

大长度高压直流电缆中电荷的产生、测量及释放研究综述

王洁铭¹, 刘巧珏¹, 崔智桐², 蔡致坤³, 胡武生⁴

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 211106; 2. 台达电子企业管理(上海)有限公司, 上海 201209; 3. 上海华为技术有限公司, 上海 201206; 4. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要: 碳减排作为能源转型的核心驱动力之一, 能够有效促进清洁能源发展, 缓解全球温室效应。在全球能源互联网发展的背景之下, 用于长距离、跨地区输电的大长度直流电缆在电力互联网中占据着重要地位。同时, 直流电缆工作时间较长, 维护工作较为困难, 而电缆中又不可避免会出现电荷积累问题, 其中的残余电荷将威胁电缆的安全运行, 降低电缆的使用寿命, 甚至可能造成电缆故障。因此, 有必要对大长度直流电缆的电荷问题开展相关研究。从直流电缆中电荷的产生、测量和释放3个方面进行概述, 总结了近年来相关研究中的热点问题, 对未来热门研究方向给出参考。所做研究对大长度直流电缆的在线监测和寿命评估均具有重要的指导意义。

关键词: 高压直流电缆; 老化; 空间电荷; 表面电荷

中图分类号: TM 851 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2024)01-0050-09

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240108

Review on Charge Generation, Measurement and Dissipation in Large-length HVDC Cable

WANG Jieming¹, LIU Qiaoju¹, CUI Zhitong², CAI Zhikun³, HU Wusheng⁴

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, Jiangsu, China; 2. Delta Electronics (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201209, China; 3. Shanghai Huawei Technologies Co., Ltd., Shanghai 201206, China; 4. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, Jiangsu, China)

Abstract: Carbon emission reduction, as one of the core drivers of energy transformation, can effectively promote clean energy development and mitigate global greenhouse effect. In the context of the development of global energy internet, large-length HVDC cables for long-distance and cross-regional power transmission occupy an essential position in power internet. However, the accumulation of electric charges in large-length HVDC cables is inevitable, and would threaten the safe operation of cables, reduce their service life and might even cause insulation fault. Therefore, it is necessary to study the electric charges in large-length HVDC cables. A brief overview of electric charge generation, measurement and release in HVDC cables is provided, and the important research issues in recent years are summarized, which has important guiding significance for both online monitoring and life assessment of large-length HVDC cables.

Key words: HVDC cables; ageing; space charge; surface charge

0 引言

随着化石燃料资源日益紧张, 环境污染问题愈发显著, 可持续发展已经成为世界能源发展的主题。2016年, 中国提出了构建全球能源互联网的倡议,

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(NS2023013); 国家自然科学基金青年项目(51907089); 江苏省自然科学基金青年项目(BK20190421)

即在国与国之间的电能互补基础上, 构建一个多能协调、资源优化配置的全球性平台。大长度直流电缆因其传输能量大, 可实现长距离跨区域输电的优势, 在能源互联网输电工程中占据着重要地位^[1-2]。随着海上新能源的开发, 大长度直流海底电缆在直流输电领域的地位也逐渐提升^[3], 已成为近年来国内外研究热点。

大长度直流电缆在运行过程中, 电荷是威胁其

安全可靠运行的关键因素之一。电荷会造成直流电缆的绝缘老化、使用寿命缩短^[4],甚至可能造成线路故障,对电力系统造成巨大危害^[5]。通常,电荷聚集初期容易造成电缆老化,而温度、充放电次数以及使用时间都是电缆老化的影响因素。研究表明,随着温度的升高,电缆的击穿强度下降,电荷积聚程度提高^[6];多次充放电形成的电老化会使电缆绝缘产生更深层次的陷阱,进而更加剧了电荷的积累^[7]。同理,随着电缆使用时间的增加,绝缘热氧化老化程度增加,绝缘结晶度降低,从而导致陷阱深度的增加^[8]。

当电荷积聚到一定程度后,还有可能发生局部放电,甚至导致电缆出现运行故障。通常,当电荷积聚造成局部场强提高到正常场强的数十倍时,不仅会出现局部放电现象,还会造成不可逆的树枝状绝缘劣化,并进一步加剧电荷积聚。当局部电场强度超过介质的击穿场强时,亦或局部电场与其他附加电场或外施工频电场叠加时,都会造成绝缘击穿,进而引发电力事故^[9]。

