

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.03.018

XLPE 电树枝生长过程中局部放电 SHF 信号特性研究

陆云才¹, 丁毅², 陶风波¹, 潘婷², 王亚林², 尹毅²

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要:交联聚乙烯(XLPE)电缆中电树枝的生长伴随局部放电(PD)的产生,二者间存在一定关联。XLPE材料绝缘强度较高,其中发生的PD在超高频(SHF,3~30 GHz)频段的信号幅值相对较高。文中采用基于针-板电极结构和XLPE绝缘材料的试样,在不同温度和电压下对电树枝生长过程中的形态和PD的SHF信号进行同步检测,分析了电压与温度条件对二者的影响,并研究了二者间的特征关系。研究表明XLPE中电树枝的长与宽和温度与电压呈正相关,电压较低时对分形维数较低,较高时分形维数无明显变化。SHF信号幅值也与温度和电压呈正相关关系,电压较高时,信号幅值呈现先增大再减小至平缓趋势,频率在电压较低时信号有一定程度下降。电树枝生长情况和SHF信号的幅值呈正相关关系,且当电树枝生长速度较快时,SHF信号的频率也会升高。

关键词:交联聚乙烯;电树枝;局部放电;超高频信号;温度和电压影响

中图分类号:TM855

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2021)03-0120-08

0 引言

交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)电缆在运行过程中,绝缘层中电树枝的引发和生长会导致材料老化和介电性能下降,是引起故障的重要原因^[1]。聚合物绝缘材料的电树枝化是一个复杂的物理化学过程,是多种因素共同作用的结果^[2],其引发和生长与环境温度、外加电压、机械应力及材料的聚合状态有关^[3-4]。绝缘材料的微小缺陷在电缆的使用过程中,受各种因素作用引发电树枝并生长,导致缺陷逐步扩大。当绝缘材料内部形成电树枝时,往往伴随着局部放电(partial discharge, PD)现象,期间产生的高能粒子对绝缘材料分子结构的破坏,是电树枝的引发和生长过程中的关键因素之一。当电缆绝缘中存在微小绝缘缺陷区域时,电场分布不均,缺陷区域会率先发生PD,诱发电树枝生长,微小气隙或通道会进一步延伸,相互连接形成放电通道,继续发生PD^[5]。因此从原理上分析,电树枝的生长和PD信号间存在关联性。

目前国内外对影响电树枝生长因素的研究包括空间电荷、实验温度、外施电压和材料结构等。李光道等^[6]利用针-板电极模型,证明了直流电树枝由受陷电荷引发的;陈仕军等^[7]的研究表明电压越高电树枝的结构越密集,电树枝起始时间缩短,生长时间延长;王雅妮等^[8]利用电荷的注入-抽出理论分析得出温度升高可以加快电荷注入和抽出的速率,增加电荷的迁移距离促进电树枝的生长。周利

军等^[9]利用实验发现:在低温下XLPE电缆绝缘中电树枝生长没有明显的影响;高温情况下,电树枝的生长更为迅速。

PD的检测方法众多,电缆运行环境中往往包含大量电磁干扰,检测方法需要有较强抗干扰能力。PD产生过程中伴随空间电荷的迁移,绝缘材料中存在结构陷阱,电荷入陷过程会产生能量,部分能量以高频电磁波形式向外辐射。材料绝缘强度越大,内部所产生PD的脉冲信号上升时间会越短,从傅里叶变换可知,非周期单脉冲信号的频谱是连续谱,脉冲上升时间越短,宽度越窄,包含的高频谐波成分越多。日本Hiroki Shibata等人研究发现变压器油中PD信号可达10 GHz^[10],由于XLPE材料绝缘强度比变压器油更高,因此其中PD的脉冲频段可达到超高频(super high frequency, SHF, 3~30 GHz)频段,而空间干扰频率一般低于2 GHz,可通过检测和分析PD过程中的SHF信号,在有效避开干扰的同时采集到PD。

文中采用基于针-板电极结构和XLPE材料的绝缘缺陷试样,在不同温度和电压下,对电树枝生长过程中的形态和SHF局部放电信号进行同步检测,分析电压和温度变化对电树枝生长与SHF PD信号的影响,研究XLPE绝缘材料电树枝生长过程中形态与SHF局部放电信号的特征关系。

1 电树枝实验设计

1.1 电树枝样品制备和放置

文中所用XLPE型号为4258,针-板电极缺陷样

收稿日期:2020-11-27;修回日期:2020-12-31

基金项目:中国博士后科学基金项目(2018M642016)

