

基于电气性能综合评估的 XLPE配网电缆受潮过程研究

罗思敏, 栾乐, 许中, 范伟男, 崔屹平, 徐硕
(广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 510000)

摘要: 为了研究不同受潮途径对电缆的作用效果, 结合运行经验设置多种内源性、外源性受潮途径, 进行90个循环周期的电缆加速受潮试验, 并定期检测绝缘电阻、局部放电、去极化电流等, 采用理想解法(TOPSIS)对试验电缆的受潮状态进行综合评估。结果表明: 水分能够在电缆运行过程中通过破损本体、中直接头和电缆终端的多种界面结构进入电缆内部并快速扩散, 中直接头浸水和内源性受潮的绝缘劣化效果最为突出, 需要重点预防和关注。此外, 基于绝缘电阻、局部放电和去极化电流的电气性能综合评估能够有效研究受潮过程、识别受潮状态, 可以应用于实际工程以评估湿热环境下配网电缆的受潮问题。

关键词: 电缆受潮; 电气性能评估; 理想解法; 中直接头; 内源性受潮

中图分类号: TM247 文献标志码: A 文章编号: 1009-9239(2022)10-0047-07

DOI: 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.10.008

Research on Damping Process of XLPE Distribution Network Cables Based on Comprehensive Electrical Performance Evaluation

LUO Simin, LUAN Le, XU Zhong, FAN Weinan, CUI Yiping, XU Shuo
(Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: In order to study the effects of different damping paths on cables, we set up a variety of endogenous and exogenous damping paths according to operating experience. Accelerated damping test were conducted on cables for 90 cycles, and the insulation resistance, partial discharge, and depolarization current were measured regularly. Then the moisture state of the cable was comprehensively evaluated by TOPSIS method. The results show that during cable operation, moisture can enter and rapidly spread inside the cable through the broken body, cable joints, and various interface structures of the cable terminals. The degradation effects of moisture through cable joints and endogenous moisture on the insulation is the most prominent, which should be prevented and taken seriously. Furthermore, the comprehensive evaluation of electrical properties based on insulation resistance, partial discharge, and depolarization current can effectively explore the damping process and identify the moisture state, which can be applied to practical engineering to evaluate the damp problem of distribution network cables in warm-damp environment.

Key words: damp cable; electrical property evaluation; TOPSIS; cable joint; endogenous moisture

0 引言

在我国城镇配电网中, 交联聚乙烯(XLPE)

电缆凭借其生产工艺成熟、性能稳定、成本低和维护简便等优点得到了广泛应用^[1]。随着电缆规模的增加, 其运行环境和技术工艺因关系到电缆的运行寿命和可靠供电, 也日益受到人们的关注^[2]。在气候湿热的南方地区, 配网电缆的运行环境较为恶劣, 长期运行于积水或高湿度的电缆通道, 由此导致电缆受潮现象普遍发生^[3]。电缆受潮后, 水分会侵入本体和附件的绝缘材料、复合绝缘界面等关键

收稿日期: 2021-10-04 修回日期: 2021-11-01

基金项目: 广东电网有限责任公司广州供电局项目(GZHKJXM 20180089)

作者简介: 罗思敏(1988-), 男(汉族), 湖北荆门人, 高级工程师, 主要从事配电网电力设备的运行性能与关键技术的研究。

部位,影响电场和温度场分布,进而诱发绝缘劣化、界面受潮、金具腐蚀等缺陷并导致电缆故障的发生,给电缆的安全和稳定运行带来了巨大挑战^[4-5]。

因此,全面了解电缆的受潮过程并进行有效预防,定期检测和诊断绝缘性能从而识别电缆受潮缺陷,对提高供电系统的稳定性具有重要意义。电缆受潮的可能原因分布在生产制造、运输存储、敷设安装和长期运行等各个环节,但不同途径受潮的作用效果还未被深入研究。在绝缘检测方面,基于耐压试验、介电特性检测、陷阱特性检测、局部放电等原理的在线和离线检测方法发展迅速,但各有优势和不足^[6-9]。综合来说,凭借单一指标难以对电缆的运行状态进行可靠性评估,亟需探究基于多方法联合分析的综合评估方式,实现对电缆受潮情况的准确识别和诊断。目前,基于理想解法(TOPSIS)、层次分析法(AHP)、主成分分析法(PAC)等的综合评估方法逐渐被研究者采用并取得了良好效果^[10-12],这对于电缆运行状态检测具有重要的参考意义。

