

交联聚乙烯电缆绝缘老化试验及其检测技术

王 天¹, 白银浩¹, 吕中宾¹, 王钊宇², 姚利娜²

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052;

2. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:为了更好地研究交联聚乙烯(XLPE)电缆的绝缘老化特性,需在实验室条件下对其进行老化试验,本文总结了目前对XLPE电缆的绝缘老化试验及其检测技术的研究进展。首先对交联聚乙烯电缆的常见老化类型和现象进行了介绍,阐述了目前对于水树老化和电树老化生长机理及影响因素方面的研究成果;其次介绍了在实验室条件下对XLPE电缆进行加速老化试验的方法和该试验对电缆的影响;然后对目前电缆绝缘老化的检测方法进行了简要分类,介绍了各种方法的原理、适用条件和优缺点以及各个阶段绝缘检测的特点和适用方法;此外,总结了目前对于水树老化和电树老化的抑制方法和原理;最后对电缆绝缘老化相关问题进行了探讨,展望了未来研究的发展方向。

关键词:交联聚乙烯电缆;绝缘老化;水树老化;电树枝;状态检测

中图分类号:TM215 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9239(2022)06-0006-10

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.06.002

Progress in Insulation Ageing Test and Detecting Technology of XLPE Cable

WANG Tian¹, BAI Yin hao¹, LÜ Zhongbin¹, WANG Qianyu², YAO Lina²

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China; 2. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to research the insulation ageing characteristics of cross-linked polyethylene (XLPE) cables, it is necessary to perform ageing tests under laboratory conditions. In this paper, the current research progress on insulation ageing tests and detection techniques of XLPE cables was reviewed. Firstly, the common ageing types and phenomena of XLPE cables were introduced, and the current research results on the growth mechanism and influencing factors of water tree ageing and electrical tree ageing were elaborated. Secondly, the accelerated ageing test methods for XLPE cables under laboratory conditions and their effect on cables were introduced. Then, the current detection methods of cable insulation ageing were briefly classified, the principle, applicable conditions, and advantages and disadvantages of each methods and the characteristics and application method of each insulation detection stage were introduced. Finally, the problems related to cable insulation ageing and their future research directions were discussed.

Key words: XLPE cable; insulation ageing; water tree ageing; electric tree branch; condition detecting

0 引言

随着我国国民对用电需求的不断增加,电力电

缆的重要性也日益提高。其中,相比于传统电缆,交联聚乙烯(XLPE)电缆不仅具有优异的电气性能,还具有更好的力学性能和耐老化性能,这使其成为应用最广泛的电缆^[1]。

绝缘层是电力电缆的重要组成部分之一,其作用是承受电压,保证电力电缆线芯与外部环境的电气隔离。实际使用中,在多种因素的共同作用下,绝缘发生老化,性能逐渐降低,最终导致绝缘失效

收稿日期:2021-08-08 修回日期:2021-11-17

基金项目:国网河南省电力公司项目(5217022000AF)

作者简介:王天(1989-),女(汉族),河南郑州人,高级工程师,主要从事输电电缆检测技术的研究;通信作者:姚利娜(1977-),女(汉族),河南开封人,教授,主要从事故障诊断与容错控制方面的研究。

而引发故障。业界研究表明,除了安装不当和外部损坏外,电缆绝缘老化是造成电缆断电的主要原因。

因此,为了保障输电系统的安全可靠,需要在实验室条件下对电缆绝缘材料进行老化试验,以便对XLPE电缆绝缘老化有更加深入的研究。本文归纳总结了XLPE电缆绝缘常见的老化方式、相应的实验室老化试验以及电缆绝缘的状态监测方法,并对目前国内外XLPE电缆绝缘老化试验的研究进展进行了论述。

1 电缆绝缘的老化方式及影响因素

由于早期经验的缺失,电缆在生产制造、安装铺设和运行维护中都不可避免地存在些许缺陷,而电缆运行时长期遭受各种外界条件的影响,导致其绝缘性能下降发生老化。其中最主要的老化方式是水树老化和电树枝老化^[2]。

1.1 水树老化

水树老化是指在交流电场和水分的作用下,电缆的绝缘材料内部发生降解的现象^[3]。在周围环境的作用下,绝缘层中会发展出一些微通道,形成水树,当水树生长到一定程度时,会迅速转变成电树枝,形成放电,加速绝缘老化,最终导致绝缘层被击穿^[4]。为了减小乃至避免实际工程中水树老化的危害,学者们一直在对水树的诱发原因、生长规律和尺寸形状等进行研究。

尽管目前仍未能全面解释水树枝的诱发原因,但电场和水分的长期作用是主导因素。研究发现,水树老化现象在直流电场下几乎不会出现,大多是出现在交流电场环境中,有学者认为,交变电场的频率变化会导致电缆绝缘材料产生疲劳,这可能是水树枝产生的根本原因^[5]。但水树老化的原因太过复杂,温度、离子浓度、机械外力和自身材料结构均会对其发展产生影响。

1.1.1 温度对水树老化的影响

温度与水树的生长及水树向电树的转换有着密切联系,研究表明在高温下水树生长速率会提高^[6],主要是由于温度的上升促进了材料力学性能的降低、微孔的扩大以及水和盐离子的扩散等,这是由分子的热运动决定的^[7]。而在低温下,水树枝的生长也会得到一定程度的促进^[8],这主要是由分子链的取向行为决定的^[9]。

此外,相较于恒温条件,温度的交替变化也会

加速水树生长。文献[10]表明,在一定温度范围内(0~60℃或更高)反复进行温度循环时,XLPE分子链会发生取向-解取向的循环过程,从高温到低温时,水树生长加速,温度再次升高,水树的生长速率也会进一步提高。在低温条件下,水树的枝干清晰,随着温度的升高,水树逐渐变粗变密,在高温条件下,水树连成一片^[11]。因此,若电缆处在温度交替变化的环境下,可能会出现绝缘中水树生长更为快速的情况。

1.1.2 离子对水树老化的影响

离子对XLPE电缆绝缘中水树的生长也有着重要影响。在相同的条件下,相比于自来水环境,含有Cl⁻、SO₄²⁻等离子度的水会使XLPE电缆更容易产生水树枝,且水树枝的生长速度是自来水环境下的3~4倍,因此水树在NaCl、KCl、FeCl₃、FeSO₄等溶液中的生长速度会明显加快^[12]。