品的具体制作过程为:将颗粒状 XLPE 放入烘箱内,抽真空后温度设 70 °C,保持加热 7~8 h,放置 20~24 h 以去除水分;在转矩流变仪中混料后置于压片机中,模具尺寸为 120 mm×120 mm×5 mm,温度设为 105 °C,逐渐加压,待压力为 20 MPa 时,升温至 180 °C 并维持 15 min,待样品冷却后取出,打磨平整后切割成 40 mm×20 mm×5 mm 规格。再利用细砂纸,将直径 1 mm,长度 35 mm 的锰钢针针尖的曲率半径打磨至 5 μm 左右(用显微镜和观察测量),擦拭干净后利用气动插针装置,将锰钢针依次插入样片中,针尖距离样片底部 3 mm。最后放入 90 °C 的真空烘箱内保持加热 7~8 h,并放置 20~24 h 后取出,以消除插针过程中在样片中产生的机械应力。样品示意如图 1 所示。

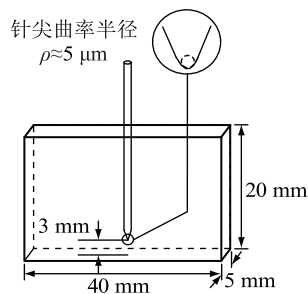


图 1 电树枝样品示意

Fig.1 Schematic of electric tree sample

实验样片固定在接地铝板上,铝板电极平放在方形容器中,铝板、容器外壳和地保证有效电连接,构成针-板电极系统,针上部插入带孔导电铜球,实现有效电连接(具有均压作用),如图 2 所示。采用恒温槽进行循环油浴加热,既能控制温度且能有效防止沿面放电和外部放电。

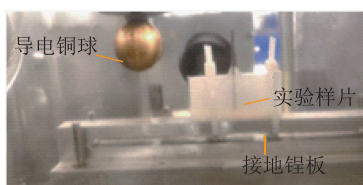


图 2 针-板电极结构

Fig.2 Structure of needle-plate electrode

1.2 电树枝形态观察和采集系统

实验过程中为清晰判断电树枝形态随时间的生长状况,需进行实时观测。文中用光源、带有显微镜镜头的 CCD 工业相机如图 3 所示和计算机组装成如图 4 所示电树枝形态实时观测系统,可通过上下、焦距调整、左右移动旋钮时观测进行调整,配合 Daheng MER-Series Viewer 软件,实时观测电树枝生长过程并保存电树枝生长图片。

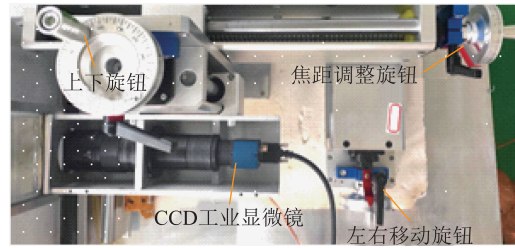


图 3 显微镜系统

Fig.3 Microscope system

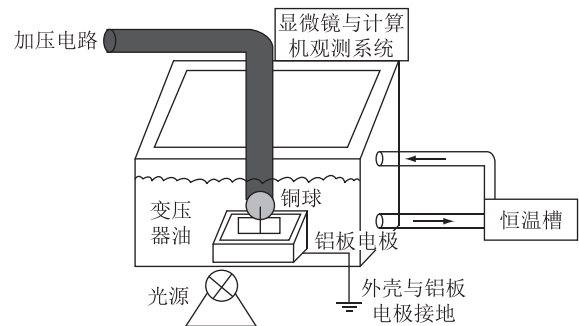


图 4 电树枝实时观测系统

Fig.4 Electric tree real-time observation system

2 SHF 局部放电检测系统设计

SHF 检测法是利用高频传感器采集局部放电信号中辐射出来的 SHF 电磁波信号^[11]。实验或工程在线检测过程中,外界会存在众多电磁信号干扰,如电晕放电带来的噪声信号等,且干扰信号和放电信号同属脉冲信号,但前者在 SHF 频段的分量较小,因此选择带宽合理的传感器和放大滤波元件可有效滤除干扰,保留放电信号。基于上述,文中搭建了 SHF 局部放电检测系统用于检测电树枝发展过程中局部放电的 SHF 信号,总体测试系统如图 5 所示。

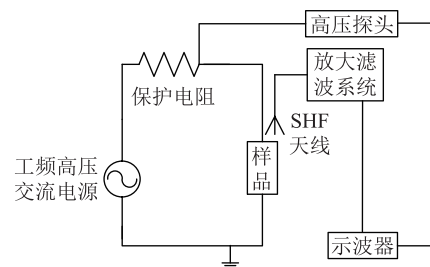


图 5 SHF 局部放电测试系统

Fig.5 SHF partial discharge test system

2.1 SHF 频段传感器

基于图 4 显示的测试环境,为避免高压对传感器和示波器造成伤害,宜采用非接触式传感器,即高频天线。由于样品置于金属槽内,考虑其屏蔽作用,需将天线伸入槽内,故不能选择尺寸过大的天

线,同时其下限截止频率应较高,以滤除部分干扰。综合考虑上述因素,选择频段为 2.4~7 GHz 的全向贴片天线传感器,扫频结果显示其电压驻波比 (voltage standing wave ratio, VSWR) 在 3~6 GHz 的范围内较平稳,采集性能最佳。预实验结果表明,在电树枝生长过程的局部放电信号中,样品产生的 SHF 分量频率在 4~5 GHz 左右,该天线传感器满足采集要求。

