

基于混合应力法的XLPE绝缘电压耐受指数评估研究

陈新岗^{1,2}, 刘新宇¹, 马志鹏^{1,2}, 朱莹月¹, 谭悦¹, 崔炜康¹, 王梅林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:考虑序进应力试验和恒定应力试验之间的等效性问题,提出一种按照“序进-恒定-序进”应力顺序对样品施加电压的混合应力试验方法,并结合威布尔(Weibull)统计分析对XLPE薄片样品的电压耐受指数进行评估。结果表明:混合应力试验计算得到的电压耐受指数 n 为16.11,与恒定应力试验评估的 n 偏差为5.36%,且总评估时间比后者缩短了98.04%,证明该方法可以有效对XLPE绝缘的电压耐受指数进行评估。

关键词:电压耐受指数;交联聚乙烯;电寿命;恒定应力试验;混合应力试验

中图分类号:TM215;TM247 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2022)05-0068-08

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.05.010

Evaluation on Voltage Withstand Index of XLPE Insulation Based on Mixed Stress Method

CHEN Xingang^{1,2}, LIU Xinyu¹, MA Zhipeng^{1,2}, ZHU Yingyue¹, TAN Yue¹, CUI Weikang¹, WANG Meilin¹

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

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

Abstract: Considering the equivalence between sequential stress test and constant stress test, we proposed a mixed stress test method that the sample was applied voltage in the order of sequential advance stress-constant stress-sequential advance stress, and then the voltage withstand index n of XLPE flake sample was evaluated by this method combined with Weibull statistical analysis. The results show that the voltage tolerance index n calculated by the mixed stress test is 16.11, the deviation between it and the n evaluated by the constant stress test is 5.36%, and its total evaluation time is shortened by 98.04% than that of the constant stress test, which proves that this method can evaluate the voltage withstand index of XLPE insulation effectively.

Key words: voltage tolerance index; XLPE; electric life; constant stress test; mixed stress test

0 引言

随着电网的发展,高压直流输电凭借其灵活性好、输电距离远等优点得到了广泛应用^[1]。交联聚乙烯(XLPE)直流电缆作为柔性直流输电工程中的关键设备之一,其绝缘老化失效机理和寿命评估的研究一直都是高电压绝缘领域密切关注的问题。其中,老化寿命模型是固体绝缘材料研究的重要成

果之一。反幂模型是典型的电寿命唯象模型,凭借其简洁的表达式和明确的参数含义而被广泛应用于电缆绝缘老化失效机理与寿命评估的研究^[2]。

电压耐受指数 n 是反幂模型中的重要参数,在实际工程中得到广泛的应用。 n 的数值可以表征电力电缆在电应力作用下的长期耐受能力。在电缆绝缘设计中,可以根据 n 值确定电缆的老化系数,并设计出电缆绝缘层的厚度^[3]。另外,电缆在其出厂前的多种检测试验的电场选取都要参考 n 值的大小^[4]。国内外学者根据反幂模型对 n 的数值进行了大量的研究。文献[5]针对XLPE及其纳米复合材料在不同的温度下进行了加速电寿命试验。结果表明,计算得到的 n 值随着试验温度的升高而增大。

收稿日期:2021-07-08 修回日期:2021-08-30

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0900701)

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。

文献[6]利用空间电荷积聚造成的宏观现象在现有反幂模型数学表达式中引入修正系数,得到的 n 值随着样品厚度的增加而增大。文献[7]采用极大似然法分析了加速电寿命试验数据并求得相应的 n 值,但该方法只通过变压器匝间油纸绝缘模型进行了验证。文献[8]利用Weibull分布统计分析结合最小二乘法计算出电缆的形状参数和尺度参数进而计算出 n 值,但该方法只进行了模拟仿真,没有进行试验验证。

综上所述,寻找合适的方法来获取直流电缆电压的耐受指数进而评估电缆电寿命是目前研究与工程应用领域需要解决的问题。因为直流电缆在正常工作状态下的失效过程是缓慢的,所以加速寿命试验是解决上述问题的有效方法^[9],其中恒定应力法最为常用。文献[10]对直流电缆切片施加40 kV/mm的恒定直流电场,通过对样品空间电荷特性进行分析,表明其具有抑制空间电荷和耐电老化的能力。文献[11]自主搭建了恒定应力试验装置,通过试验获得了试样电缆的电压耐受指数 n 为14.03。然而,恒定应力法存在试验耗时长、通常获取单一样品的电压耐受指数需花费数天乃至数十天时间,不利于其进一步的推广应用。

