

基于电应力损伤特征值的XLPE绝缘电压 耐受指数评估方法研究

陈新岗^{1,2}, 李宁一¹, 马志鹏^{1,2}, 谭世耀¹,
范益杰¹, 张金京¹, 黄宇杨¹, 赵龙¹

(1. 重庆理工大学, 重庆 400054; 2. 重庆市能源互联网工程技术研究中心, 重庆 400054)

摘要: XLPE绝缘的电压耐受指数 n 表征绝缘电寿命特性,对加速寿命试验中获取的失效数据进行分析可以获得 n 值,然而,加速寿命试验中的外施场强与试验所获失效数据的分析方法影响 n 值的准确性。本文研究电压耐受指数 n 的评估方法,对XLPE绝缘试样分别进行恒定应力试验与步进应力试验,提出基于损伤特征值的试验数据分析方法,该方法通过损伤矩阵建立试验中累积损伤阈值(D_c)与 n 的映射关系,以矩阵秩的变化作为 n 值的选取依据。结果表明:本文所提方法在恒定应力试验中获取的XLPE绝缘电压耐受指数 $n_2=12.43$,在步进应力试验中获取的XLPE绝缘电压耐受指数 $n_3=12.04$,较线性拟合获取的XLPE绝缘电压耐受指数 $n_1=12.83$ 仅相差3%与6%,且本文所提方法能够节省75%以上的试验时间,验证了该方法的有效性。

关键词: XLPE绝缘; 电缆; 电压耐受指数; 恒定应力法; 步进应力法

中图分类号: TM215 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.03.011

Study on evaluation method of XLPE insulation voltage endurance coefficient based on electrical stress damage characteristic value

CHEN Xingang^{1,2}, LI Ningyi¹, MA Zhipeng^{1,2}, TAN Shiyao¹,
FAN Yijie¹, ZHANG Jinjing¹, HUANG Yuyang¹, ZHAO Long¹

(1. Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

2. Chongqing Engineering Research Center of Energy Internet, Chongqing 400054, China)

Abstract: The voltage endurance coefficient n of XLPE insulation can characterize the electrical life characteristics of the insulation, and the n value can be obtained by analyzing the failure data obtained from the accelerated life test. However, the accuracy of the n value is affected by the applied field strength in the accelerated life test and the analysis method of the failure data obtained in the test. In this paper, the evaluation method of voltage endurance coefficient n was studied. The constant stress test and the step stress test were conducted on XLPE insulation samples, respectively, and a test data analysis method based on damage eigenvalues was proposed. This method established the mapping relationship between accumulated damage threshold (D_c) and n in the test through the damage matrix, and used the change of matrix rank as the selection criteria of n value. The results show that according to the proposed method, the XLPE insulation voltage endurance coefficient n_2 obtained in constant stress test is 12.43 and n_3 obtained in step stress test is 12.04, which compare with the XLPE insulation voltage endurance coefficient n_1 of 12.83 obtained by linear fitting, the difference is only 3% and 6%. Moreover, the proposed method can save more than 75% of the test time, which verifies the effectiveness of the method.

Key words: XLPE insulation; cable; voltage endurance coefficient; constant stress method; step stress method

0 引言

交联聚乙烯(XLPE)绝缘材料因其优良的电气性能已被广泛用作高压直流电缆的主绝缘材料^[1]。

基金项目: 重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJZD-K202101103、KJQN202201133); 重庆理工大学科研启动基金(2021ZDZ016); 重庆理工大学研究生教育高质量发展行动计划资助(gzlcx20233114)。

XLPE绝缘的寿命评估工作能够为直流电网的稳定运行提供技术支撑,众多研究人员对XLPE绝缘失效的相关规律进行了研究^[2-4]。反幂模型(inverse power model, IPM)被用来描述固体绝缘材料的电寿命特征,IPM参数中的电压耐受指数 n 是评估绝缘寿命的重要参数,也是电缆出厂试验中电压设置及绝缘厚度设计的重要依据^[5]。

