

实际 XLPE 电缆模型下升压速度对电树枝生长特性的影响

叶开颜, 廖瑞金, 刘玲, 周 淙

(重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 电树枝化是影响交联聚乙烯(XLPE)电力电缆运行安全与寿命的技术瓶颈。笔者采用金属针缺陷模拟电缆中集中的电场应力,研究了在工频交流电压下(50 Hz),不同实验起始升压速度(0.1 kV/s, 1 kV/s)对 XLPE 电缆中电树枝生长特性的影响。结果表明,在高的升压速度下电树枝起始快,同时电树枝形态会由纯枝状变为稠密枝状,分形维变大。

关键词: 交联聚乙烯电缆; 电树枝化; 升压速度; 树枝形态; 分形维

中图分类号: TM506

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)01-0081-03

Effect of Boosting Rate on Electrical Trees Growth Characteristics in XLPE Cables with Application of the Pigtail Cable Experimental Device

YE Kai-yan, LIAO Rui-jin, LIU Ling, ZHOU Quan

(State Key Laboratory of Transmission & Distribution Equipment and Power System Safety and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Electrical treeing bottlenecks the operation reliability and service life of cross-linked polyethylene (XLPE) power cables. This paper adopts metal needle defects to model a region of electrical stress in XLPE cables, and investigates the effects of different boosting rates (0.1 kV/s, 1 kV/s) on electrical tree growth characteristics of the XLPE cables under the power frequency (50 Hz). The result indicates that the inception of electrical tree is faster under higher boosting rate, and the structure of the electrical tree changes from branch morphology to dense branch morphology with increasing fractal dimension.

Key words: XLPE cable; electrical treeing; boosting rate; tree morphology; fractal dimension

0 引言

交联聚乙烯(XLPE)电力电缆具有机械性能好、绝缘性能优异、传输容量比同截面油纸绝缘电缆大、生产工艺简便、便于大规模生产等优点,在电力系统中的应用日益广泛^[1]。研究和运行经验表明,电树枝化是制约 XLPE 电力电缆安全性和运行寿命的核心问题^[2],因此迫切需要深入研究 XLPE 电缆电树枝的引发与发展机理。

目前国内外对聚合物中的电树枝化已经展开了大量的基础研究工作,在某些方面已取得了阶段性的成果。但研究工作还需要继续深入,主要因为聚合物电树枝是一种极其复杂的电腐蚀现象,影响它的因素有很多。研究者把外施电压、温度、机械应力、频率等作为电树枝的影响因素进行了电树枝生长特性的研究^[3-7],研究表明交流电压幅值、半波和交流叠加冲击都会影响树枝的引发和生长^[2,8]。笔者研究了在 12、15 kV 的工频交流电压下,起始升压速度为

0.1、1 kV/s 的两种情况中 XLPE 电缆中树枝生长的局放起始时间和电树枝形态变化,结果表明升压速度对树枝生长有较大的影响,高的升压速度会加速电树枝的引发,并且影响电树枝的后期形态。

1 实验系统

1.1 实验样品与电极

实验采用型号为 YJV₂₂-3×95, 8.7/15kV XLPE 电缆作为实验样品。具体制作步骤为:在去铠甲的三相 15 kV XLPE 电缆中截取 0.9 m 的电缆段,切削电缆的两个端头,露出 25 mm 线芯,去除 190 mm 外半导体屏蔽层,揭开电缆外层铜带,取长 2.8 mm、曲率半径 5 μm 奥氏体不锈钢针沿电缆径向插入 2.5 mm,恢复铜屏蔽层,用 AB 胶涂抹于铜带缝隙处,使其密封,样品结构见图 1。电缆线芯直径 11.5 mm,内半导体屏蔽层厚 0.5 mm, XLPE 绝缘层厚 4.8 mm,外半导体屏蔽层厚 0.55 mm,铜带紧贴外屏蔽层,针尖到内半导体屏蔽层的距离为 2.8 mm。