本文根据配网电缆的典型运行环境和常见缺陷,对6段全新电缆线路进行90个周期的多途径加速受潮试验,定期检测试验线路电缆的绝缘电阻、局部放电和去极化电流,并采用TOPSIS法综合评估电缆的运行状态,探究不同途径受潮的作用效果,以期为XLPE配网电缆的受潮预防和评估工作提供参考。

1 试验

1.1 电缆多因素加速受潮试验

基于恒压负荷循环试验思路搭建电缆多因素加速受潮试验平台,模拟配网电缆本体及附件的运行环境、常见缺陷和运行状态,进行多周期电缆加速受潮与老化试验,平台组成和试验周期设置如图1~2所示。

试验中,对电缆回路进行90个周期的循环试验,周期时长不短于6h,包括加流升温、温度保持和

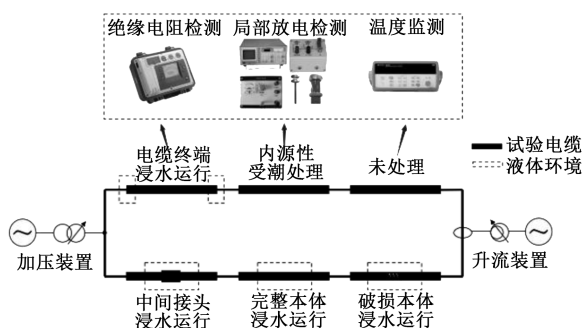


图1 电缆多因素加速受潮试验平台

Fig.1 Multi-factor accelerated damp test platform

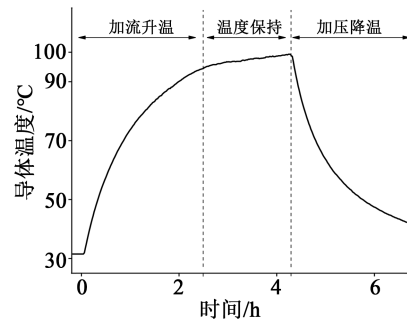


图2 电缆加速受潮试验周期设置

Fig.2 Cycle period setting of accelerated damp test of cable

加压降温3个阶段:①参考GB/T 12706.4—2020中恒压负荷循环试验方法,在电缆回路中施加850~900 A的电流使导体温度达到95~100°C实现加流升温;②调整电流大小,使导体温度保持在上述范围至少2 h;③断开电流源使电缆自然降温至接近环境温度,降温过程中对导体施加 $2.5U_0$ ($U_0=8.7$ kV)电压以加速绝缘劣化。

1.2 试验线路设置

试验回路由某厂家生产的6段全新的YJV22-8.7/15kV-3×300型电缆首尾连接而成,每段电缆的长度为5 m,均安装冷缩终端护套后按照表1进行设置。

表1 各段电缆试验条件设置

Tab.1 Setting of test conditions for each section of cable

编号	线路设置	运行环境	对应实际情况
C1	运行前缆芯注水	空气	电缆运行前缆芯进水
C2	本体破损	浸水	电缆敷设时外力损坏本体
C3	安装中间接头	浸水	接头浸水运行、工艺不佳
C4	安装户外终端	浸水	终端运行于高湿/雨水环境
C5	完整电缆	浸水	完整电缆水中运行
C6	完整电缆	空气	完整电缆空气中运行

