

# 工频电压下 110kV 级 XLPE 电缆绝缘中电树枝生长阶段特性

陈向荣, 徐 阳, 徐 杰, 史 文, 杨文虎, 刘 英, 曹晓珑, 李敬飞

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 基于实时显微数字摄像技术和局部放电连续测量相结合的实验方法, 研究了不同外施工频电压下 110kV 级 XLPE 电缆绝缘中电树枝的结构特征及其生长特性。结合大量实验结果, 研究发现在不同外施电压的作用下, 电树枝结构呈现出多样性的特点, 生长过程及其局部放电具有鲜明的阶段特性, 而且每个阶段存在不同生长机理。

**关键词:** 外施工频电压; XLPE 电缆绝缘; 电树枝; 阶段特性; 结构特征; 局部放电

**中图分类号:** TM215.1; TM247

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1003-3076(2010)03-0039-05

## 1 引言

在局部高场强作用下, 聚合物绝缘中会形成气隙, 随后由于局部放电的作用, 气隙逐渐生长为细丝状腐蚀通道并呈现出树状结构, 最终导致绝缘失效。XLPE 电缆绝缘中的缺陷主要有屏蔽层凸起、杂质和微孔<sup>[1]</sup>, 这些缺陷的存在是造成电树枝引发与快速生长的隐患, 对电缆的安全运行形成严重威胁。因此, 对于高压 XLPE 电缆而言, 电树枝已成为制约其运行寿命与可靠性的主要因素。

人们对聚合物中的电树枝现象已经进行了将近六十年的研究和探索。电树枝是一种极其复杂的电腐蚀现象, 它的引发、生长受到外施电压及其频率、残存应力、温度以及材料的聚集形态等诸多因素的影响<sup>[2-9]</sup>。以往人们对电树枝的研究主要集中在具有均匀形态的无定型聚合物材料, 近年来一些学者研究发现, 具有半结晶形态的聚合物中的电树枝生长规律远比均匀无定型材料复杂。本文采用实时显微数字摄像技术和局部放电连续测量相结合的方法研究了不同外施工频电压下, 110kV 级 XLPE 电缆绝缘中电树枝的结构特征及其生长的阶段特性。研究发现在不同外施工频电压下, XLPE 电缆绝缘中的电树枝呈现出不同的形状, 而且生长阶段特性鲜明。9kV 下电树枝可分为滞长型、枝状和枝-松枝状, 电树枝生长呈现出三个阶段, 对应局部放电结果

显示出明显的阶段性, 11kV、13kV 和 15kV 下的电树枝分别为枝状和丛状, 电树枝生长及其局部放电特性具有很好的一致性。

## 2 试样与系统

### 2.1 试样

本研究所用试样直接取自 64/110kV 级高压 XLPE 电缆样段, 抽出缆芯后, 切削加工成 5mm 厚度空心圆盘状或半圆状试样。采用典型的针-板电极结构, 电极间距控制为 2~3mm, 针电极的直径为 1mm, 针尖圆锥角 30°, 曲率半径  $5 \pm 1 \mu\text{m}$ , 试样和针电极结构如图 1 所示。为保证针电极与 XLPE 绝缘之间的紧密结合, 在经过酒精清洗处理并烘干的针电极表面预涂一层聚乙烯。利用专门制作的模具加热试样至 120~140℃, 将针电极匀速插入, 在模具中保持 120℃退火 3 分钟后, 关掉加热电源, 等待 5 分钟后将试样取出自然冷却至室温, 冷却速率为 11℃/min。在加压实验之前, 每个试样都用偏光显微镜进行观察, 所有试样的针尖区域均无残存机械应力, 而且针电极与 XLPE 绝缘紧密结合, 无气隙存在。对于针电极与 XLPE 绝缘之间有气隙存在的试样, 当外施电压为 2kV 时, 就可以测得明显的局部放电信号。

### 2.2 实验系统

实验线路如图 2 所示, 其中高压电源由调压器

收稿日期: 2009-10-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50877057)

作者简介: 陈向荣(1982-), 男, 湖南籍, 博士生, 主攻交联聚乙烯电缆绝缘中电树枝破坏以及电缆可靠性评估等;

