

高频电压下交联聚乙烯电缆绝缘中电树枝生长的动力学模型^{*}

谢安生¹⁾²⁾ 李盛涛^{1)†} 郑晓泉¹⁾

1) 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

2) 长安大学环境科学与工程学院, 西安 710064)

(2007 年 6 月 22 日收到, 2007 年 11 月 23 日收到修改稿)

针对高压交联聚乙烯电缆绝缘试样, 在 1000—2000 Hz 10 kV 峰值正弦电压下, 采用计算机实时显微数字摄像技术进行了电树枝培养实验. 基于半结晶绝缘材料中电树枝生长机理和电树枝结构的分形特征, 提出了一个在高频范围定量预测电应力驱动下交联聚乙烯电缆绝缘中电树枝生长特性的动力学模型, 获得了电树枝生长率方程和从电树枝生长到击穿过程的寿命公式. 将该模型预测值与实验中获得的电树枝生长规律实验数据进行比较, 其结果有较好的一致性, 表明提出的模型化方法可以应用到交联聚乙烯电缆绝缘中电树枝老化规律的定量分析研究中.

关键词: 交联聚乙烯电缆绝缘, 电树枝, 施压频率, 动力学模型

PACC: 7750, 7790, 8220F

1. 引言

电树枝是发生在所有高电压聚合物绝缘中直接导致绝缘结构电气老化直至击破坏的主要过程, 是严重影响采用聚合物作为主绝缘的高压电气设备可靠性与使用寿命的首要老化现象. 伴随 66 kV 及以上电压等级交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)高压电力电缆的广泛应用, 特别是近年来交联聚乙烯电缆电压等级迅速向 500 kV 的发展, 受电缆主绝缘挤出和冷却生产工艺过程的影响, 厚绝缘中的不均匀聚集态结构对电缆运行可靠性的影响正日益突出. 由于高电压等级电缆在输配电系统中的重要地位, 其主绝缘中的电树枝老化比在低电压等级电缆绝缘中的电树枝化更具有危险性, 造成停电事故的危害也远大于后者, 因此, 研究厚绝缘交联聚乙烯电缆结构中的电树枝老化特性及其影响因素无论对于电缆生产企业的发展, 还是输配电系统的可靠性均具有重要工程参考意义. 在过去的几十年中, 尽管人们在高压交联聚乙烯电缆绝缘中电树枝老化特性的研究方面已经投入了相当大的工作, 发表了

大量的研究报道^[1-8], 但是对于交联聚乙烯电缆绝缘中电树枝生长规律的定量描述方面尚未检索到相关文献, 这主要归结于在不均匀半结晶聚集态结构的交联聚乙烯电缆绝缘中的电树枝结构和生长规律远比具有纯无定形结构的均质材料复杂^[9-11]. 电树枝引发和生长过程的影响因素较多所致. 目前, 所能检索到的有关聚合物电树枝生长规律的定量研究文献, 多集中在具有均匀聚集态的环氧树脂等这类无定形高聚物材料中^[12, 13].

对聚合物电树枝生长特性的研究是一个需要消耗大量时间的大样本研究过程. 本文采用计算机实时显微数字摄像技术, 对实际的交联聚乙烯电缆绝缘样品做了大量的电树枝培养实验, 研究了在不同施压频率下交联聚乙烯电缆绝缘中电树枝的结构特征及生长规律. 发现电缆绝缘中出现的电树枝结构特征和生长特性与施加电压的频率有关, 在低频下(≤ 500 Hz)能够生成多种类型的电树枝, 而在高频下(≥ 1000 Hz)生长的电树枝结构类型则比较单一且有一定的规律性, 只能生成稠密枝状电树枝^[14-17]. 上述实验研究, 是进行数学归纳和定量研究的基础. 本文主要根据交联聚乙烯电缆样品中电

^{*} 国家杰出青年科学基金(批准号: 50625721)、教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-05-0833)和国家自然科学基金(批准号: 50577052)资助的课题.