2.2 放大滤波系统

局部放电的 SHF 信号属微小信号,需低噪声运算放大器对信号进行放大,同时天线对干扰信号存在一定衰减幅度不够,且考虑放大器的噪声干扰,需添加截止频率 3 GHz 以上的滤波器,对环境干扰和放大器噪声进行衰减。考虑到滤波器的增益曲线在截止频率处呈非阶跃变化,而呈一定斜率变化,固选择截止频率稍高于 3 GHz 的无源滤波器。综合上述因素,选择带宽 50~6 GHz 射频低噪声放大器,其在 4~5 GHz 频率下增益约 20 dB;选择带宽为 4.25~10 GHz 的无源滤波器。

所用示波器带宽 8 GHz、采样率 20 GS/s,有 4 个模拟通道且每通道配备 50 Mpts 存储器。天线用绝缘膜严密包裹,并用绝缘胶带密封,再将天线伸入槽内,待油灌满后用绝缘胶带固定在距离样品 5 cm 处,避免流动的绝缘油晃动天线。

3 实验方案和结果

通常绝缘为 4.5 mm 电缆的额定电压为 10 kV (电缆中均方根平均电场约为 2.22 kV/mm),文中样品模拟电缆中金属毛刺缺陷,电极间距 3 mm,且由于针板电极相对集中,故实验电压设为 7 kV。此外,考虑到聚乙烯电缆的正常工作温度为 70 °C,允许的工作温度不得超过 90 °C^[12]。以 7 kV,70 °C 为基准电压和温度,设置 5 kV,7 kV 和 9 kV 作为实验电压,设置 50 °C,70 °C 和 90 °C 作为实验温度,电压由变压器控制,实验温度由恒温槽设定油浴温度进行控制。加压 60 min,电树枝图片每隔 10 s 记录 1 次;SHF 信号前 5 min 中每 30 s 记录 1 次,5 min 后每 1 min 记录 1 次,记录数据包括不同时间尺度的波形。

3.1 实验特征量提取

3.1.1 电树枝特征量提取

软件采集的电树枝实时照片需要进行信息提取。由于电树枝形状具有极强的随机性,一般采用“分形维数”来描述电树枝生长特性。文中使用盒记数法计算分形维数,利用线段、圆形或者正方形等

图形去近似表示分形图形^[13],原理如图 6 所示。

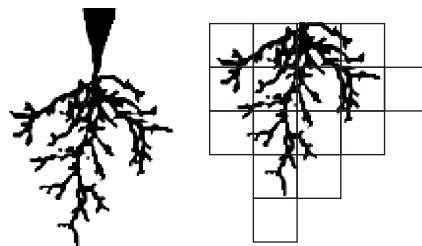


图 6 盒记数法示意

Fig.6 Schematic diagram of box notation

首先需要电树枝图像进行灰度调整、模式识别、特征测试或频谱分析等处理,将图像的中心区域提取出来,并通过 Labview 软件对提取的图像进行滤波灰黑二值化处理,转变为黑白位图。改变方盒边长 r ,计算将电树枝完全覆盖的方格数 $N(r)$,此时的分形维数 D 可以表示为^[14]:

$$D = \frac{\lg N(r)}{\lg(r^{-1})} \quad (1)$$

结合分形维数与电树枝形态特征,枝状电树枝的分形维数一般小于 1.45,丛状电树枝的分形维数一般大于 1.65,而混合状电树枝的分形维数介于 [1.45,1.65] 之间。在电树枝生长过程中分形维数都会随着时间而变化,电树枝停滞生长时分形维数趋于稳定^[15]。除分形维数外,还根据显微镜的放大倍数和图像像素数,获得实际长度对应关系。并编写了 labview 程序对图片中树枝形态进行准确测量,将电树枝的宽度和长度也作为特征量进行统计。

3.1.2 SHF 局部放电特征量提取

局部放电特征量的提取和检测方法有关,脉冲电流法以视在放电量(单位 pC)和相位等作为特征量^[16];UHF 法以 dB 为单位计量(基准为 1 mW)检测放电功率,表征放电强度,同时也提取放电相位信息等^[17-21]。

文中检测的 PD 信号在 3 GHz 以上,且不需放电模式识别,结合使用检测系统和 SHF 信号的产生机理,以放电信号的 SHF 频段频率和幅值作为放电提取的特征量。以 70 °C,7 kV 下 XLPE 样品某次 SHF 局部放电信号为例,波形如图 7 所示,图(a)PD 完整波形显示了其幅值,图(b)的波形细节显示了其频率,记录不同时刻放电幅值和频率,并求得不同条件下各量平均值。