电缆绝缘材料中水树的形貌各有不同,溶液中离子的迁移速度越快,水树就越容易生长。而离子在XLPE材料中的迁移速度和离子浓度与离子半径相关,离子的浓度越大、半径越小时,离子迁移速度就越快,对水树生长更有利^[13]。文献[14]表明,溶液中阳离子的半径越小,水树长度就越长。文献[15]从水合离子的扩散模型方面进行研究,发现离子半径越大,迁移到材料内部的离子通量越小,水树长度越短。

文献[16]研究发现向KCl溶液中添加HCl或KOH会加速水树的生长,因为溶液中H⁺和OH⁻增加。文献[17]研究了XLPE电缆绝缘在不同酸碱环境下水树的生长机理,发现酸性环境和碱性环境均能促进水树的生长,其中酸性环境的促进作用更明显。如果溶液的离子浓度相同,中性溶液中的水树长度最短但间隙最大,分枝最明显。这是因为在电场作用下,H⁺和OH⁻的离子运动更剧烈,会引起更严重的分子链断裂现象。

1.1.3 机械应力对水树老化的影响

机械应力也是影响水树生长的因素之一。即使在同一根电缆上,绝缘层受到的机械应力也会因为位置的不同而存在差异。与静态参考电缆相比,在具有最大机械应变的位置发现水树枝的密度明显更高^[18]。研究发现水树枝的密度和生长速率随着机械张力的增加而显著增加,而机械压力则会抑制水树生长,这是由于机械张力可以增大XLPE绝缘材料中细长微孔的密度,而机械压力会减小这种微

孔洞的密度^[19]。

绝缘层中出现倾斜水树的重要原因就是XLPE材料的力学取向。文献[20]研究了在不同温度条件下机械应力对电缆绝缘中水树生长的影响,发现当电缆温度升高时,施加有机械应力的绝缘材料更容易发生力学取向,使得水树枝倾斜生长,且沿着取向方向,水树枝生长速率明显提高。

1.1.4 绝缘材料对水树老化的影响

XLPE电缆绝缘材料的交联度和结晶度等也会水树的生长有影响。文献[21]表明,交联度的提升可以使电缆的耐水树枝能力显著提高。文献[22]表明,虽然交联反应会使XLPE材料的结晶度下降,但反应形成的三维网状结构也会限制水树生长,且相比于结晶度,三维网状结构对水树的影响更明显。文献[23]深入研究了交联度和结晶度对水树生长的作用机制,结果表明,在0~90%交联度范围内,水树的生长是交联和结晶共同作用的结果。交联度在0~80%内,交联度起着主要影响作用,交联度越高,水树的尺寸越小;但当交联度高于80%时,结晶度对水树的影响将大于交联度,水树尺寸随着结晶度的下降而增加。

1.2 电树老化

电缆绝缘中的杂质、气泡或突起等缺陷会造成局部电场集中而导致局部电击穿,形成树枝状放电通道,业界学者将这种现象称为电树老化^[24-25]。电树枝从引发到生长是一个十分复杂的电腐蚀现象,电缆状态、介质种类、微观结构等都会对其产生影响。电树枝一旦形成,就会在电场的作用下不停地发展,直到完全击穿绝缘层,形成贯穿的放电路径^[26],使交联聚乙烯电缆绝缘层失去原有的绝缘能力,最终导致停电等运行事故。绝缘被击穿的时间并不固定,从几微秒到几个月都有可能,但无论多长时间,电缆绝缘被击穿之前都会产生电树枝^[27]。

电树枝的引发和生长过程与很多因素有关,外加电压和频率、温度、机械应力、空间电荷等因素都会对其造成影响。

1.2.1 电压对电树枝的影响

XLPE电缆在运行时,一直处于变化的交流电压下,不同的电压类型对于电树枝的引发和发展有着显著影响。

文献[28]研究发现电树的起始电压与升压速率有关,且两者呈负相关,升压速率越快,电树枝的起始电压就越低,更易产生电树枝,需要注意的是,在

负极性直流电压下电树的起始电压较高。对电缆施加不同的电压直至绝缘被击穿,获得电树枝击穿孔道的形态不一样^[29],产生枝状电树枝的电缆绝缘最快被击穿,其次是密枝状电树枝,最后是丛状电树枝。随着外施电压的增大,电树枝的引发时间缩短,电缆绝缘的击穿时间减少,电树枝的平均生长速度减慢。

外施电压频率也会对电树枝的生长结构产生一定影响,文献[30]发现在低频下存在三类电树枝,分别为枝状、枝状与丛林混合状以及纯丛林状电树枝;而在高频作用下,电缆绝缘只能生成稠密枝状电树枝。

虽然在恒定的直流电场下^[31],XLPE绝缘表现出相当好的性能,电树枝的引发电压较高,生长速度缓慢,但如果将电缆接地或对其施加脉冲电场,则有可能使其在较低的电压下产生电树枝^[32]。

以往研究表明,接地条件下,直流预压的时间和电树枝的引发率关联不大,但极性却对电树枝的生长状况有着很大的影响。当外部条件相同时,正极性直流电场下电树枝的引发率和平均生长速度均大于负极性,且电树枝的生长速度会随着直流电压的增加而表现出明显的增大趋势^[33]。

若外施电场为交流叠加冲击电压,当预加的交流电压小于且单独作用下电树枝起始电压的40%时,XLPE中电树的冲击起晕电压仅由所加的冲击电压决定,与交流电压无关;但当交流电压上升至阈值以上时,冲击起晕电压就会随着所加交流电压的增加而减小^[34]。

1.2.2 温度对电树枝的影响

文献[35]表明,电树枝的生长速度与温度整体呈正相关,但是在负极性直流电压的作用下,只有当温度达到90℃后,电树枝的引发速率才会随着温度的升高而加快;而在正极性电场下没有阈值,电树枝生长速度随着温度上升而增加。此外,电树枝的引发时间也与温度有关,温度越高,电树枝越容易被引发,如果电缆运行温度超过110℃,则在很短时间的电场作用下也会产生电树枝^[36]。而在低温环境下,电缆绝缘中电树枝的生长速度受到抑制,且温度越低抑制作用越明显^[37],随着电树枝的生长,温度对电树枝的抑制作用也会增强^[38]。

