

XLPE电缆等温松驰电流老化因子与寿命指数对应关系研究

交联聚乙烯(XLPE)绝缘电缆的老化是影响其可靠性的重要因素。XLPE电缆绝缘的寿命指数是评估XLPE电缆老化状态的有效参数,寿命指数的确定需要对大量的样品进行测试,并不适用于评估运行中的XLPE电缆的老化状态。通过对高压XLPE电缆绝缘等温松驰电流的测试,可以得到反应不同极化类型的时间常数及系数,并得到与其老化状态相关的老化因子。本文通过对经过不同老化时间的XLPE电缆样品的等温松驰电流及逐级击穿试验得到了相应的老化因子和寿命指数。试验结果表明,未老化XLPE电缆的松驰电流老化因子为1.98~2.14,半年老化后的老化因子为2.47~2.79,而一年老化后的老化因子约2.99~3.15,相对应的寿命指数分别为15.6、14.3及9.3。因此等温松驰电流老化因子与寿命指数有相关的对应关系,可以对运行中的XLPE电缆等温松驰电流进行测试,按对应的寿命指数对其老化状态进行评估。

高小庆¹ 许强¹ 张屹¹ 李海¹ 张圣甫¹ 朱永华² 贾欣² 杨娟娟² 吴长顺²

/1.国家电网上海市电力公司 2.国家电线电缆质量监督检验中心



高小庆/高级工程师

0 引言

在我国,大量使用中压交联聚乙烯绝缘电力电缆产品始于20世纪80年代后期,随着经济的腾飞和城市电网的改造,其使用量越来越大。而随着电缆使用年限的增加,电缆用户和制造企业对中压交联电力电缆的使用寿命越来越关切。

影响电缆寿命的因素很多,评估方法也很多,大致可以分成以下几种:破坏性方法,如耐压法(逐级升压法、斜坡电压法)和预击穿局部放

电法;非破坏性方法,如介电频谱法、残余电荷法、等温松驰退极化电流法和损耗电流谐波分量法等;在线监测法,如直流叠加法、直流成分法和谐波分量法等;非电量法,如切片法、活化能法、热延伸变化率法、缺陷能态评估法及红外光谱等。

破坏性方法中的逐级升压法可以通过对大量样品的工频击穿试验比较准确地得到XLPE电缆的寿命指数,以用于对XLPE电缆的寿命评估,但由于所需样品数量较多并不适用于对在线运行电缆的寿命评估。而非破坏性方法中的等温松驰电流法则可以对运行中的XLPE电缆进行离线测试,并得到反应不同老化类型的时间常数,进而得到反应XLPE电缆绝缘老化状态的老化因子。本文中将在等温松驰电流法与逐级击穿试验方法获得的电缆寿命指数之间的相关性进行了分析,以期发现等温松驰电流法老化因子与寿命指数之间的对应关系,以用于指导电缆寿命评估工作。

1 等温松驰电流的测试及逐级击穿试验方法

等温松驰的概念最早出现在20世纪70年代时,由Simmons和Tam研究半导体材料中的缺陷能级分布时提出的,随后此概念和方法扩展到固体绝缘材料的缺陷能级分布的研究中。如果将XLPE电缆的内外半导体层各视为一个电极,电缆的XLPE绝缘在运行过程中将产生包括水树枝、电树枝在内的各种缺陷。如果对此电极系统施加一个直流极化电压,那么在极化过程中,将有电荷填充到这

关键词/Keywords

交联聚乙烯电缆·
松驰电流·
寿命指数·

些缺陷中。待极化完成后,对电极——介质系统进行短路放电处理,那么在极化过程中填充到缺陷中的电荷将会发生跃迁,而处于不同势阱的电荷,发生跃迁所需要的时间不同。如果保持环境温度基本不变,处于越深势阱的电荷,跃迁的时间越长。这些跃迁出来的电荷,在外电路中表现为一个短路电流。短路电流的大小表明电缆绝缘中的缺陷的多少,而短路电流随时间的变化,则表明了电缆绝缘中缺陷所处势阱的位置分布^[1]。