其中,C1线路模拟电缆在生产制造、运输存储和敷设安装等过程中水分直接进入缆芯的内源性受潮,通过控制注水量分别设置A相和C相为严重受潮和轻微受潮,B相不作受潮处理;C2线路本体分别设置3处尺寸相同、深度不同(分别至外护套损坏、钢铠损坏和内护套损坏)的破损;C3线路在电缆接头安装过程中,分别在A、B、C相不缠绕、完整缠绕和部分缠绕密封胶带,模拟弱密封、全密封和半

密封的接头密封状态;C4线路安装户外终端后,将终端部分浸入水中运行;C5和C6线路分别作为浸水和空气中运行的对照线路。

1.3 绝缘性能测试方法

试验中,定期对电缆线路进行绝缘电阻、局部放电和去极化电流测试。其中,绝缘电阻测试采用DM50C型电子式绝缘电阻表,量程为1 000 GΩ,使用5 kV档位分别检测加压15 s和60 s时的电阻 R_{15} 、 R_{60} ,并根据式(1)计算吸收比 K 。

$$K = \frac{R_{60}}{R_{15}} \quad (1)$$

局部放电测试使用由自耦调压器、隔离变压器、无局放变压器、限流电阻和耦合电容等组成的200 kV工频无局放电源系统,采用并联测试回路,测试时非测试相接地,局部放电分析仪型号为TWPE-E4,背景噪声不大于0.5 pC。测试中,首先缓慢升高测试相电压至 $1.73U_0$,读数稳定20 s后升高电压至 $2.5U_0$,读数稳定20 s后降低电压至 $1.73U_0$ 再次记录数据。

去极化电流测试原理如图3所示,极化阶段开关置于S1,电缆试样在5 kV的直流电压下极化5 min,然后将开关置于S2,电缆处于去极化状态,由Keithley 6517B型小电流计实时记录电流数据。

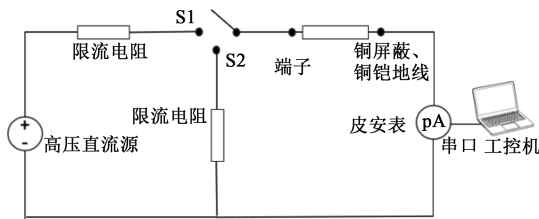


图3 去极化电流测试原理图

Fig.3 Schematic diagram of depolarizing current test

1.4 TOPSIS评估方法

TOPSIS评估方法是一种基于双基准值的多目标系统评价方法,基本原理为通过指标与正、负理想值间的加权欧式距离确定贴近度,选取距正理想解最近且距负理想解最远的目标为最优解^[13-14]。对于 m 个评估目标和 n 个评估指标的决策矩阵,第 i 个评估目标的第 j 个指标原始数据为 a_{ij} ,其评估步骤如下。

(1)对所有指标进行正向归一化处理。

对于局部放电成本型指标,采用式(2)处理。

$$b_{ij} = \frac{\max_j a_{ij} - a_{ij}}{\max_j a_{ij} - \min_j a_{ij}}, \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

对于绝缘电阻、时间常数等收益型指标,采用式(3)处理。

$$b_{ij} = \frac{a_{ij} - \min_j a_{ij}}{\max_j a_{ij} - \min_j a_{ij}}, \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

得到规范化矩阵 B ,指标数据完成归一化,并且局部放电转化为正向指标,至此,所有指标值越大越优。

(2)根据权重矩阵形成加权规范化矩阵 X ,采用式(4)处理。

$$x_{ij} = b_{ij} \times w_j, \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式(4)中: w_j 为第 j 个指标的权重,采用熵值法得到各指标的权重,如式(5)所示。