1.2.3 机械应力对电树枝的影响

电树枝生长与交联聚乙烯电缆中的机械应力也有关系。文献[39]研究发现经历过机械压力作用

的交联聚乙烯的电树枝起始电压低于没有经历过机械压力作用的交联聚乙烯,同时电树枝的引发时间也缩短。机械应力的存在使得交联聚乙烯中部分分子的化学键被物理应力拉伸变形或者断裂,导致原有交联聚乙烯结构发生变化,改变了其原有的电气性能。

文献[40]研究发现与不存在机械应力的交联聚乙烯相比,尖端周围存在机械应力的交联聚乙烯中电树枝引发时间更短,生长速度更快。当存在内部机械应力时,低频状态下的电树枝部分具有类似松枝状的结构,高频状态下则均为稠密枝状结构;如果不存在内部机械应力,则电树枝通常为枝状或枝状加丛林状的复杂结构。

1.2.4 空间电荷对电树枝的影响

空间电荷对于电树枝的引发起着主要作用。外施电压的极性和频率都会对空间电荷的产生、分布、运动造成影响。在外施电场作用下,电缆绝缘被注入空间电荷,空间电荷能够削弱针尖处的最大电场强度,该作用随着空间电荷含量的增加而增加,此外,空间电荷产生的电场也随其密度的增加而增加,当空间电荷积累到一定程度时,会在变动电压的作用下短时间内快速释放,引发电树枝。根据这一推断,可以解释电树枝引发的许多实验结果。研究空间电荷的形成、分布、运动规律是进一步定量研究电树枝引发机理的关键^[41]。

1.2.5 其他因素对电树枝的影响

电树枝的影响因素还包括气压和纳米颗粒填充等。文献[42]研究了局部气压对XLPE电缆电树枝生长特性的影响,结果表明,在低温下,气压变化对电树枝的引发无明显作用,且气压的升高会抑制电树枝的生长;在高温下,气压的变化促进了电树枝的引发与生长。

不同的纳米颗粒填充对电树枝的影响也不同,文献[43]研究发现在正极性电压下添加纳米MgO颗粒可以阻碍针尖处同极性电荷的注入与抽出,进而阻碍电树枝的引发。纳米颗粒填充对电树枝的影响未来可以应用到抗电树电缆绝缘材料的研究开发上。

2 实验室条件下的绝缘老化试验

为了便于在短时间内获取电缆绝缘老化数据,研究其老化规律,需要在实验室内进行加速电缆绝缘老化的试验,加速老化试验的难点在于将实验室

条件下电缆的寿命与运行条件下的寿命相关联^[44]。目前研究者仍然无法完全了解绝缘老化的根本机理,很难在实验室对绝缘实际老化过程进行模拟再现,而且有些外界环境条件很难用物理量进行表征。

2.1 水树老化试验

在自然条件下,水树的生长过程十分缓慢,为了加速得到XLPE电缆绝缘中的水树,需要在电缆绝缘中培养水树。实验室往往通过水针电极法来制造人工缺陷,即在电缆表面采用针扎等方法制造缺陷,然后将其放入溶液中培养水树。近年来,尽管关于水树老化的研究不断加深,但加速水树老化的基本方法还是相同的。

对于电缆绝缘层的切片样本,可以直接在表面制造缺陷,然后将其浸没在水中,通过加压来实现老化^[45];对于块状的绝缘层样本,常用的方法就是水针法,即在样本上钻孔,在中间插入电极进行老化^[46];对于直接截取的有一定长度的电缆样本,则需剥离外部铠装,在电缆绝缘层上通过针刺来制造缺陷,然后将其浸入一定浓度的NaCl溶液中,并在缆芯端加压,达到加速水树老化的目的^[47];对于不易浸入溶液中的电缆,可采用注射的方法,将装有NaCl溶液的注射器倒插入电缆绝缘层的缺陷中,在缆芯端加压,注射器针头并接地^[48]。这些方法都是利用了缺陷导致电场畸变的原理,在电场和溶液的共同作用下加速水树枝的生长。

文献[49]在水针电极法的基础上,采用热循环和热冲击分别对XLPE材料进行处理,使用显微镜对水树枝的尺寸形态进行观测,统计其引发率,同时对其力学性能和交联度进行测定,结果表明,经过热处理的XLPE电缆力学性能明显下降,水树枝的尺寸变大。

对于缩短水树培养的时间,水针电极法是目前应用较多的一种方法,但也存在不足之处。首先,大多数针头的材质是金属,电导率和相对介电常数较高,因此在电场作用下,针尖位置容易产生电树枝,导致电缆绝缘被击穿,试验失败。其次,针扎过程中会对周边材料产生机械挤压,使其产生微小空隙,即使拔出针头,残余的机械应力也会对试验结果产生影响。此外,针扎的深度和斜度很难精确控制,致使水树枝的形态差异较大,实验室环境下制造的水树多为单株,与实际情况中成片的水树有一定差异。最重要的是,实际运行的电缆绝缘中几乎

不存在这么大的针尖缺陷^[50]。

文献[51]抛弃了传统的利用针扎来制造缺陷的方法,使用砂纸打磨剥去半导体外屏蔽电缆的主绝缘表面制造缺陷作为引发水树枝的起点,并施加高频高压加速培养水树,以水树的生长速率来反映电缆的老化程度。

对于砂纸打磨产生的缺陷,尺寸较小,距离具有一定的随机性,更符合实际情况。此外,还能较大程度地避免水树枝向电树枝转化造成绝缘碳化,以及针尖对绝缘的残余机械应力影响,同时培养出的水树形态也更多样,既有单株也有连成一片的水树,更符合实际运行过程中的形貌和特征,有助于进一步研究水树枝的形成机制。

为了进一步加快水树的老化,不断有学者在原有基础上进行改进,结合水树产生的影响因素,还可以通过控制某一因素达到加速老化的目的,如水-热联合老化、改变加压频率、改变离子浓度等,这些都可以根据实际试验情况进行调整。

2.2 电树老化试验

目前绝大多数对电树枝的引发与生长特性的研究都是在实验室中进行的。实验室中为了加快电树枝的引发与生长,一般采用在电缆绝缘材料中人为制造明显缺陷的方法。电树枝引发实验中所采用的电极结构根据研究目的和对象的不同也有所不同,常用的有针-板结构和短电缆结构。