曹晓珑(1945-), 男, 陕西籍, 教授/博导, 博士, 主攻电气绝缘测试技术, 电缆技术, 电介质结构与性能等。

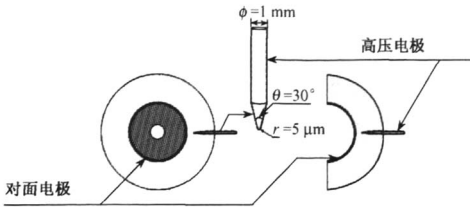


图 1 试样与电极  
Fig. 1 Sample and electrodes

T1 和高压试验变压器 T2 构成,R 为试验变压器 T2 自带的保护电阻,C1 和 C2 构成 1000:1 的电容分压器,Ck 为 2000pF 的耦合电容,Cx 为试样,检测装置由 RC 并联电路模块构成。局部放电测量系统完全按照 IEC60270 标准设计,灵敏度为 2~3pC,实验时阈值设定为 10pC,整个实验在屏蔽室中进行。实时显微数字摄像系统如图 3 所示。主要由显微数字摄像与计算机构成,器皿中的硅油用于防止外部放电和沿面闪络,同时可以增强试样的透明度,便于实验过程中的图像观察。

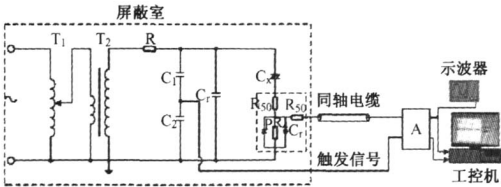


图 2 实验线路  
Fig. 2 Experimental circuit

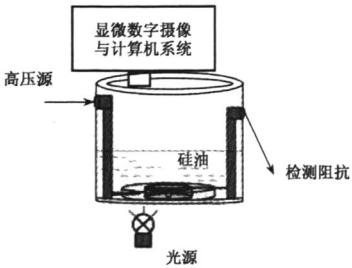


图 3 实时显微数字摄像系统  
Fig. 3 Real-time microscope observation system

3 结果与讨论

实验在室温条件下进行,外施工频电压有效值分别为 9kV、11kV、13kV 和 15kV,每个电压等级至

少实验 10 个试样,实验试样共计 50 余个。实验时实时显微数字摄像观察和局部放电连续测量同时进行,获得了大量电树枝生长过程照片及其局部放电数据,限于篇幅,本文仅给出不同外施工频电压下 110kV 级 XLPE 电缆绝缘中具有代表性的电树枝图像和局部放电数据。

当外施工频电压为 9kV 时,XLPE 电缆绝缘中的电树枝呈现出多样性的特点,分别为滞长型(图 4(a))、枝状(图 4(b))和枝-松枝状(图 4(c)),其对应生长和局部放电最大放电量  $Q_{max}$  曲线如图 5 所示,为了便于比较,滞长型电树枝只给出了 200min 以内的生长曲线。由图 5 可知,电树枝的生长过程及其局部放电具有明显的阶段性。对于滞长型电树,主要存在起始、缓慢和停滞生长三个阶段,起始阶段由于局部放电的作用,电树枝迅速呈枝状向对面电极生长,最大放电量  $Q_{max}$  迅速增加至 70pC;在缓慢生长阶段,电树枝生长速度减慢,同时最大放电量  $Q_{max}$  逐渐增加至 150pC,针尖附近通道以及枝状通道的颜色逐渐变深,材料破坏区域逐渐扩大;进入滞长阶段后,主干通道停止生长,局部放电量逐渐减小,有时甚至出现放电熄灭的现象,这是由于枝状放电通道壁上介质的特性发生了变化,在局部放电长时间作用下,材料被碳化,电导率增加,阻碍了主干通道的局部放电,随着时间的加长,被腐蚀炭化通道周围电荷注入方式由电极注入转向从枝状通道注入,枝状通道附近形成局部电场集中而导致微击穿,并逐渐扩展树枝破坏区域。

由图 4(b)和图 5 可知,枝状树的生长有起始、滞长和快速生长三个阶段。起始阶段由于局部放电的作用电树枝呈枝状快速生长,最大放电量  $Q_{max}$  迅速增加至 200pC;进入滞长阶段,电树枝主干通道停滞生长,最大放电量  $Q_{max}$  趋于平稳,部分枝状通道周围出现局部微击穿;在快速生长阶段,主干通道迅速向对面电极生长,最大放电量  $Q_{max}$  变化不大,介于 230pC 到 250pC 之间。同样,枝-松枝状树(图 4(c))也呈现出鲜明的三个生长阶段,不同的是电树枝局部放电最大放电量  $Q_{max}$  在起始和滞长阶段前期呈“单峰”形变化,且在“峰”处的  $Q_{max}$  介于 90pC 到 120pC 之间,在滞长阶段后期和快速生长阶段,局部微击穿在主干通道上继续沿着电场方向呈松枝状生长,这是由于在原来主干枝状通道上的微裂纹中形成了明显的放电通道,存在零星的局部放电,且最大放电量  $Q_{max}$  小于 20pC,由此可知松枝状结构是因为