本研究提出一种混合应力试验方法,首先,根据反幂模型和累积损伤模型建立满足恒定应力试验和序进应力试验等效性的条件;其次,通过不同电压上升率的序进应力试验得出满足等效性条件的最佳电压上升率;最后,采用混合应力试验方法对XLPE薄片按照“序进-恒定-序进”应力顺序进行加速寿命试验,根据样品失效时间结合Weibull分布统计结果求得样品的电压耐受指数。

1 两种加速寿命试验方法的等效性建立

1.1 在恒定与序进应力试验中应用的反幂模型

恒定应力加速寿命试验通常是对样品施加高于其正常耐受水平的恒定电压来加速其老化,并记录每个样品从施加电压开始到被击穿时的时间与场强。将其放入 $\ln E - \ln t$ 坐标系中绘点,最后将所有的点拟合成一条直线,如图1所示。该方法应用较广,但是存在耗时长、试验结果分散等缺点。

拟合的直线表达式满足式(1),该式也可由反幂模型等式两边取对数获得。

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

式(1)中: E 为电场强度; t 为电场强度 E 下绝缘材料

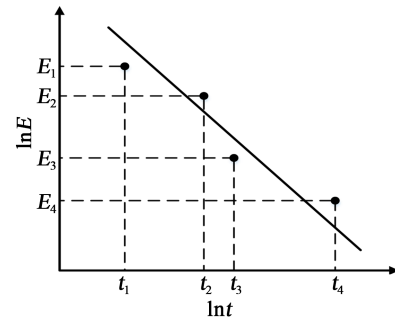


图1 恒定应力法时间与场强的关系

Fig.1 The relationship between time and field strength of constant stress method

被击穿的时间; D 为材料失效所需的累计损伤量; n 为电压耐受指数。

序进应力试验是指对样品施加时刻改变的应力,最常用的是施加随时间线性上升的电压,如图2所示。

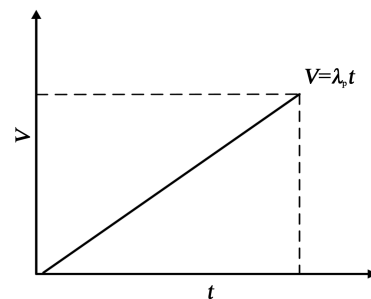


图2 序进应力法施加电压与时间的关系

Fig.2 The relationship between applied voltage and time of sequential stress method

序进应力的理论基于W NELSON提出的反幂模型的累积损伤分析,其表达式如式(2)所示。

$$D_c = V_c^n t_c \quad (2)$$

式(2)中: V_c 为恒定应力的失效电压; t_c 为恒定应力的失效时间; n 为电压耐受指数; D_c 为电压 V_c 在 t_c 时间内对样品造成的损伤量。

通过式(2)也可以将序进应力试验数据运用于绝缘材料的寿命分析中^[12-16]。采用该方法对直流电缆进行寿命评估时,通常需要通过反幂模型建立序进应力试验与恒定应力试验方法的等效关系。

1.2 恒定应力与序进应力试验的等效性分析

要使序进应力试验与恒定应力试验等效,必须基于两个假设:①累积损伤量 D 达到阈值时,被测样品发生绝缘击穿,在此过程中累积损伤量可变;②任意时刻变化的累积损伤量都可使用式(2)所示的反幂模型来表示。