等温松弛电流法测试系统的实际接线图及等效电路图如图1与图2所示。其中, R_{ISL} 与 R_{OSL} 分别为电缆的内外半导电屏蔽层的单位体积电阻,在计算过程中可以忽略; R_K 与 C_K 分别为电缆绝缘的单位长度电阻与电容; R 与 L 为电缆导体单位长度电阻与电感; R_E 为放电限流电阻; R_M 为测量保护电阻。通过对图2中方框圈出的部分进行计算,可得出绝缘老化对测得的电流的影响。其中有3对电阻和电容,分别对应着3种极化过程(C_{D1} 、 R_{D1} 对应于主体极化; C_{D2} 、 R_{D2} 对应于无定形与晶体界面的影响; C_{D3} 、 R_{D3} 对应于由于老化造成的界面中的金属盐和水合离子的影响)。所以可用三阶指数衰减函数对等温松弛电流进行拟合,如式(1)所示,其中的参数 a_i 、 τ_i 与电介质材料的特性有关: a_i 反映了陷阱的密度, τ_i ($=R_{Di}C_{Di}$) 反映了陷阱的深度, I_0 表明了电缆最终达到平衡时的稳态值。

$$I(t) = I_0 + \sum_{i=1}^3 a_i \cdot e^{-t/\tau_i} \quad (1)$$

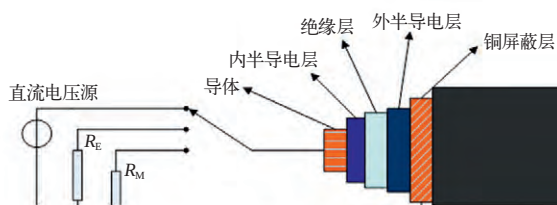


图1 XLPE电缆等温松弛电流测试接线图

对于中压电缆来说,如忽略空间电荷效应,均匀电场情况下,当所施加的电场强度约为 $E=240 \text{ V/mm}$ 时,这个电场强度给每个带电粒子施加约 0.0036 eV 的动能,此时电荷注入是不可能的,Steinbrink评估了电缆绝缘内的半导体针电极(曲率半径为 $1 \mu\text{m}$) 对电场强度的影响,结果发现 1 kV 直流电压下绝缘内部的最高场强为 118 kV/mm ,

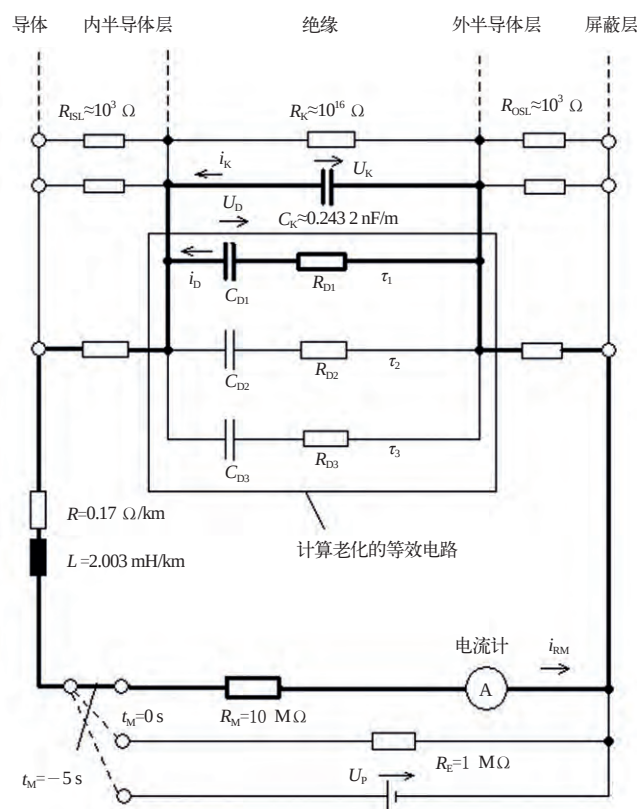


图2 XLPE电缆等温松弛电流测试等效电路图

电子可以从其中获得的能量为 0.59 eV , 由于聚乙烯中原子间的最低的键能为 1.43 eV , 因此,可以说IRC法是非破坏性的。时间常数 τ_3 对应着老化造成的界面中的盐和水合离子的影响,与之相关的参数会随着老化程度的加剧而变大;时间常数 τ_2 对应于无定形晶体界面的影响,在老化的过程中,与之相关的参数基本不变。所以实践中,常用在时间常数 τ 和 τ_3 时的去极化电流来计算老化因子A,即

$$A = \frac{I_D(\tau_3) \cdot \tau_3}{I_D(\tau_2) \cdot \tau_3} \quad (2)$$

无论从绝缘击穿的概率统计理论,还是从绝缘击穿的电化学理论,都可以推导出有关于电缆绝缘的寿命指数公式^[2]