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式(5)中, e_j 为第 j 个指标的熵值。

(3)根据加权规范化矩阵 X 找出每个指标的最优值、最劣值,进而确定正理想解 X^+ 和负理想解 X^- ,如式(6)~(7)所示。

$$X^+ = (x_1^+, x_2^+, \dots, x_j^+) \quad (6)$$

$$X^- = (x_1^-, x_2^-, \dots, x_j^-)$$

$$x_j^+ = \max_{1 \leq i \leq m} x_{ij} \quad (7)$$

$$x_j^- = \min_{1 \leq i \leq m} x_{ij}$$

(4)计算各评价目标到正理想解和负理想解的欧式距离 Ed_i^+ 和 Ed_i^- ,如式(8)所示。

$$Ed_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_j^+ - x_{ij})^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

$$Ed_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_j^- - x_{ij})^2}$$

(5)计算每个目标的相对贴近度 C_i ,相对贴近度越大,目标越优,如式(9)所示。

$$C_i = \frac{Ed_i^-}{Ed_i^+ + Ed_i^-}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

2 结果与分析

2.1 绝缘状态综合评估

选取6条试验电缆在相同循环周期的126组电气性能测试数据,基于TOPSIS法对其运行状态进行综合评估,并采用秩和比法(RSR)^[15]对相对贴近距离进行分级比较。

将各组数据的 C_i 值从小到大排列并统计其出现频数 f 及累积频数 $\sum f$,求得平均秩次 \bar{R} 和累积频

率 \bar{R}/m 后根据《百分数与概率单位对照表》得到概率单位值(Probit),最终得到相对贴进度的RSR分布,如表2所示。根据Probit值将电缆划分为优、良、中、差4个绝缘级别,临界值分别为6、5、4,分别包括21、43、42、20组测试结果,不同试验线路测试数据的绝缘级别分布如图4所示。

表2 相对贴进度的RSR分布

Tab.2 RSR distribution of relative similarity distance

编号	C_i	$\sum f_i$	\bar{R}/m	Probit
C3-A90	0.368	1	0.008	2.588
C1-A55	0.416	2	0.016	2.852
C4-B90	0.424	3	0.024	3.019
...
C6-A90	0.752	125	0.992	7.412
C4-C55	0.938	126	0.998	7.881

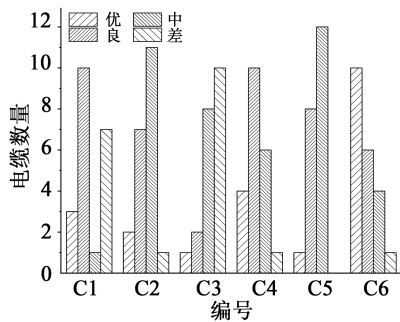


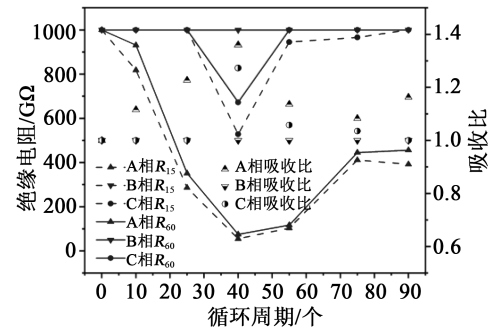
图4 不同绝缘级别电缆数量统计图

Fig.4 Statistics of the number of cables with different insulation levels

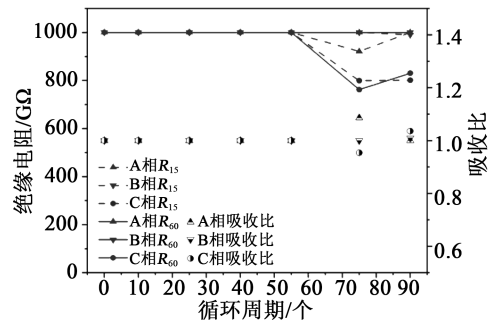
从表2和图4可以看出,基于TOPSIS评估法结果,试验线路的绝缘劣化程度由大到小的顺序为C3、C1、C2、C5、C4、C6线路。作为空气对照组,C6线路在循环试验中的电气性能最优,这是由于其结构完整且运行环境干燥使得电缆没有缺陷产生,绝缘劣化类型以电热老化为主。然而,设置缺陷和浸水运行的电缆线路均出现相对严重的绝缘劣化,说明水分进入电缆加速了绝缘劣化。另外,不同受潮途径的劣化效果有所差别,内源性受潮和中间接头受潮的绝缘劣化最为显著,而本体破损和终端浸水线路的绝缘劣化相对较弱,这可能与水分进入电缆后的作用部位有关,对主绝缘内侧和复合绝缘界面具有最严重的劣化效果。