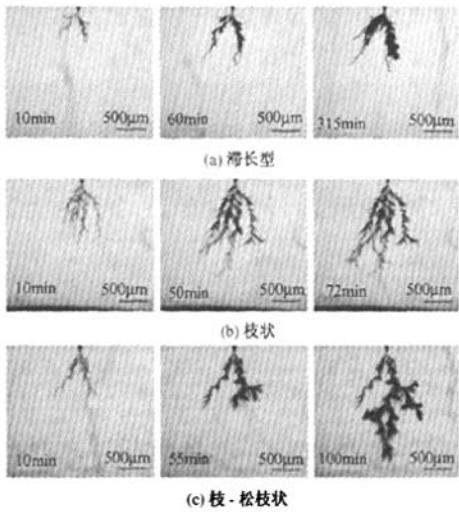


图4 9kV时的电树枝  
Fig.4 Electrical trees of 9kV

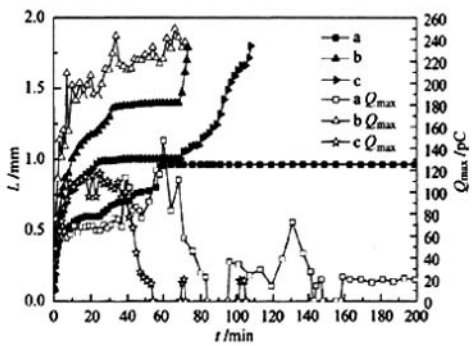


图5 9kV下电树枝  $t$ - $L$  和  $t$ - $Q_{\max}$  曲线  
Fig.5 Electrical trees  $t$ - $L$  and  $t$ - $Q_{\max}$  curves at 9kV

主干通道的电导率增加并在其附近形成局部高场强区域,进而导致出现松枝状腐蚀通道,新形成的树枝通道在局部微放电的作用下沿着材料的电气弱区又会形成新的微击穿通道,如此反复,最终导致材料的快速破坏。

11kV、13kV 和 15kV 外施工频电压下得到的典型电树枝结构如图 6 所示,分别为枝状和丛状,其对应生长和局部放电最大放电量  $Q_{\max}$  曲线如图 7 所示。对于枝状树而言,其整体生长速度较快,阶段特性不太明显,结合生长过程图像观察及其生长速度和最大放电量  $Q_{\max}$  曲线分析可知,电树枝经过起始阶段的快速生长后,由于局部放电产生的高温和高压的作用,存在一个主放电通道由细变粗的扩大过程,期间树枝生长速度有所减慢,且最大放电量  $Q_{\max}$

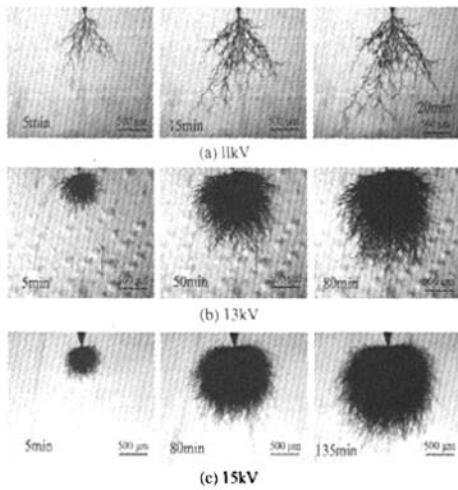


图6 11kV、13kV 和 15kV 时的电树枝  
Fig.6 Electrical trees of 11kV, 13kV and 15kV

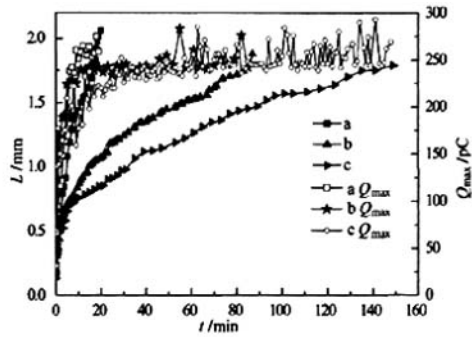


图7 11kV、13kV 和 15kV 下电树枝  $t$ - $L$  和  $t$ - $Q_{\max}$  曲线  
Fig.7 Electrical trees  $t$ - $L$  and  $t$ - $Q_{\max}$  curves at 11kV, 13kV and 15kV