[†] 通讯联系人, E-mail: sli@mail.xjtu.edu.cn

树枝在高频下生长的特定物理机理和电树枝结构的分形特征,对电树枝的生长特性提出定量的描述并通过实验结果进行验证.

2. 实验过程及结果

2.1. 实验过程

实验采用计算机实时显微数字摄像电树枝培养分析系统进行,该系统由一台变频高电压发生器(由变频高压放大器和函数信号发生器组成)和一套长焦距显微镜数字摄像计算机系统构成^[15]. 实验用试样为由英国 National Grid 提供的 66 kV 级交联聚乙烯电缆样品,将电缆样品抽去缆芯,切削加工成 5 mm 厚度空心圆盘状试样. 电极采用典型的针板结构并统一采用曲率半径为 $5 \pm 1 \mu\text{m}$ 的钢针电极. 高压针电极与圆盘状接地电极之间的距离控制为

3 mm. 为保持针电极与交联聚乙烯介质之间的密和性,在插入针电极前对钢针电极进行了表面清洗和预涂聚乙烯(polyethylene, PE)处理,并使用专用的试样电极加工制作模具加热试样,然后将针电极插入^[16]. 在半结晶聚合物试样中获得高清晰电树枝照片的关键要素,一是必须采用均匀的强背景光,二是要求样品表面尽可能的光滑,并将试样浸在具有与聚乙烯相似折射率的绝缘油中.

2.2. 实验结果

整个实验过程均在室温和 10 kV 峰值正弦电压下进行. 图 1 分别是施压频率在 1000 Hz 和 2000 Hz 情况下获得的交联聚乙烯电缆绝缘中电树枝的生长结构照片. 在高频时由于局部放电强烈,电树枝的生长受材料结构情况的影响较小,因而高频引发并生长的电树枝多数情况下均为稠密的枝状电树枝.

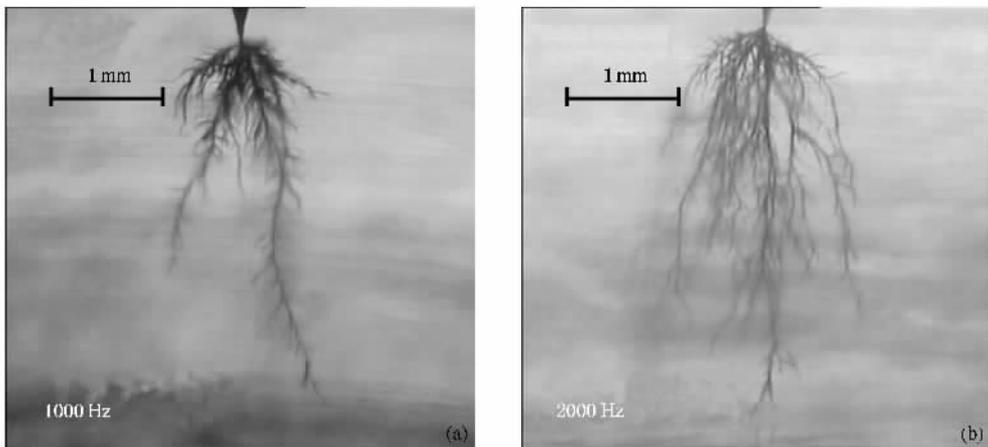


图 1 外施电压为高频时生长的电树枝结构图 (a)1000 Hz (b)2000 Hz

3. 电应力作用下交联聚乙烯电缆绝缘中电树枝生长的分形动力学模型

电树枝通常是在一个高的和发散的电应力作用一定时间后被引发的. 由于局部电场的发散以及半结晶介质材料的非均质特征,交联聚乙烯电缆绝缘中的电树枝生长特性变得更加复杂. 一般而论,当电介质材料受到一定时间的电应力作用时,在针电极的尖端会产生一个很细的管状电树枝通道,当电树枝通道向前运动时,在电树枝通道尖端以外的区域将会受到电应力、电荷注入与抽出,以及热的和化学方面的影响,足以引起电树枝尖端前部和周围不可