3.2 不同温度下实验结果

3.2.1 电树枝形态

通过显微镜观测得到在施加电压 7 kV,不同温度下电树枝的最终发展情况如图 8 所示。在电压 7 kV 不同温度下,电树枝的长度、宽度和分形维数随

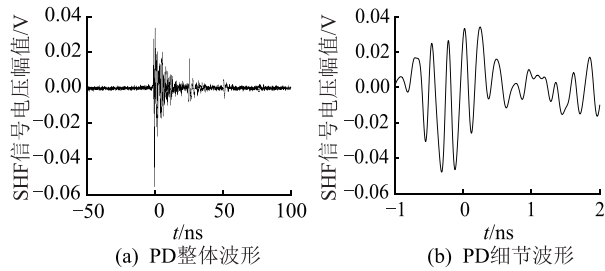


图7 SHF 局部放电信号波形
Fig.7 SHF partial discharge signal

时间的变化规律如图9所示。

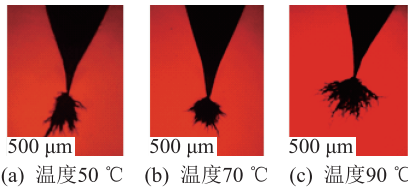


图8 不同温度下电树枝的最终发展情况
Fig.8 The final development of electric tree branches at different temperatures

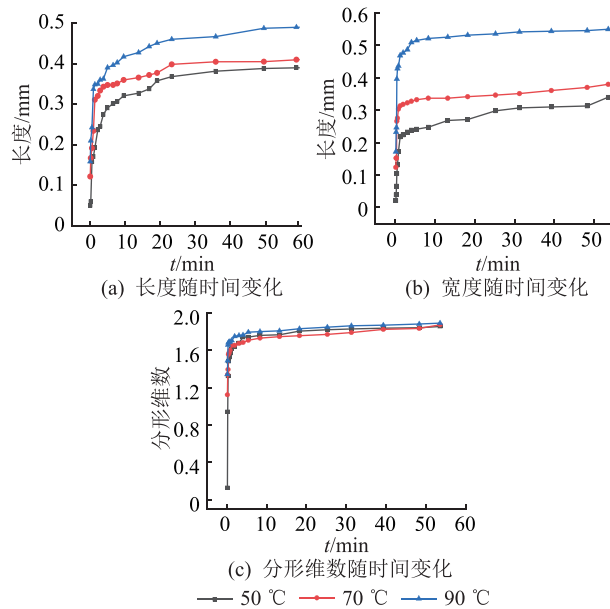


图9 不同温度电树枝特征量随时间变化
Fig.9 Electrical tree feature quantity changes with time at different temperature

由图9可知,电树枝的长度、宽度和分形维数随时间变化的速率均是先快速后缓慢,在前10 min左右生长较快,之后较为平缓,最终长成的电树枝的分形维数大于1.65,属丛状电树枝。在相同电压下,随温度升高,电树枝的长度和宽度逐渐增长,50 °C和70 °C下电树枝状况差异较小,90 °C下电树枝有了明显的延长和拓宽,而分形维数变化不大。结合图8的显微镜照片可看出,温度对电树枝的分形维数影响较小,电树的长宽则呈延伸状态,且温度越高影响越大。

3.2.2 SHF 局部放电信号

经采集和结果筛选统计,不同温度下 SHF 局部放电信号的特征量参数如图10所示。

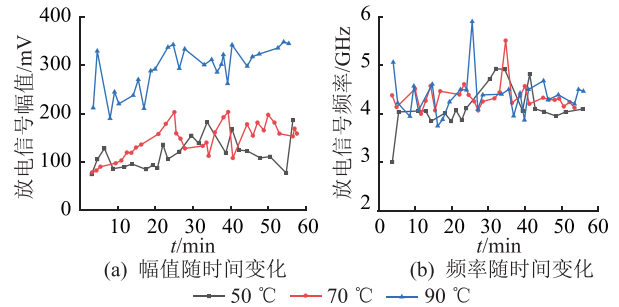


图10 不同温度 SHF 局放信号特征量随时间变化
Fig.10 SHF PD feature quantity changes with time at different temperature

不同温度下 PD 信号幅值和频率的平均值如表1所示。

表1 不同温度 SHF PD 信号特征量平均值
Table 1 SHF PD feature quantity average value at different temperature

温度/°C	放电信号幅值/mV	脉冲频率/GHz
50	117.29	4.13
70	143.19	4.35
90	292.16	4.38

根据图10所示现象和表1统计结果,50 °C和70 °C下,SHF局部放电信号的幅值差距很小,90 °C下,幅值显著提高;3种温度下的SHF信号频率差异不大,信号频率大多在4~5 GHz之间。

3.3 不同电压下实验结果

3.3.1 电树枝形态

通过显微镜观测得到在70 °C,不同电压下电树枝的最终发展情况如图11所示。在70 °C和不同电压下,电树枝的长度、宽度和分形数随时间的变化规律如图12所示。

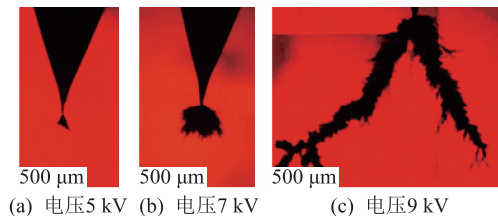


图11 不同电压下电树枝的最终发展情况
Fig.11 The final development of electric tree branches at different voltages