综上所述,电缆长时间运行不可避免会出现电荷积累及绝缘老化,而电荷积累反过来又会加剧老化。因此,如何减少电荷积累、准确测量并且及时采取措施释放残留电荷,对于保障大长度直流电缆的安全运行、延长电缆使用寿命至关重要。基于近年来国内外研究学者所取得的研究成果,下面将从电荷的产生机理、测量方法及电荷释放三方面进行综述,并对未来大长度直流电缆的研究方向进行探讨。

1 电荷产生机理

通常,在大长度直流电缆中存在的电荷包括表面电荷和空间电荷,其中,表面电荷一般分布在绝缘层的外表面^[10],空间电荷一般存在于绝缘材料内部的杂质附近^[11]。

电缆绝缘中产生表面电荷的途径可分为接触式和非接触式。其中,接触式主要是指由金属电极向材料表面注入电荷以及绝缘材料和气隙之间摩擦产生电荷;非接触式主要是指由电晕放电产生的带电粒子的迁移和积聚^[12]。固体绝缘中表面电荷的形成机理如图1(a)所示^[13]。当绝缘材料受到高压电极极化后,电荷被注入在绝缘表面,这些电荷在切向电场的作用下向低压电极移动。开始时高压电极附

近电荷量较大,当绝缘周围气体发生电离时,气体电离产生的负离子会中和电极附近的部分电荷,使远离电极处的电荷残留在绝缘表面。

电缆绝缘内部空间电荷来源主要包括两种,如图1(b)所示^[14]:一种是场致发射的载流子被绝缘中的陷阱捕获所形成的空间电荷,也被称为同极性电荷;另一种是在电场较低的情况下,绝缘材料内部的杂质电离后产生离子,而离子迁移后形成空间电荷,这类电荷也被称为异极性电荷。

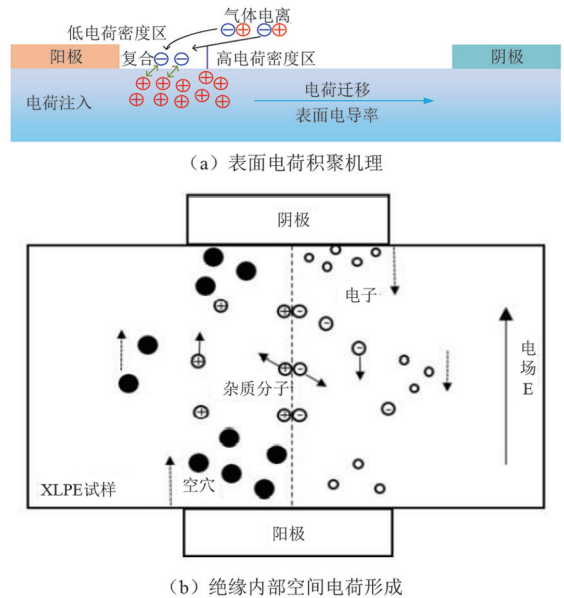


图1 固体绝缘中的表面电荷和空间电荷

通常,空间电荷产生于靠近电极的位置,随着电缆运行时间的增加,绝缘材料的结晶度逐渐降低,陷阱能量密度逐渐增加,这时空间电荷会残留在电缆绝缘内部而非靠近电极^[15]。电荷陷阱的形成原因主要包括运行过程中电缆绝缘的物理变化和受热发生的化学变化,杂质、介质聚合物链的断裂、不同原子组合成新的化学键以及运行过程中形成的绝缘水树枝等都会吸附周围环境中的电荷^[16]。其中,水树枝在电缆运行过程中是不可避免的,主要和电缆长时间运行达到的老化程度有关,并且这个过程是不可逆的。文献[17]通过对带有针孔缺陷的交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)绝缘电缆反复充放电进行加速老化,观察到不同老化时间绝缘水树枝形态,如图2所示。该研究发现,电缆内部由于电老化造成水树面积不断增大,每次充放电都会造成空间电荷残留在水树枝中,导致水树部分的电场发生畸变,会吸引更多的电荷聚集,造成空间电荷的积累加剧。