逆损害的发生,这个发生不可逆损害的区域称作劣化区. 劣化区的形成便是电树枝生长过程中电树枝生长的起因^[12],一般情况下,这个劣化区是一个以微孔、裂缝纹或其他特征的微缺陷的总体,并且在电树枝尖端周围的劣化区里只受到高频交流电应力的作用. 在电树枝生长过程中,劣化区显示出以自相似的方式发展特征,而且是从聚合物的一些初始形态到电气损害形态的发展过程,在这种方式下电气损害的特性本质上是与聚合物的微观结构有关.

对电树枝生长的微观物理特性而言^[12,18,19],首先是在一个电树枝尖端前部的劣化区里由损害引起微孔,然后这些微孔与电树枝的延伸或分枝相结合便造成了电树枝的生长. 微孔的密度及其在劣化区

里的分布与样品中的杂质分布特征、物理聚集形态、几何形状以及施加电场的情况有关。电树枝通道位于两个电极之间的一定范围内,且电树枝生长的方向是随机的。假定在电树枝的生长过程中,在电树枝尖端的前部至少有一个劣化区,而且这个劣化区在施加电应力的情况下能够转变成亚微观树(微孔),由于主电树枝与在其尖端前部的劣化区之间的相互作用,使得电树枝的生长是一个不连续的过程。而且在电树枝生长的两个连续增量之间的间隔也是与整个材料中劣化区里的微孔的随机分布有关,因此电树枝生长的过程又是一个随机的过程,且树的结构能够被作为一个由生长着的微孔组成的分形簇来表示,这个分形簇是由作为若干个亚微观树的连续连接的结果而构成。根据 Kudo^[20]的报道,分形簇可通过簇的线性尺寸 L 和从已经形成的簇里的分枝元素的总数 X 之间的关系来描述。这个关系是一个具有非整数指数 D_f 的幂律关系:

$$X = (L/L_b)^{D_f}, \quad (1)$$

这里 D_f 是树的分形维数, X 是已经形成的树枝结构里生长的亚微观树(微孔)的总数, L 是树枝结构的线性长度,而 L_b 是一个生长着的亚微观树(微孔)的线性平均长度, $dX/dt = K$ 表示微孔的增长频率(聚合物键的击穿率)。方程(1)已被用来把一个树作为所有的分枝长度(在单位上等于新产生的一个分枝的平均长度)的总合来描述一个电树枝总的绝缘损害。

根据 Ding 等人^[21]对无定型高聚物材料中电树枝生长规律定量描述的动力学理论,树枝尖端前部的劣化区里亚微观树(微孔)的增长频率 K 能够通过计算聚合物键的破坏率来确定,根据聚合物连续键击穿机理,在一个由生长的微孔组成的分形簇来表示的树结构里,假定形成长度为 L_b 的一个分枝所需要生长的微孔数为 N_b ,则树结构中全部的树枝化损害率能够被确定如下:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{K}{N_b} = \left(\frac{kT}{hN_b} \right) \exp\left(\frac{\alpha\pi\epsilon E^2 C_0 - U_0}{kT} \right), \quad (2)$$

这里 E 是局部电场强度, ϵ 是介电常数, $\pi\epsilon E^2$ 表示当微孔通过一个单位长度生长时释放的静电能的数量,称为每单位长度的微孔生长力; C_0 代表一个微孔的线性尺寸, U_0 代表活化能,参数 α 表示材料的性能,表示了电场方向上的活化面积, αC_0 表示是由施加电场造成的活化体积; k 是波尔兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$, h 是普朗克常数 $h = 6.626 \times$