2.2 绝缘电阻测试

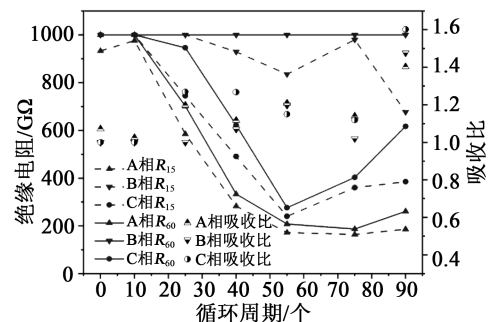
基于综合评估结果选取典型线路的绝缘电阻和吸收比 K 进行精细化分析,结果见图5。从图5可以看出,在90个循环周期中,内源性受潮和接头浸



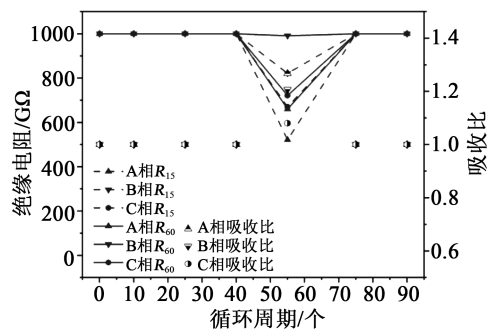
(a)内源性受潮



(b)本体破损



(c)接头浸水



(d)空气对照组

图5 试验电缆绝缘电阻、吸收比 K 测试结果

Fig.5 Insulation resistance and K of test cables

水线路的绝缘电阻明显降低,降低幅度与受潮程度、电缆安装工艺等因素有关。在内源性受潮线路中,严重受潮的A相绝缘劣化速度明显快于轻微受潮的C相,而未做受潮处理的B相绝缘良好,说明缆芯受潮会加速绝缘劣化并且受潮程度与绝缘电阻呈负相关。对于接头浸水线路,绝缘电阻的降低幅度随密封程度升高而降低,三相绝缘性能从高到低依次为全密封相、半密封相、弱密封相,原因为潮气入侵复合绝缘界面降低绝缘性能,短期内便导致绝缘电阻迅速下降。

从图5还可以看出,试验中,本体破损和空气对照组的绝缘电阻始终维持在较高水平,这与综合评估结果一致。然而,解剖后发现本体破损线路的护套内部存在大量水分,直接与XLPE外侧半导体屏蔽接触,但线路绝缘电阻却没有明显降低,这是因为外屏蔽层阻水性能良好并起到了水分隔离作用,短时间内XLPE绝缘未与水分充分接触并发生水树等严重劣化现象。

值得说明的是,吸收比作为衡量电缆绝缘状态的指标之一,在电缆绝缘状态良好时应具有较大的数值(大于1.3),电缆受潮后数值减小(1.0~1.3)。由于绝缘电阻测试设备的量程限制(1 000 G Ω),部分测试的K值不纳入试验结果,仅对电缆受潮后的K值进行分析。如图5所示,内源性受潮和接头浸水线路受潮相的吸收比多为1.0~1.3,并且整体呈下降趋势,说明吸收比可以作为评价电缆受潮情况的指标。

2.3 局部放电测试

绝缘电阻测试适用于检测较为严重的电缆整体受潮,在轻度受潮和局部受潮检测中的灵敏度不足,因此采用局部放电对线路受潮情况进行协同评估。基于1.73U₀下的局部放电数据,以10 pC为标准统计局部放电发生次数并计算平均放电量,作为评价指标在表3中列出。