此外,直流电缆内部空间电荷的积聚和电缆运

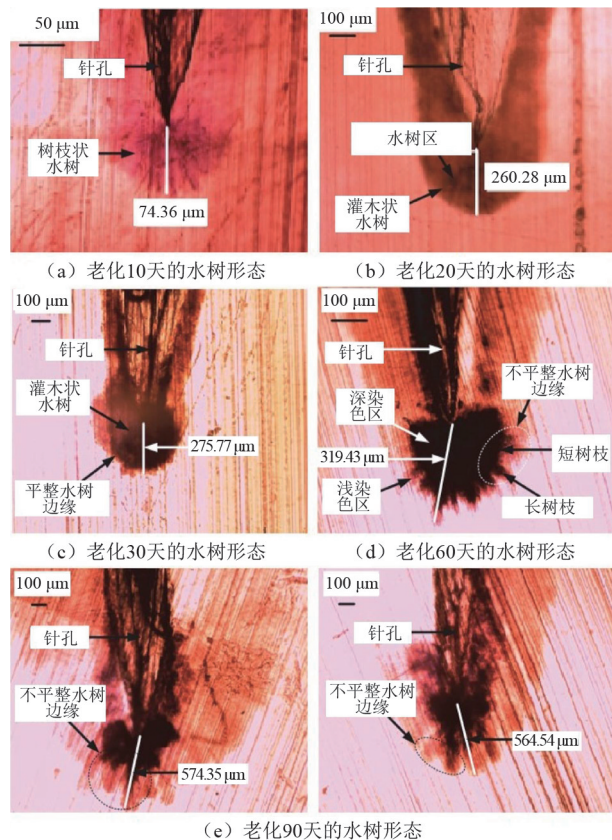


图 2 不同老化时期的绝缘水树形态^[17]

行时的环境温度有关,不同温度下空间电荷的积聚现象不同。文献[18]的研究表明,空间电荷积聚和电荷迁移率有关,在运行初始阶段由于外部环境温度较低,电荷迁移率很低,容易出现空间电荷包,空间电荷大量积累;而当电缆运行一段时间后,环境温度升高,此时电荷迁移率增加,空间电荷包数量减少,积累的空间电荷也会相应地减少。

最后,在不同绝缘介质的交界面将会出现空间电荷积聚现象。根据 Maxwell-Wagner 理论,这种现象主要是由介电常数与电导率之比(ϵ_r/ρ)不连续造成的。该比值越大,空间电荷积累程度就越大^[19-20],这也对电缆的制造、加工工艺提出了更高要求。

通常,电缆与电缆附件的交界面处 ϵ_r/ρ 最大,空间电荷积累最严重,因此主绝缘和附件之间的配合是抑制空间电荷的关键^[21]。文献[22]研究了多种绝缘材料复合电缆的界面空间电荷特性,所用的两种绝缘材料复合电缆截面及各自在 25 °C 下的空间电荷分布如图 3 所示。结果表明,造成空间电荷在不同材料界面处聚集的原因是界面处的电场畸变,其本质是两种材料的电导率和相对介电常数存在差异。由于电缆的老化不可避免且不可逆,以目

前的技术水平无法限制绝缘陷阱吸附电荷,只能采取技术手段改善空间电荷积累程度。

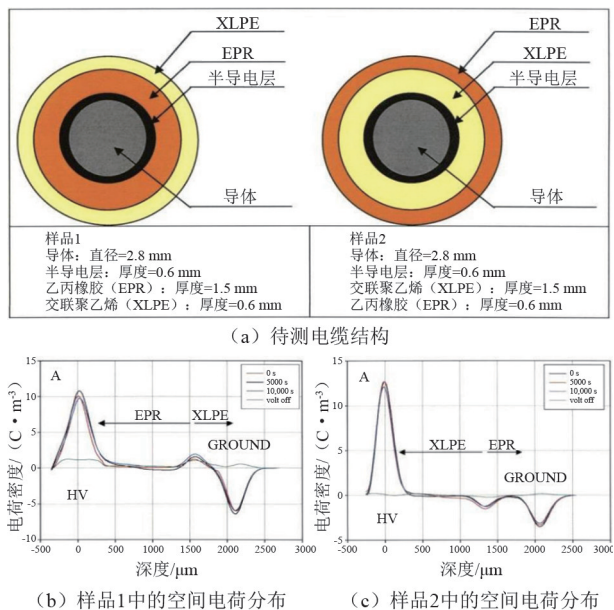


图 3 电缆样品的空间电荷分布(25 °C、29 kV/mm)^[22]