$$E^n t = C \quad (3)$$

式中, E 为击穿场强, kV/mm ; t 为电场作用的时间; n 为寿命指数; C 为常数。

对于同一原材料、同一生产工艺制造出的电缆,其绝缘发生击穿时的老化总量 C 应相同。因此,对于逐级击穿试验中不同耐压时间的样品,其老化总量相同,则有

$$\sum_{p=1}^{10} \sum_{i=1}^{j-1} \sum_{pi} t_p \sum_{pi} t_i = \sum_{q=1}^{10} \sum_{j=1}^{i-1} \sum_{qi} t_p \sum_{qi} t_2 \quad (5)$$

式中, t_p 、 t_q 为逐级击穿试验中每级电压保持时间, s; t_1 、 t_2 为逐级击穿试验中最后一级电压所耐受的时间, s; E_{pi} 、 E_{qi} 为逐级击穿试验中两种电压持续时间下的击穿电场强度, kV/mm。

在逐级击穿试验中, 对于两种不同电压持续时间通过击穿试验得到样品的击穿场强, 利用式(5)可以计算得到样品的寿命指数 n 。如果电缆绝缘的寿命指数 n 已知, 在电场强度 E_1 作用下, 如其寿命为 t_1 , 那么就可以根据寿命指数公式计算出其在电场强度 E_2 作用下的寿命

$$t_2 = \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^n t_1 \quad (6)$$

在实际工程中, 如果可以通过试验求得XLPE电缆绝缘的寿命指数 n , 那么只要知道寿命曲线上某一电场强度下其寿命值, 就可以根据寿命指数

公式对于实际工作场强下的寿命进行估计。

2 试验结果及分析

试验中, 首先对8.7/15 kV、120 mm²的XLPE样品进行了空气中半年及一年的电热老化。老化进行时, 其导体被加热至工作温度90 ℃, 并进行热循环, 而在导体上施加17 kV ($2U_0$) 的电压, 样品长度75 m。电热老化结束后, 对未老化、半年老化及一年老化的各10根样品测试了其等温松弛电流并进行了逐级击穿试验。样品的等温松弛电流结果及计算得到的老化因子 A 值如表1所示。

如表2所示为不同老化时间后样品的逐级击穿试验结果, 试验起始电压为80 kV, 每级试验电压增加5%, 每级电压保持时间分别为1 min和10 min, 直至样品击穿, 记录样品击穿电压及时间。

将逐级击穿试验所得的试验结果利用式(5)

表1 样品等温松弛电流测量结果及老化因子 A

老化状态	样品编号	τ_1	a_1	τ_2	a_2	τ_3	a_3	Q_2	Q_3	A	平均值
未老化	A-1	13.87	91.88	73.91	35.92	508.5	10.44	3671	7285	1.98	2.05
	A-2	10.31	15.55	50.72	9.184	482.8	1.736	538.4	1156	2.14	
	A-3	11.78	31.64	55.95	24.43	365.1	6.859	1 593	3 321	2.08	
	A-4	12.38	59.38	54.38	33.45	353.6	9.455	2 362	4 666	1.97	
半年老化	B-1	0.016 94	66.01	8.741	34.63	84.26	6.513	246.6	650.8	2.64	2.64
	B-2	1.104	117.4	23.20	21.02	270.4	4.778	544.3	1434	2.63	
	B-3	0.893 7	98.17	8.263	12.79	77.95	8.716	222.9	622.9	2.79	
	B-4	0.348 0	99.19	15.45	15.02	147.9	3.173	227.9	563.5	2.47	
一年老化	C-1	0.848 3	132.6	46.96	20.26	622.4	4.148	901.8	2696	2.99	3.08
	C-2	0.426 2	147.1	36.76	22.69	501.7	4.598	753.0	2355	3.12	
	C-3	0.481 8	82.94	9.780	49.33	137.2	9.003	429.9	1303	3.03	
	C-4	0.016 8	46.01	33.12	9.742	233.7	6.436	403.5	1273	3.15	