结合图12实验结果和图11显微镜照片可知,相同温度下,电压升高对电树枝的长宽影响较大,分形维数在5 kV时较小呈混合状,7 kV和9 kV变化相对不明显,最终电树枝依然呈丛状。7 kV下电

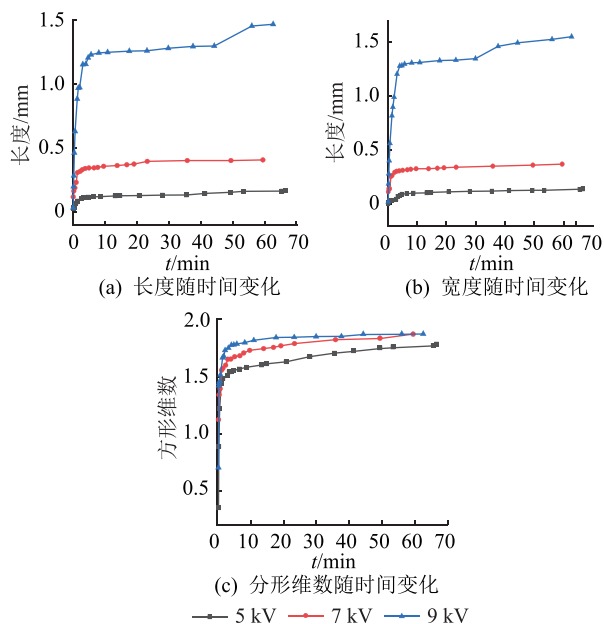


图 12 不同电压电树枝特征量随时间变化

Fig.12 Electrical tree feature quantity changes with time under different voltages

树枝的长度和宽度约为 5 kV 的 2 倍,而 9 kV 下电树枝的长度和宽度有了较大幅度增加。

3.3.2 SHF 局部放电信号

经采集和结果筛选统计,温度 70 ℃,不同电压下 SHF 局部放电信号特征量变化如图 13 所示。

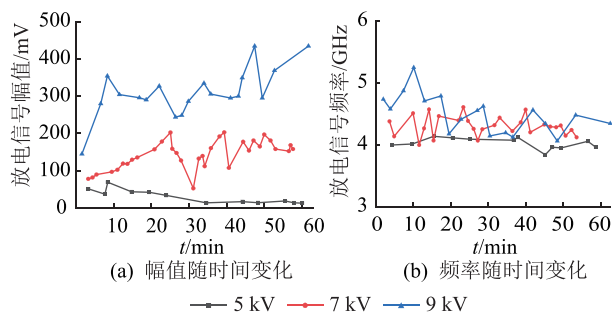


图 13 不同电压 SHF PD 信号特征量随时间变化

Fig.13 SHF PD feature quantity changes with time under different voltages

不同电压下 PD 信号幅值和频率的平均值如表 2 所示。

表 2 不同电压 SHF PD 信号特征量平均值
Table 2 SHF PD feature quantity average value under different voltages

电压/kV	放电信号幅值/mV	脉冲频率/GHz
5	31.06	4.03
7	143.19	4.35
9	310.11	4.50

图 13 和表 2 结果表明随着电压升高,SHF 信号的幅值有明显提升,且随电压升高提升幅度变大,频率有一定程度的升高,9 kV 下的信号频率在初始

时较大,随后逐渐减小趋于平缓,幅值则呈现逐渐增大趋势。

4 结果分析和讨论

4.1 温度和电压对电树枝形态的影响

对比图 9 与图 12 所示生长趋势可知,电压对电树枝的生长影响程度比温度大。综合交流电场下不同温度和不同电压下电树枝的生长状况,和电树枝的生长原理分析,温度升高促进电荷的入陷和脱陷过程^[22],电荷的迁移率也越高,导致电树枝长度和宽度的延伸,但电荷的注入浓度越高,针尖的电场更加均匀,抑制电荷的注入,因此一定范围内的温度升高电树枝的形态差异较小。温度较高时会对材料的结构造成影响,当温度超过 XLPE 的玻璃化转变温度时,其许多性能参数,如介电常数,导热系数和膨胀系数等会发生变化,且材料中的自由体积会增大,电荷分布更加均匀会使更多热电子在与外加电场垂直的方向生成,同时由于电子平均自由程的增大,会促进电树枝分枝的形成^[8],使其宽度增加,这一点在图 8 的显微照片和图 9(b)的宽度数据中已有所体现。电子平均自由程的增加也会使热电子撞击距针尖更远处的 XLPE 分子,延伸电树枝的长度。