从表3可以看出,干燥环境下电热联合老化不易引起电缆绝缘的局部放电,因此空气对照组未发生明显的放电现象,并具有最小的平均放电量。其他线路的局放现象均有所增强,其中对于内源性受潮线路,局部放电次数与受潮严重程度呈正相关,这与其绝缘电阻变化规律一致。此外,对于绝缘电阻难以体现出的终端浸水线路的性能变化,局部放电具有更好的检测效果。图6展示了终端浸水线路的放电量随循环次数的变化情况,随着循环周期增

表3 试验电缆发生局部放电现象情况

Tab.3 Partial discharge phenomenon of test cable

线路设置	相序	局部放电发生次数	平均视在放电量/pC
内源性受潮	A(严重受潮)	6	12.62
	B(未受潮)	1	4.21
	C(轻微受潮)	3	10.51
本体破损	A	1	3.30
	B	1	10.22
	C	2	7.85
接头浸水	A(弱密封)	2	6.91
	B(全密封)	4	22.42
	C(半密封)	2	6.82
终端浸水	A	2	6.45
	B	5	27.02
	C	2	3.93
空气对照组	A	0	5.44
	B	0	3.30
	C	0	2.73

加,三相在1.73U₀和2.5U₀下的放电量均呈现出增加的趋势,并且在试验后期尤其明显,这表明水分通过终端的界面结构进入电缆内部,但发生时期较晚而未产生整体受潮,因此难以通过绝缘电阻得以体现。

2.4 去极化电流测试

绝缘电阻和局部放电测试分别对电缆的整体和局部受潮检测展现出良好的效果,但其应用仍受限于灵敏度低和随机性大等缺点。去极化电流法通过检测绝缘材料的陷阱情况和去极化过程,对水分具有较高的检测精度,有望成为主要的电缆受潮检测方法。

为深入分析电缆去极化电流包含的状态信息,根据一阶和多阶德拜支路解析去极化电流并选取一阶时间常数表征电缆运行状态,由式(10)通过非线性拟合计算得到。

$$i_{\text{depol}}(t) = ae^{-\frac{t}{\tau}} \quad (10)$$

式(10)中: i_{depol} 为去极化电流; a 为拟合系数; t 为时间; τ 为时间常数。

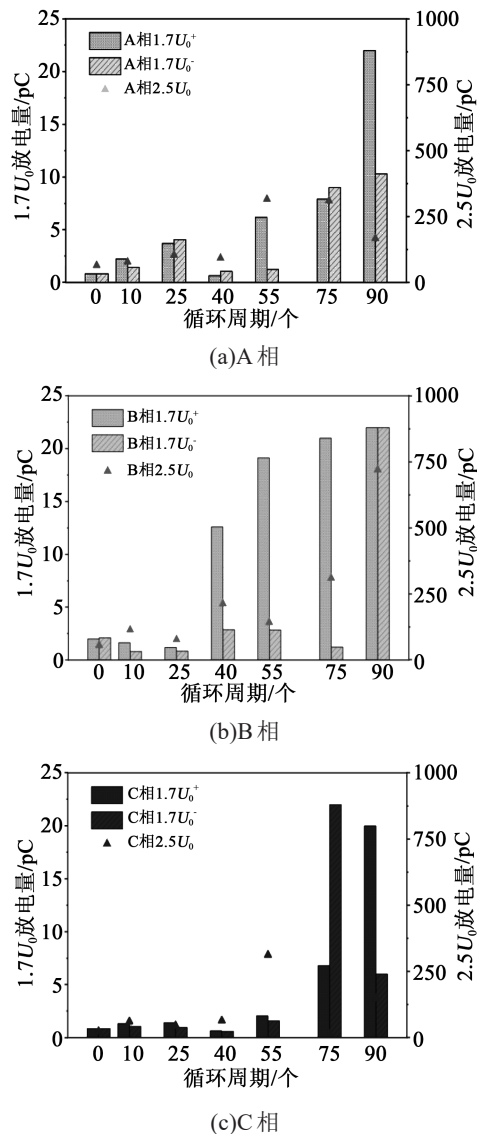


图6 终端浸水电缆的局部放电量

Fig.6 Partial discharge quantity of cable with terminal immersed in water

表4为试验线路循环前后的三相平均时间常数,即三相时间常数的平均值,部分试验电缆A相

表4 循环前后三相平均时间常数

Tab.4 Three-phase average time constant before and after cycle

线路设置	循环前时间常数	90次循环后时间常数
内源性受潮	25.44	20.10
本体破损	24.19	3.93
接头浸水	31.76	3.51
终端浸水	26.45	11.72
水中对照组	28.69	32.52
空气对照组	26.17	39.71

