

中文摘要

交联聚乙烯(XLPE)电缆具有极佳的电气性能, 极易敷设和极佳的抗老化特性等优点, 已被广泛用于各个电压等级的输电线路当中。在电场和水分的共同作用下, 电缆绝缘中会产生水树枝。伴随着水树枝的生长, 水树枝尖端的电场将愈加集中, 局部高场强最终使水树枝尖端产生电树枝。电树枝一旦形成, 极可能造成电缆绝缘层在短期内被击穿。因此, 考察水树枝的生长过程及检测方法对保障电力电缆的可靠运行具有重要的理论意义和实用价值。

本文从微观角度叙述了 XLPE 电缆内水树枝的形成过程, 介绍了水树枝的微观结构和等效的椭球模型结构。详细阐述了水树枝的非线性电阻特性, 据此提出了基于残留电荷法的水树枝老化检测技术, 设计并搭建了实验电路。对 12 根 10 千伏 XLPE 电缆样品进行实验, 测量了样品中残留的电荷量。结果显示, 施加第一组斜坡交流电压时, 残留电荷泄漏的速率和大小与电缆绝缘的水树枝生长情况有较好的相关性。

关键词: XLPE 电力电缆 水树枝 非线性 残留电荷法

ABSTRACT

XLPE cable has excellent electrical performance, easy-installation and degradation-proof property, thus is widely used in electric transmission lines at all voltage levels. Under the mutual influence of water and electrical field, water tree may be generated in insulation layers of cables. As the water tree grows, electrical field at the tip of water tree will become more intensive, and finally result in the generation of electrical tree at the tip of water tree. Once the electrical tree appears, breakdown will almost occur in the insulation layer of cable in a short period of time. Therefore, it is highly important to investigate the growing process and diagnosis methods which have important theory and application value in maintenance of reliable operation of power cables.

From microscopic viewpoint, the formation of water tree in XLPE cable insulations is stated, and the microscopic structure of water-tree and its equivalent ellipsoid model structure are introduced. Based on the nonlinear property of resistance of water tree, a new method, Residual Charge Method (RCM), is proposed to diagnose water tree. After the design and building of experiment circuit, experiments are conducted on 12 10kV XLPE cable samples, and the amounts of residual charges are measured. The results show that when the first ramping alternative current (ac) voltage is applied, there is a good correlation between the leakage rate and magnitude of residual charges and the growing information of water tree in insulation layers of cables.

KEY WORDS: XLPE power cable, water-tree, nonlinear property, Residual Charge Method (RCM)

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得天津大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：刘彦君 签字日期：2008年6月10日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名：刘彦君

导师签名：李洪波

签字日期：2008年6月10日

签字日期：2008年6月10日

第一章 绪论

1.1 课题研究背景和意义

城市电网电缆化程度是衡量城市电网技术经济水平的重要标志,亦是促进城市文明化进程迅速向前迈进、改善人类生活环境的必要手段。最近三十年来,国内外电力电缆制造技术迅速发展,特别是推广应用悬链、立塔等先进的生产技术以及三层共挤生产工艺制造交联聚乙烯(XLPE)绝缘电力电缆^{[1][2]},电缆产品质量显著提高,微孔、杂质的尺寸和含量以及线芯偏心度等关键技术指标得到严格控制^[3]。随着电力市场的繁荣,全球电力电缆投运回路的数量迅猛增涨,铜芯电力电缆逐步取代铝芯电力电缆、XLPE绝缘电力电缆已经取代油纸绝缘电力电缆并逐步取代PVC绝缘电力电缆和充油电力电缆,且电压等级也越来越高,目前已经发展到500 kV。

在过去很长的时间内,由于诊断评估技术的限制,计划经济体制的制约,电力系统的检修是以事后维修、预防计划检修为主的检修体制,这种检修体制适应当时我国生产力的发展水平,其优点在于可保障电网备用容量的稳定,做到人力、物力和资金安排的计划性,在相当一段时间里,为电力安全稳定生产发挥了良好的作用。但是,就提高设备安全经济运行水平的目标而言,技术监督对检修的深层次要求应该是该修必修,不该修不修,也就是状态检修。随着设备制造工艺的进步和传感技术、计算机技术的发展,开展状态检修逐渐成为可能。目前,厂网分开、电力走上竞争上网之路,开展状态检修也成为经济形式所需。国家电力公司和华中电力集团公司相继举行了实施状态检修研讨会,积极推动状态检修工作。国家电力公司的张贵行总工程师在其工作报告中要求发、供电设备推行状态检修工作,作为检修的一种创新手段。

以前,由于电力系统庞大,电缆的运行周期比较长,绝缘老化缓慢,电缆的监测和诊断却没有引起人们足够重视。而XLPE电缆的一个致命弱点是在绝缘层内容易引发水树枝,水树枝生长到一定程度会迅速转变为电树枝,并形成放电而加速绝缘劣化,以至于在运行过程中发生击穿。近年来,随着城市建设的发展,机组容量的不断加大,电力电缆在城网供电中所占的份额加重,在一些城市的市区逐步以敷设电缆取代架空输电线路;同时随着电缆数量的增多及运行时间的延长,以前安装的XLPE绝缘电缆的老化故障频繁,造成绝缘击穿事件,甚至引起

部分电网停电,给国民经济带来重大的经济损失。高压电缆的价格也非常昂贵,仅在美国,地下配电网系统需要更换的费用就达150亿美元,所以,有效的在线检测的经济意义不容忽视。对于连续运作的电力系统来说,电缆的在线监测与故障诊断成为了亟待解决的问题,也是电力系统状态检修不可缺少的环节。

XLPE电力电缆在线监测的最终目的有两个:一是发现早期水树枝绝缘老化,防止突然发生事故,以期尽量减少故障损失和保证可靠运行。二是持续监测和采集电缆重要的状态参数并加以存储,通过对这些参数的处理、比较和分析,对电缆的劣化程度有一个正确的评估,预测电缆的实际寿命。

电缆绝缘在线监测避免了原来的人工管理,不必大量人员到现场进行巡视和定期停电检修,这样节省了大量的人力资源,也减少了人工巡检的不安全因素,避免了人工直接读表的不精确性,同时也能迅速地发现安全隐患。针对电缆分布广、电压等级高、成本较高和维护复杂的实际情况,寻求一种安全、准确、快速和实用的电缆绝缘故障监测手段,显得犹为重要。

1.2 电力电缆发展概况

自从1890年Vincent de Ferranti制造出著名的10kV的同轴电缆以来,电力电缆得到了广泛应用,电压等级也得到了不断提高。1926年在蒙特利尔和Philadelphia的电缆的电压等级达到66 kV, 1927年在米兰电缆的电压等级达到70 kV, 1936年在巴黎电缆的电压等级达到220 kV, 1952年在瑞典电缆的电压等级达到380 kV。最近几年在加拿大和美国电缆的电压等级分别达到525 kV和535 kV。当今由于制造技术的进步,在意大利已敷设有1100 kV电压等级的电缆。

在我国,自1951年国产6 kV油纸绝缘电力电缆问世以来,不到20年,我国第一条220 kV充油电缆就投入运行,而到1982年,充油电缆的电压等级已发展到500 kV。我国XLPE电力电缆的制造和推广应用起步较晚,1970年我国正式投产10~35 kV XLPE电缆,1985年广州、南京等城市首先引进110 kV XLPE电力电缆以后,相继在发电厂、变电站和抽水蓄能电站先后引进220、330、500 kV XLPE电力电缆。1990年第一条国产110 kV XLPE电力电缆线路在首钢投入运行,1996年国产220 kV XLPE电力电缆通过技术鉴定,并于2000年通过长期老化试验(预鉴定试验)和产品鉴定,逐步推广应用。

电缆绝缘材料有油纸绝缘、充油绝缘、充气绝缘、挤出绝缘等,电压等级由早期的几百伏低电压到当今五十万伏以上特高压。尤其是二十世纪七十年代以后,材料科学、电工电子技术的发展极大地推动了电力电缆制造技术进步。

1.3 电力电缆的分类

在国外,20世纪初已经开始使用电缆。我国在建国后开始特别是在七十年代,电缆的使用量迅猛增长。现在使用的35 kV以下电力电缆主要有橡皮绝缘电力电缆、聚氯乙烯绝缘电力电缆、油浸纸绝缘电力电缆、XLPE电力电缆;35 kV以上电力电缆主要有高压充油电力电缆、XLPE电力电缆、六氟化硫气体绝缘电力电缆、超导电缆等^{[4][5]}。

1、橡皮绝缘电力电缆

橡皮绝缘电力电缆的绝缘材料是普通的合成橡胶或乙丙橡胶等,普通的合成橡胶耐臭氧能力差,在电晕的作用下容易发生开裂,击穿场强较低,一般只用于低压配电系统,也可以用于定期移动的固定敷设线路。当被用于直流电力系统时,电缆的工作电压可以是交流电压的两倍。

2、聚氯乙烯电力电缆

聚氯乙烯电力电缆加工简单、成本低、耐腐蚀、化学稳定性好,但这种材料的介质损耗大、耐热性差、击穿场强低。因而,使用场合也受到限制。

3、油浸纸绝缘电力电缆

油浸纸绝缘电力电缆是由纤维纸和浸渍剂组成的复合绝缘电缆,分为带绝缘电缆和分相铅包电缆,这种电缆在生产和运输过程中难免会产生气隙,使其绝缘强度较低,因此只能用于低压配电系统。

4、高压充油电力电缆

高压充油电力电缆利用补充浸渍油的原理来消除绝缘层中的气隙以提高电缆工作场强。按照其保护层的结构不同分为两类:一类是自容式充油电缆,一类是钢管充油电缆。自容式充油电缆在线芯中心有油道和补充浸渍设备相连,使得当电缆温度升降时,浸渍剂热胀冷缩,膨胀的油可以流入浸渍设备或者从浸渍设备补充浸渍油。钢管式充油电缆设有中心油道,三根屏蔽电缆拉入密封的钢管内,浸渍剂粘度较高。充油电缆虽然有较好的运行特点,但是运行维护工作量大,安装不方便,目前正在逐渐被淘汰。

5、XLPE电力电缆

从70年代开始,XLPE作为电缆的绝缘得到了广泛的应用,国外高压电缆的电压等级已经发展到500 kV,而且已在线路上应用。我国则从80年代开始大规模引进XLPE绝缘电力电缆生产线,产品的等级也在逐步提高。66~110 kV XLPE电缆于1991年在沈阳进行了首批鉴定,并在沈阳电缆厂和上海电缆厂批量生产^[6]。目前国内已形成了一个生产高压XLPE电缆热,已能批量生产,加上从国外引进的产品,极大地促进了我国城市电网的建设和改造。

XLPE电缆由于无油、附属设备较少,在一定防护条件下无火灾危险、安装敷设以及运行维护较简单,而成为城市电网改造和建设所需电力电缆的首选产品。110 kV及220 kV XLPE电缆也逐渐取代110 kV及220 kV充油电缆,使高压电能通过高压电缆地下输电方式输入至城市负荷中心,为我国XLPE电缆技术的发展与规模生产也带来了良好的机遇。通过在城市拓展的新区中预留和安排好变电站地址、线路走廊、地下电缆通道和大型建筑物的配电间以及开关室等,使新区实现高低压配电地下电缆化。按水电部1982年8月提出的《城市电网新装备技术条件》,地下电缆普遍采用XLPE绝缘电力电缆。

XLPE电力电缆由于其合理的工艺和结构,耐酸碱、耐腐蚀能力较强,安装敷设简单,运行维护工作少,不存在油的淌流问题,优良的电气性能和安全可靠的运行特点,比充油电缆有较大的优越性,目前国内外已经把它作为主要的发展对象。例如日本已经开始开发750 kV电缆,俄罗斯的220 kV电缆已经稳定运行了十年,我国也开始使用220 kV XLPE电力电缆,一些500 kV XLPE电力电缆项目已在招标和敷设之中。

6、一些新型的电力电缆

随着科学技术的发展和大量远距离输电的要求,一些新型结构的电力电缆还在不断出现,如管道充气电缆,低温有阻电缆和超导电缆。

管道充气电缆,也就是六氟化硫电缆,主要是为了满足封闭式变电站的要求,这种电缆的优点在于既有架空电线的传输能力,又有电缆的运行优点:其介电常数小,电缆电容量小,充电电流小,不需要电容电流补偿装置,有效输电距离长,介质损耗小,限制了运行时温度的上升,增加了传输容量。

低温有阻电缆是采用冷却技术把高纯度铝或铜导体冷却到很低的温度,使得导体电阻系数大大降低,从而提高电流密度,降低导线损耗,增强散热能力,增加整体传输容量。

超导电缆是由超导技术的发展而出现的,电缆工作时处于超导状态,导体电阻很小,其传输容量远远超过充油电缆,也大于低温有阻电缆。但因为常温冷却和降低造价和一些关键技术等问题很难寻求一个合理解决的平衡点,故其离大规模应用有一定的距离。

虽然电缆的形式多种多样,但目前广泛应用的电缆仍然以XLPE电力电缆为主。

1.4 电力电缆供电的优缺点

我国城市电网改造工作经过几年努力之后,目前已见成效,初步调整了长期

困扰我国电力系统的供电、输电和配电三者之间的比例关系,配电网得到重视,电力系统布局逐渐趋于合理化。从发展的眼光看,城市电网改造工作具有两个鲜明的特点:一是城网供电方式环网化,二是输电网络电缆化。国外工业发达的国家早就致力于城市电网供电的环网化和电缆化,研究和生产出许多新材料和新产品供给城网使用。由于输电线路电缆化具有许多优点,可以提高供电可靠性。我国一些大中小城市对于这种电网模式已经日趋认可并已行动起来,供电系统电缆化在我国将很有发展前景和市场。

与传统的架空线供电相比,电缆供电有一系列优点,大体可归纳为以下几点:

(1) 削弱自然环境条件的影响。由于电缆线路直接敷设于地下,除电缆分接箱和户外终端部分外,不受外界恶劣气候环境影响;而架空线易受暴风、暴雨、雷电、冰雹、积雪、沙尘暴等自然灾害影响,有可能造成断线、短路或其他故障。

(2) 可避免外力直接破坏。如交通事故撞击,建筑棚架倒塌,鸟害或风筝引发的高压放电,电路器材被窃以及战争损害等。

(3) 减少人身触电事故。架空线敞露于地面之上,线路全程都需要安全的“全线保护”;而电力电缆仅有若干个地点突出于地面,只需进行“单点保护”,大大减少了防范范围,提高了整体安全性。

(4) 节省地面上的占地面积。架空线走廊占地面积大且较平直,其走向通常不能与城市道路方向相符,使城市建筑布局困难。走廊下面很大一块面积不允许搭建任何建筑物,浪费宝贵的城市土地资源。而电缆输电可以腾出架空走廊面积,电缆地下敷设可以转弯躲开建筑物,彻底消除城市“蜘蛛网”,美化市容。