在序进应力试验中电压随时间发生变化,因此样品的累积损伤量也随加压时间而变化。这一过程中,产生的累积损伤量可采用积分的方法表示,如式(3)所示。

$$D_p = \int V_p^n dt_p \quad (3)$$

式(3)中: V_p 为序进应力的失效电压; t_p 为序进应力的失效时间; D_p 为序进应力的累积损伤量。

序进应力试验电压表达式为式(4)。

$$V_p = \lambda_p t_p \quad (4)$$

式(4)中, λ_p 为电压上升率。

将式(4)代入(3)并积分得到式(5)。

$$D_p = \frac{\lambda_p^n t_p^{n+1}}{n+1} \quad (5)$$

基于假设①累积损伤量 D 到达阈值时,样品发生击穿,可得到式(6)。

$$D_p = D_c \quad (6)$$

联立式(2)~(6)可得到式(7)。

$$V_c^n t_c = \frac{\lambda_p^n t_p^{n+1}}{n+1} \quad (7)$$

利用式(7),在恒定应力加速寿命试验和序进应力加速寿命试验采用相同的试样且已知 n 值的情况下,根据一种试验的失效时间就可预测另一种试验的失效时间,从而建立起恒定应力法与序进应力法的等效关系。这种等效关系为使用混合应力法进行电压耐受指数 n 的评估提供了理论依据。

1.3 混合应力试验评估电压耐受指数

恒定应力试验存在耗时长、样品之间的电压耐受能力存在差异、施加恒定电压的选值困难等缺点。使用混合应力试验进行电缆电寿命的评估能够有效避免上述缺点。

混合应力试验由恒定应力试验和序进应力试验混合构成,可分为3个阶段,如图3所示。第1个阶段是序进应力试验,对样品施加上升率为 λ_p 的变化电压,电压从0 kV上升到选定的电压,记录时间 t_{p1} ;第2个阶段对样品进行选定电压下的恒定应力试验,记录时间 t_c ;第3个阶段为序进应力试验,对样品施加上升率为 λ_p 的变化电压,电压从选定电压上升至样品发生击穿,记录击穿电压 V_t 和击穿时间 t_{p2} 。运用序进应力试验与恒定应力试验的等效性:假设存在一个 n 值,可以将第1阶段与第3阶段序进应力试验总时间转化为等效的恒定应力试验时间。将该时间与第2阶段恒定应力试验时间相加即可得到混合应力试验的总时间。

因为恒定应力试验和序进应力试验的击穿时

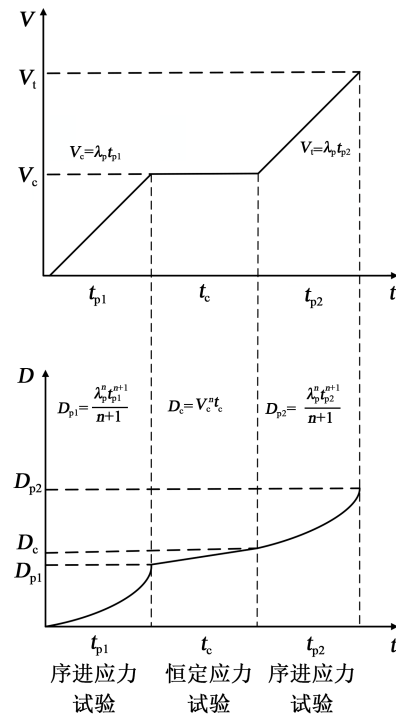


图3 混合应力法

Fig.3 Mixed stress method

间都符合Weibull分布,则等效的混合应力试验时间也符合Weibull分布。根据Weibull定律,样品的累积击穿概率 $F(t_i)$ 可表示为式(8)。

$$F(t_i) = \frac{i - 0.3}{N + 0.4} \quad (8)$$

式(8)中: N 为试验样品总数; i 表示从试验开始到任意试验时间 t 后的样品累计击穿个数。

因此,可以进行不同选定电压 V_c 下的多组混合应力试验,得到每组试验的混合应力击穿时间。将该时间结合Weibull定律转化为尺度参数 t ,即为XLPE被测样品在 V_c 下的电寿命。把不同的尺度参数 t 和选定场强代入式(1)中并在双对数坐标系中绘制出一条直线,通过该直线可以求取电压耐受指数和累积损伤量。

混合应力试验中第1阶段和第3阶段的序进应力试验可以有效减少XLPE电缆老化的时间,防止长时间加压试验中外部环境变化造成的干扰。第2阶段的恒定应力试验可以使绝缘材料最终的失效形式为电热击穿,保证一定的安全裕度,预防短时击穿造成的试验误差,使最终算出的电压耐受指数更接近于真实值。