循环前后的去极化电流如图7所示。从表4和图7可以看出,90个循环周期后,受潮线路与未受潮线路区别明显,不同途径受潮线路的时间常数均呈下降趋势,并且初始去极化电流幅值明显增加,电流衰减速度加快,与两组对照线路的变化趋势相反,原因为受潮缺陷增强了电缆绝缘的极化现象,并且水分的存在极大地促进了去极化过程;空气对照线路在试验全程保持良好的绝缘性能,去极化电流始终小于试验前的线路。

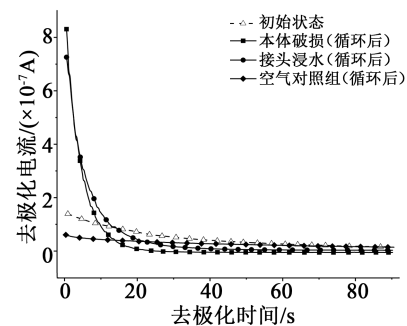


图7 部分电缆的去极化电流曲线

Fig.7 Depolarization current curve of some cables

2.5 相关性分析

根据TOPSIS综合评估和电气性能分析,绝缘电阻、局部放电及去极化电流均能有效反映电缆受潮状态,但检测效果和适用场景有所差别。为了研究3种电气性能指标对4种受潮路径的检测灵敏度,采用Pearson法对不同线路3种指标与循环时间进行相关性分析^[16]。皮尔逊相关系数的计算公式为式(11)。

$$\rho = \frac{\sum(A - \bar{A})(B - \bar{B})}{\sqrt{\sum(A - \bar{A})^2 \sum(B - \bar{B})^2}} \quad (11)$$

式(11)中: A 、 B 为进行相关性分析的两组指标; \bar{A} 、 \bar{B} 分别为 A 、 B 指标的平均值。

对于不同线路,3种绝缘性能指标与循环次数的相关性如表5所示,表5中 p 值为显著系数,系数越小,相关性的判定可靠度越高。以内源性受潮线路为例,其局部放电量与循环次数的相关性系数为0.577,显著系数为0.006,说明二者具有中等强度的正相关性,且可信度较高,即局部放电对缆芯受潮有较高的灵敏度。综合上述分析并考虑水分排出等多种因素,建立3种绝缘指标对不同受潮途径的检测灵敏度并从高到低划分为3级、2级、1级,结果如表6所示。

表5 受潮电缆绝缘性能指标与循环次数的相关性

Tab.5 Correlation between the insulation performance index of damp cable and the number of cycles

线路设置	相关性			<i>p</i>		
	绝缘电阻	局部放电量	时间常数	绝缘电阻	局部放电量	时间常数
内源性受潮	-0.217	0.577	0.019	0.344	0.006	0.934
本体破损	-0.497	0.351	-0.620	0.022	0.119	0.003
接头浸水	-0.666	0.195	-0.510	0.001	0.398	0.018
终端浸水	-0.076	0.458	0.037	0.743	0.129	0.577

表6 不同指标对不同受潮途径的检测灵敏度

Tab.6 Sensitivity of different indicators to different damp pathways

受潮途径	灵敏度等级		
	绝缘电阻	局部放电量	时间常数
内源性受潮	3	3	1
本体破损	2	1	3
接头浸水	3	2	3
终端浸水	1	2	1

电气性能对不同途径电缆受潮的检测灵敏度分析既能为电缆的受潮检测提供指导,又能根据其适用场景分析电缆的受潮表现。综合全文分析,中间接头浸水运行是最主要的受潮途径,3种电气性能测试均对其有较好的检测效果;绝缘电阻和局部放电测试对内源性受潮检测效果良好,说明内源性受潮更容易导致局部绝缘缺陷的产生;相比之下,本体破损条件下电缆浸水运行更易发生绝缘的整体受潮劣化;电缆终端受潮的绝缘劣化效果相对较弱,但仍能通过局部放电检测进行识别。