其中,针-板结构应用最为广泛,文献[52]在电缆绝缘试样加热状态下,将涂有一层聚乙烯的针电极直接插入剥除的电缆绝缘层中,与电缆的线芯构成电极系统,这种结构可以更加方便地观测到电树枝的生长过程,且更易操作;文献[53]首先将针电极放在两个片状材料之间,通过加压加热得到带针试样,针电极和地电极之间存在高低差,这种结构下的针电极可以更紧密地贴合材料,但实施工艺较复杂,对材料和针电极的要求也更高。针-板电极结构中,电场方向与板电极垂直,并不符合电缆实际运行过程中的电场分布,因此试验结果有一定误差。

与针-板结构不同,短电缆结构的试样采用实际电缆。文献[54]通过将金属针插入聚乙烯电缆中来制造缺陷,模拟电树老化时的电场应力集中,并且使用充油电极系统来平衡试样两个端头的压力,防止在电缆表层出现局部放电。使用实际电缆来模拟电树枝老化现象,其电场分布与针-板结构相

比更符合实际情况,因此短电缆结构的试验结果更真实可信,但该方法不能实现实时监测,只能在试验后观测电树枝的生长情况。

早期加速电老化试验多通过对电缆样品施加不同条件的电压来获取电缆老化信息。文献[55]对高压直流电缆切片在高直流电场下进行电老化试验,结果表明随着电老化程度的加深,样品内较浅陷阱向较深陷阱转变,并得到了老化程度与陷阱密度、陷阱深度的关系。随着电树老化机理研究的深入,不少研究者通过施加多种不同方式的外界应力来加快绝缘内部电树生长,从而获取绝缘缺陷在老化过程中对电缆造成的破坏。相对于单纯对电缆样品施加电应力进行老化,通过扎针等方式对电缆造成一定的人工缺陷,更能够在短时间内获取老化结果。

文献[56]研究表明,XLPE电缆绝缘中电树枝的引发场强随缺陷尖端半径的减小而增大,但两者并不是呈线性变化,达到一定的阈值后,曲率半径再减小,引发场强便不再增大。文献[57]考虑了线芯直径、缺陷尺寸和绝缘厚度分布等因素,研究发现缺陷尺寸分布的均值和标准差也会对电树枝的引发造成影响,减小这两项数值,会使电缆绝缘耐电树枝起始的可靠性得到提高,其中又以减小标准差起到的作用更大。

2.3 老化试验对电缆的影响

除了了解如何在实验室条件下加速老化之外,还应该了解老化试验会对电缆带来怎样的影响。

文献[58]针对实际运行10年以上的退役高压电缆,以DSC方法对其绝缘老化状态进行分析。结果发现,相较于全新的电缆,退役电缆由于在运行过程中受到电、热以及氧的联合作用,其熔程变宽,材料的结晶度、晶体大小和尺寸分布均发生改变,晶体结构的完整性下降。反映到宏观力学性能上,即表现为绝缘材料的交联度、断裂能、弹性模量等均降低,而断裂强度略有增加。

文献[59]研究了加速水树老化试验和电老化试验对交联聚乙烯绝缘材料理化性能的影响。试验结果表明,两种试验样品中的羰基指数均随着老化程度的增加而增大,其中水树老化试验样品的生长速率更快。对于绝缘的结晶度,电老化试验样品升高后降低,而水树老化试验样品则呈下降趋势。此外,老化使得两种样品的热稳定性都变差。

文献[60]研究了加速老化对交联聚乙烯绝缘材

料力学和结构性能的影响。结果表明,在整个测试期间,交联度的值几乎恒定;拉伸强度、断裂伸长率和结晶度随时间延长而降低;电应力和热应力的强度越大,观察到的老化程度越大;在实验室条件下,短期的水树老化会影响电缆的结晶度,拉伸强度和断裂伸长率等特性没有明显变化;电缆加速老化约3 000 h时,拉伸强度和断裂伸长率仍处于标准允许的范围之内。

XLPE绝缘的击穿电压会随着样品厚度的增加而增加,但其关键的影响因素可能是体积而不是厚度^[61]。文献[62]研究了热处理对水树老化XLPE绝缘的影响,结果发现XLPE绝缘样品经过热老化后,材料中产生大量微孔,力学性能下降,晶体尺寸增加且不均匀化。文献[63]通过将针嵌入电缆绝缘的方式制造电树,施加高频电压进行测试。局部放电测量结果表明,除了温度和机械应力对击穿时间有一定影响之外,空间电荷在决定电树的形状和绝缘击穿时间方面起着主导作用。

3 电缆的检测方法

一旦电缆绝缘出现老化,会使整个电网的安全运行产生隐患,为保证电缆运行过程中的安全可靠,应当及时判断电缆绝缘的劣化程度,识别缺陷点的位置,以进行合适的维修或者更换。因此电缆的绝缘监测是必不可少的。

目前对于中低压电缆的检测技术有离线和在线两种方式^[64],而对于更高电压等级的电缆,则仅采用离线方式^[65]。国内外研究单位^[66-68]提出了多种对于XLPE电缆状态监测与绝缘性能检测的方法,如表1所示。

根据以往的统计结果,学者们发现电缆运行过程中的故障率与运行时间有关,不同阶段具有不同的特征,如图1所示^[69],在运行的前1~5年为早期失效期,主要损坏原因是生产和铺设时所引入的缺陷;投入使用后的5~25年为意外故障阶段,该阶段的故障率较低,主要损坏原因是外部环境所导致的电缆绝缘老化;电缆运行25年以上进入绝缘老化期,电缆绝缘的老化会导致电缆性能下降。

在不同的时期,适用的绝缘检测方法不同,早期的故障是由质量缺陷引起的,更适合采用绝缘耐压试验,并结合局部放电试验;在意外故障阶段,则更多采用在线监测方法,如温度监测、护层电流监测等,辅以基于介电特性的检测方法;在绝缘老化