目前,主要通过加速寿命试验来获取XLPE电

压耐受指数 n ,进而外推出正常应力水平下的电缆寿命信息^[6]。其中,恒定应力法与步进应力法为加速寿命试验的两种主要方法。恒定应力法是通过施加恒定场强进行加速寿命试验获取失效数据,该方法的加速老化形式更接近绝缘的自然老化。文献[7]基于IPM模型,推导出以XLPE电气强度与老化时间的关系为基础的寿命表达式,采用恒定应力试验与击穿试验获取了电压耐受指数 n 。文献[8]提出了极性反转情况下XLPE绝缘的寿命模型,通过恒定电应力试验与空间电荷测试计算出模型参数,评估出电缆预期寿命。但恒定应力法获取失效数据的时间较长,且获取的失效数据分散性较大^[9]。

步进应力法具有加压时间短、失效数据分散性小的优点,是应用较为广泛的固体绝缘材料加速寿命试验方法^[10]。文献[11]使用步进应力法测试了XLPE在不同温度下的耐压特性,对比了Crine模型与IPM模型反映材料耐老化性能的差异。文献[12]将步进电压的阶跃式上升考虑为斜坡式上升,在IPM模型中加入了斜坡上升时间内的累积损伤,并求解出IPM参数。然而,恒定应力法与步进应力法获取的失效数据具有不同的表现形式。前者能够用具体的 (E,t) 失效数据点表示,进而将数据点线性拟合获取IPM参数,而后者的绝缘失效是电损伤的逐级累加所致,无法将其表征到具体某一电压等级下,因此无法通过线性拟合的方式获取 n 值。不同的 n 值获取方法在一定程度上影响了评估方式的等效性,弱化了外推电寿命信息的可信度。此外,步进加压的方式可能导致绝缘老化过程中存在不同的老化机理,从而导致步进应力下的加速老化不能等效于恒定电压下的自然老化^[13],相应地由步进应力法所得结果外推获取的电寿命不具有参考价值。

上述两类问题的存在影响了使用步进应力法评估 n 值的等效性。本文分析试验参数对绝缘老化的影响机制,研究维持步进加压过程中老化机理一致的参数选取方法。针对获取 n 值的方法不同所引起的等效性问题,提出基于损伤特征值的矩阵化IPM参数评估方法,并开展相关试验对所提方法进行验证。

1 加压方法与老化机理

1.1 外施场强与绝缘击穿

式(1)为IPM的表达式,其在 $\ln E - \ln t$ 坐标系中的线性关系如式(2)所示,从IPM曲线的斜率和截距可以分别获取参数 n 与 D_c ^[14]。

$$D_c = tE^n \quad (1)$$

$$\ln E = -\frac{1}{n} \ln t + \frac{1}{n} \ln D_c \quad (2)$$

式(1)~(2)中: t 为绝缘材料在场强 E 下的电寿命;参数 n 为电压耐受指数; D_c 为电介质承受电损伤的阈值,相同规格试样的 n 与 D_c 为常数。

在恒定应力试验中,通过选取多个等级的恒定场强来加速XLPE绝缘失效,将各等级电场下产生的 (E,t) 数据进行线性拟合得到式(2),从而在曲线中外推出特定场强下的剩余电寿命。然而,恒定应力法存在两个主要缺陷:①当选取场强较低时,试样达到绝缘失效耗时过长;②在合适的场强下,试样达到绝缘失效的时间具有较大的分散性。

步进应力法通过逐级升高场强的方式使绝缘介质承受的场强更快过渡到高场强。步进应力法中累积损伤阈值 D_c 的表达式如式(3)所示,步进至高场强时,损伤的累积速率将呈指数形式增加,试验效率明显优于恒定应力法^[15]。

$$D_c = (E_0^n + E_1^n + \dots + E_{k-1}^n) \Delta t + E_k^n t_k \quad (3)$$

式(3)中: E_0 为初始场强; $E_i(i=0,1,\dots,k-1)$ 为各级场强; Δt 为升压时间步长; t_k 为末级场强 E_k 的作用时间。

然而,步进应力法的参数选取同样缺乏依据,并且试验参数相较于恒定应力法更多,盲目选取的参数组合对XLPE绝缘老化过程的影响具有更强的随机性,这也是目前使用该方法进行XLPE绝缘加速寿命试验的主要缺陷。