由于电缆样品两端头应力比较集中,为了防止

收稿日期:2008-01-31; 修回日期:2008-08-11

作者简介:叶开颜(1979-),硕士研究生,从事电气设备绝缘在线监测与故障诊断研究。

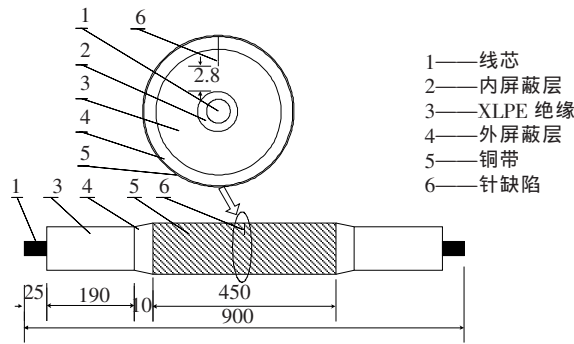


图1 样品结构

两端产生局部放电影响实验结果,实验采用一套充油的电极系统来对两端头进行均压处理,其结构见图2。采用玻璃钢(FPR)圆筒2作为外壳,顶部开口,玻璃钢筒两端采用圆型不锈钢板1与其契合形成密封箱,一个中间开槽的圆柱型铜电极3位于箱体内部中心,通过一个螺纹杆穿过不锈钢板与外部均压罩6相连,电缆样品插在两圆柱电极中,外层铜带通过铝合金出油阀7接地,实验时在箱体中灌入25号变压器油。

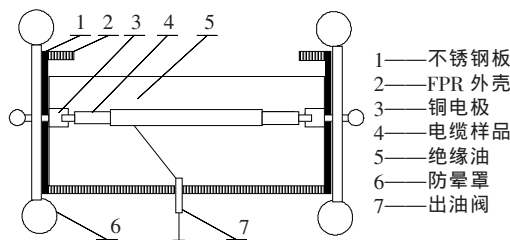


图2 电极系统结构

1.2 实验路线

该实验通过检测局部放电来监测电缆中的电树枝发展,因此采用数字化的局部放电检测方法,实验线路见图3。调压器、变压器、10 kΩ 保护电阻和1 000 pF 的耦合电容组成一个50 kV/50 kV·A 无晕局部放电电源系统,传感器为铁氧体罗戈夫斯基线圈(带宽50 kHz~15 MHz),局放信号经过10~100 倍的程控放大和100 kHz 的高通滤波后,利用LeCroy Wavepro7100 示波器(带宽1 GHz,最高采样率20 GS/s)进行观测和采集存储。

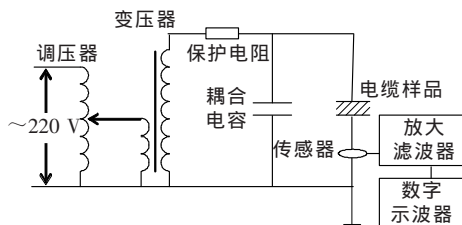


图3 实验接线图

1.3 观测系统

加压结束的XLPE 电缆样品,利用切片机将电缆切成1~3 mm 的薄片后,利用带摄像头的数码体式显微镜进行拍照观测,电树枝观测系统见图4,主要由体式显微镜(最大放大倍数300 倍)、CCD 镜头

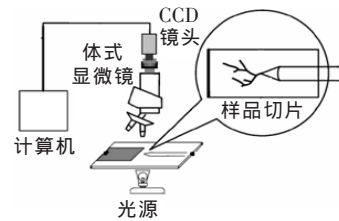


图4 电树枝观测系统

或数码相机和计算机组成。

2 试验结果

制作4 个电缆样品进行实验,样品a 和c 在0.1 kV/s 升压速度下分别均匀升压至12 kV 和15 kV 稳定,样品b 和d 在1 kV/s 升压速度下分别均匀升压至12 kV 和15 kV,观测并记录局部放电的起始时间,结果见表1,局放起始10 min 后停止加压并切片观测电树枝图片,结果见图5。