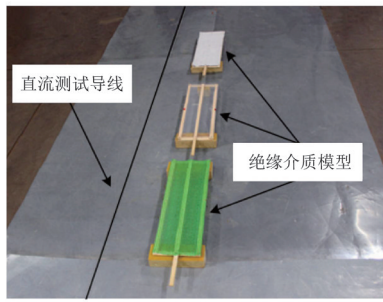
综上所述,虽然表面电荷和空间电荷在位置和成因上有所差别,但是二者之间也有如下共同点:首先,在实际高压直流电缆的运行中,电荷的产生是不可避免的;其次,电荷的产生与电缆的运行状态、所处的电磁环境、温度等因素息息相关。因此,为了避免电缆中的电荷造成不必要的危害,准确测量电荷量并及时消散电荷是至关重要的。

2 电荷测量方法

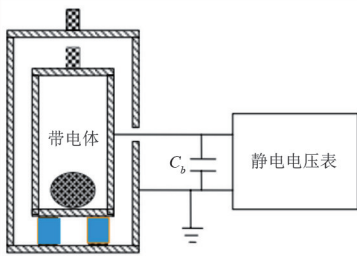
2.1 总电荷测量方法

总电荷一般是指单位长度电缆所积累的电荷量,反映了整根电缆中剩余的电荷总量,包括空间电荷量和表面电荷量。通常,表面电荷分布相对均匀,可以通过感应法进行测量。文献[23]基于电磁感应原理,采用法拉第笼测量了直流导线通电后 3 种绝缘材料表面电荷量,得到了不同绝缘材料对电荷捕获能力的差异,实验装置和测量原理如图 4 所示。该方法虽然具有原理简单、计算方便等优点,但也有局限性。面对大尺寸的高压直流电缆,法拉第笼尺寸受限,且由于每段电缆工作环境存在差异,测量结果不能反映电缆运行时的实际带电程度。

对于空间电荷来说,可以采用热刺激电流法(thermally stimulated current, TSC)进行测量,该方法广泛应用于绝缘材料的极化程度和陷阱能级测



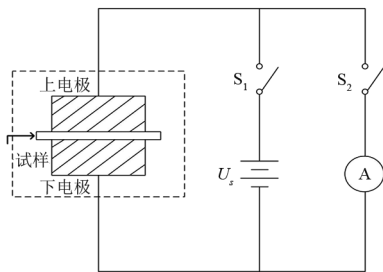
(a) 实验装置



(b) 法拉第笼测量原理

图 4 感应法测量表面电荷的装置及原理^[23]

量^[24]。TSC 法测量空间电荷量的原理是利用温度刺激使被俘获在绝缘陷阱的空间电荷释放出来,再通过测量迁移电流获得空间电荷量。实际测量中,一般先测量待测绝缘材料受激发的去极化电流,再对电流-温度曲线图积分得到所测试样的空间电荷量^[25]。TSC 测试系统原理如图 5 所示^[26],先闭合开关 S_1 使试样极化,极化完成后迅速将试样冷却;待冷却完毕后断开开关 S_1 ,闭合开关 S_2 ,同时对试样进行升温并测量短路电流,电流计外接计算机,利用温度和电流数据得到 TSC 曲线。该方法的优点是简单实用,但是由于通过实验测到的电流不仅包含脱陷电荷所形成的电流,还包含偶极子和界面极化电荷所形成的电流,因此无法精准测量绝缘内部的空间电荷量。

图 5 TSC 测试系统原理^[26]