1.2 维持老化机理一致的参数选取方法

上述两类方法对老化过程的影响来源于两个方面:①过高的场强会改变绝缘的击穿形式;②过低的场强使绝缘的老化过程漫长,受到环境因素的影响较大,同样影响绝缘的击穿形式。如图1所示,过高或过低的场强会改变绝缘的击穿类型,使 n 值发生明显变化,造成 $\ln E - \ln t$ 曲线在较宽的场强范围内呈现显著的非线性特征^[16]。从图1可以看出,以场强 E_a 与 E_b 为界线将不同斜率的寿命曲线划分为3个区间。 E_a 为阈值场强,当外施场强低于阈值场强

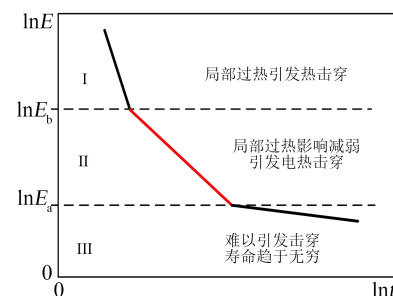


图1 场强对 n 值的影响

Fig.1 Effect of field strength on the n value

时,电寿命可视为无穷。 E_b 为短时击穿场强^[17]。

在区间I中的高场强作用下,电荷的大量注入使绝缘中的陷阱迅速被填满,无法被陷阱捕获的电荷发生极间迁移,使得流经绝缘的电流迅速增大,导致绝缘表面温度过高并引发热击穿。随着场强降至区间II,注入的电荷在陷阱中发生入陷、脱陷与迁移等现象,并与陷阱中的分子链发生碰撞使之断链与重排,导致局部绝缘性能不断劣化,此外伴随着热量的产生,使绝缘最终呈现电-热击穿^[18]。低于区间III的场强几乎无法引起电荷的注入,绝缘在漫长的老化过程中受到电-热-化学等多种因素的影响,最终呈偶发性击穿。

图2是以电-热老化为机理的加压过程示意图。图2中的参数 D_c 表示XLPE绝缘介质所能承受的电损伤阈值,当绝缘老化机理改变时,多类型应力损伤使XLPE绝缘介质的绝缘性能下降,承受电损伤的能力降低,导致 D_c 值低于自然电-热老化下的水平,获取的IPM参数不能表征XLPE绝缘在自然老化下的电寿命。因此,可以将区间II视为维持老化机理不变的最大区间。

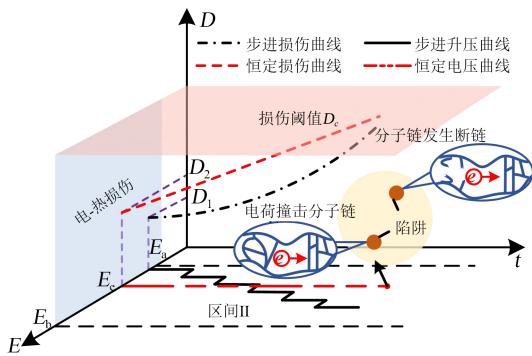


图2 以电-热老化为机理的加压过程

Fig.2 Applied voltage process with electrical-thermal ageing as mechanism

区间II的电场上限 E_b 可由短时击穿测试获取,具体步骤于2.1节详述。获取 E_a 的方法为传导电流法,传导测试通常在30~90℃的温度范围内进行。传导电流密度 J 与外加电场 E 之间的关系如式(4)所示。

$$J = \alpha E^x \quad (4)$$

式(4)中: α 表示传导电流密度随外施场强变化的比例系数; x 为系数。

将 E 与测试获取的传导电流密度的数据点(E, J)在双对数坐标系下进行线性拟合,可获取 E - J 特性曲线。 E_a 代表电荷注入的起始场强,当 $E > E_a$ 时,传导电流过渡到非欧姆区,两区域的分界处使 E - J 曲线发生明显的偏转,偏转处所对应的场强为阈值