10^{-34} J s ; N_b 是允许形成长度为 L_b 的一个分枝所需要生长的微孔数,并且在树枝尖端前部的劣化区里所有生长的微孔都有着同样的生长频率 K , K/N_b 便是从微孔的形成和生长来计算出新树枝的形成率。对最简单的情况,即在方程(2)中 $N_b = 1$ 的情形,也就是说在树枝尖端前部的劣化区里,一个生长着的微孔被吸收形成了一个新的分枝后树枝就生长了。方程(2)给出了电树枝化损害发展的规律,但只是由基于与时间有关的聚合物介质击穿动力学模型获得的。很明显,电树枝化损害发展规律不仅与微孔的形成和生长的特殊的物理机理有关,而且与材料的微结构特性和施加载荷情况有关。

根据电树枝生长的气体放电和电子雪崩理论^[22,23],在电树枝生长的开始阶段会产生一根提供气体放电的细管,通过树枝状细管中的放电推动树枝生长,放电是起始电极的导电路径扩张的有效方式,且在放电的有限时间(10至100 ns)内可使树枝周边高聚物中的电场增加。在频率为 f 的交流电场中,瞬时增加的电场可使高聚物中产生电子崩,而单位时间内由雪崩产生放电的电离数是与施加电压的频率成正比的,每次放电都会在树枝内沿它路径的一些点处引发雪崩,即在单位时间内每个雪崩区积累的破坏与施压频率成正比。因此,考虑施加电压的频率对电树枝结构生长的影响因素后,将(2)式修正如下:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{K}{N_b} = Bf \left(\frac{kT}{hN_b} \right) \exp\left(\frac{\alpha\pi\epsilon E^2 C_0 - U_0}{kT} \right), \quad (3)$$

这里 f 是施加电压的频率,单位是 Hz, B 是经验常数,对交联聚乙烯电缆 $B = 9.0 \times 10^6 \text{ Hz}^{-1}$ 。把方程(1)代入方程(3),便可得到一个交联聚乙烯电缆绝缘中在高频下电树枝的生长率方程

$$\frac{dL}{dt} = \frac{BfkTL_b^{D_f}}{hN_b D_f} L^{(1-D_f)} \exp\left(\frac{\alpha\pi\epsilon E^2 C_0 - U_0}{kT} \right). \quad (4)$$

把(4)式对时间 t 进行积分便可得到电树枝的生长定律

$$L = L_b \left\{ \frac{BfkT}{hN_b} \exp\left(\frac{\alpha\pi\epsilon E^2 C_0 - U_0}{kT} \right) \right\}^{1/D_f} t^{1/D_f}. \quad (5)$$

电树枝生长到击穿的时间 t_g 可以通过对(4)式进行积分计算得到,假定树的初始长度为 $L_0 = 0$,临界树枝的长度为 L_c ,从 L_0 到 L_c 做定积分可得到

$$t_g = \left(\frac{L_c}{L_b} \right)^{D_f} \frac{hN_b}{BfkT} \exp\left(\frac{U_0 - \alpha\pi\epsilon E^2 C_0}{kT} \right). \quad (6)$$

(6)式表明,这是一个在一个方程里树枝生长到击穿的时间(寿命)与局部电场强度、环境温度、树的分形

维数以及施加电压的频率之间最基本的关系.由此可知,材料的寿命是随电场强度的增加呈指数规律减小,电树枝的分形维数越大绝缘寿命越长,实验温度和施加电压的频率越高则绝缘寿命越短.

4. 实验结果的验证

根据在高频的情况下由实验获得的交联聚乙烯电缆绝缘中电树枝的生长数据对以上获得的理论模型进行验证.在计算过程中,有关参数的选取和确定如下:

针电极尖端的局部电场强度 E 的计算,假定在树枝的尖端周围不存在空间电荷,则在针尖处的局部电场强度可按下式近似计算^[24]:

$$E = \frac{2V}{r \ln(1 + 4R/r)}, \quad (7)$$

这里 V 是试样两端施加的电压, r 是针电极针尖的曲率半径, R 是针尖到板电极之间的间距.

模型中电树枝分形维数的数值是按照电树枝生长终了的图形计算的,对图 1(a),分形维数 $D_f = 1.52$,对图 1(b) $D_f = 1.55$.