处于平稳状态,介于 250pC 到 270pC 之间,随后电树枝进入快速生长阶段,最大放电量  $Q_{\max}$  变化不大。13kV 和 15kV 外施工频电压下的材料并没有出现立即击穿的现象,其电树枝生长和局部放电表现出鲜明的阶段特性。对于 13kV 下的丛状树而言,第一阶段电树枝快速生长并显现出丛状的结构特征,随后针尖附近树枝颜色逐渐加深,外围的细枝沿着丛状部分向外继续生长,树枝破坏区域逐渐扩大,最大放电量  $Q_{\max}$  迅速增加至 240pC;第二阶段丛状区域的细枝逐渐稠密,同时在丛状树的边沿继而又生长出细枝,如此反复,因此该阶段电树枝呈匀速生长,且最大放电量  $Q_{\max}$  处于稳定状态;第三阶段为快到达对面电极之前的快速生长阶段。而外施电压 15kV 下的电树枝,其阶段生长特性与 13kV 下的电

树枝基本相似,唯一不同的是其深黑色丛状区域面积更大,这样极大地减慢了树枝的生长速度,第二阶段生长时间更长,同时局部放电最大放电量  $Q_{max}$  幅值比 13kV 下的电树枝更大。因此丛状结构的出现表明由于树枝放电通道的整体增加减小了局部放电能量的作用从而延缓了电树枝生长的时间,随着电树枝的生长,放电通道的长度随之增加,局部放电量也随之增加,而 11kV 下枝状结构中因为放电能量集中于少量主干放电通道,因而生长速度最快。此外,国内学者郑晓泉等研究发现对于 XLPE 电缆绝缘层内侧而言,由于电缆生产冷却工艺的影响,在 XLPE 电缆绝缘内侧容易形成大球晶以及微孔,同时结晶过程的排渣效应会使绝缘中的杂质聚集在晶界周围而形成绝缘弱区<sup>[10]</sup>,这为电树枝的引发和快速生长提供了可能。对于更高外施电压下聚合物中电树枝的生长规律,文献[11]中 L. A. Dissado 等的研究表明,随着外施电压的增加,电树枝结构分别呈枝状和丛状规律性变化,然而当外施电压升高到某一临界值时,聚合物材料将会被直接击穿(Runaway)。

#### 4 结论

通过对 110kV 级 XLPE 电缆绝缘在不同外施工频电压下的电树枝生长阶段特性分析,得出如下结论:

(1) 外施工频电压 9kV 下 XLPE 电缆绝缘中的电树枝结构呈现出多样性的特点,分别为滞长型、枝状和枝-松枝状,电树枝生长及其局部放电阶段特征鲜明。滞长型电树枝生长时间长,起始阶段局部放电对电树枝生长速度作用明显,滞长阶段后期由于局部放电的长期腐蚀作用导致主干通道电导率增加而使得局部放电最大放电量  $Q_{max}$  变小,枝状电树枝生长较快且局部放电作用明显,枝-松枝状电树枝生长时间较长,但是在滞长阶段后期和快速生长阶段主干通道被腐蚀炭化导致通道尖端场强集中而形成松枝状结构,且只有零星的微弱放电。

(2) 11kV 下的电树枝为枝状树,其生长速度最快,阶段特性不太明显,但是在中间阶段可以观察到树枝通道由细变粗的过程,最大放电量  $Q_{max}$  增加,后趋于稳定水平。13kV 和 15kV 下的材料并没有出现立即击穿的现象,而是形成了丛状电树,电树枝呈现出起始快速生长、中间匀速生长和达到对面电极之前的快速生长阶段,起始阶段局部放电量迅速增加,

匀速生长阶段局部放电量处于稳定水平,快速生长阶段局部放电量出现较大波动。15kV 下电树枝的深黑色丛状区域面积比 13kV 下的电树枝更大,放电细枝通道更为密集,这样极大地减弱了局部放电的作用,进而延长了电树枝生长的时间。