(5) 有利于提高城网的功率因数。电缆芯线与其外面的接地屏蔽层构成一个电容器。这就相当于每相加进无功补偿电容器,容性无功电流分量将部分补偿线路上感性无功电流分量,使总电流幅值降低。

(6) 电缆馈电可以直接深入负荷中心。对于负荷密集地区,如繁华商业区、大工业区、高层建筑物等,电缆可直接引至,从而缩小供电半径,减少线损,提高供电系统质量。

(7) 容易大幅度提高供电线路的供电能力。一条电缆通道通常可以容纳多条电力电缆。当需要增加供电容量时,可在电缆沟或电缆通道内多加电缆,施工亦较简便,而且施工过程中,原供电电缆也无需长时间停电。

(8) 维护工作量减轻和保密性强。电缆敷设于地下,正常时一般不需维护,只需进行路面观察。地下布线,局外人很难知晓布局,避免人为破坏。

与此同时,电缆化供电也存在不足之处:

(1) 投资费用较大。电缆的结构设计、制造材料、工艺流程以及设备安装和维护都比较严格,造价也比较高。其整体价格比架空线路加上杆塔费用要高得多。

(2) 线路不易变更。电缆线路长期埋于地下，产生自然定形，其外护套会受到腐蚀，一般不宜移动。这便要求电缆敷设前须有长远规划，线路不再更改，必要时利用电缆分接箱留出备用分支接头。

(3) 故障点的寻测和修复比较困难。虽然有寻找故障点的专用仪器(例如用电桥法或脉冲回波法来确定故障点的位置)，但使用起来也比较麻烦。

(4) 电缆附件(中间接头、终端)的绝缘强度、防水密封、安装工艺要求高，所以现场施工操作人员需要经过专业培训，具备一定的操作水准。

1992 年联合国环境与发展大会确定了可持续发展的当代人类发展主题。电力工业的发展方式也将发生重大改变^[7]。根据以上对电缆供电和高架线供电的优缺点的分析，电缆取代传统架空线路可以做到小型化、无油化、低损耗、低噪音、自动化、智能化、高可靠性和环保性，为可持续发展做出一定的贡献。随着科学技术和工艺流程的进一步发展，电缆的使用费用高昂也将逐步得到改善，维护和检测技术也会进一步得到提高。

1.5 电力电缆的常见故障

2003年，美国、加拿大等国家相继发生大面积的突然停电，导致航空、道路交通、通讯系统全面或部分瘫痪、人们的生活收到了极大的影响。仅美国大停电的经济损失就高达60亿美元。可见，随着电力系统的日益庞大、复杂，其脆弱性和潜在危险也逐渐暴露出来。中国科学院院士卢强曾指出过：“本世纪后半叶发生在美国的五次灾难大停电给以科技为主导的现代社会敲响了警钟”。为此，现代电力网络应具有极强的自我保护和调解能力，从网络末端到核心枢纽的实施层层保护，局部设备应具有监测和故障诊断的措施等。

电力电缆和其他电气设备一样在运行过程中会由于各种各样的原因而发生一些突发性的故障，为电力系统的安全运行、国民经济生产、人民生活带来影响。但是，电力电缆的故障不是一下发展起来的，而是长期绝缘老化的结果，最终导致绝缘击穿^[8]。

日本有关部门曾对1963年到1979年的6.6 kV级XLPE电缆的事故原因，进行了调查分析。可以看出：1970年以前敷设的电缆，发生的事故较多；接头和终端的故障总体来说较为均匀，概率也较低。从使用年数来看，运行了8年之后的电缆事故和更换件数激增。从事故的种类来看，水树、自然老化和浸水已经占总事故比例的50%。在考虑XLPE电缆寿命时，把终端、接头不良这类早期故障和外力破坏事故等排除，就可以认为现场绝缘诊断应以水树枝老化为主^[9]。

水树枝老化被认为是造成XLPE电缆在运行中被击穿的主要原因。自从1968

年首次在地下直埋式XLPE电缆绝缘中发现“水树枝”以来，人们一直没有停止过有关水树枝引发和生长机理、水树枝结构及特性的研究。特别是近些年来，一方面，由于水树枝老化导致早期敷设应用的XLPE电缆绝缘击穿停电事故呈逐年上升之势，并不断造成重大经济损失，水树枝现象已经成为电力电缆安全运行的重大隐患，迫使人们不断加强对XLPE电缆绝缘老化状况的诊断技术研究工作。另一方面，伴随许多新技术新设备的不断出现，尤其是有关绝缘中空间电荷测量技术及研究的新成果^[10-24]，将水树枝机理及检测技术研究推向新的阶段。

在绝缘中存在缺陷、微孔和水分的前提下，由于缺陷或微孔处的电场畸变，会导致在较低的电压下引发水树枝^[25-29]，这便是 XLPE 电缆绝缘中水树枝的引发及生长特征。水树枝的生长相对较慢，但伴随水树枝生长，水树枝尖端的电场将愈加集中，局部高电场强度最终会导致水树枝尖端产生电树枝^{[30][31]}。电树枝一旦形成，即可能造成电缆绝缘层在短期内被击穿。研究发现，许多 XLPE 电缆在电力线路遭到雷击后较短时间即发生击穿停电事故，对这些电缆绝缘的解剖分析发现，在水树枝尖端有不同程度的电树枝出现。分析表明，当水树枝长到一定程度时，如电力线路遭到雷击，大气过电压会在水树枝尖端形成较大瞬态电流，该电流在树枝中的损耗会造成水树枝微孔内水分温度的急剧上升甚至气化，所产生较大压力会使水树枝尖端处的 XLPE 分子链断裂从而引发电树枝。雷电流导致含水树枝 XLPE 电缆绝缘层在短时间内有被工频运行电压击穿的可能。还存在另一种机理，即较高的雷电压向水树枝尖端附近的绝缘陷阱中注入了空间电荷，在日后的运行中，空间电荷在水树枝尖端构成的局部高电场与电缆的工频额定电压叠加即可能引发电树枝并导致绝缘层在短期内被击穿。可见水树枝的引发和不断生长是 XLPE 电缆绝缘老化的最重要原因之一。

1.6 国内外对电缆检测问题的认识过程

自1944年美国铺设第一根3 kV XLPE绝缘电缆以来，XLPE电缆因其性能优良、工艺简单、安装方便、输送容量大、适应多种场合和运行维护简单而在世界范围内得以广泛应用。

高压XLPE电缆的发展历史并不长，1960年在美国才开始XLPE电缆的制造技术。该技术一问世，立即传入了欧洲和日本，此后XLPE电缆在美国、欧洲和日本开始逐渐成熟。日本XLPE电缆自1960年以后，发展速度最快，并形成了自己的体系。

目前，在国外电缆的在线监测开展比较早、比较多的是日本。早在80年代初，

日本就在该领域进行持续不断的研究和探索,开发出直流分量法、叠加电压法和电介质损耗法等多种诊断技术^[32]。日本住友电气工业株式会社于80年代后期研制出在线运行电缆监测仪(OLCM——On Line Cable Monitor)。该仪器分为固定型和携带型两种,主要应用范围是3.3, 6.6, 11.0 kV的电压等级;电网中性点的接地方式为不接地、经消弧线圈接地或接电阻接地;采用的方法主要是直流叠加法。

我国的XLPE电缆的在线监测的技术起步较晚、发展相对缓慢。九十年代初,上海电缆研究所也开始了研究工作,并进行了大量的现场试验。1993年,该所采用直流成分和直流叠加的复合诊断方法,研制成了适合于工业现场使用的CDZ型XLPE电缆诊断仪,并在包钢东码头电网中现场运行了两年。为企业的经济运行提供了有力保证。

电缆运行的安全与否,对电力系统、各种厂矿的影响较大,这一点已经逐渐被电力运行部门重视。1998年10月,中原油田下属分公司的一从总变电站到聚乙烯变电站的电缆,由于敷设环境潮湿,温度过热,绝缘提前老化,造成相间短路,造成上游开关由于差动保护而跳闸的恶性事故,为生产安全和连续生产造成极大影响。1999年本溪钢铁公司由于电缆接头烧毁,导致隧道内一百二十多条电缆全部被烧毁。2000年宝钢某一电缆隧道的一条电缆故障引起火灾,造成经济损失上亿元。

整体来说,国内外对于电缆绝缘故障的在线监测研究还不够成熟,尤其是对于110 kV/220 kV超高压电缆系统的研究和应用真是少之又少。而随着电力系统的容量的不断扩大,电压等级的不断提高,高压电缆的造价和维护费用不断增加,一种经济可行、安全可靠的在线监测方法和装置是迫切需要的。同时,随着变频技术和数字信号处理技术的成熟,进行采集和传输系统的数字化,并在此基础上进一步实现智能化,才能真正做到提高系统的稳定性和可靠性,从而使电缆绝缘故障在线监测系统可以应用于大面积、长距离、多测点、工作条件恶劣的现场。

1.7 本文研究内容

本文详细阐述了残留电荷法的原理,搭建了试验系统,按照实验步骤对 12 根 XLPE 电缆进行了实验,将其实验结果与测量介质损耗的实验结果进行了对比。结果证明,残留电荷法能够对 XLPE 电缆内水树枝的劣化程度做出极佳判断。目前,这种方法在日本已经发展成熟并投入现场的电力检测当中,但欧美等国家还是没有对此方法进行研究。我国对此方法知之甚少,到目前为止还没有重大研究成果。

第二章 水树的生成原理以及电缆在线检测方法的比较

2.1 水树的生成原理

2.1.1 水树枝的微观结构

将因老化而替换下来的XLPE电缆绝缘进行切片和染色，在显微镜下得到水树枝的微观结构，如图2-1所示。分析发现，电缆在运行中所产生的水树枝基本上是由沿电场方向排列的一系列含水微孔组成，微孔之间可能有更细微的微小通道相连^{[33][34]}。微孔的尺寸大约为零点几到几微米数量级，只有当其尺寸增至大约为10到20微米以上时才能为肉眼可见。微孔之间的细微通道尺寸则更小，可能只有几十纳米以下^[35]。即使在显微镜下，这些细微通道也只有含在含水或者染色时才能被观察到。

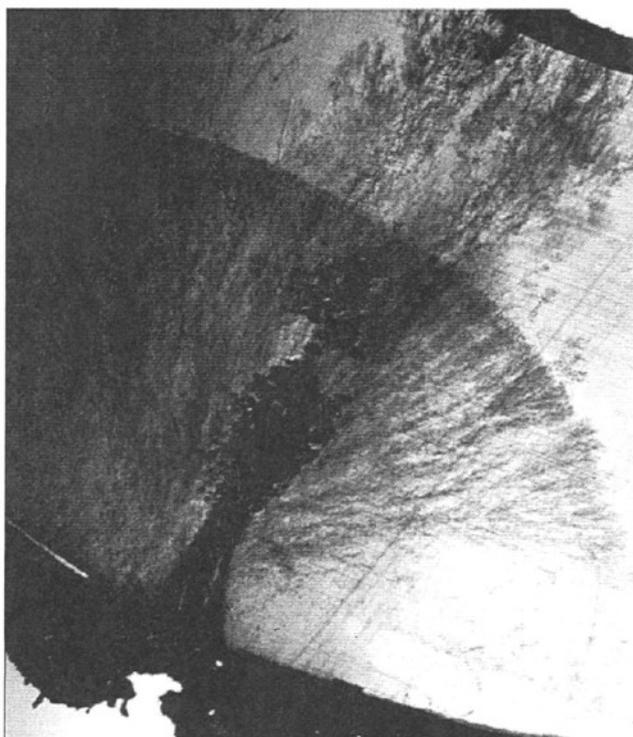


图2-1 显微镜下染色后水树枝的照片

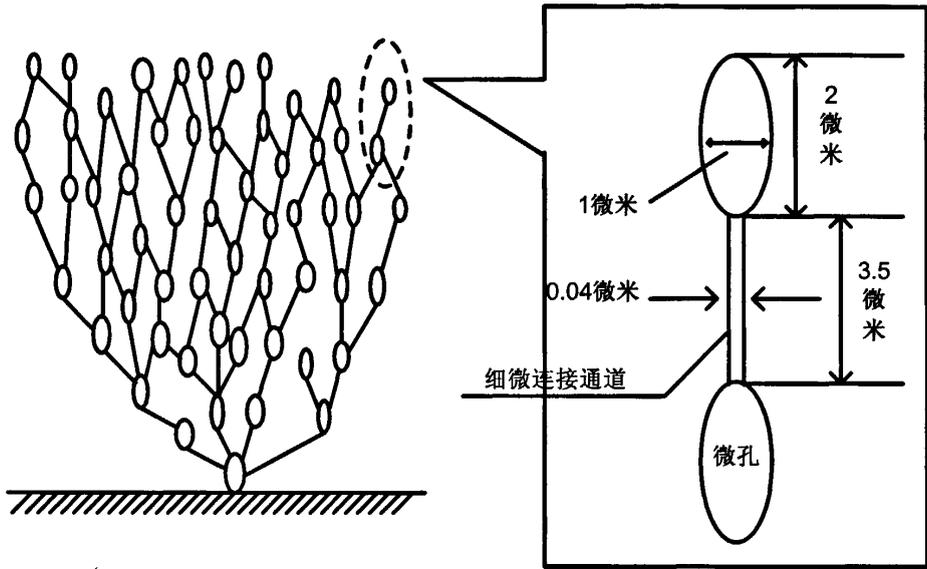


图2-2 水树枝的椭球模型结构示意图

在这些微孔中主要存在着两种分子：水分子和杂质离子。它们对水树的引发和成长起着至关重要的作用。水树枝的形成比较复杂，是物理、化学和电机械应力综合作用的产物。

2.1.2 XLPE 电缆绝缘中的水分

XLPE电缆绝缘中的水分存在两种引入方式：一是绝缘中固有的，包括原料中的固有水分以及在电缆绝缘生产中引入的水分；二是在电缆运行中由外界环境侵入，特别是对于周围土壤较为潮湿的直埋式电缆而言，由于液体渗透压的作用，水分更容易从外界进入绝缘。有学者对低压电缆绝缘进行湿度分析后得出如下结论：绝缘在靠近外半导电屏蔽处的含水量大于靠近内屏蔽处，在水中浸泡后各电缆样品绝缘在靠近外半导电屏蔽处的含水量变化并不明显，而内屏蔽处的绝缘含水量趋于均匀，表明外屏蔽附近绝缘中的水分是在电缆运行过程中由外界环境侵入且含水量已趋于饱和^[36]。

从分子理论的观点，水的吸收或其他杂质的扩散是在水分浓度影响下分子的无序运动。电缆的湿度聚集梯度是沿着半径方向，因此湿度 p 透过电缆薄层 dr 沿径向流动服从Fick定律^[35]：

$$p = -D \left(\frac{\partial c}{\partial r} \right) \quad (2-1)$$

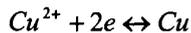
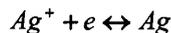
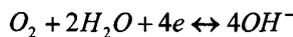
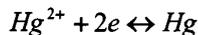
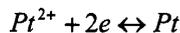
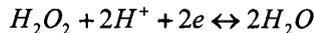
式中： c 为湿度浓度； r 为电缆绝缘半径； $\frac{\partial c}{\partial r}$ 为沿电缆绝缘径向的湿度浓度梯度；