U_0 和 αC_0 值按照以下两式来计算的^[25,26]:

$$U_0 = [2.55 - 0.0414 \times \ln(N_b)] \times 10^{-19} (\text{J}) \quad (8)$$

$$\alpha C_0 = 6.0 \times 10^{-27} (\text{m}^3). \quad (9)$$

另外,在计算中,取 $T = 300 \text{ K}$, $N_b = 1$, $\epsilon = 2.45 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$, $L_b = 10^{-5} \text{ m}$, $L_c = 3 \times 10^{-3}$,即针尖到板电极的间距被作为临界树的击穿长度.

图 2 是高频下交联聚乙烯电缆绝缘中电树枝生长特性的实验结果和模型计算结果的对比,图 2(a)是图 1(a)实验结果的生长特性,(b)是图 1(b)实验结果的生长特性,(c)和(d)分别是按照模型(6)式预测的图 1(a)和图 1(b)的结果.从图中可以看出,模型的预测值和实验结果有较好的一致性,但高频时的实验结果与模型预测结果的差距较低频下的大,其差距主要表现在起始阶段,随着时间的增长,差距逐渐减小.

根据模型中的(6)式还可以预测电树枝生长到击穿的寿命时间.对图 1(a)和(b)分别计算出的交联聚乙烯电缆绝缘内侧电树枝生长到对面电极的时间大约为 170 min 和 85 min,即频率越高树枝生长到击穿的时间越短.从以上真产实验数据与所建立的在高频电应力作用下电树枝生长的动力学模型对比可知,根据该模型的计算与真实电树枝生长特性有

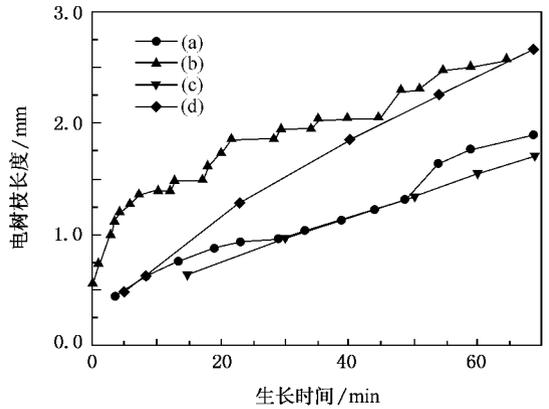


图 2 电树枝的生长特性与模型预测结果的比较 (a)图 1(a)的实验结果;(b)图 1(b)的实验结果;(c)图 1(a)的模型预测结果;(d)图 1(b)的模型预测结果

较好的一致性.

5. 讨 论

以上电树枝生长的动力学模型,其电树枝的生长是基于树枝尖端前部亚微观树(微孔)的引发而引起的,其基本机理是当局部电场强度最终增大到某个临界值时在原来树枝尖端前部的劣化区里亚微观树将被引发^[27],关于这样一个电树枝的生长机理已有一些实验结果得以证实:在聚乙烯受到高电场作用下,在树枝引发以前在针电极尖端周围会产生一个劣化区,通过电子显微镜的观察能够看到这个劣化区有许多小的微孔^[28],这种聚合物中的微结构缺陷(许多微孔)是一种自然的表现;而在交联聚乙烯这种半结晶聚合物中的情况则比较特殊,半结晶聚合物中的无定型区和结晶区之间是材料的电气弱区,因此,微孔会更密集地集中在无定型区和结晶区之间的网状区域内,而且电压等级越高,绝缘越厚的交联聚乙烯电缆,这种情况越严重^[14].根据有关亚微观树与初始的主树枝之间的相互作用而形成的分形树结构的具体详细的机理还需要进一步的研究.