因此,混合应力法是评估被测XLPE样品电压耐受指数的有效方法。然而,混合应力法的合理应用需建立在试验参数如序进升压的升压速率 λ_p 的优

化选取基础上。因此有必要继续研究最优试验参数的获取方法。

2 序进应力最优试验参数

2.1 最优试验参数的求取方法

选取一个合理的序进应力电压上升率 λ_p 范围,并在该范围内选取若干个 λ_p 数值: $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i$ 。采用同批次XLPE样品分别以 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i$ 作为升压速率进行序进应力击穿试验。相邻 λ 之间可以求取一个该电压上升率范围下的假定电压耐受指数,如图4所示。

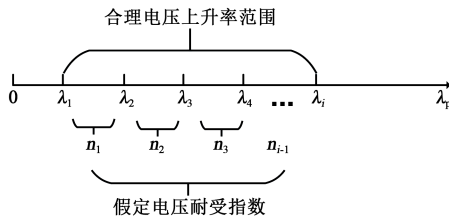


图4 最优试验参数求取

Fig.4 Optimal test parameters

将该假定电压耐受指数与理论的电压耐受指数范围进行对比。若该假定电压耐受指数最为接近理论值范围,则该电压上升率范围的中间值就为最佳电压上升率 λ_p 。

采用如下所示方法,可由相邻两个 λ 数值 λ_1, λ_2 求取一个假定的电压耐受指数。电压上升率 λ_1, λ_2 下的累积损伤为式(9)。

$$\begin{cases} D_{p1} = \frac{\lambda_1^n t_{p1}^{n+1}}{n+1} \\ D_{p2} = \frac{\lambda_2^n t_{p2}^{n+1}}{n+1} \end{cases} \quad (9)$$

当进行序进应力试验时,可以求得两种电压上升率下的样品寿命 t_{p1}, t_{p2} 。假定一个电压耐受指数 n 值,代入式(9)可以求得两种电压上升率下的累积损伤量 D_{p1}, D_{p2} 。基于假设②,假定的 n 值和累积损伤 D_{p1}, D_{p2} 都满足反幂模型,将它们分别代入式(2)中并取对数得到式(10)。

$$\begin{cases} \ln D_{p1} = \ln(t_{p1}) + n \ln(V_1) \\ \ln D_{p2} = \ln(t_{p2}) + n \ln(V_2) \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中, V_1, V_2 为不同电压上升率下序进应力试验等效为恒定应力试验的电压。

将式(10)中两等式代表的直线在双对数坐标系中表示,如图5所示。

由图5可知,直线的斜率由假定的电压耐受指数 n 决定,两条直线保持相对平行的位置关系。然

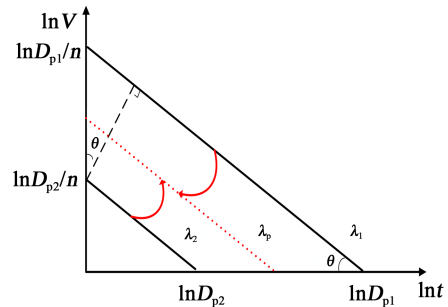


图5 序进应力 $V-t$ 曲线

Fig.5 Progressive stress $V-t$ curves

而,每条直线在坐标系中的具体位置是由累积损伤量 D 所决定的。由于样品都选自同一材料且大小形状相同,在理论上,当假定的 n 值为XLPE样品电压耐受指数的真实值时,不同电压上升率下电缆击穿时的累积损伤 D_{p1}, D_{p2} 应该相同。但是在真实试验中,累积损伤量存在一定的差异。因此可认为当两条直线越接近时, n 值就越接近于该 λ 范围下电压耐受指数的真实值。由几何关系可知,两条直线斜率相同时,它们之间的距离就可表示直线的差异程度。图5中两条直线之间的距离 d 可由式(11)表示。

$$d = \cos \theta \left| \frac{\ln D_{p1}}{n} - \frac{\ln D_{p2}}{n} \right| = \frac{|\ln D_{p1} - \ln D_{p2}|}{\sqrt{n^2 + 1}} \quad (11)$$

换言之,求取两种电压上升率范围下假定电压耐受指数的问题就可以转化为求取以 n 为变量,式(12)为目标函数的数学规划问题。

$$\begin{cases} \min \left[d = \frac{|\ln D_{p1} - \ln D_{p2}|}{\sqrt{n^2 + 1}} \right] \\ D_{p1} = \frac{\lambda_1^n t_{p1}^{n+1}}{n+1} \\ D_{p2} = \frac{\lambda_2^n t_{p2}^{n+1}}{n+1} \\ n > 0 \end{cases} \quad (12)$$