有研究表明,外施电场越强,电荷注入越多^[23]。由电磁场理论可知,电场强度是电压的负梯度,电压升高针尖处场强也随之升高,除增大电荷的移动速度外,电荷的注入会造成局部场强过高,促进新的游离自由基积聚形成新的空间电荷,使得电荷的注入速度和浓度有较大幅度的增加,电树枝向板电极的延伸更为明显。尤其当场强较高时,XLPE 内部大量共价键达到断键临界场强而断裂,上述过程发展更剧烈,故电树枝长宽较大。

4.2 温度和电压对 SHF 局部放电信号的影响

文中对局部放电的研究着重于温度和电压的影响对其 SHF 信号幅值和频率影响。从数学角度分析,SHF 信号是非周期脉冲,其频谱为全频域连续谱,脉冲越窄,dV/dt 值越高,则高频部分幅值越高。从信号产生机理分析,在 PD 产生瞬间,电荷快速移动产生微小脉冲电流,引起局部电场的瞬时变化,从而激发高频电磁波,若将每个发生 PD 的通道简化为一个微小的偶极子天线,偶极子天线的远场电场辐射为:

$$E_{\theta} = j \frac{\beta^2 I l \sin \theta}{4\pi\omega\epsilon_0} e^{-j\beta r} \quad (2)$$

式中: E_{θ} 为辐射场强,是仰角 θ 和距离 r 的函数; β 为

相移常数; l 为偶极子长度,远小于波长; I 为电流幅值。

由式(2)可知,天线接收的辐射强度和电流幅值成正比。由文中实验可知,电流幅值和电荷量及移动速度呈正相关。温度升高会激发更多热电子,电荷注入浓度升高,主要增大了PD产生过程中的迁移电荷量, I 增大,引起信号的幅值增大。电压/电场的增强如4.1节所述,一方面会增加电荷量,另一方面也会增大电荷的移动速度,因此 I 增大幅度比温度升高要大,信号的幅值也更大。

SHF信号的频率随温度和电压变化趋势尽管不十分明显,但从式(2)中辐射信号的角频率 ω 与辐射信号幅值呈反比可知,若信号电流幅值不够大,高频的信号幅值会较小,不易检测,因此信号幅值最大的70℃,9kV所得的平均频率也最高,其中联系有待进一步理论分析和实验验证。

4.3 电树枝形态与SHF局部放电信号的关系

根据不同条件下实验结果,温度和电压的升高都会促进电荷的注入,增加电荷量和电荷的移动速度,从而增大PD的SHF信号幅值,也促使电树枝的延伸,长宽增加。对于XLPE绝缘材料而言,随着加压时间的延长,针尖附件的材料逐渐老化,随着电树的生长,更多的XLPE分子链被打断,断裂而形成 $H\cdot$ 和 $\cdot CH_3$ 游离自由基,游离自由基的积聚会促进空间电荷的积累^[24],畸变内部电场分布,诱发PD,PD的产生则会继续释放高能粒子,撞击分子结构,导致电树分枝继续延长,总体来看电树枝的生长情况与SHF局部放电信号的幅值总体呈正相关,当电树枝生长速度较快时,局部放电信号的频率也有所升高。而当电树发展到一定程度,产生微观缝隙而电场不够强时,带电粒子可能无法全部到达极板, I 不够高,SHF信号的幅值会有所下降,这在图13(a)中也有所体现。

5 结论

文中对XLPE绝缘材料在不同温度和电压下进行电树枝和SHF局部放电实验,通过电树枝形态实时监测系统和SHF局部放电检测系统,对电树枝生长过程中形态变化与SHF局部放电信号进行监测和采集,经处理获得电树枝长度、宽度和分形维数及SHF信号的幅值和频率,综合分析温度与电压的影响和二者的特征关系,得到如下结论:

(1) 相同电压下,温度升高,电树枝的长度、宽度呈现上升趋势,分形维数变化较小;温度较高时SHF局部放电信号的幅值增加较明显,频率变化

较小;

(2) 相同温度下,电压升高,电树枝的长度、宽度增加,电压越高增加越明显,电压较低时分形维数较小;SHF局部放电信号的幅值随电压升高显著增加,且温度越高增加幅度越大;

(3) 电树枝生长的长度、宽度与SHF局部放电信号的幅值呈正相关关系,且电树枝生长速度较快时SHF信号的频率也有所提升。

通过上述研究发现用SHF法检测XLPE绝缘中电树枝引发和生长过程中的PD信号有较高的灵敏度,同时由于所测频段高,能够避开常见电磁干扰,有望成为XLPE绝缘电力电缆PD在线监测的一种有效技术。

参考文献:

- [1] 周利军,仇祺沛,成睿,等.不同温度下局部气压对XLPE电缆电树枝生长及局放特性的影响[J].中国电机工程学报,2016,36(18):5094-5102,5135.
ZHOU Lijun, QIU Qipei, CHENG Rui, et al. Influence of partial air pressure on propagation and partial discharge characteristics of electrical trees in XLPE cable under different temperatures [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 5094-5102, 5135.
- [2] 廖瑞金,周天春,刘玲,等.交联聚乙烯电力电缆的电树枝化试验及其局部放电特征[J].中国电机工程学报,2011,31(28):136-143.
LIAO Ruijin, ZHOU Tianchun, LIU Ling, et al. Experimental research on electrical treeing and partial discharge characteristics of cross-linked polyethylene power cables [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 136-143.
- [3] 郭洋,王雅妮,乐彦杰,等.XLPE与MgO/XLPE纳米复合材料周期性直接地电树枝与交流电树枝的温度特性[J].高电压技术,2018,44(5):1459-1466.
GUO Feng, WANG Yani, YUE Yanjie, et al. Temperature characteristics of periodically grounded DC tree and AC tree in XLPE and MgO/XLPE nano-composite insulation [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1459-1466.
- [4] 李欢,翟双,陈杰,等.热历史过程对XLPE电缆热历史温度的影响研究[J].电力工程技术,2019,38(5):157-163.
LI Huan, ZHAI Shuang, CHEN Jie, et al. Influence of thermal history process on the thermal history temperature of XLPE cable [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(5): 157-163.
- [5] 叶笛.交联聚乙烯电缆电树枝引发特性及局部放电分析[D].重庆:重庆大学,2009.
YE Di. Analysis of initiation characteristics and partial discharge of electrical trees in XLPE cables [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [6] 李光道,王雅妮,吴建东,等.空间电荷对直接地电树枝影响的实验及仿真研究[J].中国电机工程学报,2017,37(22):6749-6756,6788.

- LI Guangdao, WANG Yani, WU Jiandong, et al. Effect of space charge on grounded DC electric tree: experiment and simulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37 (22): 6749-6756, 6788.
- [7] 陈仕军. 不同条件下交联聚乙烯电缆电树枝生长特性研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2009.
- CHEN Shijun. Study on the electric tree growth characteristics of cross-linked polyethylene cables under different conditions [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [8] 王雅妮, 李光道, 吴建东, 等. 不同温度下高压直流电缆纳米复合绝缘中的周期性直流接地电树枝特性[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3674-3681, 3388.
- WANG Yani, LI Guangdao, WU Jiandong, et al. Characteristics of periodic grounded DC tree in high voltage DC cable nano-composite insulation under different temperatures[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3674-3681, 3388.
- [9] 周利军, 仇祺沛, 成睿, 等. 不同温度下局部气压对 XLPE 电缆电树枝生长及局放特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 5094-5102, 5135.
- ZHOU Lijun, QIU Qipei, CHENG Rui, et al. Influence of partial air pressure on propagation and partial discharge characteristics of electrical trees in XLPE cable under different temperatures [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36 (18): 5094-5102, 5135.
- [10] SHIBATA H, KOTSUBO T, YAMAUCHI T, et al. Construction of the SHF test apparatus to measure the partial discharge current waveforms in the practical operation conditions of power transformer and application to influence of BTA addition[C]// 2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). San Antonio, TX, USA. IEEE, 2018: 182-185.
- [11] 乔兆龙. XLPE 电缆局部放电检测天线的设计 [D]. 石家庄:河北科技大学, 2014.
- QIAO Zhaolong. Design of antenna to detect partial discharge in XLPE cable [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2014.
- [12] 于竞哲, 苏宜靖, 周浩, 等. 10 kV 交流 XLPE 电缆改为直流运行的温度场和电场仿真分析[J]. 高电压技术, 2017, 43 (11): 3653-3660.
- YU Jingzhe, SU Yijing, ZHOU Hao, et al. Simulation analysis of temperature field and electric field for 10 kV AC XLPE cable in DC operation [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43 (11): 3653-3660.
- [13] 陈向荣, 徐阳, 徐杰, 等. 工频电压下 110 kV XLPE 电缆电树枝生长及局放特性[J]. 高电压技术, 2010, 36 (10): 2436-2443.
- CHEN Xiangrong, XU Yang, XU Jie, et al. Propagation and partial discharge characteristics of electrical trees in 110 kV XLPE cable insulation at power frequency applied voltage[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2436-2443.
- [14] 刘云鹏, 李演达, 刘贺晨, 等. XLPE 直流接地电树枝生长特性及形态结构[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3551-3558.
- LIU Yunpeng, LI Yanda, LIU Hechen, et al. Grounded DC tree growth characters and propagation structure in XLPE[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3551-3558.
- [15] 谢安生, 郑晓泉, 李盛涛, 等. XLPE 电缆绝缘中的电树枝结构及其生长特性[J]. 高电压技术, 2007, 33(6): 168-173.
- XIE Ansheng, ZHENG Xiaoquan, LI Shengtao, et al. Structures and propagation characteristics of electrical trees in XLPE cable insulation[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(6): 168-173.
- [16] SUN J T, LI X N, ZHU L Y, et al. Partial discharge of needle-plane defect in oil-paper insulation under AC and DC combined voltages: developing processes and characteristics [J]. Energies, 2017, 10(11): 1759.
- [17] 王国利, 郝艳捧, 刘味果, 等. 电力变压器超高频局部放电测量系统[J]. 高电压技术, 2001, 27(4): 23-25, 83.
- WANG Guoli, HAO Yanpeng, LIU Weiguo, et al. Ultra-high-frequency (UHF) PD measuring system for power transformer [J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(4): 23-25, 83.
- [18] 王国利, 袁鹏, 单平, 等. 变压器典型局放模型超高频放电信号分析[J]. 高电压技术, 2002, 28(11): 28-31.
- WANG Guoli, YUAN Peng, SHAN Ping, et al. Study on the ultra-high-frequency discharge signals of typical PD models in transformers[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28 (11): 28-31.
- [19] 赵晓辉, 杨景刚, 路秀丽, 等. 油中局部放电检测脉冲电流法与超高频法比较[J]. 高电压技术, 2008, 34 (7): 1401-1404.
- ZHAO Xiaohui, YANG Jinggang, LU Xiuli, et al. Comparative research on current pulse method and UHF measurements of partial discharge in mineral oil[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(7): 1401-1404.
- [20] 汪正江, 夏红攀. 组合电器局部放电特高频检测的气压影响分析[J]. 电力工程技术, 2018, 37(3): 107-111.
- WANG Zhengjiang, XIA Hongpan. Influence of relationship between UHF signals and discharge quantity of partial discharge under various pressure in gas insulated switchgear[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37 (3): 107-111.
- [21] 杨玥坪, 何聪, 李军浩. 工频恒定电压下 SF₆ 气体中沿面放电发展过程研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 145-150.
- YANG Yueping, HE Cong, LI Junhao. Development process of surface discharge in the SF₆ gas under constant voltage of power frequency[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 145-150.
- [22] 周凯, 吴广宁, 高波, 等. 空间电荷对脉冲电压下局部放电影响[J]. 电工技术学报, 2008, 23(10): 11-17.
- ZHOU Kai, WU Guangning, GAO Bo, et al. Space charge effects on partial discharge activities under pulse voltage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(10): 11-17.
- [23] 易妹慧, 王亚林, 彭庆军, 等. 温度对交联聚乙烯中的空间电荷积累以及迁移的影响[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5796-5803, 5857.