3 结论

(1)在电缆运行过程中,水分能够通过破损本体、中间接头和终端头的多种界面结构进入电缆内部并发生快速扩散,是电缆运行的重要隐患。

(2)基于绝缘电阻、局部放电量、去极化电流时

间常数的TOPSIS综合评估方法能够对电缆受潮状态进行有效评估,有助于准确识别受潮电缆。

(3)中间接头受潮是电缆受潮的主要途径,在密封措施不足的情况下,水汽能够进入并存储在复合绝缘界面进而导致电缆绝缘性能快速下降,这将是界面爬电、附件绝缘击穿等故障的重要原因。

(4)内源性受潮极易在主绝缘内侧诱发局部缺陷,促进局部放电,具有较强的绝缘劣化效果。

参考文献:

- [1] 袁野,陈剑,贾志东,等.10kV XLPE 电缆受潮绝缘特性研究[J]. 电网技术,2014,38(10):2875-2880.
- [2] 柳怡晨,于竞哲,陈向荣,等.基于TOPSIS-RSR方法的水环境下交流配网XLPE 电缆绝缘状态评估[J]. 高压电器,2021,57(7):105-111,118.
- [3] 刘力,周凯,陈玉豪,等.交联聚乙烯和硅橡胶界面修复前后电气性能分析[J]. 绝缘材料,2020,53(3):63-67.
- [4] 李蓉,周凯,万航,等.基于频域反射法的10 kV 配电网中间接头受潮定位[J]. 电网技术,2021,45(2):825-832.
- [5] 曹雯,张敏,刘倩,等.电缆接头复合界面处水分对其闪络特性的影响[J]. 高电压技术,2018,44(11):3699-3706.
- [6] 曹佳滨.交联聚乙烯电缆现场耐压试验的特点分析[J]. 绝缘材料,2008,41(3):63-65.
- [7] 任志刚,李伟,周峰,等.基于超低频介损检测的电缆绝缘性能评估与影响因素分析[J]. 绝缘材料,2018,51(4):64-68,74.
- [8] 赵艾萱,刘健,徐龙,等.基于PDC法的在运XLPE 电缆绝缘状态评估[J]. 高电压技术,2019,45(5):1542-1550.
- [9] 夏睿,谭笑,陈杰,等.10kV XLPE 电缆接头典型绝缘缺陷的局部放电特征分析[J]. 绝缘材料,2020,53(8):95-101.
- [10] 姜雅男,于永进,李长云.基于改进TOPSIS模型的绝缘纸机-热老化状态评估方法[J]. 电工技术学报,2022,37(6):1572-1582.
- [11] 杨廷方,张航,黄立滨,等.基于改进型主成分分析的电力变压器潜伏性故障诊断[J]. 电力自动化设备,2015,35(6):149-153,165.
- [12] 杨颖,游蛟,贾志东,等.10kV 交联聚乙烯电缆运行状态评估分析[J]. 高电压技术,2017,43(5):1684-1692.
- [13] 付学谦,陈皓勇.基于理想解法的电能质量综合评估[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):26-30.
- [14] MOJAVER P, KHALILARYA S, CHITSAZ A, et al. Multi-objective optimization of a power generation system based SOFC using Taguchi/AHP/TOPSIS triple method[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments,2020,38:100674.
- [15] 林佩贤,王维,钟倩红,等.应用EXCEL实现秩和比法的计算及其评价[J]. 数理医药学杂志,2009,22(2):183-186.
- [16] 俞大刚.线性回归模型分析[M]. 北京:中国统计出版社,1987.