当 n 值变化时,两条直线相向运动,相交后分开,运动轨迹如图5所示。距离 d 的大小与 D_{p1} 和 D_{p2} 差的绝对值呈正相关,在运动过程中先减少至0后再增大。运动过程中两条直线始终保持平行,二者运动的时间和速率近似相等。当两直线运动到中间位置时相交, d 达到最小值,此时该位置对应的 λ_p 为该范围下最佳的电压上升率,其值为 $(\lambda_1 + \lambda_2)/2$ 。

若选取计算的电压上升率 λ 数目为 m 个,求取序进应力试验最佳电压上升率 λ_p 的流程如下:

首先,选取一个合理的电压上升率区间,在该

区间内选取 m 个呈等差数列排布的电压上升率 (m 为偶数)。然后,在该区间内用所有被选 λ 对 a 个样品进行序进应力试验得到击穿时间,并计算 a 个击穿时间的平均击穿时间。最后,再进行相邻两个电压上升率范围内的假定电压耐受指数求取,得到 n_1 、 $n_2 \cdots n_{m-1}$ 。将所有不同范围下求得的电压耐受指数与理论的耐受指数范围进行对比,取最接近理论值的电压上升率区间的中间值为序进应力试验最佳的电压上升率 λ_p 。

2.2 方法验证

设计不同电压上升率的序进应力试验,进行最佳电压上升率的求取。试验中采用北欧化工公司生产的型号为LS4258DCE的XLPE材料,利用平板硫化机热压制成直径为50 mm、厚度为0.1 mm的圆形薄片作为试验样品,然后用无水乙醇清洗,在60℃真空烘箱中干燥24 h。

为了确定一个合理的序进应力试验电压上升率范围,需要知道样品大致的击穿电压区间。将样品放置在绝缘油内,控制油温为室温,对6组厚度为0.1 mm的XLPE薄片进行短时击穿试验来确定击穿电压区间,初始电压设置为0 kV。记录的击穿电压如表1所示。从表1可以看出,短时击穿试验的击穿电压分布在20~40 kV,为了方便控制电压和保证击穿时间的裕度,合理电压上升率范围取0~2 kV/s。

表1 短时击穿电压

Tab.1 Short-term breakdown voltage

样品序号	1	2	3	4	5	6
击穿电压/kV	22.4	24.7	32.4	31.5	36.8	30.2

设计序进应力试验初始电压 $V_0=0$ kV,电压上升率 λ 分别取0.5、1.0、1.5、2.0 kV/s,每组试验对6个XLPE样品进行击穿。分别记录每组试验所有样品的击穿时间并计算平均击穿时间,结果如表2所示。

根据表2的数据和式(12),对所有电压上升率范围内的假定 n 值进行计算,计算结果如图6所示。从图6可以看出,在 λ_p 取值1.0~1.5 kV/s时,计算得到的假定 n 值(11.27)接近文献[11]评定的电压耐受指数区间12~16,因此序进应力试验的最佳电压上升率 λ_p 为1.25 kV/s。

3 混合应力法求XLPE样品 n 值的试验验证

采用混合应力试验求取XLPE样品的电压耐受指数 n 。为了验证方法的可行性,采取恒定应力试验进行对照。

表2 序进应力试验击穿时间

Tab.2 Progressive stress test breakdown time

λ (kV/s)	击穿时间/s						平均击穿 时间/s
	1	2	3	4	5	6	
0.5	14.2	38.2	40.2	58.4	61.4	65.4	46.30
1.0	16.8	18.1	21.0	36.0	38.0	39.7	28.27
1.5	15.1	15.5	17.5	21.8	22.0	25.0	19.48
2.0	10.6	10.3	19.0	19.15	20.4	20.8	16.70