表1 实验结果

样品	升压速度/(kV·s ⁻¹)	电压值/kV	局放起始时间/s	树枝形态
a	0.1	12	9 063	纯枝状
b	1.0	12	2 456	密枝状
c	0.1	15	643	纯枝状
d	1.0	15	247	稠密枝状

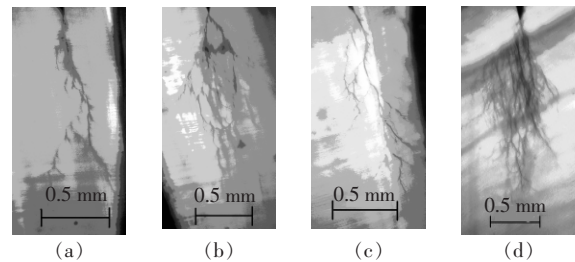


图5 电树枝照片

3 分析与讨论

3.1 电树枝的引发

电树枝的形成需要经过两个阶段,一个是潜伏期即引发期,另一个是生长发展期,电树枝是在潜伏期之后开始的。电树枝的引发伴随着一系列的复杂、多变的微观变化过程,包括热电子的形成、空间电荷的入陷与脱陷、电致发光与光降解等等^[2,9],现在一般认为电树枝的引发与注入到聚合物中的电荷有关,聚合物的断链和自由基的形成是电树枝开始引发的标志^[2]。潜伏期之前检测不到局部放电,电树枝引发后在树枝通道中会产生局部放电,因此可以近似将局部放电的起始作为电树枝的起始,对比表1 结果可以看到在12 kV 和15 kV 下,升压速度由0.1 kV/s 提高到1 kV/s,局部放电的起始时间大大的缩短,即较高的升压速度加速了电树枝的形成,这表明在升压过程中,较高的升压速度产生的电压波动加速了针尖电荷的注入与抽出,这种强力的电荷的注入抽出对树枝引发产生了影响,从而较快地形成了电树枝。

对于实际运行的 XLPE 电缆,电树枝的潜伏期一般都比较长,其发展时间相对可以忽略,因此电树枝的起始可以作为电缆运行寿命的终点,文[10]利用预击穿局部放电(PPD)方法来检测 XLPE 电缆的“弱点击穿”,从局放起始时间变化可以看到电压的快速改变将会加速电树枝的形成,因此运行中的 XLPE 电缆在电压的快速变化作用下会加速电缆中电荷转移,从一定程度上加速电树枝的形成,影响电缆的安全和使用寿命,这个结果与交流叠加冲击^[8]下得到的结果是相同的。

3.2 电树枝的发展

从图 5 可以看出,升压速度的变化,树枝形态随之发生了变化,样品 b 在树枝引发后迅速发展出两个主分支,样品 d 生长出更多的小分支。在一般情况下,可用分形维数 D 描述电树枝的形状,在三维欧氏空间中,对于开式结构分枝树, $1 < D < 2$; 对于具有紧密结构的丛形或球形电树枝, $2 \leq D \leq 3$; 但是通常试验得到的是 2 维照片,对于 2 维照片,该值位于 1~2 之间,接近 1 时为枝状电树枝,接近 2 时为丛林状电树枝,中间状态为混合状。通过盒子维数法^[11-13]可以计算得到各样品的分形维,见表 2。

12 kV 下分形维为 1.22 和 1.37,15 kV 下电树枝分形维为 1.25 和 1.49,升压速度的提高使电树枝的分形维变大。由于升压结束后电压值稳定,此时外界环境对电树枝的生长影响较小,所有电树枝形态变化的主要原因是升压速度改变加速了电荷的注入,改变了空间电荷的动态分布过程,使电树枝起始后初期发展过程改变,进而影响了电树枝的最终形态,这说明电树枝的起始形态与后期发展相关联,电树枝的发展是一个受外部环境作用、内部条件影响的非线性动力发展过程,这也是电树枝生长过程复杂多变的原因。其发展过程见图 6。