表1 检测方法分类

Tab.1 Classification of detection methods

类型	试验方法	特点
耐压试验	直流耐压试验	离线、具有破坏性
	交流耐压试验	离线、具有破坏性
	变频谐振耐压试验	离线、具有破坏性
	0.1 Hz超低频电压耐压试验	离线、具有破坏性
	千赫兹级振荡波电压耐压试验	离线、具有破坏性
在线监测方法	局部放电试验	在线、非破坏性
	护层电流监测	在线、非破坏性
	温度监测	在线、非破坏性
基于介电特性的检测方法	直流叠加法	在线、非破坏性
	交流叠加法	在线、非破坏性
	直流分量法	在线、非破坏性
	绝缘电阻法	在线、非破坏性
	介质损耗因数法	离线、在线、非破坏性
基于陷阱特性的检测方法	空间电荷法	离线、在线、非破坏性
	热刺激电流法	离线、具有破坏性
	电流积分法	离线、非破坏性
新式无损检测方法	极化-去极化电流法	离线、非破坏性
	X射线检测	在线、非破坏性
	超声波检测	在线、非破坏性
其他	TM电磁波谱检测技术	在线、非破坏性
	差示扫描量热法(DSC)	在线、非破坏性
	傅里叶红外光谱法(FTIR)	在线、非破坏性
	核磁共振法(NMR)	在线、非破坏性
	微观形貌观测法	在线、离线、具有破坏性

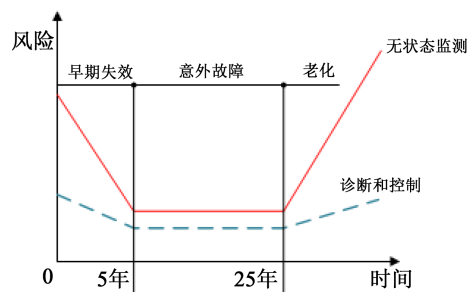


图1 电缆运行时间图

Fig.1 Cable running time chart

期,电缆绝缘材料整体的性能和结构都显著劣化,此时可采用微观形貌观测法和基于陷阱特性的检测方法。

3.1 耐压试验

直流耐压试验适用于检测比较明显的缺陷,缺点是在试验过程中,容易使电缆中空间电荷的含量增加;交流耐压试验为离线检测,针对轻微缺陷的效果更好,缺点是会造成电缆绝缘状况恶化,且检测设备的质量和体积较大,很难移动;变频谐振耐压试验主要适用于绝缘中出现空隙,以及施工不当导致的残留缺陷,若绝缘中产生电树枝,则不能使用该方法;0.1 Hz 超低频电压耐压试验为离线检测,针对电缆整体的绝缘情况,缺点是时间长,可能导致新的缺陷产生,损伤电缆;千赫兹级振荡波电压耐压试验主要针对局部缺陷,是离线检测,与交流电的等效性好,检测时间短且不会形成新的缺陷,并已有统一的测试标准。

3.2 在线监测试验

局部放电试验:该方法针对整体电缆,通过监测电缆的局部绝缘材料是否发生非贯穿性的放电现象即局部放电,并进行特征提取和分析,从而判断是否存在局部缺陷,进而分析电缆的绝缘老化情况。该方法具有较为完整的测量方法,被认为是目前电缆绝缘状态评估的最佳方法,在实际工程中应用广泛^[70]。但目前故障点定位的效果仍不理想,提高传感器的灵敏度、加强抗干扰技术、抑制噪声,是推广局部放电试验方法应用的关键。

护层电流监测:主要适用于金属护套破损、腐蚀、交叉互联箱进水等电缆外绝缘的故障监测,但由于多回路电缆铺设方式增多,测量的电压与电缆型号、线路长度、排列方式、负载电流、周边环境等因素都有关系,在实际应用中,护层电流的获得方法与电缆绝缘情况的对应关系仍亟待研究。

温度监测法:用于局部及整条电缆的温度监测。电缆正常工作的温度最高为90℃,通过监测电缆的运行温度,可获得载流量信息及局部温度变化。目前分布式光纤测温技术(DTS)可实时在线监测电缆的温度,该技术的优点是对于异常温度变化点位置的定位准确且灵敏,能有效记录温度的变化趋势,缺点是需提前将光纤布置在电缆内,且容易受到周围环境温度和湿度的影响。

3.3 基于介电特性的检测方法

介质损耗因数法:绝缘体泄漏电流和电缆电压

之间的相位差 δ 又叫做介质损耗角,通过计算介质损耗角正切值得到电缆绝缘的介质损耗因数 $\tan\delta$, $\tan\delta$ 与电缆老化程度成正比, $\tan\delta$ 越小代表电缆的绝缘性能越好,当 $\tan\delta>1\%$ 时,可以认为绝缘不良。该方法的优点是适用范围较广,使用时不需要考虑电缆的电压等级,能有效预防工频信号和外界杂散电流的干扰,测量结果精准。缺点是只能反映电缆绝缘的整体老化情况,对局部缺陷反应不灵敏,且对检测设备的精准度要求较高。

直流叠加法:将低压直流电源与接地电压互感器的中性点相串联,在电路中叠加直流电压,测量流经电缆绝缘的直流电流,判断绝缘老化情况。该方法可针对整体电缆,优点是有效消除单向杂散电流对监测数据造成的影响,有较强的抗干扰性;缺点是只能用于评估绝缘的老化状况,与电缆的剩余使用年限没有直接联系,而且只适用于低压系统,无法检测高压系统中较小的直流分量。

直流分量法:将微电流测量装置接入电缆接地线,通过测量电缆接地线中泄漏电流的直流分量来反映电缆的水树老化情况。直流分量越大则表示电缆绝缘中水树越严重。该方法的优点是比较安全,测量时不与带电的电缆线芯相接触,且不需要连接其他电源;缺点是只能根据直流分量的变化来判断绝缘是否发生老化,需要积累大量的数据,而且由于电缆屏蔽层对地电势的影响,干扰很大,检测精度不高。

交流叠加法:原理是将101 Hz的交流电压叠加到已施加电压上,通过对产生的1 Hz特性的电流信息进行分析,得到电缆绝缘的老化情况。该方法针对整体电缆,优点是检测过程简便易操作,抗干扰性强且检测精度高,缺点是缺乏实际工程应用和评估标准。

绝缘电阻法:由于电缆老化后形成的集中导电通道会使绝缘电阻明显减小,传导电流明显增大,而暂态的吸收电流迅速减弱,因此线缆绝缘的老化程度能够利用上述数据的变化规律来表达。该方法针对整体电缆绝缘,优点是目前已有相关评估标准,缺点是无法反映局部劣化情况。

3.4 基于陷阱特性的检测方法

空间电荷法:当电缆绝缘发生老化后,材料中的陷阱密度会发生变化,被陷阱捕获的自由电荷会形成空间电荷,而绝缘中空间电荷的分配也会发生变化,该方法就是根据这些变化来判定电缆的老化