对于交联聚乙烯电缆这种半结晶聚合物材料而言,结晶状态对材料电树枝老化特性有很大影响,电树枝的生长除了与晶体结构有关外还和施加电压的频率有关,在低频下能够生成多种类型的电树枝,其电树枝的结构特征和生长特性没有一定的规律性^[15].而在高频时由于局部放电强烈,局部放电所产生的局部高压和局部高温也比低频下严重,因此高频电树枝的生长特性与球晶关系不大,高频引发并生长

的电树枝多数情况下可使强烈的局部放电过程得以持续并生成稠密枝状电树枝,电树枝的结构类型比较单一且有一定的规律性,因而便于定量描述.

在上述交联聚乙烯电缆绝缘中电树枝生长的动力学模型中导出的电树枝生长定律和电树枝生长到击穿的寿命公式,是把材料的微观结构特性和宏观的电树枝形状及施加电压频率之间联系到了一起.另外,树枝生长到击穿的寿命公式的主要特征是它与局部电场力(E),环境温度(T),介质的动力学和物理学特性($U_0, \alpha C_0, \varepsilon$),电树枝的分形状结构(D_f),外施电压的频率(f)以及电树枝的生长特性($L_b, L_c, dL/dt$)等有关.并且根据绝缘寿命公式还可以预测:电树枝生长到击穿的总的时间越长,电树枝的分形维数就越大,施加电压的频率越高,电树枝生长到击穿的总的时间就越短.

6. 结 论

基于特殊的电树枝生长机理和树枝结构的分形

特性,提出了一个在高频范围定量预测电应力驱动下交联聚乙烯电缆绝缘中电树枝生长特性的动力学模型,获得了基于施压频率的电树枝生长率方程和电树枝生长的寿命公式,该模型综合考虑了电应力、环境温度、分形特性以及施加电压频率对电树枝的影响.

施加 1000 Hz 和 2000 Hz 的 10 kV 峰值正弦交流电压所获得的交联聚乙烯电缆绝缘试样中电树枝生长的实验规律与模型预测值相比较,结果有较好的一致性.其中高频时的实验结果与模型预测结果的差距较低频下的偏大,其差距主要表现在起始阶段,随时间的增长,差距逐渐减小,表明提出的模型化方法可以应用到交联聚乙烯电缆绝缘电树枝老化规律的定量分析研究中.

在研究交联聚乙烯电缆绝缘电树枝的生长动力学模型方面,对目前提出的模型还需要更多的实验数据来验证以及需要大量实验和数学分析工作来模拟较低施压频率下电树枝的生长动力学,这是作者下一步的重点研究目标之一.