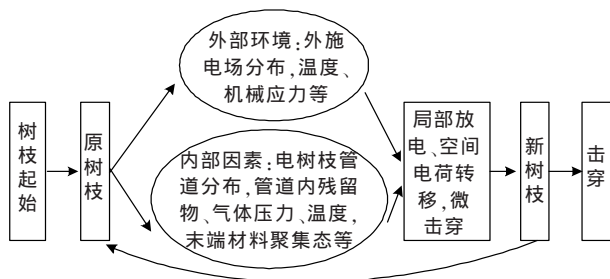


图 6 电树枝的生长过程

电树枝引发后形成树枝管道,管道内残留物的电导^[2]及周围的空间电荷分布与外施电场等因素影响局部放电,局部放电产生的高温和高气压使原树枝管道局部微击穿,材料的聚集态与机械应力影响微击穿的方向^[6],微击穿后新的树枝管形成,电树枝

如此循环生长,直致树枝通道贯穿电极而击穿。

4 结论

(1)在工频电压下,电压值快速变化会加速应力集中点的电荷注入速度,从而加速电树枝的引发速度。

(2)初期电荷的注入速度会影响空间电荷的分布,改变电树枝的起始形态,电树枝的起始形态会影响其后期形态,电树枝的发展过程是一个复杂的非线性动力发展过程。

(3)在实际运行的 XLPE 电缆中,频繁电压快速变化过程会加速电树枝的形成,影响电缆的运行寿命。

该研究是建立在电缆中存在电场应力集中区域的基础上,对于电缆中不存在应力集中情况下电缆劣化和寿命特性还有待对空间电荷影响的深入研究。

参考文献:

- [1] 应启良,魏东,高小庆,等.我国高压及超高压交联聚乙烯绝缘电力电缆的应用与发展[J].电线电缆,2001(3):3-9.
- [2] 李盛涛,郑晓泉.聚合物电树枝化[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [3] 张秀阁,贺景亮,王洪新,等.工频电压下 XLPE 绝缘的电树枝老化实验研究[J].高电压技术,1998,24(4):57-59.
- [4] 郑晓泉,CHEN G.机械应力与电压频率对 XLPE 电缆电树的影响[J].高电压技术,2003,29(4):6-8.
- [5] 郑晓泉,冯小倩,王以田.聚合物电树枝种类及其影响因素[J].绝缘材料,2003(3):25-28.
- [6] 王以田,郑晓泉,CHEN G,等.聚合物聚集态和残存应力对交联聚乙烯中电树枝的影响[J].电工技术学报,2004,19(7):44-48.
- [7] CHAMPION J V, DODD S J. The Effect of Material and Temperature on Electrical Tree Growth Epoxy Resins [C]// Dielectric Materials, Measurement and Applications Conference Publication, 2000: 30-34.
- [8] MURATA Y, KATAKAI S, KANAOKA M. Impulse Breakdown Superposed on AC Voltage in XLPE Cable Insulation [J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation. 1996, 3(3): 361-365.
- [9] DISSADO L A. Understanding Electrical Trees in Solids: from Experiment to Theory [J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(4): 483-49.
- [10] KUBOTA T, TAKAHASHI Y. Development of 500 kV XLPE Cables and Accessories for Long Distance Underground Transmission Line Part1: Insulation Design of Cables [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(4): 1741-1749.
- [11] KUDO K. Fractal Analysis of Electrical Trees [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 5(5): 713-727.
- [12] SARKAR N, CHAUDHURI B B. An Efficient Differential Box-counting Approach to Compute Fractal Dimension of Image [J]. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, 1994, 24(1): 115-120.
- [13] Niemeyer L. Fractal Dimension of Dielectrics Breakdown [J]. Phys. Rev. Lett., 1984, 52(12): 1033-1036.