D 为扩散系数。

方程(2-1)描述了水(或潮气)在稳态时流过电缆绝缘单位面积的速率,是用水的浓度梯度和一个常数所限定的一个吸收参数。水分子侵入电缆绝缘过程可描述如下^[35]:当电缆绝缘暴露在水(或潮气)中时,高速运动的水分子将撞击电缆绝缘表面。然后,分散的水分子或聚集在一起的几个水分子易于从邻近另一位置的水分子获得进一步的热能,而在邻近水分子的位置形成空腔或孔洞,水分子很容易注满这个孔洞并在 Vander Wall 力的作用下不再移动。在实际中,即便是采用良好的生产工艺和采用水树枝抑制绝缘料,也难以避免环境水分的侵入。特别是在电缆运行中,电缆绝缘损耗和导体发热会增加水分向绝缘的渗入程度。随着电缆运行时间的增加,绝缘中的水分含量会持续上升,意味着绝缘中的微孔数量及微孔尺寸均会随时间推移而增加,从而使得引发水树枝的可能性逐步增加。

2.1.3 XLPE 电缆绝缘中的杂质离子

在水树枝的引发、生长规律及水树枝检测技术研究中,杂质离子扮演着非常重要的角色^{[37][38]},它不仅会促使绝缘中的水树枝在较低电场强度下引发和生长,而且在特定的激励条件下,会和水树枝中的水分一起,产生一些有利于水树枝检测的特征信号。以下给出一些重要杂质离子的复合及离解方程:



近十年来,由于电缆生产工艺的不断改进和原材料质量及性能的不断提高,电缆绝缘及半导体屏蔽层中的杂质含量已大为减少,但盐及金属离子的含量仍达数十 ppm 数量级^[39],其中许多是溶解在电缆绝缘中的微量水之中,必然会促进水树枝的引发和生长,同时也必然会使水树枝的电导大为增加。而事实上,由于电缆敷设运行场地不尽相同,电缆周围土壤湿度及所溶解的离子各不相同,因此电缆水树枝中的杂质种类及含量也千差万别^{[40][41]},必然会对电缆的水树枝老化程度及树枝生长速度产生不同的影响。但它们具有一个共性,那就是会促使水树枝中含有较多的导电离子,并在较低的直流电场作用下聚集构成离子形空间电荷,同时使水树枝的电导率提高。

杂质离子对水树枝的生长具有一定的催化作用。许多学者的研究证实,在水

树枝生长的化学因素中, 电解液浓度是促进水树枝增长的最重要因素之一^[42]。一些学者对水树枝增长速度与电解液浓度的依赖关系进行了较为系统的研究, 水树枝增长速率相对值 Q 和电解液浓度 C 的对数关系如图2-3所示。水树枝生长的这种对电解液浓度的一览关系与所发现的金属离子对聚合物氧化催化的关系类似, 因此被认为是水树枝延伸期间的化学过程。

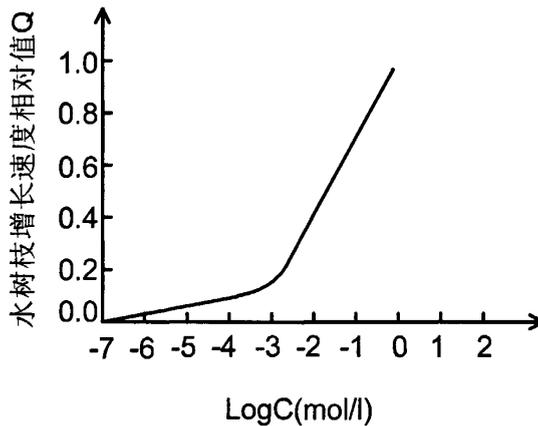


图2-3 水树枝增长速率相对值 Q 和电解液浓度 C 的对数关系曲线

由图可知, 水树枝增长速率相对值 Q 和电解液浓度 C 的对数在两个阶段都近似成线性关系, 其原因是: 当绝缘中的微孔尺寸达到临界值时, 水分进入了连接水树枝微孔的细微通道。在各种电机力的作用下, 可能使细微通道打开, 也可能使细微通道闭合。当电解液在聚合物内部流动时, 会发生类似于在微孔表面的化学反应, 并通过将离子束缚于细微通道内部表面而将其转化为亲水性。只要交流电场存在, 电解液离子就会通过细微通道运行至水树枝尖端并导致水树枝长度的持续增加。

XLPE电缆绝缘中的水分是引发水树枝的必要条件之一, 水分中的杂质导电离子浓度及种类是水分中电导率大小的决定因素。它们不仅会加速水树枝在工频电场下的生长速度, 而且在特定激励条件下, 杂质及水分离子在水树枝中的运动必然会产生一些有利于我们对电缆绝缘水树枝老化程度进行在线或离线检测的有用信息。因此了解XLPE电缆绝缘中水分及杂质导电离子的引入机理及分布特征, 具有重要的意义。

2.1.4 含水树枝 XLPE 试样中的空间电荷动态分布

研究发现,在不同电压作用下,水树枝化的XLPE电缆绝缘中会出现两种空间电荷,一种为积聚于水树枝尖端的由水分电离离子和杂质离子构成的离子型电荷^{[43][44]},此类空间电荷会随施加的交变电场作周期性振动,在较低电场下就会产生,电场消除或两电极短接时即会消除。另一类为在直流高电场下由水树枝尖端注入XLPE绝缘缺陷的陷阱空间电荷,其注入程度取决于电缆绝缘水树枝老化的程度;此类空间电荷即使在电极短接情况下也不会消除,在较高交变电场下或经对试样进行热处理才可能在短期内得以释放;此类空间电荷所产生的静电场与电缆工频运行电压叠加即可能在水树枝尖端引发电树枝,电树枝的存在是导致电缆绝缘层在短期内被击穿的直接原因,故这种空间电荷对电力电缆的安全运行有较大威胁^[45],所以一般不推荐采用高压直流耐压对已运行的XLPE电缆进行预防性试验。

两种空间电荷具有完全不同的形成机理,也必然存在不同的响应特征。空间电荷的行動规律不仅是加速绝缘老化的重要因素,空间电荷的分布和其在不同电压下的运动特性也是判别绝缘水树枝老化状态的重要依据。

尽管人们对空间电荷的研究已有一些年了,但多数是对强直流电场下聚合物中陷阱空间电荷的产生机理、分布,及检测技术的研究。而对于在交流情况下聚合物水树枝区的离子型空间电荷行为了解甚少。为此,有学者采用具有相位解析能力的脉冲电声法(PEA)检测系统测试了水树枝老化XLPE试样在50赫兹正弦电压下的空间电荷动态分布。

该实验结果的重要特征是,空间电荷分布密度峰值位于水树枝尖端附近,且正空间电荷密度峰值的最大值出现在108度附近,负峰值的最大值出现在288度左右,样品中的空间电荷密度近似与所施加电压的瞬态值成比例,并有一定的滞后效应。

从实验可以得出以下结论:多数空间电荷聚集在水树枝尖端;空间电荷密度随水树枝中的水分含量增加而上升;频率增加时含水较少的水树枝老化试样中的空间电荷密度减小,当水树枝中水分含量进一步减小时这种趋势更加明显;空间电荷的极性与水树枝长出侧的电极极性相同;总电荷量与所施加电压成正比。

2.1.5 XLPE 电缆内水树枝形成机理

XLPE电力电缆绝缘中,由制造环节进入的水和外界酸溶液、碱溶液或者潮湿侵入的水里都含有较多的水溶性导电离子。由介电电泳效应原理知,液体中介电常数较大的离子会向电场集中的地方运动,而其中XLPE的介电常数仅为2.3左

右，水的介电常数则是XLPE的三十五倍左右。因而在电场力作用下会导致水分向高场强区运动。

直流电场使溶解在水树枝微孔水分中的水溶性导电离子发生电离，沿着电场方向移动，聚集在水树枝微孔壁上形成离子型空间电荷。此时，由离子型空间电荷形成的内电场和外电场的方向一致。

许多学者均通过实验证实，XLPE为一种结晶态和非晶态共存的固体高聚物结构形式，在电缆绝缘生产过程中，聚乙烯分子交联过程及冷却过程均是从外层向缆芯进行，因而会在绝缘中的晶区与非晶区的界面以及非晶区内产生应力和微裂纹，上述的细微通道事实上就是这些微裂纹。在电缆运行期间，由于液压差的作用，绝缘中的固有微量水分和从电缆周围侵入的水分会在裂纹处浓缩为极小的水滴。在长期交变电场的作用下，沿电场方向的固体绝缘界面在周期性Maxwell电机机械应力反复作用及微孔内的氧化腐蚀作用下，充水微孔被逐渐沿电场方向拉长。微孔内的水分也会在Maxwell应力的作用下向沿电场方向与水滴相连的裂纹内注入。许多作者均通过实验证实，微孔壁及微裂纹内有羟基(-OH)，羧基(-COON)等极性端基存在，表明在水树枝引发和增长过程中，水树枝内有氧化降解反应产生，从而使得微孔壁由疏水性变成亲水性，水分易于沿微孔壁形成连续水膜，并使得整个水树枝的电导大为增加。图2-4为水树枝区的物质形态示意。

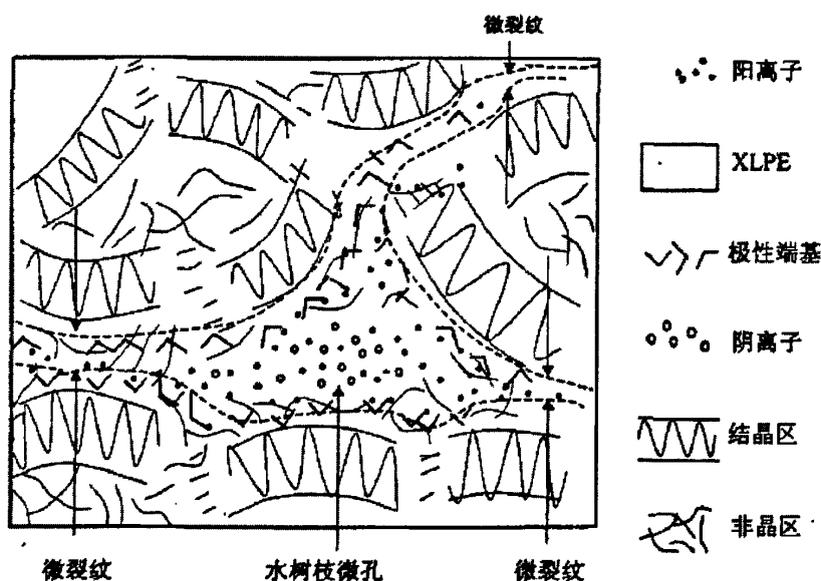


图 2-4 水树枝的微观物质形态示意图

因而,对水树枝的老化的 XLPE 电缆绝缘同时施加交直流电压,有望产生有利于电缆绝缘老化的协同激励效果,所产生的响应电流必然含有单一激励时不可能出现的电缆水树枝老化特征信息,从而使检测灵敏度大为提高,信号特征更为明显。这种与水树枝老化状态相关性较好的 XLPE 电缆绝缘现场无损检测技术,推动了电缆现场检测技术的发展。

2.2 XLPE 电缆绝缘监测方法及比较

总体来说, XLPE 电力电缆绝缘现场检测技术分为在线检测和离线检测两大类。经过多年的研制,现在已有的离线检测技术有直流成分法、直流高压泄漏电流法等。这些离线检测的共有特点是需要对电缆施加较高的直流电压。XLPE 电力电缆绝缘交流离线检测技术有谐波电流法、空间电荷检测法等,目前许多还正在研究阶段。其中高频谐波与背景噪音的分离有一定难度。但是,离线检测的最大劣势是需要停电检修。对于运营费用昂贵的电力系统来说,停电检修的成本和代价较高,也给国民生产带来极大的不便;电缆的水树枝是长周期、缓慢发展的一种绝缘老化行为,定期停电检修给连续运作的电力系统造成困难,不利于提高设备安全经济运行目标的实现。所以电缆的在线监测与故障诊断成为了更待解决的问题。

目前,对于 XLPE 电缆的在线监测已有多种方法提出,但这些方法大都是对电缆的绝缘信号的一种识别性研究,所进行的实验也多为实验室环境下的模拟仿真试验。即使少量投运到实际中的一些技术成果,也主要涉及低压电缆的在线监测,采取的方法为直流成分法和直流叠加法。对于 110 kV/220 kV 的高压电缆的研究却甚少,主要因为高压电缆的系统接地方式、检测电源的提供,及现场干扰对监测的影响等问题都没有很好的解决,并且单一的直流感也很难测准结构复杂的高压电缆的绝缘水平。但对于日益庞大的电力系统和城市现代化建设的发展,110 kV, 220 kV 级甚至 500 kV 高压电缆是今后发展的趋势,其绝缘水平的监测也是进行安全生产的必要保证。所以,要结合电力系统的实际情况和允许工作条件等因素,分析各种在线监测技术在实际电网系统中的技术难点和适用的电压等级。

2.2.1 直流法在线检测技术原理及方法

直流法可分为直流成分法和直流叠加法两种。直流成分法是指当 XLPE 电缆绝缘中存在水树枝等缺陷时,树枝尖端与接地电缆屏蔽层之间有类似于针板电极的整流效应。图 2-5 为其整流作用机理。

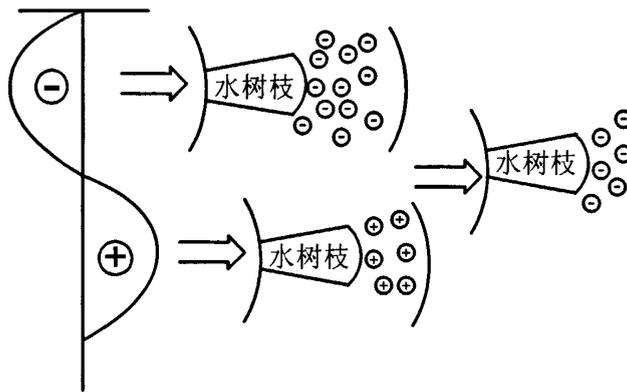


图 2-5 水树枝整流作用模型

在运行电压作用下，在电缆的绝缘体和内屏蔽层之间存在纳安级直流电流流过。直流法利用这个原理，在线测量绝缘体中流过的直流电流，即可进行绝缘诊断。

直流叠加法则是利用在接地的电抗器的中性点串接一个低电压直流电源（一般为直流几十伏），通过正接法和反接法来测量流过电缆绝缘层的电流，从而可以判断电缆的老化状况。该方法能够克服 XLPE 电缆长期使用后产生的化学电动势对直流成分法的影响。