程度,主要反映电缆整体老化情况,缺点是日前尚未形成统一的测试方法及诊断标准。

热刺激电流法:在直流电压的施加过程中,一部分电荷会被绝缘内的陷阱捕获,而光、热等外界激励能使被捕电荷从陷阱中脱陷,通过外界或者自建电场的作用形成电流或衰减的电位,对其加以整理分析,可提取到试样的陷阱参数,并以此来反映电缆整体老化情况。

电流积分法:施加电压,使用积分电容器来检测样品中的电荷特性,测量分析绝缘材料中的电荷含量和运输参数等电荷动态特性变化与试样绝缘状态之间的关联,以此来反映绝缘老化情况。该方法对于片状试样和整体电缆同样适用,反映的是电缆整体老化状态,目前尚无统一的诊断标准。

极化/去极化电流法(PDC):XLPE 电缆发生老化时,绝缘内部会产生新的陷阱,流经该区域的电流在极化/去极化电流测试中会发生改变。通过对电缆进行多次连续的PDC测试,统计分析其电导率变化情况,能够掌握电缆绝缘材料的介电特性和老化程度。该方法是一种无损检测方法,针对片状试样和整体电缆皆可,能够较准确地反映电缆的劣化程度,但无法准确判断出老化的具体类型,目前已有判断依据和诊断标准。

4 预防和修复方法

针对 XLPE 电缆绝缘中的水树老化和电树老化问题,未来的预防和修复方法主要有以下几种:

(1)在电缆结构设计过程中,可采取措施改变交联方式来预防老化的产生。该方法通过抑制引发的必要生长条件来达到预防老化的目的,例如,对于水树枝,为了降低电缆绝缘层的水分含量、微孔数量及尺寸,可以将交联方式从湿法改为干法;对于电树枝,可以在基体结构上通过控制聚合物的结晶度和球晶尺寸来限制其发展。

(2)在制造工艺上,可采取对材料进行超净化处理的措施,消除局部的电场集中。在电缆的挤出过程,可采用“三层共挤”工艺,同时挤出电缆的绝缘层和绝缘屏蔽层,减少界面微孔缺陷,防止绝缘层与外界杂质相接触。此外,绝缘后处理工艺也能起到抗水树、电树老化的作用,其作用原理是减少在绝缘层中的应力残存^[71]。

(3)在电缆绝缘材料的选择上,使用抗水树交联聚乙烯(TR-XLPE),或改变绝缘材料的性质以防

止水分在电场的作用下进行迁移,从而抑制水树生长^[72];对于电树枝,可以使用乙烯-丙烯酸共聚物(EAA)改性 XLPE 电缆,减少绝缘中空间电荷的积累,以达到降低电树枝形成概率的目的^[73]。

(4)针对已经产生老化的电缆,可以使用绝缘修复技术,主要方法是向电缆线芯中注入绝缘修复液。对于水树老化,第一代修复技术主要是采用含有硅烷和催化剂的修复液体,当其渗透到绝缘层后,会与水树区域中的水发生反应形成有机聚合物,填充水树空腔,以实现绝缘修复^[74],该技术能将老化电缆的寿命延长 10~15 年,但中长期使用效果并不好且修复效率不高。在此基础上,第二代修复技术进一步考虑了更多外界因素的影响,如电场、应力、紫外光和局部放电等,在绝缘修复液中添加有机成分,使得修复效果和修复效率得到提升^[75]。但对于电树老化,由于绝缘材料的碳化损伤等是不可逆的,无法完全进行修复,但修复液也可以起到抑制电树枝引发的作用,预防电缆绝缘中水树枝向电树枝的转换,提升老化电缆的抗电树性能。另外,还可以通过添加电压稳定剂,例如苯偶酰类电压稳定剂、噻吨酮类电压稳定剂等来延缓电树枝的生长^[76]。此外,还有基于纳米颗粒复合填充的修复技术,能够增强电缆的绝缘性能^[77]。

5 结束语

电缆绝缘的状态会影响整个供电系统的安全与稳定运行。学者们从多种因素的综合作用来考虑,根据实验室条件下的电缆绝缘老化试验,开发出许多物理模型和模拟方法,并将他们投入到对电缆绝缘状态的研究与检测中,目前已取得了一定成果。

在电缆的在线监测方面,目前已经可以满足对电缆各种绝缘参数的检测和评估,但仍存在着研究对象的电压等级单一、运行年限较短、试验次数较少等问题,所得数据和结论缺乏说服力和代表性,因此投入实际运行的在线监测产品并不多见。此外,多数研究仅针对中低压电缆,对于 110 kV 及以上的 XLPE 电缆缺乏足够的技术支持,尤其是现场条件下与实验室条件下电缆绝缘老化结果的对比。但局部放电检测和在线监测仍是主要方向,未来可以在以下几点展开研究:

(1)针对 XLPE 电缆中的水树,可以通过改变交联方式、增加电缆绝缘材料与绝缘屏蔽层的隔绝

性、抑制水分在电场下的迁移、填充水树区域等方式进行抑制和解决。

(2)除了掌握树枝的生成原因和机理之外,未来的研究应侧重于对实际运行电缆的在线无损监测。借助电缆绝缘在线监测的实践经验和研究数据,结合多种检测手段来适应不同环境,有效定量地分析电缆的可靠性,及时发现潜在故障,分析电缆老化的趋势,发展在线的、非破坏性的、更加直观的检测手段。

(3)需要考虑提取方法、试样来源及规格、测试环境等外部条件的不相同,进一步积累大量数据,建立常用试验参数与电缆绝缘老化程度之间的关联,并提供每种方法评估的判据或标准。

(4)水树枝和电树枝存在时,都伴随着绝缘材料局部介电性能的改变,将该部分特征参数的变化规律应用到电缆绝缘监测技术上,也是未来研究的方向。此外,将该技术与深度学习相结合,实现智能化的检测,克服各种监测手段单一使用的局限性,提高测量结果的准确性,积累操作经验,建立相关行业标准,是未来发展的迫切需求。

参考文献:

- [1] 江日洪. 交联聚乙烯电力电缆线路[M]. 第2版. 北京:中国电力出版社,2009:1-7.
- [2] 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.
- [3] ROSS R, SMIT J J. Composition and growth of water trees in XLPE[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,1992,27(3):519-533.
- [4] 郑晓泉,王金锋,李彦雄. 交联聚乙烯中水树枝向电树枝的转化[J]. 中国电机工程报,2013,33(22):166-174,25.
- [5] CRINE J P, PAPPAL J L. Influence of fatigue on some electrical ageing mechanisms of polymers[J]. IEE Proceedings-Science Measurement and Technology,1996,143(6):395-398.
- [6] 高小庆,罗俊华. XLPE 电力电缆过负荷温升与早期破坏机理的研究[J]. 高电压技术,1997,23(2):62-64.
- [7] 王金锋,李彦雄,刘志民,等. 温度对聚乙烯水树枝老化特性的影响[J]. 高电压技术,2012,38(1):181-187.
- [8] 冯杰,濮峻嵩,刘曦,等. 低温环境下 XLPE 材料中水树枝生长特性的研究[J]. 四川电力技术,2018,41(6):28-31,46.
- [9] 周凯,陶文彪,赵威,等. 以分子取向理论理解交联聚乙烯中水树在不同温度下的生长特性[J]. 高电压技术,2014,40(12):3665-3673.
- [10] 李康乐,周凯,黄明,等. XLPE 在电场作用下的取向对温度变化条件下水树枝生长的促进作用机理[J]. 中国电机工程学报,2018,38(3):956-964.
- [11] 刘曦,蔡钢,濮峻嵩,等. 聚合物形态变化与水树枝生长的关联性研究[J]. 绝缘材料,2016,49(5):60-64.
- [12] 豆朋,文习山. 交联聚乙烯电缆中水树研究的现状[J]. 绝缘材料,2005,38(2):61-64.
- [13] 周凯,李天华,朱光亚,等. 离子迁移特性对水树微观结构的影响[J]. 高电压技术,2019,45(5):1630-1637.
- [14] QURESHI M I, MALIK N H, AL-ARAINY A A. Effects of different ionic solutions on statistical length distribution of water trees in XLPE cable insulation[C]//International Conference on Properties & Applications of Dielectric Materials. Xi'an:IEEE,2000:513-516.
- [15] 周凯,杨明亮,陶文彪,等. 单一极性直流电压下交联聚乙烯电力电缆水树枝生长特性[J]. 高电压技术,2015,41(4):1075-1083.
- [16] FILIPPINI J C, KOO J Y, CHEN J L. Electrode influence on the propagation of water trees in polyethylene[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation,2002,24(1):75-82.
- [17] 张春烁,周凯,李天华,等. 从离子本性角度分析不同酸碱环境下 XLPE 电缆水树枝生长特性[J]. 高电压技术,2020,46(1):233-239.
- [18] HELLES S, BENJAMINSEN J T, SELSJORD M, et al. Water tree initiation and growth in XLPE cables under static and dynamic mechanical stress[C]//IEEE International Symposium on Electrical Insulation. San Juan, United states: IEEE,2012.
- [19] ILDSTAD E, FAREMO H. Effect of dynamic mechanical load on water treeing of XLPE cables[C]//International Conference on High Voltage Engineering & Application. Shanghai, China: IEEE,2012:55-58.
- [20] 周凯,李康乐,杨明亮,等. XLPE 电缆在不同温度下的力学响应对水树枝生长的影响[J]. 高电压技术,2018,44(5):1428-1434.
- [21] 胥智勇,赵洪,陈俊岐,等. 交联度对交联聚乙烯水树枝老化特性的影响[J]. 绝缘材料,2017,50(4):31-35, 41.
- [22] 王金锋,郑晓泉,柳立为,等. LDPE 结晶形态对水树枝老化特性的影响[J]. 高电压技术,2010,36(3):678-684.
- [23] 刘曦,冯杰,濮峻嵩,等. 交联聚乙烯交联度和结晶度对水树枝生长的作用机制[J]. 绝缘材料,2020,53(6):21-24.
- [24] ROSS R. Dealing with interface problems in polymer cable terminations[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,1999,15(4):5-9.
- [25] DENSLEY J. Ageing mechanisms and diagnostics for power cables-An overview[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2001,17(1):14-22.
- [26] 刘云鹏,刘贺晨,李演达,等. 直流叠加交流电压下交联聚乙烯中电树枝特性研究[J]. 电工技术学报,2018,33(3):601-608.
- [27] KITCHIN D W, PRATT O S. Treeing in polyethylene as a prelude to breakdown[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers Part III Power Apparatus & Systems,1958,77(3):180-185.
- [28] IEDA M, NAWATA M. DC treeing breakdown associated with space charge formation in polyethylene[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation,1977,12(1):19-25.
- [29] 叶开颜. 交联聚乙烯电力电缆电树枝化的影响因素及机理研究[D]. 重庆:重庆大学,2008.
- [30] 谢安生,李盛涛,郑晓泉,等. 外施电压频率对 XLPE 电缆绝缘中电树枝生长特性的影响[J]. 电工电能新技术,2006,25(3):33-36.
- [31] LIU Y, SU Y, XIAO Y. Grounded DC tree initiation in XLPE DC cable insulation through different resistors[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Xi'an:IEEE,2018.
- [32] SEKII Y, KAWANAMI H, SAITO M, et al. DC tree and grounded DC tree in XLPE[C]//2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Nashville,