场强 E_a 。

恒定外施电场能够稳定在区间II,但步进场强的阶梯增加可能占满所有区间,造成试验过程中具有不同的老化机理。故在设置步进应力试验时,应确保初始场强 $E_0 > E_a$,以保证能够引起电-热老化作用,若击穿时的场强 $E_k < E_b$,则说明整个试验过程具有相同的老化机理。否则,应重新选取参数进行试验。

1.3 损伤特征值法获取 n 值

由于试验中的试样规格相同,因此在理想情况下,无论加压方式为恒定方式或步进方式,每次试验的 D_c 值均应相同。以此为依据,将每次步进应力试验中获取的 $E_1, E_2 \dots E_k$ 与 t_k 代入反幂模型,通过 n 与 D_c 的映射关系构成 m 阶矩阵 D 中的各元素,并且矩阵 D 的秩为1。

$$|\lambda E - D(n)| = \begin{vmatrix} \lambda - D(n)_{c11} & \cdots & -D(n)_{c1m} \\ -D(n)_{c21} & \cdots & -D(n)_{c2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -D(n)_{cm1} & \cdots & \lambda - D(n)_{cmm} \end{vmatrix} \quad (5)$$

能使式(5)为0的 λ 值即为方阵 D 的特征值。根据秩为1的矩阵特点可知,该 m 阶矩阵有 $m-1$ 个特征值为0,剩余不为0的最大特征值 $\lambda_{\max} = mD_c$ 。因此,处理试验数据获取 n 值等同于求解满足条件的特征值,求解表达式如式(6)所示。

$$\begin{cases} |\lambda E - D(n)| = 0 \\ \lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_{m-1} = S \\ I = \frac{S}{\lambda_{\max}} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: S 表示 $m-1$ 个较小的特征值之和; I 表示与 λ_{\max} 的比值。

由于实际试验中的 D_c 值总有偏差,矩阵 D 中的初始数据具有一定的分散性,而通过迭代 n 值的方式则能不断改变矩阵元素的分散程度,因此,当获取的 n 值能够使 S 与 λ_{\max} 之比 I 近似于0时,可认为此时的 n 值接近真实的 n 值。利用损伤特征值法获取 n 值的流程如图3所示。

值得注意的是,在迭代求解的过程中,可能存在不止一个符合条件的 n 值,因此需要加入精度(α)要求,取最小 I 值对应的 n 值作为材料的真实 n 值。本文选取 $I_{\min} \leq \alpha = 5\%$ 作为约束条件, I_{\min} 越小,则 n 值的唯一性越好。