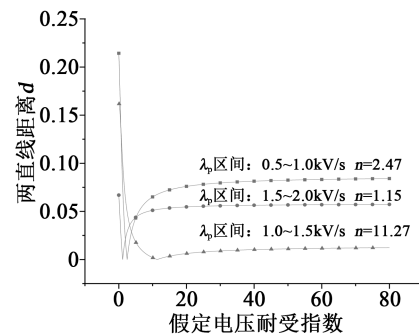


图6 假定 n 值的计算

Fig.6 Calculation of assuming n value

3.1 装置搭建

为了减少试验时间,搭建多电极击穿试验装置如图7所示,由多电极加压罐、固态继电器、电磁铁、击穿计时计数器组成。

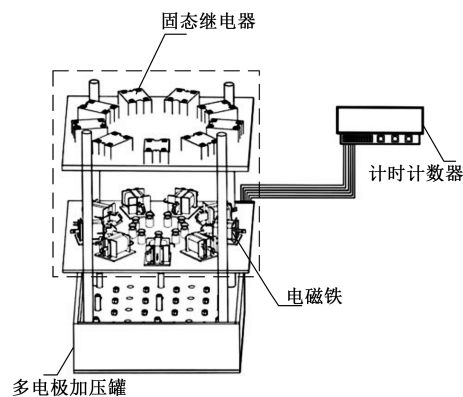


图7 多电极试验装置示意图

Fig.7 Schematic diagram of test device with multiple electrodes

多电极加压罐中电极孔呈棋盘排列,单个孔可防止该电极与罐中的接地钢板之间的放电。将多个电极分别置入不同孔位,控制相邻电极之间的距离防止电极间放电。罐中形成一个密闭的空间,并在空间内注入绝缘油,可保持试验时罐中油体的温

度,防止异物流入造成试验干扰和阻止闪络的发生。交直流控制电路中的交流电路和直流电路通过电磁铁和固态继电器进行相互控制通断。击穿计时计数器由 STM32 型微处理器中的实时时钟 RTC、存储芯片 AT24C02 和液晶显示模块组成,用于记录击穿时间。该装置结构简单可靠,可同时进行多组击穿试验,并准确记录各个样品的击穿时间,能够防止装置的误动和拒动,并且能有效防止高压试验时电极间放电现象和闪络的发生。

3.2 求取电压耐受指数

为了方便与恒定应力试验求取的电压耐受指数进行对比,混合应力试验中恒定应力试验部分施

加与文献[11]相同的恒定电压,分别为 8、9、10 kV。由文献[17]可知,当 XLPE 失效时间为 1 h 到 1 年内,样品失效机理为电热击穿,获取的 n 值能够保证一定的安全裕度,因此选取恒定应力施加时间为 1 h。

设计 3 组混合应力试验,每组试验放置 6 个样品。其中恒定应力部分的电压分别为 8、9、10 kV,施加时间为 1 h,序进应力试验的电压上升率 λ_p 为 1.25 kV/s。按照样品击穿时间的先后顺序,依次记录每段应力的作用时间,通过式(7)将首、尾两段序进应力作用时间转换为等效恒定应力时间。将等效恒定应力时间与恒定应力作用时间相加得到混合应力时间,试验数据如表 3~5 所示。

表 3 8 kV 恒定应力下的混合应力试验时间

Tab.3 The mixed stress test time at 8 kV of constant stress

样品编号	时间/s			等效恒定应力时间/s	混合应力时间/s
	序进应力(0~8 kV)	恒定应力(8 kV)	序进应力(8 kV~击穿)		
1	6.4	3 600	12.5	307 392.64	310 992.64
2	6.4	3 600	17.0	4 224 601.03	4 228 201.03
3	6.4	3 600	17.7	6 065 355.25	6 068 955.25
4	6.4	3 600	25.0	155 895 619.57	155 899 219.57
5	6.4	3 600	28.0	477 616 389.01	477 619 989.01
6	6.4	3 600	31.0	1 332 421 676.74	1 332 425 276.74

表 4 9 kV 恒定应力下的混合应力试验时间

Tab.4 The mixed stress test time at 9 kV of constant stress

样品编号	时间/s			等效恒定应力时间/s	混合应力时间/s
	序进应力(0~9 kV)	恒定应力(9 kV)	序进应力(9 kV~击穿)		
1	7.2	3 600	11.4	66 979.52	70 579.52
2	7.2	3 600	12.5	135 556.02	139 156.02
3	7.2	3 600	15.4	731 019.14	734 619.14
4	7.2	3 600	21.6	14 314 099.35	14 317 699.35
5	7.2	3 600	23.2	27 789 265.84	27 792 865.84
6	7.2	3 600	26.5	98 409 513.81	98 413 113.81