- [1] Densley R J 1979 *IEEE Trans. Electr. Insul.* **14** 148
- [2] Ildstad E, Hagen S T 1992 *Electrical Insulation Conference Record of the IEEE International Symposium* **7-10** 135
- [3] Suwamo, Suzioki Y, Mizutani T, Uchida K 1995 *ICSD '95* **10-13** 366
- [4] Kalicki T, Braun J M, Densley J, Fujimoto N, Sedding H G 1995 *ICSD '95* **10-13** 528
- Champion J V, Dodd S J 2000 *IEE Diel. Mater. Meas. and Appl. Conf.* **473** 398
- [5] Young-Shin Cho, Mi-Ja Shim, Sang-Wook Kim 1997 *Proceedings of the 5th International Conference* **25-30** 443
- [6] Ishibashi A, Kawai T, Nakagawa S, Muto H, Katakai S, Hirotsu K, Nakatsuka T 1998 *IEEE Trans. Diel. and El.* **5** 695
- [7] Cisse L, Teyssedre G, Mary D, Laurent C 2002 *IEEE Trans. Diel. and El.* **9** 124
- [8] Harlin A, Shuvalov M, Ovsienko V, Juhanoja J 2002 *IEEE Trans. Diel. and El.* **9** 401
- [9] Dissado L A, Fothergill J C 1992 *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers* (London: P. Peregrinus)
- [10] Zheng X, Chen G, Davies A E, Sutton S J, Swingle S G 2002 *Annual Report Conference* **20-24** 955
- [11] Zheng X Q, Chen G, Davies A E 2003 *Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy* **22**(4) 21 (in Chinese) [郑晓泉、G Chen、A E Davies 2003 电工电能新技术 **22**(4) 21]
- [12] Ding H, Varlow B R 2002 *IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* 934
- [13] Ding H, Varlow B R 2005 *IEEE Trans. Diel. and El.* **12** 81
- [14] Zheng X Q, Xie A S, Li S T 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5494 (in Chinese) [郑晓泉、谢安生、李盛涛 2007 物理学报 **56** 5494]
- [15] Xie A S, Li S T, Zheng X Q 2006 *Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy* **25**(3) 33 (in Chinese) [谢安生、李盛涛、郑晓泉 2006 电工电能新技术 **25**(3) 33]
- [16] Zheng X Q, Chen G, Davies A E 2006 *Proceedings of the CSEE* **26**(3) 79 (in Chinese) [郑晓泉、G Chen、A E Davies 2006 中国电机工程学报 **26**(3) 79]
- [17] Li S T, Zheng X Q 2006 *Electrical Treeing in Polymer* (Beijing: Machine Industry Press) (in Chinese) [李盛涛、郑晓泉等 2006 聚合物电树枝化(北京:机械工业出版社)]
- [18] Ding H Z, Varlow B R 2005 *IEEE Trans. Diel. and El.* **12** 81
- [19] Shimizu N, Uchida K, Rasikawan S 1992 *IEEE Trans. Diel. and El.* **27** 513
- [20] Kudo K 1998 *IEEE Trans. Diel. and El.* **5** 713
- [21] Ding H Z, Xing X S, Zhu H S 1994 *Phys. D: Appl. Phys.* **27** 591
- [22] Dissado L A, Sweeney P J J 1993 *Phys. Rev. B* **48** 16261
- [23] Dissado L A, Dodd S J, Champion J V, Williams P I, Alison J M 1997 *IEEE Trans. Diel. and El.* **4** 259
- [24] Mason J H 1955 *IEE Proc.* **102** 254
- [25] Ding H Z, Varlow B R 2004 *IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* **17-20** 306
- [26] Crine J P 1997 *IEEE Trans. Diel. and El.* **4** 487

- [27] Champion J V , Dodd S J , Stevens G C 1994 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **27** 1020
- [28] Shimizu N , Uchida K , Rasikawan S 1992 *IEEE Trans. Diel. and El.* **27** 513

Dynamics model for electrical tree propagation in cross-linked polyethylene cable insulation under high frequency voltage^{*}

Xie An-Sheng^{1,2)} Li Sheng-Tao^{1)†} Zheng Xiao-Quan¹⁾

¹⁾ *State Key Laboratory of Power Equipment and Electrical Insulation , Xi 'an Jiaotong University , Xi 'an 710049 , China)*

²⁾ *School of Environment Science and Engineering , Chang 'an University , Xi 'an 710064 , China)*

(Received 22 June 2007 ; revised manuscript received 23 November 2007)

Abstract

In this paper we investigated the structures and propagation characteristics of electrical trees observed in the high voltage cross-linked polyethylene (XLPE) cable insulation samples under high voltage of 10 kV at frequency of 1000—2000 Hz. Based on the specific tree growth mechanism and the fractal nature of tree structures , a dynamic model has been developed to qualitatively predict the electrical tree growth characteristics in XLPE cable insulation when subjected to an electrical stress under high frequency voltage , and then the tree growth rate equation and life formula of tree growth to breakdown are derived. We performed electrical tree growth tests in XLPE cable insulation samples at high frequency and compared the results , which showed that the proposed model was in good agreement with the experiment. So it seems that the proposed model can be applied to the qualitative analysis of aging law of electrical tree in XLPE cable insulation.

Keywords : cross-linked polyethylene cable insulation , electrical tree , frequency , dynamic model

PACC : 7750 , 7790 , 8220F

^{*} Project supported by the National Outstanding Young Investigator Grant of China (Grant No. 50625721) , the Program for the New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. NCET-05-0833) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50577052).

[†] Corresponding author. E-mail : slt@mail.xjtu.edu.cn