YI Shuhui, WANG Yalin, PENG Qingjun, et al. Effect of temperature on charge accumulation and migration in cross-linked polyethylene[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5796-5803, 5857.

- [24] 李亚莎, 花旭, 代亚平, 等. 外电场下交联聚乙烯电介质材料分子结构变化及其电老化微观机理研究[J]. 原子与分子物理学报, 2019, 36(3): 413-420.

LI Yasha, HUA Xu, DAI Yaping, et al. Study on molecular structure change and micro-mechanism of electrical aging of XLPE dielectric materials under external electric fields[J]. Journal of Atomic and Molecular Physics, 2019, 36(3): 413-

420.

作者简介:



陆云才

陆云才(1982),男,硕士,高级工程师,从事高电压技术研究及设备状态评价工作(E-mail: 15105168845@163.com);

丁毅(1995),男,硕士在读,研究方向为局部放电;

陶风波(1982),男,博士,研究员级高级工程师,从事超特高压输电系统电磁暂态计算及输变电设备状态诊断技术研究工作。

Characteristics of partial discharge SHF signal during the growth of electric tree in XLPE

LU Yunchai¹, DING Yi², TAO Fengbo¹, PAN Ting², WANG Yalin², YIN Yi²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The growth of electrical tree in cross-linked polyethylene (XLPE) cables is accompanied by the generation of partial discharges (PD), and there is a correlation between the both. The rise time of the PD signal in XLPE with high dielectric strength is short, so the signal amplitude in the super high frequency (SHF, 3~30 GHz) band is large. In this paper, the defect sample based on needle-plate electrode structure and XLPE insulation material is applied. The morphological of electrical tree and SHF PD signals are detected synchronously during the growth of electrical tree at different temperatures and voltages. The effects of voltage and temperature on the growth of electrical tree and SHF PD signals are analyzed and the characteristic correlation between the morphological of electrical tree and SHF PD signals in XLPE is studied. The results indicate that there is a positive correlation between the length and width of electrical tree in XLPE and temperature or voltage. The fractal dimension is usually lower at a lower voltage while it is not significantly changed with higher voltage. There is also a positive correlation between SHF PD signal amplitudes and temperature or voltage. Higher voltage leads to the trend that the amplitude of SHF signal increase firstly and then decreases to a plateau. The frequency of the signal decreases to a certain extent at a lower voltage. A positive correlation between the growth of electrical tree and the amplitude of SHF PD signals is acquired. The frequency of SHF signals also increases with a faster speed of the growth of electrical tree.

Keywords: cross-linked polyethylene (XLPE); electrical tree; partial discharge; SHF signal; effects of temperature and voltage

(编辑 李栋)