采用直流法获知绝缘层内的水树枝老化造成的直流成分电流，进而综合测量结果来评估电缆绝缘的老化状态。电缆在非测量状态下，屏蔽层通过接地线进行接地来确保安全，而测量过程中，需要对电缆接地线进行断开操作，并串入测量仪器，这样，屏蔽层对地的电势和屏蔽的对地电阻（也就是电缆外护套绝缘电阻）组成的串联电路和测量装置形成了并联，影响了测量装置上通过的电流，与理想测量有偏差，造成测量误差。这里我们通过叠加电势的方法来测量和计算出这个影响因素，然后对测量结果进行修正。

直流成分法和直流叠加法的 XLPE 电缆在线检测系统的实际接线简图如图 2-6 所示，其中， T 为接地电压互感器， E_n 为直流叠加法的叠加电源， K_1 和 K_2 为常闭触头的接地开关， C_1 和 C_2 为用来保证交流接地的电容； K 同样为电缆一端屏蔽接地线上的常闭触头的接地开关，其两端并联电容用来保证交流接地；电缆护套绝缘电阻为 R_s ， E_s 为屏蔽接地的等效化学电势；仪器部分由滤波器，放大器，数码显示器部分、移动网无限通讯装置、操作系统及计算机智能化测试和分析系统等构成。

采用直流成分法时，需将图 2-6 中的在线检测装置串接于电缆屏蔽接地线上，然后断开 K 和 K_2 ， K_1 保持闭合，即可进行在线检测工作。安全电容的作用，一

是保证在线监测的安全性，与在线检测装置的输入保护装置一起构成多重保护；二是保证电缆屏蔽交流接地的可靠性。 C_2 可永久并接在 K_2 两端，亦可在仪器串入前接入。

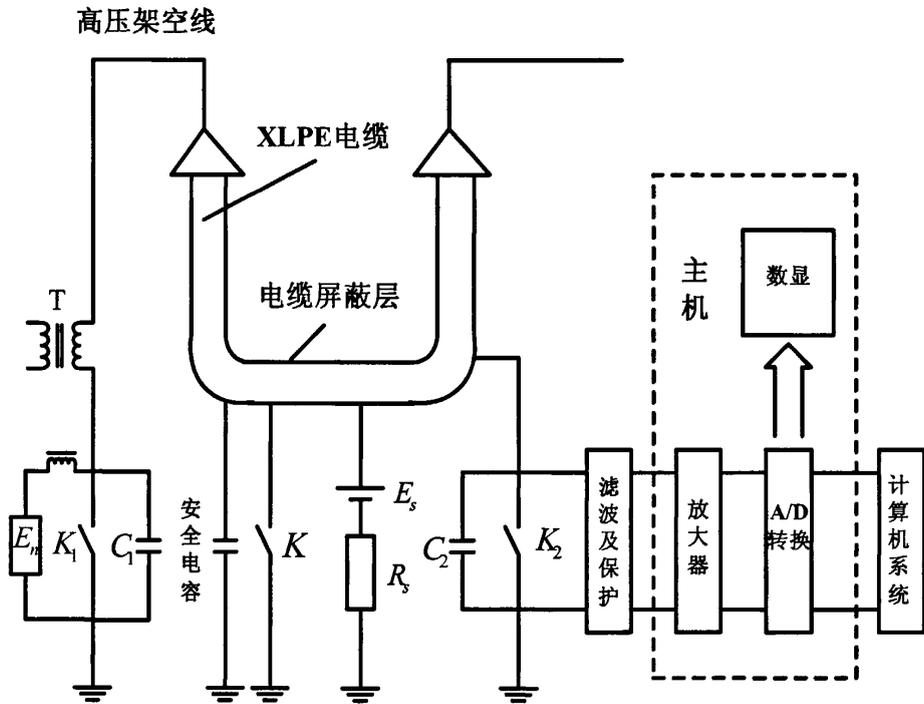


图 2-6 直流法 XLPE 电缆绝缘在线诊断原理

电缆护套绝缘电阻 R_s 和屏蔽接地化学电势 E_s 对直流成份法在线测试精度影响较大。装置中设计可随时对 E_s 和 R_s 进行在线检测的补偿电势机构，该电势同时可用以抵消 E_s 对在线检测的影响及其它杂散电流，显著提高仪器的抗干扰能力。还可在一定范围内选择放大器输入阻抗 R_i 的大小，从而为直流成分 I_d 测量值的有效性及精度判别以及修正提供了手段和参数。

2.2.2 介质损耗法

介质损耗法是测量线路电压与流经绝缘体的电流之间的相位差，即从电压互感器取出电压信号，从电流互感器获取流经电缆绝缘的工频电流，而后通过数字化的测量装置，测量二者相位差值，从而获得 $\tan \delta$ 。研究认为介质损耗角正切值的大小随电缆水树枝老化的程度增加而增加，在低频下电缆 $\tan \delta$ 与水树枝老

化状况有良好的相关性。

有关资料提出,当 $\tan \delta$ 大于 1% 时,绝缘可判断为不良。由此法得到的信息是反映绝缘缺陷的平均程度,也有研究者认为该方法只能反映电缆的吸水程度。

2.2.3 接地电流法

接地电流是表征绝缘状态的基本参数。由于测试方法比较简单,而测试结果又可靠有效,所以最早被用于监测电力设备的绝缘状态。

接地电流是指绝缘体在外加电压作用下通过的电流。以往在绝缘测试技术中,接地电流定义为:在直流电压下,通过绝缘体的稳定电流,但在线监测绝缘体性能多是在交流电压下进行的,故“接地电流”也包括了在交流电压下,通过绝缘体的工频及脉冲电流,要采用不同的采集方法。交流高电压下运行的设备,可在线监测交流接地电流;而电缆要测直流接地电流,要进行离线检测。

接地电流法是根据电力电缆伴随着水树枝老化会出现静电容量以及 $\tan \delta$ 增加的倾向,在接地线端进行电流测量的方法。XLPE 电缆主绝缘层在运行过程中将流过电容电流,在老化过程中其电容量将呈增加趋势,导致接地线电流增大,从接地线电流中提取蕴含电缆绝缘老化信息的参量,以此来综合评估绝缘的老化状况。

2.2.4 其他检测方法

交流叠加法是在 XLPE 电缆的运行电压上叠加一个交流高压电源,频率为 101 赫兹左右,检测此时的 1 赫兹的特征信号从而判断电缆老化的程度。研究表明当叠加的信号频率为 101.4 赫兹时,老化 XLPE 电缆将出现明显的特征电流;而在新电缆中不产生特征电流。

低频叠加法是在电缆的运行电压上叠加一个低频电源,检测此时电缆接地线中的低频电流。此时把电缆看成电缆电容的并联电路,当外加的电源为低频时流过电缆的容性电流较工频时的小得多,而阻性电流不变,比较容易分离。根据阻性电流的大小来判断绝缘老化的程度。

谐波分量法的原理就是根据在运行电压下由水树枝引发的老化 XLPE 电缆的损耗电流中的谐波分量来判断电缆老化程度。研究表明,由于水树枝的非线性伏安特性会产生谐波,随着电缆老化程度的增加,损耗电流的畸变就越严重,也就是电缆的谐波分量越来越大。损耗电流的谐波分量本身包含 XLPE 电缆水树枝的老化信息。

场致发光法是指在电树枝起始之前,聚合物中电场强度集中部位发射的光是一种特殊的场致发光。由于场致发光是在大量水树枝转化为电树枝之前发射出来

的, 由此可以判断聚合物材料出现老化。一旦电树枝开始, XLPE 电缆处于危险的运行状态。运用高灵敏度的光学设备可以检测 XLPE 电力电缆场致发光的波长、强度、色度等特征, 且按不同的场致发光起始电压测出光谱的强度和光学参数的关系来判断绝缘状况。加拿大成功在 500 kV 线路上应用。

局部放电法是指 XLPE 电缆在运行的故障前期, 有明显的局部放电特征信号。通过收集不同的局部放电特征信号, 分析局部放电信号中所携带的电缆老化信息来得到电缆的老化状态。同时建立数据库, 提出可靠的判别标准, 达到判断电缆老化状态和寿命的目的。

分布式光纤测温法是指分布式光纤电缆温度监测系统采用国际领先的分布式光纤温度测量(DTS)技术, 沿着每条电缆铺设探测光纤, 就可以连续的得到沿着高压电缆每一点的温度信息, 进而采用标准的电缆实时热模型(如 IEC60287)可以得到电缆的动态载流量的情况, 对于优化输配电资料和指导电力扩容有重要的意义。Sentinel-DTS 系列电缆监测系统可以实现单线最长 30 千米的在线监测, 同时可以精确定位热点。目前已经成功的在英国电力、法国电力等多个国家的项目中应用。

2.3 本章小结

以上方法中较为成熟和广泛应用的是直流叠加法和测量 $\tan \delta$ 。因为前者对于局部放电产生水树枝的故障比较敏感, 后者对电缆整体老化、受潮等反映显著。两者结合可以取得较好的绝缘诊断结果。目前已有两者联合的监测装置投入运行, 并积累了一定的报警判据。

国内亦有开始试用叠加直流分量监测, 如上海电缆研究所开发的直流成分法与直流叠加法在线监测电缆绝缘状况, 并已在宝钢试运行数年, 但目前尚未将该测试装置进行商业化运行。国内的各大高校包括西安交通大学、清华大学、浙江大学等也都在积极开发电缆在线监测设备和研究开发监测技术。包括直流成分电流和绝缘电阻测量以及损耗角正切的测量等, 取得一定成效。目前, 国内外已开发或研究中的 XLPE 电缆在线检测方法已有多种, 但真正进入实用的方法极少见。

历经多年的努力, 国内外已经探索出多种 XLPE 电缆在线检测技术。并都有投入了实际应用的例子。由于选取了不同的绝缘特征参量来得到电缆的老化信息, 所以各种检测技术有着不同的适用范围和特点。

许多方法处于不成熟的阶段, 有的没有足够的实验数据来支持(比如谐波电流法、场致发光法); 有的现场干扰严重, 很难从监测到的信息中分离出真实信

号(比如交流叠加法等)。但这些方法都有自己的特色,如果能够得到进一步的发展,克服方法中的缺点,就有可能成为有效的检测方法。且对于直流叠加法,电缆在非测量状态下,屏蔽层通过接地线进行接地来确保安全,而测量过程中,需要对电缆接地线进行断开操作,并串入测量仪器,所以必须研究切实可行的接地保护体系,并要求该保护体系在电缆屏蔽一旦升高到一定电压的时候,快速实现接地,减小危险系数。这需要对各种保护的動作电压,时间和動作特性进行详细研究。

第三章 残留电荷法的原理和实验系统的搭建

由第二章中分析可知,直流法、交流法、介质损耗法、局部放电法和谐波分量法都有现场干扰复杂,特征量难以提取的缺点,场致发光法、氧化特征法和高频频谱分析法的技术要求很高,难以实现,目前现行的检测方法都不是十分理想。本文考察了一种新型的XLPE电缆绝缘的监测方法——残留电荷法,该方法可以对电缆绝缘层绝缘水平进行有效评估。

3.1 水树枝的非线性

树枝老化是应用在高电场强度下XLPE材料的最主要老化方式,电树枝老化则是导致XLPE绝缘的高压电力电缆在运行中被击穿的最主要原因。水分和高电场共存是聚乙烯中引发水树枝的必要条件。由于在电气绝缘结构生产过程中不可避免出现诸如尖角、微孔及杂质等绝缘弱点,水树枝会在低于或等于绝缘工作场强的情况下引发和不断生长。最终在水树枝端部形成局部高电场,从而引发电树枝,进而导致绝缘击穿。已经证实,水树枝由一系列的纳米级微裂纹连接微米级微孔构成。研究发现,当水分在交变电场作用下进入微裂纹时,检测回路有谐波电流产生,此时水树枝是可见的;而在去除外加电场一定时间后,水树枝会因为自愈作用而消失。分析表明,水分进入或退出微裂纹时,会导致水树枝具有不同的电导,从而呈现出非线性绝缘电阻的特性。在交变电压作用下,由于水分子振动和Maxwell电机机械应力的作用使得水分及杂质离子易于沿电场方向首尾相接架成水桥,并随直流电场的增强,水树枝逐渐导通,从而造成试样的绝缘电阻随电压增加而下降,当电压施加到某一值时,绝缘电阻会发生突变,此时正是水分子进入或退出微裂纹时。如图3-1所示。

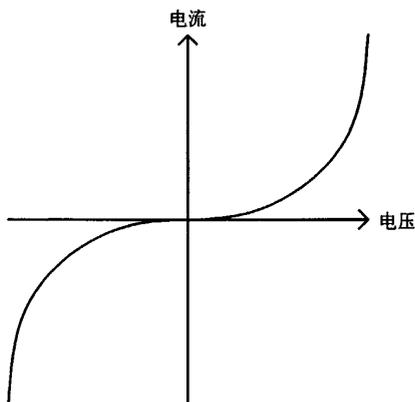


图 3-1 XLPE 绝缘电阻的 U-I 示意图

3.2 残留电荷法的原理

水树枝化 XLPE 绝缘中会出现两种空间电荷，一种为积聚于水树枝尖端的由水分电离离子和杂质离子构成的离子型电荷，此类空间电荷会随施加的交变电场作周期性振动，在较低电场下就会产生，电场消除或两电极短接时即会消除。另一类为在直流高电场下由水树枝尖端注入 XLPE 绝缘缺陷的陷阱空间电荷，其注入程度取决于电缆绝缘水树枝老化的程度；此类空间电荷即使在电极短接情况下也不会消除，在较高交变电场下或经对试样进行热处理才可能在短期内得以释放。此类电荷可以反映出电力电缆绝缘性能的好坏：电荷越多说明电缆绝缘性能越差，电荷越少则说明电缆绝缘性能越好。

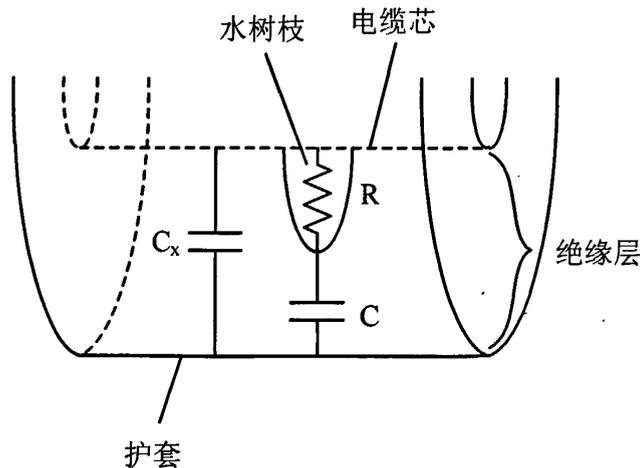


图 3-2 水树枝的等效电路

含水树枝的 XLPE 电缆绝缘层的等效电路如图 3-2 所示。其中，电阻 R 为水树枝的等效非线性电阻，其特性如图 3-1 所示； C 为含水树枝的部分绝缘层的等效电容； C_x 为不含水树枝的部分绝缘层的等效电容。