2 试验验证与数据分析

选用北欧化工公司生产的绝缘料制备XLPE薄片,使用平板硫化机将铜板模具中的XLPE料粒热

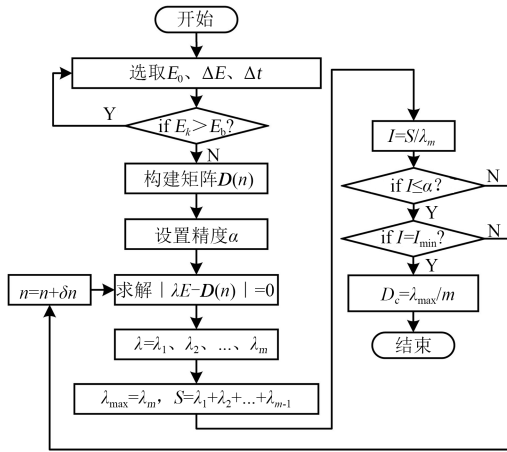


图3 损伤特征值法获取反幂模型参数

Fig.3 Inverse power model parameters obtained by damage eigenvalue method

压成厚度为100 μm的薄片试样,使用无水乙醇清洗试样,再将其放入60℃的真空烘箱中干燥24 h。

为减少试验时间,将同组试验中的试样进行并联加压,当一个试样被击穿时将自动断开加压,其余试样继续加压。步进应力试验与恒定应力试验均通过如图4所示的加压装置进行。

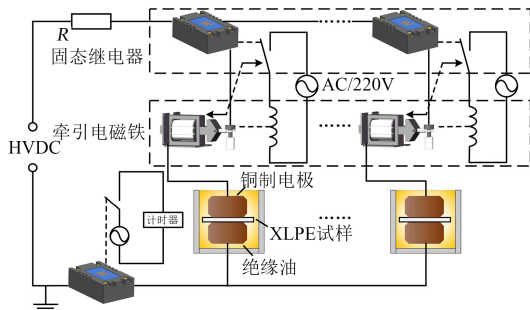


图4 加速寿命试验装置

Fig.4 Accelerated life test device

图4中的加压装置具有交直流两个回路,当直流回路中的XLPE试样发生击穿时,流过的电流使固态继电器通电从而控制交流回路中的常开开关闭合。交流回路接通后,牵引电磁铁中的线圈通电使其常闭开关断开,同时由计时器记录下直流电压的施加时间。

2.1 恒定应力测试结果

在恒定应力试验之前以1 kV/s的升压速率对试样进行短时击穿测试,结果如图5所示。采用式(7)所示的双参数Weibull分布模型分析击穿数据以获取试样的击穿场强。

$$F(E) = 1 - \exp\left[-(E/\alpha)^\beta\right] \quad (7)$$

式(7)中: $F(E)$ 为场强为 E 时的击穿概率; α 和 β 分别为尺度参数和形状参数。

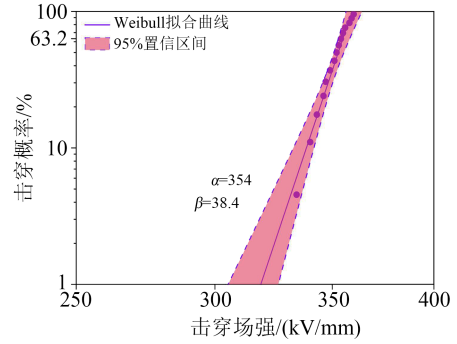


图5 短时击穿场强

Fig.5 Short-time breakdown field strength

从图5可以看出,击穿概率为63.2%的短时击穿场强 $E_b=354$ kV/mm。由于试验在室温下进行,选取 $E_a=30.73$ kV/mm,其获取方式可参考文献[19]。

在恒定应力试验中,并联加压试样数量为6组,所选取的恒定电压分别为18、21、24 kV,均位于区间II。不同恒定电压下失效时间的Weibull分布如图6所示。

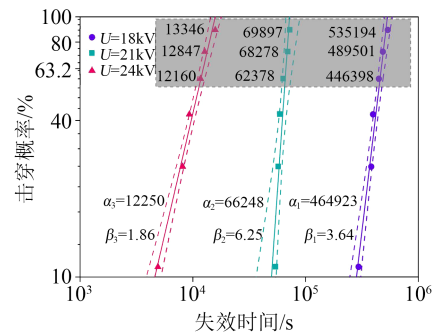


图6 失效时间的Weibull分布

Fig.6 Weibull distribution of failure time

各电压作用下击穿概率为63.2%的失效时间的统计分布如图6中的参数 α 所示。将所得失效数据点 (E, t) 进行拟合,得到IPM参数 $n_1=12.83, D_c=3.42 \times 10^{21}$ 。

为对比以上采用线性拟合方式获取的IPM参数,使用损伤特征值法根据以上数据再次获取IPM的参数。采用图6中阴影部分的数据点 (E, t) 构成3阶损伤矩阵并获取 n 值,结果如图7所示。由于所用数据量仅为线性拟合方式的一半,故可节约一半样品,并且在无法并联加压的条件下,可减少50%以上的试验时间。

由于符合条件的 n 值能够使 I 近似于0,为使结果更加直观,图7中以 I 值倒数的变化曲线来反映 I 值的变化。曲线的峰值对应的横坐标即为符合条件的 n 值,此时的 $\lambda_{max}=3D_c$ 。所得符合条件的 $n_2=12.43, D_c=1.87 \times 10^{21}$ 。

