加速老化实验,利用 PDC 测试、显微观测及红外光谱仪测量,研究了水树老化电缆电气性能和水树长度及水树区域含水量之间的关系,得出以下结论:

- 1) 水树老化电缆电气性能和水树长度不呈正相关关系。
- 2) 水树老化电缆电气性能和水树区域含水量关系密切。当水树区域含水量较低时,电缆电气性能较好,而当水树区域含水量显著增加时,电缆电气性能将显著降低。

参考文献

[1] Ross R. Inception and Propagation Mechanisms of Water-Treeing [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 5(5): 660-680.

(下转第 65 页)

不同张力差下横担的受力情况如表 6 所示。不同张力下的塔重比较如表 7 所示。

表 6 计算工况列表

(不平衡张力/最大 使用张力) /%	左横担受力 /kN	右横担受力 /kN
5	12.9	12.9
10	0	25.9
15	0	0
20	0	0

注: 不平衡张力为 0 时, 代表横担已转动。

表 7 不同张力下的塔重比较

(不平衡张力/最大 使用张力) /%	对应 V 串夹角 / (°)	塔重 /t
5	40	24.9
10	40	25.3
15	40	25.6
20	40	25.9

从表 7 可以看出, 随着不平衡张力增加, 塔重在逐渐增大, 但是变化幅度较小。因此, 建议在设置转动阈值时, 应尽量增大 V 串夹角, 使得转动阈值增大, 从而在不均匀覆冰工况下横担不转动或较少转动。但由于过大的 V 串夹角, 将使得隔面支架伸长较多, 一方面增加塔重, 另一方面构造也较困难。因此, 针对此三型直线塔, 可取最大使用张力的 10% 作为最优转动阈值, 对应的 V 串夹角为 40°。

(上接第 3 页)

[2] 周凯, 李康乐, 杨明亮, 等. 由异常水树形态洞察力学取向对水树生长的影响[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5373-5381.

[3] 李康乐, 周凯, 黄明, 等. XLPE 在电场作用下的取向对温度变化条件下水树生长的促进作用机理[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 956-964.

[4] 周凯, 陶文彪, 赵威, 等. 以分子取向理论理解交联聚乙烯中水树在不同温度下的生长特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(12): 3665-3673.

[5] J. J. De Bellet, G. Matey, L. Rose, et al. Some Aspects of the Relationship between Water Treeing, Morphology and Microstructure of Polymers [J]. IEEE Transactions on Electric Insulation, 1987, 22: 211-217.

[6] 黄明, 周凯, 黄科荣, 等. 基于 PDC 法的绝缘老化电缆低频损耗特性分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(3): 959-967.

3 结 论

前面分析了传统复合材料横担的优缺点, 并提出了可控转动方案, 在投资金额基本相当的情况下, 可有效克服传统复合横担运维困难或造价高的问题。同时对可控转动方案的布置及运行方式进行了研究, 并提供了简单可行的操作方法。通过对可控转动方案荷载取值的研究, 得出了转动阈值的取值建议, 为新型可控转动复合横担的推广提供了一定的理论依据。

参考文献

[1] 左玉玺, 薛更新, 等. 750 kV 输电线路复合横担设计研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(1): 1-8.

[2] 王虎长, 赵雪灵. 复合材料(FRP)格构塔应用研究报告[R]. 西安: 西北电力设计院, 2010.

[3] 赵雪灵, 谭浩文. 免横担组合绝缘子塔应用研究[R]. 西安: 西北电力设计院, 2013.

[4] 徐维, 敖翔, 李冬. 500 kV 线路悬垂绝缘子串金具碰撞塔材原因分析及对策[J]. 云南电力技术, 2019, 47(6): 74-76.

[5] 架空输电线路复合材料杆塔结构设计导则(报批稿): Q/DG 2-T02-2011[S], 2011.

[6] 750 kV 架空输电线路杆塔复合横担技术规定: Q/GDW 11124.5-2014[S], 2014.

作者简介:

鄢秀庆(1984), 硕士, 高级工程师, 从事输电线路结构设计工作。(收稿日期: 2019-10-12)

[7] 蔡钢, 刘曦, 濮峻嵩, 等. 基于 PDC 法的水树老化电缆绝缘诊断[J]. 绝缘材料, 2016, 49(7): 61-64.

[8] 陈井锐, 赵威, 赵荣普, 等. 极化-去极化电流法诊断电缆绝缘[J]. 绝缘材料, 2018, 51(2): 57-61.

[9] 张福忠, 周凯, 谢敏, 等. XLPE 水树老化电缆介电响应下非线性研究[J]. 绝缘材料, 2018, 51(2): 51-56.

[10] 周凯, 黄科荣, 黄明, 等. 交联聚乙烯电缆绝缘中的水树生长特性[J]. 高电压技术, 2018, 45(10): 3207-3213.

[11] K. A. Rubinson, J. F. Rubinson. Contemporary Instrumental Analysis (1st edition) [M]. Beijing: Science Press, 2003.

作者简介:

李康乐(1990), 在读博士生, 研究方向为固体绝缘介质老化及电缆修复。

(收稿日期: 2019-10-17)