文献[48]发现：当对 XLPE 电力电缆进行直流充电后，电缆内部会产生上述两种电荷，如图 3-3 所示，其中在绝缘层表面的正、负电荷为第一类电荷，在绝缘层内部的负电荷为第二类电荷，假设第二类电荷量为 Q_0 ；在对电缆进行放电后，第一类电荷会完全消失，仅留下第二类电荷，如图 3-4 所示；在对电缆施加幅值变化的交流电压后，残留在电缆内部的第二类电荷放出，如图 3-5 所示。施加的交流电压波形如图 3-7 所示。

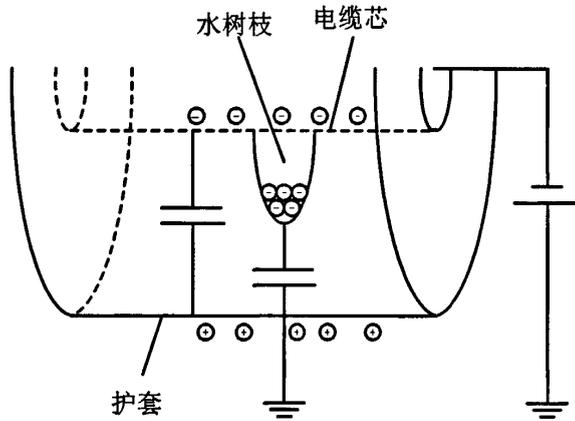


图 3-3 对电缆进行直流充电

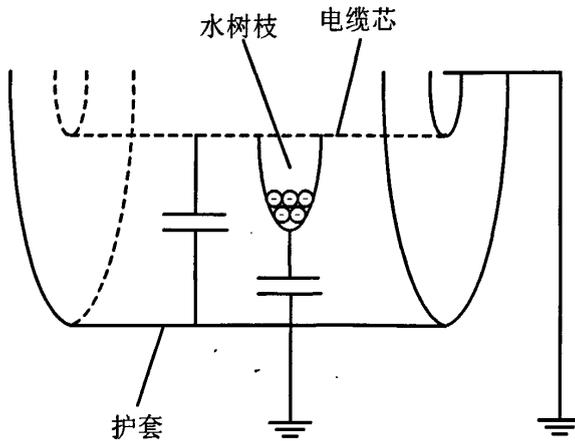


图 3-4 对电缆进行放电示意图

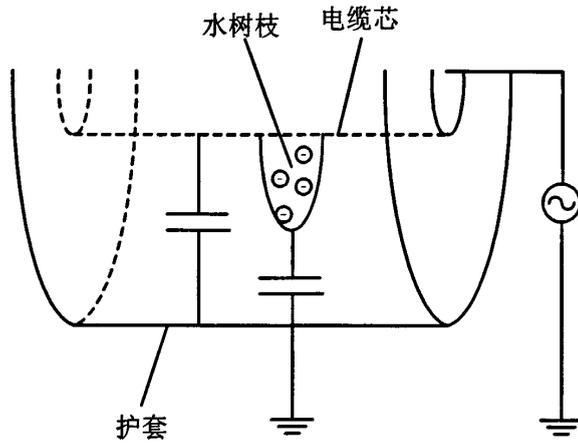


图 3-5 对电缆进行交流放电

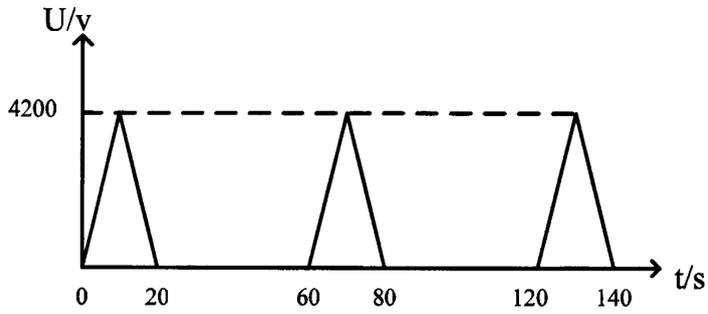


图 3-6 所加交流电压幅值波形示意图

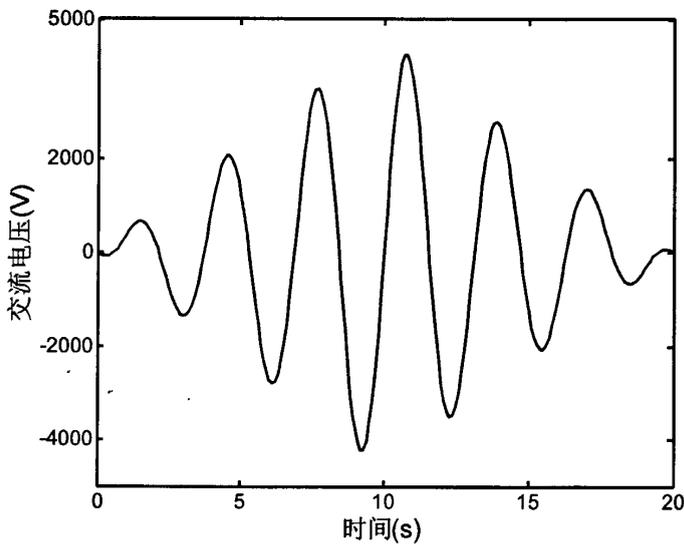


图 3-7 所加交流电压波形示意图

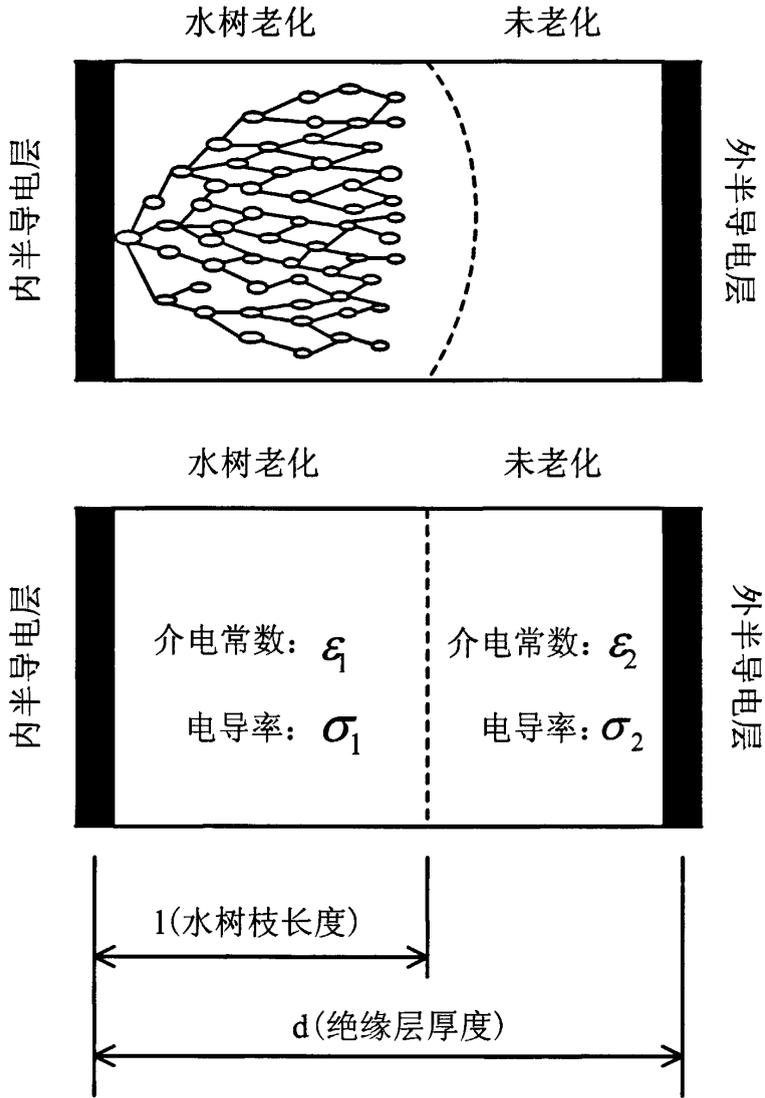


图 3-8 XLPE 电缆内双层绝缘模型

根据水树枝的等效电路，如图 3-8 所示，当第二类电荷释放时，其释放速度的快慢由时间常数 $\tau = RC$ 决定。设在电荷释放过程中，电缆内部残留的电荷量为 Q ，则根据电路可以推导出：

$$Q(t) = Q_0 \frac{(\epsilon_1 \sigma_1 - \epsilon_2 \sigma_2)(d-l)}{fg} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \right] = Q_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$$

其中： Q_0 为一个假设值，它不会影响残留电荷 Q 的减小速度；由于水树枝等效电容 C 不会随电缆承受电压的变化而变化，所以它不会影响残留电荷 Q 的减小速度；而由于水树枝的等效电阻 R 具有非线性，当电缆电压升高到某一值时，

电阻 R 会突然减小, 从而导致放电时间常数 $\tau = RC$ 也会随之突然减小, 电缆内部残留电荷会突然放出, 残留电荷量 Q 会突然减小。

由此可见, 通过观察电缆绝缘中残留电荷量 Q 的变化趋势, 可以判断出电缆内部水树枝的等效电阻随交流电压的变化情况, 进而可以判断出电缆内部水树枝的生长情况: 当残留电荷量 Q 缓慢减小时, 说明水树枝的等效电阻 R 非线性程度不高, 电缆内部水树枝生长程度很轻, 绝缘层绝缘性能较好; 当残留电荷量 Q 快速减小时, 说明水树枝的等效电阻 R 非线性程度很高, 电缆内部水树枝生长程度很严重, 绝缘层绝缘性能很差。其次, 通过 Q_0 也可以判断出电缆绝缘层绝缘性能的优劣: Q_0 大, 说明电缆内水树枝多而长, 电缆绝缘层的绝缘性能很差; 相反, Q_0 小, 则说明电缆内水树枝少而短, 电缆绝缘层的绝缘性能很好。由此可见, 通过综合观察 Q_0 的大小和残留电荷量 Q 的变化趋势, 可以判断出电缆绝缘层绝缘性能的优劣。

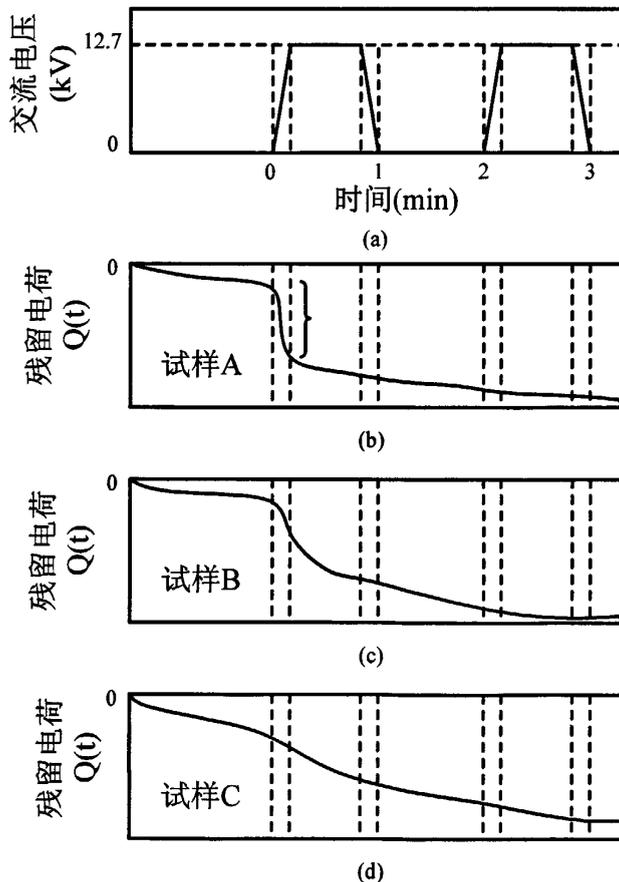


图 3-9 交流电压下残留电荷时间特性

图 3-9 为交流电压下交联聚乙烯电缆中残留电荷随时间变化特性。图 3-9(a) 为所施加交流电压形式，图 3-9(b)~(d) 为老化程度不同的电缆残留电荷特性。当交流电压第一次升高时，试样 A 中残留电荷释放速度最快，B 中其次，C 中最慢。结果显示，试样 A 中水树劣化程度最严重；试样 B 中水树劣化程度一般；试样 C 中水树劣化程度较轻。说明通过比较交流电压第一次升高时，电荷的泄漏速度和电荷量可以判断电缆水树的老化程度。

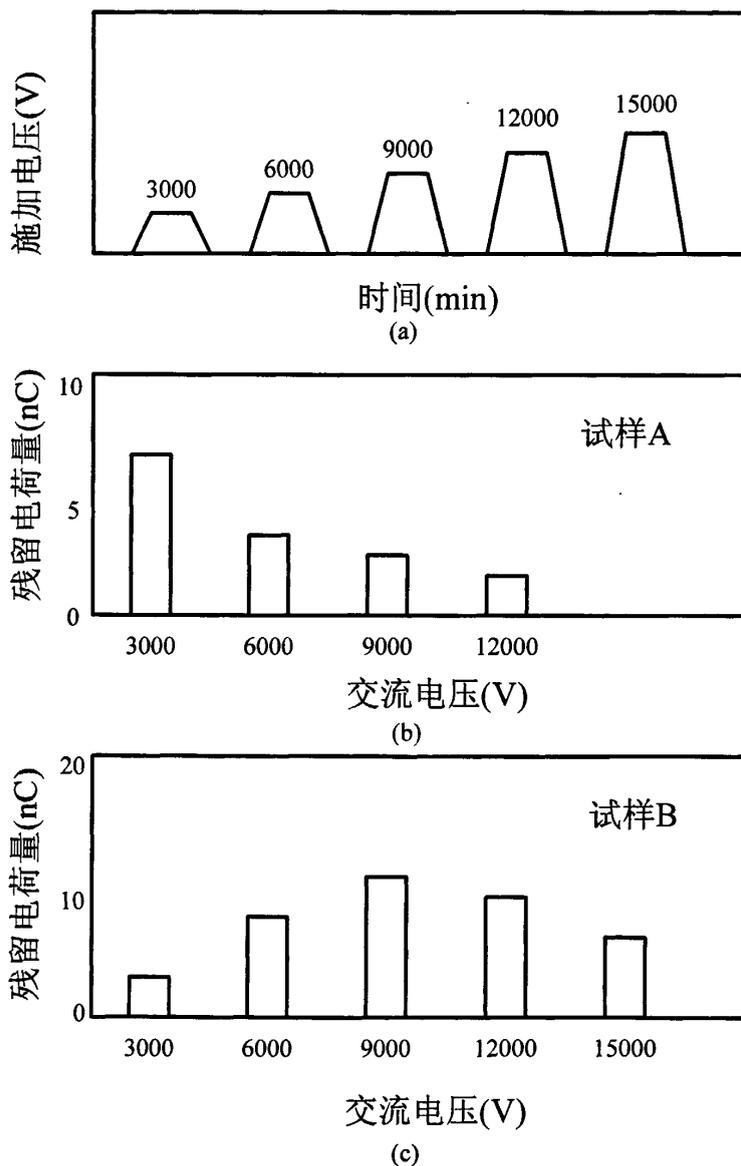


图 3-10 不同交流电压下残留电荷特性

图 3-10 为改进的残留电荷法。图 3-10(a)为施加交流电压的形式，与图 3-9(a)不同，交流电压幅值随时间延长而增大，而每个施压单元电压上升时间和下降时间都相同。在此电压作用下，电缆试样 A 的残留电荷特性曲线如图 3-10(b)所示，随交流电压幅值的增大，泄漏电荷量逐渐减小；电缆试样 B 的残留电荷特性曲线如图 3-10(c)所示，随交流电压幅值的增大，泄漏电荷量先增大后减小。在施加电压达到 9000 V 时达到最大值，约 10 nC。对比图 3-10(b)和(c)可知，试样 A 中残留电荷量少，试样 A 的水树老化程度低于试样 B。此外，泄漏的残留电荷量依赖于所施加的交流电压幅值。