以不同混合应力下击穿时间的对数 $\ln t$ 为 x 轴,以累积击穿概率 $F(t)$ 的相关函数 $\ln(-\ln(1-F))$ 为 y 轴拟合直线,结果如图 8 所示,得到 3 个混合应力下的 Weibull 尺度参数分别为 18.79、16.23、13.24。

将 3 个混合应力等效场强和 Weibull 尺度参数代入场强和电压组成的双对数坐标轴,线性拟合结果如图 9 所示。

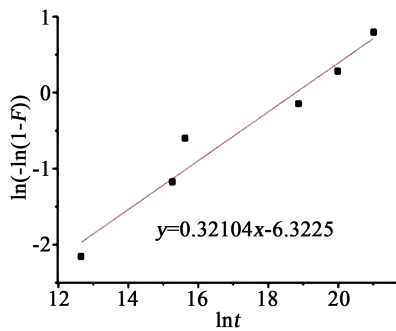
将拟合的直线与式(1)进行对照,该直线的斜

率为 $-\frac{1}{n}$,截距为 $\frac{1}{n} \ln D$,计算得到混合应力试验法评估的电压耐受指数 $n=16.11$,累积损伤 $D=5.93 \times 10^{38}$ 。

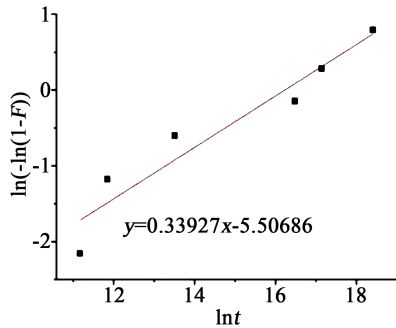
为了验证方法的正确性,进行恒定应力对照试验。对相同批次和数量的样品分别施加 8、9、10 kV 的恒定电压进行老化击穿,依次记录击穿时间。将击穿时间拟合,得到 3 个恒定电压下的 Weibull 尺度参数,最后将恒定场强和尺度参数代入场强和电压

表5 10 kV 恒定应力下的混合应力试验时间
Tab.5 The mixed stress test time at 10 kV of constant stress

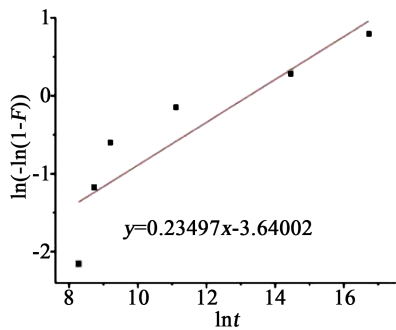
样品编号	时间/s			等效恒定应力时间/s	混合应力时间/s
	序进应力(0~10 kV)	恒定应力(10 kV)	序进应力(10 kV~击穿)		
1	8	3 600	5.3	333.42	3 933.42
2	8	3 600	7.7	2 552.82	6 152.82
3	8	3 600	8.9	6 302.33	9 902.33
4	8	3 600	12.4	63 459.03	67 059.03
5	8	3 600	18.9	1 889 695.20	1 893 295.20
6	8	3 600	24.4	18 523 308.47	18 526 908.47



(a)8 kV 混合应力



(b)9 kV 混合应力



(c)10 kV 混合应力

图8 不同混合应力下击穿时间的Weibull分布
Fig.8 Weibull distribution of breakdown time at different mixed stress

组成的双对数坐标轴，试验结果如表6和图10所示。

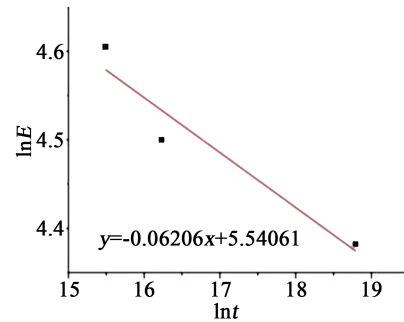


图9 混合应力试验 E-t 曲线

Fig.9 E-t curve of mixed stress test

表6 恒定应力试验击穿时间

Tab.6 Breakdown time of constant stress test

单位:s

试验电压/kV	样品编号					
	1	2	3	4	5	6
8	172 152	193 712	246 041	351 570	354 656	917 158
9	54 445	72 115	129 835	143 720	150 331	296 855
10	1 229	4 367	22 948	72 115	72 578	76 291