- USA: IEEE,2005.
- [33] 刘贺晨. 高压直流电缆绝缘老化对空间电荷特性的影响及其电树枝特性研究[D]. 北京:华北电力大学,2017.
- [34] 王洪新,贺景亮,李恪,等. 交流叠加冲击电压下XLPE绝缘中电树枝起始特性[J]. 高电压技术,1999,25(2):3-5.
- [35] 廖瑞金,郑升讯,杨丽君,等. 不同温度下XLPE电缆中电树枝的生长特性[J]. 高电压技术,2010,36(10):2398-2404.
- [36] LIU Y, XIAO Y, SU Y, et al. Electrical treeing test of DC cable XLPE insulation under DC voltage and high temperature[C]//2016 IEEE International Conference on Dielectrics. Montpellier: IEEE,2016.
- [37] 马一力,丛祥旭,李忠华. 0~-50℃交联聚乙烯材料的电树枝生长特性[J]. 哈尔滨理工大学学报,2018,23(3):111-116.
- [38] FANG S C, DU B X, ZHU X H, et al. Effect of temperature gradient on electrical tree in XLPE from 0 to -196℃ [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity,2019,29(2):1-4.
- [39] 郑晓泉, CHEN G. 机械应力与电压频率对XLPE电缆电树枝的影响[J]. 高电压技术,2003,29(4):6-8.
- [40] ZHENG X, CHEN G, DAVIES A E, et al. The influence of survival mechanical stress and voltage frequency on electrical tree in XLPE[C]//2002 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Cancun, Mexico:IEEE,2002.
- [41] 刘子玉,刘荣生,王惠明,等. 空间电荷与电树枝的引发[J]. 西安交通大学学报,1985(5):29-37.
- [42] 周利军,成睿,江俊飞,等. 局部气压对交联聚乙烯电缆电树枝生长特性的影响[J]. 高电压技术,2015,41(8):2650-2656.
- [43] 王雅妮,李光道,吴建东,等. 添加纳米MgO对交联聚乙烯中直流接地电树枝的影响[J]. 南方电网技术,2015,9(10):26-30.
- [44] STONE G C. Statistics of aging models and practical reality[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation,1993,28(5):716-728.
- [45] 党智敏,亢婕,屠德民. 新型抗水树聚乙烯绝缘电缆料的研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(1):8-11.
- [46] 郑晓泉,王国红,屠德民. 聚乙烯水树枝的非线性特性研究[J]. 绝缘材料,2001,34(5):32-34.
- [47] 欧阳本红,康毅,赵健康,等. 加速水树老化对XLPE电力电缆绝缘性能的影响[J]. 高电压技术,2010,36(8):1942-1949.
- [48] 陶霁韬,周凯,杨滔,等. 改进水针法加速XLPE电缆水树老化研究[J]. 绝缘材料,2013,46(6):62-65.
- [49] 王金锋,郑晓泉. 热处理对聚乙烯水树枝老化特性的影响[J]. 绝缘材料,2016,49(6):62-66.
- [50] 张春焯,周凯,李天华,等. 一种新的加速XLPE薄片水树老化的方法及其研究[J]. 绝缘材料,2019,52(1):29-34.
- [51] 刘飞. 35kV及以下XLPE电力电缆绝缘老化评估研究[D]. 上海:上海交通大学,2014.
- [52] 郑晓泉, CHEN G, DAVIS A E. XLPE电缆绝缘中电树枝生长的阶段性特性实验研究[J]. 电工电能新技术,2003(3):24-27.
- [53] 周远翔,聂琼,邢晓亮,等. 频率对高密度聚乙烯电树枝特性的影响[C]//中国电机工程学会高电压专委会学术年会. 中国电机工程学会,2007.
- [54] 周淦,叶笛,安文斗,等. 基于不同电极系统的电树枝生长特性的研究[J]. 高压电器,2010,46(2):12-14.
- [55] 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.
- [56] 王志钧,吴炯. 500kV XLPE电缆绝缘中树枝化现象的述评[J]. 电线电缆,2001(2):16-20.
- [57] 贾欣,刘英,曹晓珑. XLPE电缆缺陷尺寸分布对电树枝起始的影响[J]. 高电压技术,2003,29(10):7-8,43.
- [58] 罗潘,任志刚,徐阳,等. 退役高压交联聚乙烯电缆绝缘老化状态分析[J]. 电工技术学报,2013,28(10):41-46.
- [59] 陈智勇,罗传仙,张静,等. 电老化与加速水树老化对交联聚乙烯绝缘理化特性的影响[J]. 西安交通大学学报,2015,49(4):32-39.
- [60] ANDJELKOVIC D, RAJAKOVIC N. Influence of accelerated aging on mechanical and structural properties of cross-linked polyethylene (XLPE) insulation[J]. Electrical Engineering,2001,83(1-2):83-87.
- [61] CRINE J P. Influence of high electrical fields on ageing and polarization properties of polyethylene[J]. Polymer International, 2002,51(11):1159-1163.
- [62] 王金锋,郑晓泉. 热处理对聚乙烯水树枝老化特性的影响[J]. 绝缘材料,2016,49(6):62-66.
- [63] DENSLEY R J. An investigation into the growth of electrical trees in XLPE cable insulation[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation,1979,EI-14(3):148-158.
- [64] 江秀臣,蔡军,董小兵,等. 110kV及以上电压等级交联电缆在线监测技术[J]. 电力自动化设备,2005,25(8):13-17.
- [65] 董小兵,蔡军,江秀臣,等. 10~35kV XLPE电缆在线监测技术[J]. 电力自动化设备,2005,25(9):20-24.
- [66] LI S, LI J. Condition monitoring and diagnosis of power equipment:review and prospective[J]. High Voltage,2017,2(2):82-91.
- [67] 朱晓辉,杜伯学,周凤争,等. 高压交联聚乙烯电缆在线监测及检测技术的研究现状[J]. 绝缘材料,2009,42(5):58-63.
- [68] 聂永杰,赵现平,李盛涛. XLPE电缆状态监测与绝缘诊断研究进展[J]. 高电压技术,2020,46(4):275-285.
- [69] MONTANARI G C. On line partial discharge diagnosis of power cables[C]//IEEE Electrical Insulation Conference. Montreal, Canada: IEEE,2009.
- [70] LI S T, LI J Y. Condition monitoring and diagnosis of power equipment: Review and prospective[J]. High Voltage,2017,2(2):82-91.
- [71] 陈泽龙,周凯,尹游,等. XLPE水树老化电缆的绝缘修复技术综述[J]. 绝缘材料,2018,51(10):1-6.
- [72] 党智敏,亢婕,屠德民. 新型抗水树聚乙烯绝缘电缆料的研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(1):8-11.
- [73] 党智敏,亢婕,屠德民. EAA改性XLPE中空间电荷和电树、水树的关系[J]. 中国电机工程学报,2001,21(7):5-8.
- [74] BERTINI G J, CHATTERTON W J. Dielectric enhancement technology[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,1994,10(2):17-22.
- [75] ZHOU K, TAO X T, WANG X J, et al. Insight into the new role of titanium isopropoxide catalyst on rejuvenation for water tree aged cables[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2015,22(1):611-618.
- [76] 徐刚,郑庆利. 超高压电力电缆电树枝放电抑制机理的探讨[J]. 上海电机学院学报,2005,8(2):24-28.
- [77] 周凯,陶霁韬,赵威,等. 在水树通道内生成纳米TiO₂的电缆修复方法及其绝缘增强机制研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(7):202-210.