3.3 残留电荷法的影响因素

残留电荷法包括三个部分：直流电源充电部分；接地放电部分；施加交流电源，残留电荷释放部分。

采用不同电压对电缆进行相同时间的充电，所得到的最终结果略有不同。文献[47]对含有水树枝的 XLPE 电缆切片进行实验，结果如图 3-11 所示，随着施加直流电压的增大，残留电荷量增加。随着水树老化程度的加剧，电荷量增大的幅度也加剧。因此，合理选择施加直流电压的幅值对获取显著的残留电荷信息意义重大。需要注意的是，施加直流电压会向电缆绝缘层注入电荷，空间电荷的引入会加速电缆绝缘的老化。因此，直流电压的施加时间不宜过长，文献[47]中采用的施压时间不超过 10 min。

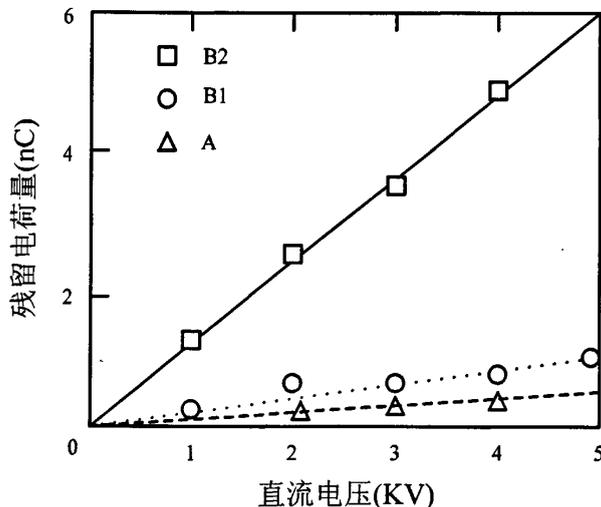


图 3-11 直流电压特性

文献[47]考察了残留电荷量与接地放电时间的关系,结果如图 3-12 所示。随着接地时间从 1 min 延长至 10 min,残留电荷量基本不变。说明接地时间对下一步测量过程的影响并不大。

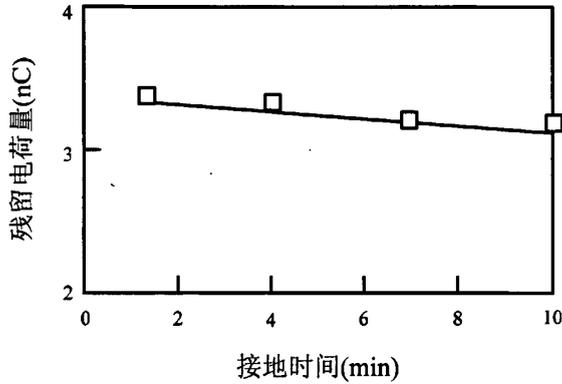


图 3-12 接地时间的影响

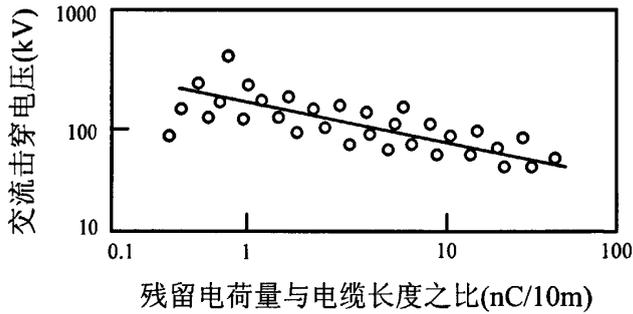


图 3-13 残留电荷量与交流击穿电压的关系

文献[48]考察了电缆长度、残留电荷量与交流击穿电压之间的关系,结果如图 3-13 所示。随着残留电荷量与电缆长度比值的变大,交流击穿电压随之变大。说明电缆长度越长,残留电荷量越大。

文献[47]对含有水树枝的 XLPE 电缆切片进行实验,得到了不同幅值和不同频率的交流电源对残留电荷量的影响,结果如图 3-14 所示。其中,虚线表示交流电压为 2 kV,实线表示交流电压为 1 kV。随着交流电压频率的增加,残留电荷量增大。施加的交流电压幅值越大,残留电荷量越大。结果显示,合理选择施加交流电压的幅值和频率能够使残留电荷法的效果更显著。本文的实验装置如图 3-7 所示。

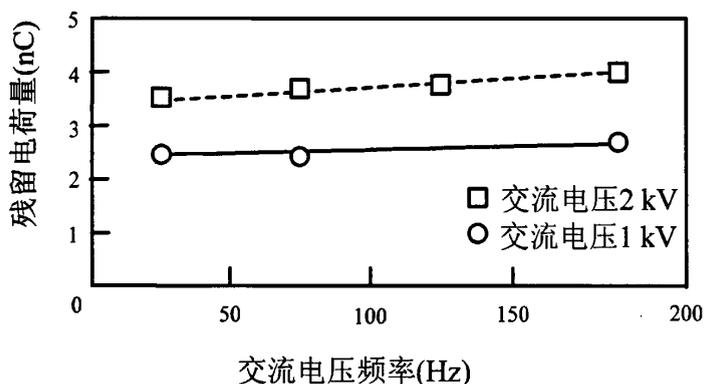


图 3-14 交流电压频率和幅值的影响

3.4 实验线路及实验装置

本文开发的基于残留电荷法的实验系统如图 3-15 所示。其中，高压直流电源为天津市东文高压电源厂生产的 DW-N403-2AC 型高压电源，输出电压范围为 0 至-50 kV，实验采用-3 kV 对电缆进行充电；高压交流电源由试验变压器提供，该变压器由上海电机厂生产的型号为 TDGK 调压器控制，调压器的输出范围为 AC 0~250 V，实验采用 4200 V 和 50 Hz 的交流电源。

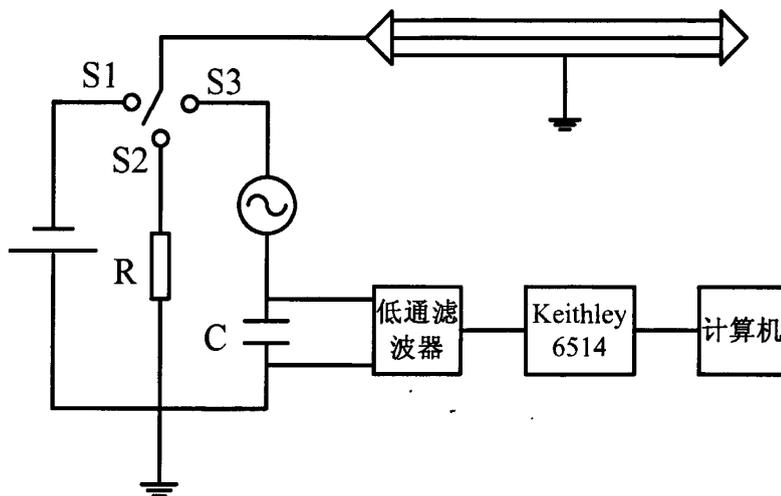


图 3-15 实验线路示意图

为得到如图 3-7 所示的电压波形，本试验采用时间继电器和磁电式继电器对电机进行定时开关操作，继电器定时电路如图 3-16 所示。其中，KT1、KT2、KT3 和 KT4 为时间继电器，K1 和 K2 为磁电式继电器。KT1 和 KT2 的时间延迟定为 10 s，KT3 和 KT4 的时间延迟分别定为 40 s 和 20 s；电机的三相交流电采用 K1 和 K2 控制，K1 控制电机正转，K2 控制电机反转。这样就可以让电机正转 10 s，然后反转 10 s，再停止 40 s，如此循环下去，最终得到的交流电压幅值如图 3-6 所示，其交流电压最大值为 4200 V，每个周期为 60 s。

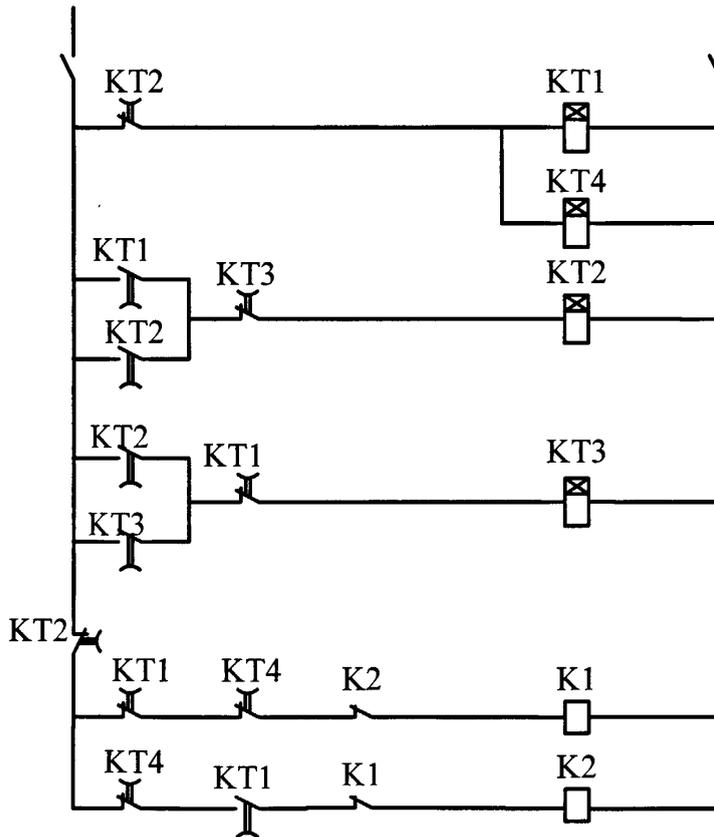


图 3-16 继电器定时电路

采样电容的选择受电缆绝缘参数的影响。电容量过小则耦合的电压值过大，使得有效信号被噪声所淹没，分辨率降低。因此，电容值宜取较大值。本试验采用的电容 C 为 $80\ \mu F$ ，其耐压值为 500 V。

试验采用低通滤波器屏蔽电磁干扰。采用直流运算放大器 op295 搭建的低通滤波电路如图 3-17 所示， R_1 、 R_2 和 R_3 均为 $10\ k\Omega$ ，电容 C 由两个 $470\ \mu F$ 的电

容并联组成，滤波器增益为 2，截至频率为 10 Hz。

实验步骤如下：首先闭合 S1 断开 S2 和 S3，对电缆施加直流充电；然后断开 S1 闭合 S2，使感应电荷沿线泄漏到地；最后断开 S1 和 S2 闭合 S3，对电缆施加交流电压，令其内部的残留电荷释放，通过检测电容 C 两端的电压来获取电缆内部残留电荷量及其释放速度。

本试验中电荷的变化量是通过电容 C 反映出来的。在电缆内残留电荷释放的过程中，这些电荷会通过交流高压电源积聚在电容 C 上，通过测量该电容上的电压波形就可通过公式 $Q = CU$ 算出残留电荷量并可获取其释放速度。

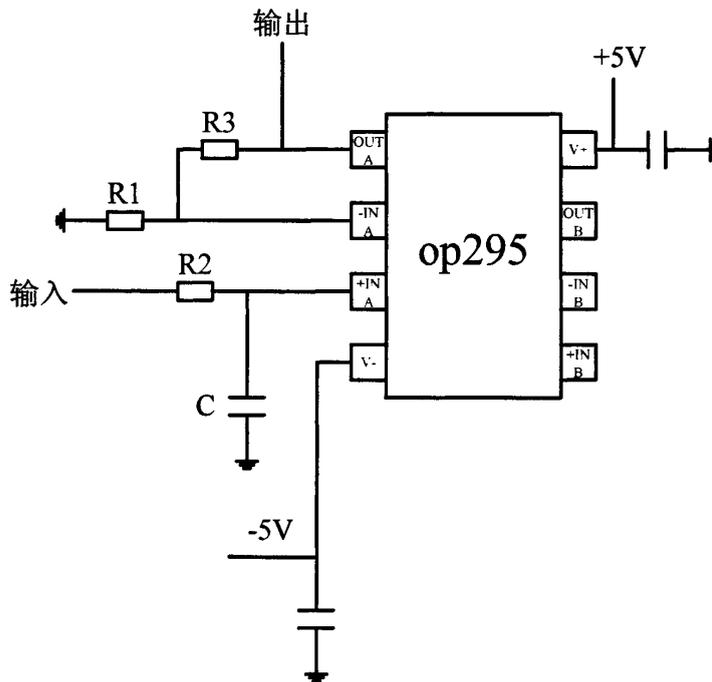


图 3-17 低通滤波电路图

本试验测取 XLPE 电力电缆的介质损耗角正切值作为辅助分析。介损的测量基于如图 3-18 所示的电桥平衡原理。

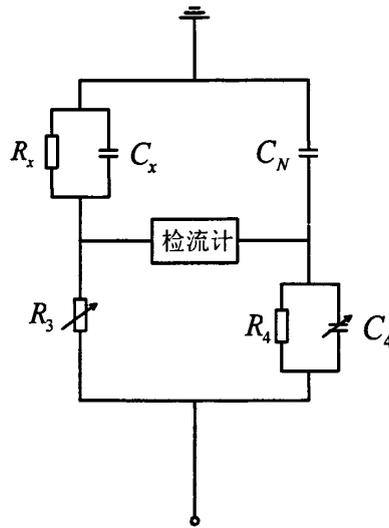


图 3-18 电桥平衡原理

当满足公式

$$\frac{Z_1}{Z_3} = \frac{Z_2}{Z_4}$$

时，检流计读数为零，此时

$$\tan \delta = \omega R_4 C_4$$

其中 $Z_1 = R_x // C_x$ ， $Z_2 = C_N$ ， $Z_3 = R_3$ ， $Z_4 = R_4 // C_4$ 。本试验采用山东泛华电子科技有限公司生产的 AI-6000 型自动抗干扰精密介质损耗测量仪。其电容量范围：内置高压 3 pF~60000 pF/10 kV，60 pF~1 μF/0.5 kV，分辨率：最高 0.001 pF，4 位有效数。试验采用反接线法，施加电压为 1 kV，频率为 50 Hz。