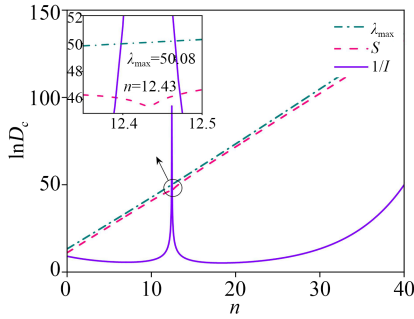


图7 恒定应力试验获取的n与D_c

Fig.7 The n and D_c obtained from constant stress test

2.2 步进应力测试结果

为避免步进场强升高过快,选取初始场强 $U_0=33.3\%U_b=10\text{ kV}$, $\Delta U_1=2.9\%U_b=1\text{ kV}$ 。根据以往研究,多样的步进应力试验参数所得结果具有更好的代表性^[20],因此参数选取如表1所示,各次试验所产生的累积损伤曲线如图8所示。

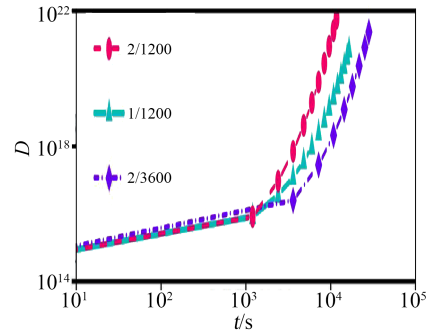
表1 步进应力试验数据
Tab.1 Step stress test data

$\Delta U/\Delta t$	升压级数	末级时间/s
2/1 200	11	157
1/1 200	21	986
2/3 600	10	859
1/600	19	568
2/2 400	9	2 053
2/4 800	10	2 096
2/1 200	10	1 057
1.5/1 500	13	1 188
2/2 000	11	1 191

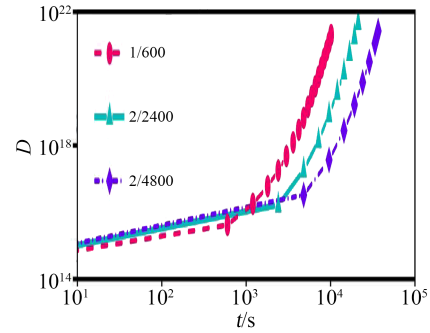
将图8(a)~(c)中的损伤曲线作为各行元素构成3阶损伤矩阵。对n值在0~40的范围内进行迭代,所得结果如图9所示。从图9中获取符合条件的 $n_3=12.06$, $D_c=2.38\times 10^{21}$ 。根据步进应力试验数据,其所耗时间之和不到恒定应力试验所耗时间的25%,但所获n值仅偏差0.77。3种方法获取的IPM参数如表2所示。

所选取的恒定场强与各次步进应力试验的初、末级场强均位于区间II。此外, I_{\min} 均小于5%的约束条件,满足将峰值处的n值选取为真实n值的条件。

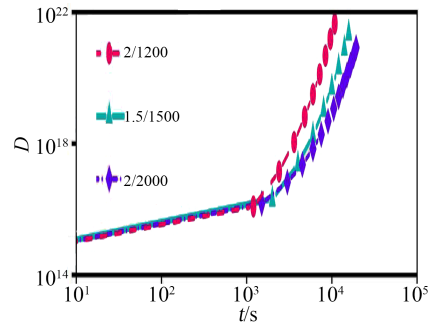
由线性拟合获取的恒定应力IPM曲线与由损伤特征值法分别获取的恒定应力与步进应力IPM曲线如图10所示。从图10可以看出,由恒定损伤特征值与步进损伤特征值获取的IPM曲线均位于由恒定失效数据线性拟合所得IPM曲线的95%置信区间内。此外,在低场强下曲线重合度更高,证