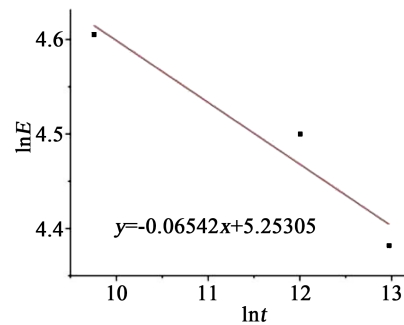


图10 恒定应力试验 E-t 曲线

Fig.10 E-t curve of constant stress test

计算得到恒定应力试验法评估的电压耐受指数 $n=15.29$ ，累积损伤 $D=7.46 \times 10^{34}$ 。混合应力试验

耗费总时间为 65 249 s, 恒定应力试验总时间为 3 332 118 s。通过比较, 混合应力试验与恒定应力试验评估的电压耐受指数 n 偏差为 5.36%, 且混合应力试验总时间比恒定应力总时间缩短了 98.04%。

4 结论

根据反幂模型和累积损伤模型证明恒定应力试验和序进应力试验的等效性, 依据该等效性提出一种混合应力试验方法并进行验证, 主要得到以下结论:

(1) 通过不同电压上升率的序进应力试验, 得到序进应力试验的最佳试验参数电压上升率 λ_p 为 1.25 kV/s。

(2) 使用混合应力试验对直流 XLPE 薄片电压耐受指数进行评估, 并与恒定应力试验进行比较。试验计算得到电压耐受指数 n 为 16.11, 累积损伤 D 为 5.93×10^{38} 。所评估 n 值与恒定应力试验 n 值的评估值偏差为 5.36%, 且总时间比后者缩短了 98.04%。证明该方法可以有效对 XLPE 绝缘的电压耐受指数进行评估。

参考文献:

- [1] 周远翔, 赵健康, 刘睿, 等. 高压/超高压电力电缆关键技术分析及展望[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2593-2612.
- [2] 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.
- [3] 廖雁群, 冯冰, 罗潘, 等. 反幂定律应用于高压电缆寿命设计的研究进展[J]. 绝缘材料, 2016, 49(3): 1-6.
- [4] 全国电线电缆标准化技术委员会. 额定电压 500kV 及以下直流输电用挤包绝缘电力电缆系统: GB/T 31489—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [5] WANG Y, LÜ Z P, WANG X, et al. Estimating the inverse power 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.
- [6] MA Z, YANG L, BIAN H, et al. An improved IPM for life estimation of XLPE under DC stress accounting for space-charge effects [J]. IEEE Access, 2019, 7: 157892-157901.
- [7] 林春耀, 欧小波, 魏新劳, 等. 步进电压下变压器匝间油纸绝缘的电老化[J]. 绝缘材料, 2016, 49(8): 53-59, 67.
- [8] 张铁岩, 王承民, 孙秋野, 等. 一类基于改进 Weibull 分布模型的电力电缆寿命评估方法[J]. 中国工程科学, 2008(10): 42-46.
- [9] 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.
- [10] 刘云鹏, 刘贺晨, 钟平, 等. 直流电老化对 160kV 直流电缆材料空间电荷分布特性的影响分析[J]. 绝缘材料, 2017, 50(3): 37-42, 48.
- [11] 龙尧. 考虑电应力的 XLPE 寿命评估方法及试验装置研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2020.
- [12] 郭春生, 万宁, 马卫东, 等. 序进应力在线加速退化模型研究[J]. 物理学报, 2011, 60(12): 633-637.
- [13] 郭春生, 单尼娜, 冯士维, 等. 序加实验理论模型误差修正的研究[J]. 物理学报, 2010, 59(4): 2350-2355.
- [14] 汤银才. CE 模型下 Weibull 分布序加试验的 Bayes 分析[J]. 系统科学与数学, 2006(3): 342-351.
- [15] PENG C Y, TSENG S T. Progressive-stress accelerated degradation test for highly-reliable products[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2010, 59(1): 30-37.
- [16] STARR W T, ENDICOLT H S. Progressive stress - A new accelerated approach to voltage endurance[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1961, 80(3): 515-522.
- [17] 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): 190-197.