3.5 本章小结

本章首先介绍了水树枝等效电阻的非线性这一重要特征，提出了含有水树枝电缆的等效电路，分析了水树枝内电荷的种类和运动规律；然后根据等效电阻的非线性，详细阐述了残留电荷法的原理和各种影响因素；最后描述了本文中所采用的实验系统和各种实验装置。

第四章 基于残留电荷法的 XLPE 电缆内水树枝劣化程度分析

水树枝老化是造成XLPE电缆在运行中被击穿的主要原因,在绝缘中存在缺陷、微孔和水分的前提下,由于缺陷或微孔处的电场畸变,会导致在较低的电压下引发水树枝。水树枝的生长相对较慢,但伴随水树枝生长,水树枝尖端的电场将愈加集中,局部高电场强度最终会导致水树枝尖端产生电树枝。电树枝一旦形成,即可能造成电缆绝缘层在短期内被击穿。目前,人们判断XLPE电缆内水树枝劣化程度的方法还比较少,常用的方法还是切片观察,如何采用很有效的方法对XLPE电缆内水树枝劣化程度进行判断是本研究领域的难点。在本试验中,利用水树枝电阻的非线性特征,在对电缆充电后对其残留在电缆内部的电荷进行释放,通过其释放电荷量的大小和速度来对电缆绝缘层的好坏做出比较准确的评价。

4.1 实验试样

本实验中所用的为武汉高压研究所提供的 10 kV 交联聚乙烯电缆,共 12 根。将这 12 根电缆分别编号为#2、#4、#8、#12、#14、#15、#16、#17、#19、#20、#22 和#23,他们线芯材料均为铝,导体截面积为 75 mm^2 ,绝缘层厚度为 5 mm,长度从 4 米到 8 米不等。实验前将电缆两端半导电层剥去 15 厘米。

4.2 试验数据及其分析

4.2.1 介质损耗角正切值的测量

采用介损仪分别对 12 根进行介质损耗角正切值的测量,结果如表 4-1 所示。在实验过程中电缆#4、#12 和#20 发生击穿现象,表明电缆绝缘老化程度非常严重,经过测量其绝缘电阻分别为 $4.7 \text{ k}\Omega$ 、 $3.54 \text{ k}\Omega$ 和 $0.2 \text{ k}\Omega$ 。

表 4-1 介质损耗正切值

电缆编号	#14	#15	#22	#16	#17	#2	#19	#8	#23
$\tan \delta$ (%)	0.031	0.024	0.041	0.014	0.010	0.014	0.084	0.070	0.019

结果显示,除#8和#19外,各电缆介质损耗值都在0.05%以下,无法判断出这六根电缆绝缘老化的情况,需要结合残留电荷法的结果进行综合判断。

4.2.2 残留电荷法的试验结果

施加交流斜坡电压后,获取的典型残留电荷信息如图 4-1 所示。在前 30 秒内,继电器开关处于“闲置”状态,并未对电缆施压,因此,泄漏电荷幅值变化不大。在 35 s 至 55 s 期间施加斜坡交流电压时,泄漏电荷量连续增大至约 240 nC。随后,停止施压 40 s。在此期间,累积于采样电容上的电荷向电缆反向充电,此时电容电压下降,泄漏电荷量减少。当施加第二组斜坡交流电压时,如图 4-1 中 $t=95$ s 处所示,泄漏电荷量增大。与此类似,在 $t=135$ s 附近,泄漏电荷量再次增大。表明在施加交流斜坡电压时,残留电荷不断向电容充电,而在停止施压时,电容电荷又向电缆反向充电。两类电荷的相互作用,形成了如图 4-1 所示的残留电荷特性图。其中,施加第一组斜坡交流电压时,残留电荷泄漏速度可以较好的表示残留电荷的特征。

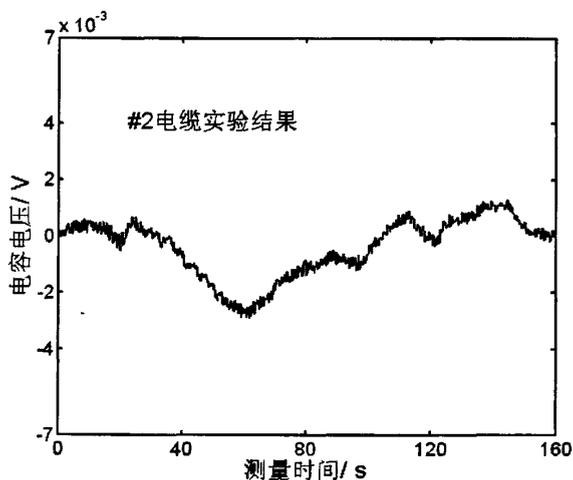


图 4-1 #2 电缆的试验结果

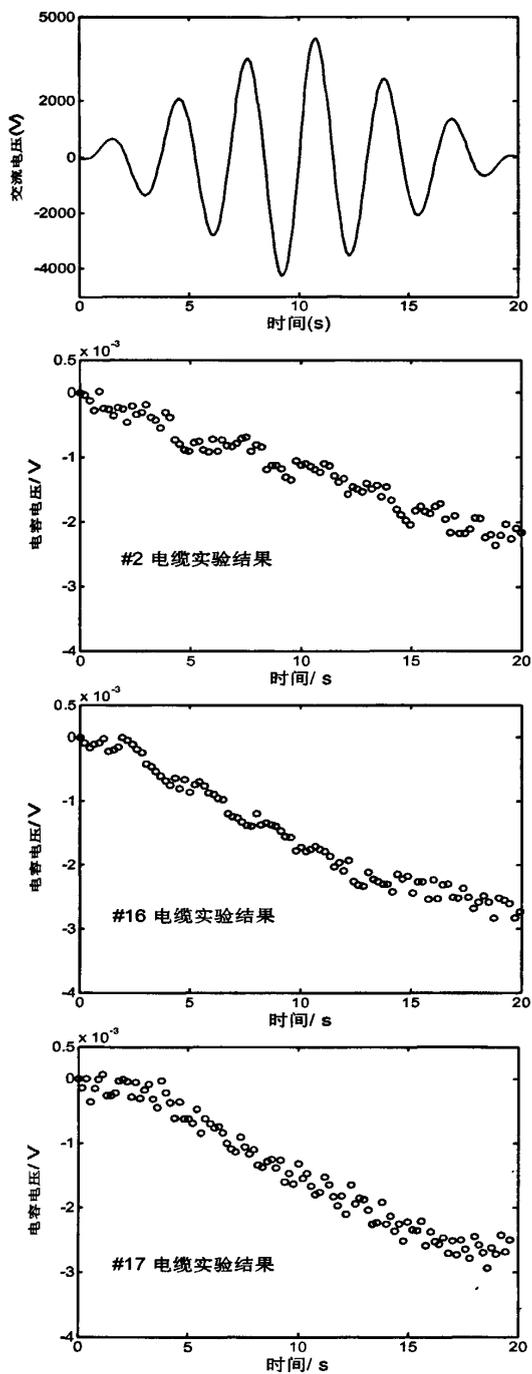


图 4-2 #2、#16、#17 电缆残留电荷特性

#2、#16、#17 这三根电缆在施加第一个斜坡交流电压后泄漏电荷特性如图 4-2 所示。这三根电缆残留电荷量下降的速率分别为 9.2 nC/s, 11.2nC/s, 12 nC/s, 即这三根电缆内部残留电荷释放的速度相差不大, 据此可以判断出, 这三根电缆内部绝缘层的水树老化水平相近。

#14、#15、#22 三根电缆在施加第一个斜坡交流电压后泄漏电荷特性如图 4-3 所示。这三根电缆残留电荷量下降的速率分别为 6 nC/s, 6.4 nC/s, 3.2 nC/s, 即这三根电缆内部残留电荷释放的速度接近, 据此可以判断出, 这三根电缆内部绝缘层的水树老化水平相近。

如图 4-4 所示, #8、#19 这两根电缆在进行实验后, 残留电荷下降速率分别为 16 nC/s, 20nC/s。残留电荷量首次下降的速率相差不大, 说明这两根电缆内部绝缘层的绝缘水平相近。

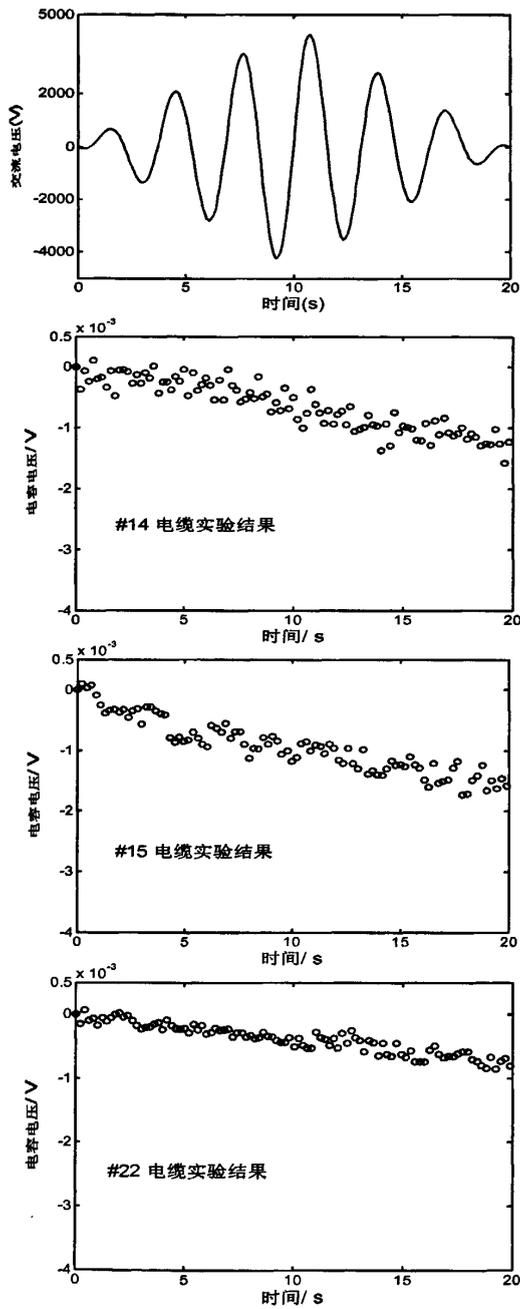


图 4-3 #14、#15、#22 电缆残留电荷特性

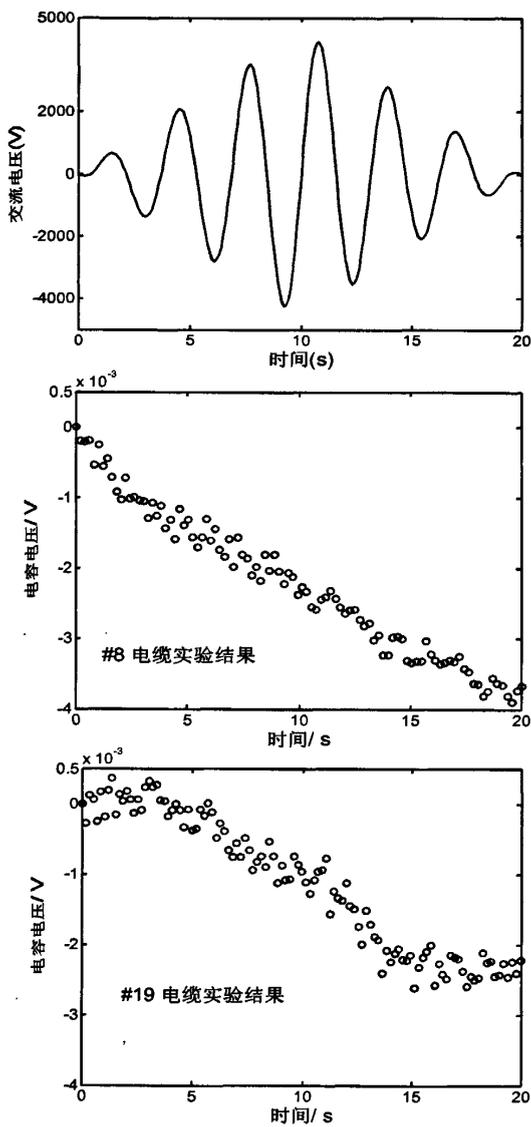


图 4-4 #8 #19 电缆残留电荷特性

试验中，当对电缆#4，#12，#20，#23 施压时，发生击穿，试验无法继续进行，其老化程度最严重。通过对比上述三组实验结果可知，#8 和#19 的水树老化程度强于#2，#16，#17；#14，#15，#22 水树老化程度最轻。

通过考察上述 8 根电缆样品的介质损耗，同样可以将电缆划分成三组，如表 4-2 所示。

表 4-2 按介质损耗的电缆老化分类

组别	电缆编号	介质损耗
A	#2, #16, #17, #23	<0.02%
B	#14, #15, #22	0.02~0.05%
C	#8, #19	>0.07%

其中, C 组电缆样品的介质损耗明显大于其它组, 表明其劣化最严重, 与残留电荷法分析的结果一致。A 组和 B 组的介质损耗值均小于 0.05%, 说明其绝缘性能相差不大, 但是通过残留电荷法可以清晰判断出 B 组水树老化的严重程度低于 A 组, 这表明介质损耗不能作为有效区分水树枝老化程度的工具。此外, #23 的介质损耗值为 0.019%, 表明其绝缘电阻并未明显降低。而采用残留电荷法试验时出现放电现象, 可能是由于在加压过程中, 某些老化严重的水树枝尖端产生电树并导致击穿所引起。综上所述, 介质损耗的测量仅能粗略的对电缆绝缘的老化状态进行评估, 而残留电荷法则可以更加有效的分析电缆水树老化的程度。

4.3 本章小结

本章采用残留电荷法对 10 kV XLPE 电缆的水树老化程度进行评估, 并结合介质损耗法分析各种评定方法的优缺点。结果显示, 对电缆绝缘水平进行评价时, 介质损耗法只能区分出绝缘水平差别较大的电缆, 无法对绝缘水平相近的电缆进行判断。而本文采用的残留电荷法可针对不同绝缘水平的电缆进行判断, 且效果明显。本章提出采用施加交流斜坡电源时残留电荷泄漏的速率来对电缆样品进行分类, 其结果同采用介质损耗法进行的分类结果具有较好的相关性。