#### 参考文献 (References):

- [1] 刘英,王乐,王磊,等 (Liu Ying, Wang Le, Wang Lei, et al.). 从缺陷影响看高压 XLPE 电缆绝缘减薄的必要性 (Necessity of reducing the insulation thickness of HV XLPE cables from the defect point of view) [J]. 高电压技术 (High Voltage Eng.), 2006, 32(7): 29-32.
- [2] Chen G, Tham C H. Electrical treeing characteristics in XLPE power cable insulation in frequency range between 20 and 500 Hz [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(1): 179-188.
- [3] Champion J V, Dodd S J, Stevens G C. Analysis and modelling of electrical tree growth in synthetic resins over a wide range of stressing voltage [J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 1994, 27(5): 1020-1030.
- [4] Densley R J. An investigation into the growth of electrical trees in XLPE cable insulation [J]. IEEE Trans. Electrical Insulation, 1979, 14(3): 148-158.
- [5] 郑晓泉 (Zheng Xiaoquan), G Chen, A E Davies. XLPE 电缆绝缘中电树枝种类及其影响因素 (Types of electrical trees and influence factors in XLPE cable insulation) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2003, 22(4): 21-24.
- [6] 谢安生,李盛涛,郑晓泉,等 (Xie Ansheng, Li Shengtao, Zheng Xiaoquan, et al.). 外施电压频率对 XLPE 电缆绝缘中电树枝生长特性的影响 (Influence of frequency of voltage applied on the propagation characteristics of electrical trees in XLPE cable insulation) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2006, 25(3): 33-36.
- [7] 周远翔,邢晓亮,聂琼,等 (Zhou Yuanxiang, Xing Xiaoliang, Nie Qiong, et al.). 高频下电树老化引起的高密度聚乙烯击穿现象 (Breakdown phenomena caused by electrical tree degradation in high density polyethylene under high frequency voltage) [J]. 高电压技术 (High Voltage Eng.), 2007, 33(12): 14-18.
- [8] 任浩,王珏,严萍 (Ren Hao, Wang Jue, Yan Ping). 重频纳秒脉冲下有机玻璃电树枝老化特性的实验研究 (Study on electrical tree in PMMA under repetitive nanosecond pulses) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2008, 27(4): 32-35.
- [9] 郑晓泉,冯小倩,王以田 (Zheng Xiaoquan, Feng Xiaoqian, Wang Yitian). 聚合物中电树枝种类及其影响因

- 素 (Categories of electrical tree in polymer insulation) [J]. 绝缘材料 (Insulating Materials), 2003, 32(5): 25-28.
- [10] 郑晓泉, 谢安生, 李盛涛 (Zheng Xiaoquan, Xie Ansheng, Li Shengtao). 发展在 XLPE 电缆绝缘内外侧的电树枝 (The electrical trees that developed in inner and outer layer of XLPE cable insulation) [J]. 物理学报 (Acta Physica Sinica), 2007, 56(9): 5494-5501.
- [11] Dissado L A, Dodd S J, Champion J V, et al. Propagation of electrical tree structures in solid polymeric insulation [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997, 4(3): 259-279.

## Propagation stage characteristics of electrical tree in 110kV XLPE cable insulation at 50Hz power frequency voltage

CHEN Xiang-rong, XU Yang, XU Jie, SHI Wen, YANG Wen-hu, LIU Ying, CAO Xiao-long, LI Jin-fei  
(State Key Laboratory of Power Equipment and Elec. Insulation,  
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Based on the combined experimental methods of real-time microscope digital imaging technology and partial discharge continuous measurement, the structure properties and propagation characteristics of electrical tree in 110kV XLPE cable insulation were studied at different 50Hz power frequency applied voltage. Combined with a number of experimental results, it was found that under the effect of different applied voltages, the electrical tree structures displayed the features of diversity, the propagation process and partial discharge showed apparent stage characteristics, and also there were different propagation mechanisms in each stage.

**Key words:** 50Hz power frequency applied voltage; XLPE power cable insulation; electrical tree; stage characteristics; structure properties; partial discharge

---

(上接第 29 页, cont. from p. 29)

- [12] F Katiraei, M R Iravani. Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation unit [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2006, 21(4): 1821-1831.
- Chai Jianyun). 永磁磁阻发电机的电压控制 (Voltage control of permanent-magnet/reductance generator) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2006, 25(4): 63-66.
- [13] 吴义勇, 孙旭东, 柴建云 (Wu Yiyong, Sun Xudong,

## Virtual synchronous generator based inverter in microgrid

SU Jian-hui, WANG Chang-liang  
(Research Center for Photovoltaic System Engineering Ministry of Education,  
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** A new inverter based on the model of synchronous generator (which is called virtual synchronous generator) is presented. The inverter has the function of controlling power and modulating frequency and voltage, which meets the need of microgrid. It can modulate the output reasonably to meet the stability requirements of the power system. This scheme has been proved with MATLAB/Simulink in the end.

**Key words:** microgrid; inverter; virtual synchronous generator