表2 不同老化时间后样品的逐级击穿试验结果

1 min样品编号	A-1					A-2				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
击穿场强/(kV/mm)	50.67	64.81	41.51	49.66	47.14	41.42	46.27	49.37	33.39	47.80
最后一级时间/s	16	12	17	26	55	26	34	5	13	16
10 min样品编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
击穿场强/(kV/mm)	48.70	36.14	39.41	45.78	44.24	51.66	46.40	50.17	45.44	49.74
最后一级时间/s	358	207	272	312	327	214	43	166	386	186
1 min样品编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
击穿场强/(kV/mm)	32.72	42.38	53.73	50.98	49.38	45.94	41.71	55.53	35.12	56.85
最后一级时间(s)	24	36	35	38	11	18	12	42	23	15
10 min样品编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
击穿场强/(kV/mm)	36.45	24.45	33.13	39.18	34.55	46.98	45.07	37.97	47.83	46.25
最后一级时间/s	254	382	489	109	244	288	242	12	423	306
1 min样品编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
击穿场强/(kV/mm)	39.73	46.02	57.53	57.85	50.81	60.10	52.31	48.83	56.09	48.56
最后一级时间/s	12	30	17	57	59	46	25	14	6	38
10 min样品编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
击穿场强/(kV/mm)	41.50	45.56	45.80	38.07	43.63	41.16	39.42	42.55	39.69	39.69
最后一级时间/s	272	198	536	269	247	124	569	301	216	332

可以计算得到不同老化时间后的XLPE电缆样品的寿命指数 n 。不同老化时间后样品的老化因子及寿命指数如表3所示。

表3 不同老化时间后样品的老化因子与寿命指数

老化状态	老化因子范围	老化因子平均值	寿命指数
未老化	1.97~2.14	2.05	15.6
半年老化后	2.63~2.79	2.64	14.3
一年老化后	2.99~3.15	3.08	9.3

如图3所示为寿命指数随等温松弛电流老化因子的变化趋势。从图中可以看出，随着老化的进行，老化因子增大，而寿命指数下降程度增大，样品的残余寿命将越小。这表明，老化因子与寿命指数之间有着明显的关系，可以用等温松弛电流老化因子的测试来对应其寿命指数，以用于XLPE电缆绝缘老化状态的评估。

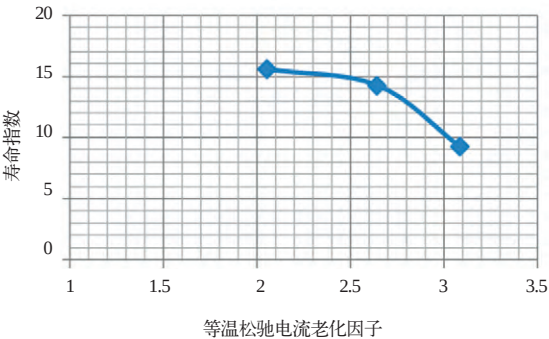


图3 XLPE电缆寿命指数随等温松弛电流老化因子的变化

从逐级击穿试验的结果来看，即使经过90℃，2 U_0 电压的电热老化，样品的寿命指数仍有9.3，此值与中低压XLPE电缆设计寿命指数基本相当，说明目前的设计中寿命指数取得较小，安全裕度较大，也意味着对于中低压XLPE电缆的绝缘

厚度可以减薄，适当提高其工作电场强度。

本文中由于数据量的限制，目前还不能得到等温松弛电流老化因子与寿命指数间较明确的数学关系。将来应对实际运行中的XLPE电缆进行大量测试以获得更多的数据量，并将其应用于高压XLPE电缆的老化状态评估中。

3 结束语

通过对XLPE电缆未老化、半年及一年电热老化样品的等温松弛电流的测试，可以得到不同老化状态下的等温松弛电流老化因子。对于未老化样品其老化因子约为1.97~2.14，半年老化后样品的老化因子约为2.63~2.79，而一年电热老化后的老化因子则为2.99~3.15，不同老化状态下能过逐级击穿试验所得的寿命指数则分别为15.6、14.3及9.3。随XLPE电缆的老化进行，其等温松弛电流老化因子增大，而寿命指数则加速下降，老化因子与寿命指数间有较明显的关系。

参考文献

[1] 王雅群，尹毅等，等. 温松弛电流用于10 kV XLPE 电缆寿命评估的方法[J]. 电工技术学报，2009(9).
[2] 刘子玉、王惠明，编. 电力电缆结构设计原理[M]. 西安：西安交通大学出版社，1995.

(收稿日期：2015-05-15) EA

作者简介

高小庆（1961-）男，高级工程师，主要研究方向为电网输变电工程。