第五章 总结

5.1 全文总结

XLPE电力电缆具有极佳的电气性能,极易敷设和极佳的抗老化特性等优点,如今已被广泛用于输电线路当中。在其绝缘中存在缺陷、微孔和水分的前提下,因缺陷或微孔处的电场畸变,会导致在较低的电压下引发水树枝。水树枝的生长相对较慢,伴随水树枝生长,水树枝尖端的电场将愈加集中,局部高电场最终会导致水树枝尖端产生电树枝。电树枝一旦形成,即可能造成电缆绝缘在短期内被击穿。因此,考察水树枝的生长过程及检测方法对保障电力电缆的可靠运行具有重要的理论意义和实用价值。

本文针对水树枝的结构模型和生长原理,基于水树枝的非线性电阻特征,建立了基于残留电荷法的水树老化诊断系统。结合介质损耗法,对12根XLPE电缆的老化状态进行评估。提出采用施加第一组交流斜坡电压时残留电荷的泄漏速率来表征电缆老化特性。实验结果表明:残留电荷法和介质损耗法对于诊断电缆的老化程度具有一定的相关性。其中,介质损耗法适用于对电缆的老化程度进行初步评定,而残留电荷法则可以进一步确定电缆的水树老化程度。

5.2 研究展望

通过本文的分析,残留电荷法可以应用到实际电缆检测当中。以往的检测方法大多是将电缆施加高压,然后在电缆放电点附近切片并观察水树枝生长的情况,属于破坏性实验。残留电荷法不必对电缆进行破坏性试验即可检测出电缆内部水树枝的生长情况,有利于节约资源和资金,对电力部门的维护工作提供了较大的方便。

在今后的研究中,以下几条是需要改进和特别注意的:

(1) 本试验全部在实验室完成,欲将试验方法工程实用化,在硬件方面还需要做如下改进。

首先,本文中直流电源的功率较小,对于长度较短的电缆样品来说可以完成试验,但在实际工程中,电缆长度一般在几公里,低功率的直流电源难以使电缆充分带电。因此,只有增大直流电源的功率才能满足实际工程中的需求。

其次,实验室中的噪声形式单一且幅值较小,采用一阶低通滤波器即可获得较好的滤波效果。现场中的干扰较大,欲提取可靠的残留电荷信号,需不断改进低通滤波器的结构,优化参数,并进行大量现场调试。

此外,本文采用的交流高压源由三部分构成:继电器控制部分、调压器和试验变压器。采用的国产继电器,响应时间较慢,所产生的交流斜坡电压波形随试验时间有微小畸变,可能会对试验结果产生影响。宜开发精确度较高,且幅值及频率均可调的斜坡电压源,以备今后试验所用。

(2) 从施压方式上看,残留电荷法也有需要改进的地方。如论文第三章所述,对于水树老化程度不同的电缆,连续施加幅值增大的交流斜坡电压时,其残留电荷量值的变化趋势差异很大。这有利于工程实际中的诊断。今后的试验中,可调整所施电压的波形,如其频率,上升时间及下降时间,如图 5-1 所示;可调整斜坡电压的施加方法,如图 5-2 所示。以图获得更为显著的残留电荷特征。

(3) 残留电荷法虽然能够较好地分辨低压电缆水树老化的程度,但是却无法对水树老化程度严重的薄弱点进行有效定位。近年来,文献[49]提出了一种水树枝定位的新方法。其原理为:在雷电等过电压的作用下,水树枝的尖端可能产生电树枝,电树枝的生长伴随着局部放电现象。通过测试上述局部放电源并定位,即可找到水树的薄弱点。武田等人给出了上述试验的原理图和试验方法,并验证了其有效性。开展水树定位,是对残留电荷法的进一步发展,对电力工程中的现场诊断,有着重要的意义。

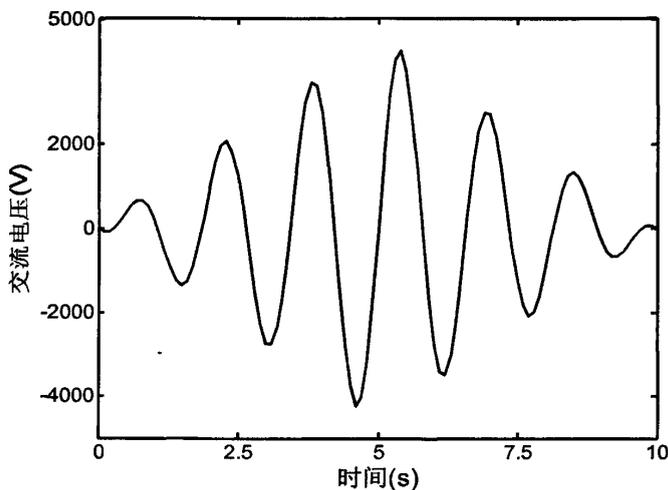


图 5-1 频率改变的交流电压波形

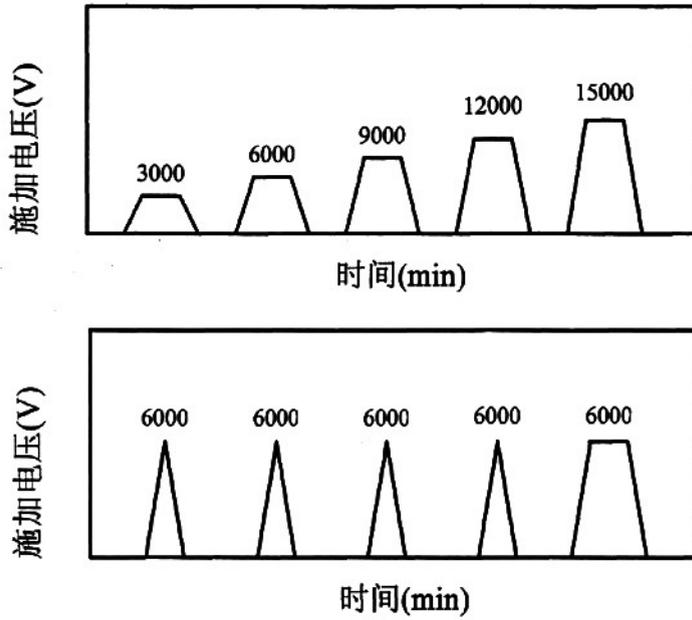


图 5-2 调整的斜坡电压



图 5-3 水树老化定位系统

(4) 电缆附件的老化研究。经验表明，电力电缆的绝缘系统出现故障的概率远小于电缆附件出现故障的概率。附件包括电缆中间接头和电缆终端。对附件所使用的绝缘材料，如硅橡胶，环氧树脂等进行老化研究对认识电缆附件老化机理，合理设计附件有着重要的意义。

参考文献

- [1]蒋佩南, 中高压交联电缆的研究和应用, 广东电缆技术, 2001(2): 6~11
- [2]应启良, 面临二十一世纪我国超高压与特高压电力电缆发展预期, 中国电工技术学会电线电缆专委会 98 学术年会论文集, 海南, 1999, 223~231
- [3]M. Ruedi and U. Rengel, Practical Application of New Cable Technology, Swiss Electro -Technical Association, 1998, S422R
- [4]江日洪, 交联聚乙烯电力电缆线路, 中国电力出版社(第一版), 1997: 7~12
- [5]M. Hoof and R. Paisch, Characteristics of Partial Discharge Pulse Sequences during Electrical Treeing in Polyethylene, 9th International Symposium on High Voltage Engineering, Graz, 1995, 5606
- [6]朱宝宗, 高压交联聚乙烯电力电缆及生产, 电线电缆, 1998, (3): 2~6
- [7]黄其励, 21 世纪电力发展的必由之路——高效、环保及可持续性发展, 国际电力, 2001,(1): 4~9
- [8]朱德恒, 严璋, 高电压绝缘, 清华大学出版社(第一版), 1992: 200~232
- [9]张重午, 日本住友公司的在线运行电缆监测仪, 电线电缆, 1994, (1): 33~40
- [10]江日洪, 周良才, 农业和工矿电网中的高电压技术, 北京, 机械工业出版社, 1985
- [11]江日洪, 城网供电, 武汉, 中国地质大学出版社, 1991
- [12]郑肇骥, 王琨明, 高压电缆线路, 北京, 清华大学出版社, 1985
- [13]朱德恒, 严璋, 高电压绝缘, 北京, 清华大学出版社, 1992
- [14]王昌长, 郑光辉等, 电力电容器的可靠性评估和失效分析, 清华大学学报, 1991, 31(4): 107~112
- [15]王晓林, 施围等, 电缆出线的限流电抗器上的过电压, 高电压技术, 1993(2): 13~17
- [16]解广润, 过电压及保护, 北京, 水利电力出版社, 1980
- [17]朱德恒, 谈克雄, 电绝缘诊断技术, 北京, 中国电力出版社, 1999
- [18]电力工业部, 电力设备预防性试验规程, 北京, 中国电力出版社, 1997
- [19]马家炯, 王秉均, 高压架空线及电缆网络中的过电压及其防护, 北京, 中国电力出版社, 1996
- [20]张纬跋, 高玉明, 电力系统过电压与绝缘配合, 北京, 清华大学出版社, 1988

- [21]陈守植, XLPE 电力电缆线芯屏蔽层的可靠性, 高电压技术, 1995(3): 57~59
- [22]蒋佩南, 额定电压 35kv 及以下铜芯、铝芯塑料电力电缆, 北京, 中国标准出版社, 1991
- [23]陈秀丹, 刘子玉, 电解质物理学, 北京, 机械工业出版社, 1982
- [24]高小庆, 姜芸等, XLPE 电力电缆过负荷温升与早期损坏机理的研究, 高电压技术, 1997(2): 62~64
- [25]董振亚, 电力系统的过电压保护, 北京, 中国电力出版社, 1997
- [26]张仁豫等, 高电压试验技术, 北京, 清华大学出版社, 1990
- [27]S. Yamaguchi, 交联聚乙烯配电电缆的改进和电缆带电监测设备, 第十届国际供电会议论文集, 1989, 141~128
- [28]L. H. Zhong, etc., The State of Insulation Middle Voltage Cable and life Diagnosis, ICMEP2000, Wuhan, China
- [29]A. Boubakeur, A. Medjdoub, etc. Influence of Thermal Aging on Properties Cross-Linked Polyethylene Used as Insulation Medium Voltage Cables, ISH97, Quebec, Canada
- [30]S. S. Bamji, A. T. Auminski, etc. Electroluminescence due to Impulse Voltage in Unaged and Aged XLPE, ISH97, Quebec, Canada
- [31]Daniel Pepper, Wilfried Kalkner, PD Measurements on Typical Defects on XLPE-insulated Cables at Variable Frequencies, ISH97, Quebec, Canada
- [32]菜丹宙, 周汉亮, 江斌, 交联聚乙烯电缆绝缘的在线诊断及其仪器, 电线电缆, 1996,(4): 23~26
- [33]E. Moreau and A. Boudet., A Comparison between Water Tree Structure in Laboratory Specimen and in Cable., Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Tokyo, 1991,232~235
- [34]Z. H. Fan, N. Yoshimura and M. Yanagiwara, The Research on Microstructure of Water Trees in Polyethylene, Proceedings and Applications of Dielectric Materials, 1994, 1, 440~443
- [35]S. V. Nicolajevic, The influence of the Water on Water Absorption and Density of XLPE Cable Insulation, IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(2):297~303
- [36]C. Katz and M. Walker, Evaluation of Service Aged 35KV TR-XLPE URD Cables. IEEE.Transactions on Power Delivery, 1998, 3(1):1~5
- [37]I. C. Finippini, Y. Poggi and C. J. Long, Influence of Ions on the Growth of Water Trees, Second International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Beijing, 1988, 507~510

- [38]H. M. Li, Association between Ion-ion Interaction in Solution and Water Tree Degradation of Polymeric Electrical Insulation, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1991, 24(8):1436~1442
- [39]Jean-Pierre Crine, Electrical, Chemical and Mechanical Processes in Water-treeing, *IEEE Transactions on Dielectric and Insulation*, 1998, 5:681~693
- [40]A. Garton, J. H. Groeger and J. L. Henry, Ionic Impurities in Cross-Linked Polyethylene Cable Insulation, *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, 1990, 25(2):427~437
- [41]P. F. Hinrichsen, A. Houdayer and G. Kajrys, ect., Comparison of NAA and Micro-PLXE for Impurity Detection in Water Trees Grown in XLPE Cables, *IEE Proceedings A: Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and education*, 1990, 137(5), 255~260
- [42]J. Y. Koo, Effect of Physics-Chemical Factors on the Propagation of Water- Trees in Polyethylene, *IEEE Trans. Dielectric and Insulation*, 1983, 19(3):217~219
- [43] H. Kon, Y. Suzuoki, T. Mizutani, ect., Packet-Like Space Charges and Condition Current in Polyethylene Cable Insulation, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1996, 3(3):380~385
- [44]Y. Li, J. Kawai, Y. Ebinuma, ect., Three-Dimensional Space Charge Distribution in Water Tree Tip Using the Pulsed Electroacoustic Method, *9th International Symposium on Dielectrics*, Shanghai, 1996, 217~222
- [45]屠德民, 直流耐压试验对交联聚乙烯电缆绝缘的危害性, *电线电缆*, 1997,(5): 33~40
- [46]宮島和久, 今博之, 渡辺和夫, 内田克己, 新規残留電荷法による CV ケーブルの水トリー劣化診断, *電学論 B*, 2005, 125(2): 199~205
- [47]海老沼康光, 増井典明, 水トリー劣化の残留電荷法残留とその測定法の検討, *電学論 A*, 2005, 127(2): 108~114
- [48]大高巖等. 短時間電圧昇降を用いた直読式残留電荷法による CV ケーブルの水トリー劣化診断. *電学論 B*, 2006, 126(4): 452-459.
- [49]Kiyoka Suenaga, Katsumi Uchida and Naohiro Hozumi. Location of Water Tree Degraded Point Along XLPE Cable Line Using DC Voltage. In: *Proceedings of 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*. Beijing China, 2008. 1224~1227

发表论文和科研情况说明

发表的论文:

- [1] 刘彦君, 高宇, 杜伯学, “聚萘二甲酸丁二醇酯表面电荷迁移与消散过程分析”, 《中国电机工程学会高电压专委会学术年会》, 2007年12月

致 谢

本论文的工作是在我的导师杜伯学教授的悉心指导下完成的，杜伯学教授严谨的治学态度和科学的工作方法给了我极大的帮助和影响。在此衷心感谢三年来杜伯学老师对我的关心和指导。

杜伯学教授悉心指导我们完成了实验室的科研工作，在学习上和生活上都给予了我很大的关心和帮助，在此向杜伯学老师表示衷心的感谢。

杜伯学教授对于我的科研工作和论文都提出了许多的宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

在实验室工作及撰写论文期间，高宇、古亮等师兄对我论文的研究工作给予了热情帮助。在两年的研究生学习期间，高宇、古亮等师兄在学习、生活等方面给予我很多的帮助，在此向他们表达我的感激之情。同时也向其他所有帮助过我的师兄和同学表示衷心的感谢。

另外也感谢我的父母及家人，他们的理解和支持使我能够在学校专心完成我的学业。