(a)矩阵第一行元素



(b)矩阵第二行元素



(c)矩阵第三行元素

图8 各组步进应力试验的损伤曲线

Fig.8 Damage curve of each group of step stress test

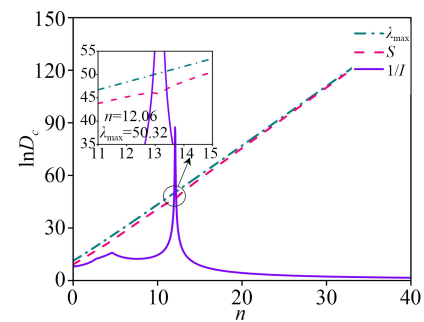


图9 步进应力试验获取的n与D_c

Fig.9 The n and D_c obtained from the step stress test

明以另外两种方式获取的IPM曲线在较低场强水平下进行外推寿命计算时均具有较高的准确度。

3 讨论

XLPE绝缘的电压耐受指数不仅能够表征其电

表2 由3种方式获取的IPM参数

Tab.2 IPM parameters obtained by two three methods

方法	n	D_c	I_{\min}
线性拟合	12.83	3.42×10^{21}	—
恒定特征	12.43	1.87×10^{21}	1.0%
步进特征	12.06	2.38×10^{21}	1.3%

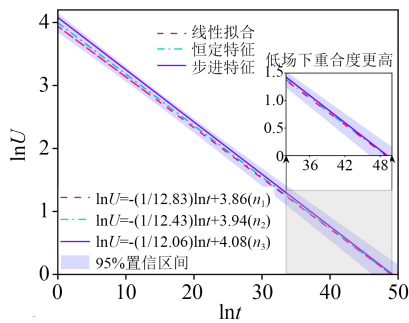


图10 由3种方式获取的XLPE样品的IPM曲线

Fig.10 IPM curves of XLPE samples obtained by three methods

压耐受能力的大小,也能反映绝缘老化机理的变化。本文分析了以电应力为主导的电-热老化模式下XLPE绝缘电压耐受指数的评估方法,该方法同样有助于分析非电应力主导的XLPE绝缘老化机理。

XLPE绝缘试样厚度与试验温度能够从微观层面影响老化机理。厚度的增加意味着深陷阱与浅陷阱密度的增大,浅陷阱密度越大则被捕获的电荷越多,电荷积聚造成的电场畸变现象也越严重;但深陷阱的存在可能会对电荷积聚起到抑制作用。

对于一定厚度的XLPE绝缘试样而言,电极处注入的同极性电荷在绝缘内部会发生入陷、脱陷与迁移的现象,而深陷阱的存在导致入陷电荷难以脱陷而积累于深陷阱中,使电极与XLPE绝缘的交界处形成界面电荷层,削弱了电荷的注入过程。更多的电荷注入需要克服更大的能量势垒,而势垒值与温度有关,温度的升高能够降低电荷注入所需势垒,对绝缘的老化起促进作用。

在试验温度小于XLPE绝缘介质的玻璃化转变温度时,其陷阱特性不会发生显著的变化,介质的微观结构不会发生明显的改变^[21],主导绝缘的老化机理是否变化是不明确的。但这一变化却可以从宏观层面的电压耐受指数的变化来体现。这是因为热应力对XLPE绝缘老化的影响会改变绝缘的电压耐受能力,在电场相同而温度不同的条件下获取 n 值,使 n 值发生明显变化的温度即为主导老化的机理变为热应力时的温度。

4 结论

本文分析了外施场强对XLPE绝缘老化机理的影响,通过损伤特征值法对恒定应力试验数据与步进应力试验数据进行分析,得到如下结论:

(1)由线性拟合与损伤特征值法获取的XLPE绝缘电压耐受指数 n_1 、 n_2 与 n_3 的值位于12~13的范围内,这与现有的 n 值参考范围(9~20)相符,表明相同的老化机理能够获取有效的试验结果。

(2)恒定应力损伤特征值法获取的XLPE绝缘电压耐受指数 n_2 相比 n_1 仅相差3%,并且前者消耗时间仅为后者的一半,表明在外推电寿命时该方法具有更高的效率,且所得 n 值可取代线性拟合获取的 n 值。

(3)步进应力损伤特征值法获取的XLPE绝缘电压耐受指数 n_3 相比 n_1 仅相差6%,但所用时间节省了75%以上。3种方法获取的IPM曲线外推出的低场强下的电寿命几乎相同,因此在外推XLPE绝缘的低场寿命时,采用步进应力法更加高效。

参考文献:

- 杜伯学,韩晨磊,李进,等. 高压直流电缆聚乙烯绝缘材料研究现状[J]. 电工技术学报,2019,34(1):179-191.
- 赵琦,周凯,孔佳民,等. 高压XLPE电缆阻水缓冲层烧蚀机理研究现状[J]. 绝缘材料,2022,55(4):20-28.
- 沈智飞,柳宝坤,王国栋,等. 10kV交联聚乙烯电缆加速电老化特性研究[J]. 绝缘材料,2021,54(8):60-66.
- LIU Y, CAO X L. A novel method for the insulation thickness design of HV XLPE cable based on electrical treeing tests[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2014,21(4):1540-1546.
- 陈新岗,杨平,马志鹏,等. 基于加速性能退化数据的XLPE绝缘可靠性评估[J]. 绝缘材料,2021,54(7):95-101
- 刘智谦,高震,郝建,等. 交流500kV交联聚乙烯海缆绝缘材料的步进工频击穿特性及寿命模型[J]. 绝缘材料,2020,53(2):29-35.
- SIMONI L. A new approach to the voltage-endurance test on electrical insulation[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1973,8(3):76-86.
- CAVALLINI A, FABIANI D, MAZZANTI G, et al. Life model based on space-charge quantities for HVDC polymeric cables subjected to voltage-polarity inversions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2002,9(4):514-523.
- 陈新岗,刘新宇,马志鹏,等. 基于混合应力法的XLPE绝缘电压耐受指数评估研究[J]. 绝缘材料,2022,55(5):68-75.
- 刘霞,于钦学,刘明昊,等. 160kV直流XLPE电缆绝缘的直流 $E-t$ 特性[J]. 高电压技术,2019,45(1):130-135.
- 黄炬城,王政钧,吕泽鹏,等. 基于Crine模型和逐步升压法的交联聚乙烯及其纳米复合材料老化寿命研究[J]. 绝缘材料,2021,54(12):73-79.
- WANG Y, LÜ Z P, WANG X, et al. Estimating the inverse pow-

- er law aging exponent for the DC aging of xlpe and its nanocomposites at different temperatures[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2016,23(6):3504-3513.
- [13] BIAN H R, YANG L J, YAO R Y, et al. Method of selecting step stress test parameters for XLPE insulation DC voltage endurance coefficient[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2019,26(3):746-753.
- [14] 杨丽君,廖瑞金,李剑,等. 用逐步升压法和Weibull参数估计油纸绝缘寿命[J]. 高电压技术,2004,30(6):4-6,8.
- [15] TIWANA A P S, REDDY C C. Life estimation using damage equalization method and step-stress breakdown tests[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2016,23(4): 2311-2318.
- [16] 边浩然,杨丽君,马志鹏,等. 基于累积损伤曲线的电寿命模型步进应力试验方法及在XLPE电缆中的应用[J]. 中国电力, 2020,53(9):125-132.
- [17] 陈善同. 电压寿命公式中 n 值的探讨[J]. 电线电缆,1979(5): 35-44.
- [18] FUKUI T, HIROTSU K, UOZUMI T. The improved voltage life characteristics of EHV XLPE cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1999,14(1):31-38.
- [19] LAN L, WU J, YIN Y. et al. Effect of temperature on space charge trapping and conduction in cross-linked polyethylene[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2014, 21(4),1784-1791.
- [20] 杨丽君,李仲轩,姚人允,等. 获取XLPE绝缘直流电压耐受指数的步进应力试验参数选取方法研究[J]. 电工技术学报,2019,34 (24):5244-5251.
- [21] MEN R J, LEI Z P, SONG J C, et al. Effect of thermal ageing on space charge in ethylene propylene rubber at DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2019, 26(3):792-800.

收稿日期:2023-04-07;修回日期:2023-06-14。

作者简介:陈新岗(1968-),男(汉族),重庆人,教授,主要从事电气设备状态监测、智能发变电运行与控制、信号采集与信号处理等方面的研究;通信作者:马志鹏(1988-),男(汉族),重庆人,讲师,主要从事电气设备状态监测的工作。