2.2 电荷密度的测量

相比于总电荷测量,电荷密度测量更关注于局部电荷聚集的程度,在工程应用中具有十分重要的地位。电荷密度的测量分为表面电荷的测量和空间

电荷的测量。固体绝缘中表面电荷的测量方法主要是表面电位计法和粉末图形法,二者对比如表 1 所示。其中,表面电位计法是使用静电计利用高斯定理进行电荷测量^[27],表面电位计包括静电容静电计、动电容静电计、反馈式静电计^[28]。粉末图形法基于电荷异性相吸原理,将混合后的白色滑石粉和红色过氧化铁粉末撒在介质表面,振动后形成电荷图像^[29]。1978 年,N.Ando 在通电后的电缆截面喷洒粉末,得到了 XLPE 绝缘电缆截面的电荷分布情况^[30]。

表 1 表面电荷测量方法特点

方法	优点	缺点
表面电位计法	操作简单 平台搭建方便	存在电荷泄露问题 测量精度低
粉末图形法	实验装置简单 测量结果直观 可操作性强	对电缆绝缘的表面 电荷无法进行在线 测量

由表 1 可知,利用表面电位计和粉末图对电缆表面电荷密度测量均存在局限性。为了保证较高的测量精度,表面电位计在操作时应保证介质和电极表面良好接触。粉末图形法在测量时会对电缆造成破坏,无法做到对电缆电荷分布的实时监测,但是该方法经过改进,在其他电力设备的表面电荷测量中得到应用。文献[31]对在不同绝缘气体和气压下工作的带电绝缘子喷洒粉末,观测到绝缘表面的电荷积聚现象,同时也观察到绝缘子表面的电场畸变现象,如图 6 所示。

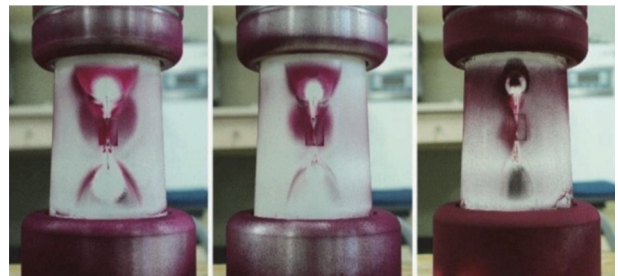
(a) N_2 , 0 MPa (b) N_2 , 0.2 MPa (c) SF_6 , 0 MPa

图 6 粉末图形法测量绝缘子表面电荷分布

在测量电缆内部空间电荷方面,当前主流方法是压力波法、电声脉冲法以及热脉冲法。其中,压力波法使用阶跃压力波或脉冲压力波进行测量,利用压力波在介质中不均匀变化产生开路电压或短路电流,间接获得空间电荷密度;该方法要求前置放大器和主放大器频带宽、噪声低、分辨率高、信号畸变小^[32]。电声脉冲法是在试样上加直流矩形脉冲,使介质-电极交界面产生应力脉冲波,最后通过压

电换能器接收声信号以计算空间电荷密度分布^[33]。热脉冲法基本原理与压力波法相同,利用光脉冲照射金属电极会产生热脉冲,在脉冲传播时产生不均匀变化,检测电路中产生的电压或电流信号^[34]。

3种测量方法的特点如表2所示^[35-37]。由表2可知,相较于热脉冲法,电声脉冲法和压力波法的精确度更高,且不会对样品造成破坏,在测量时满足相关要求即可获得准确的空间电荷分布。而热脉冲法在操作和数据处理方面还存在不足之处,仍需要改进。因此,电声脉冲法和压力波法是当前应用最广泛的两种电荷测量方法。文献[38]利用电声脉冲法和压力波法对规格相同的电缆中的空间电荷进行测量,原理如图7所示。通过实验对比可知,电声脉冲法测量空间电荷的信号微弱,高温下电缆空间电荷测量困难;压力波法测量空间电荷的信号较强,适合于厚电缆绝缘中空间电荷的测量。

表2 3种空间电荷测量方法对比

方法	优点	缺点
电声脉冲法	无损测量 简单方便 信号分析简单	电压等级要求较高 不适合厚绝缘测量
压力波法	无损测量 简单方便	噪声干扰较大 易受环境影响
热脉冲法	操作简单 响应速度快	信号处理复杂 试样发生化学变化 测量精度低

随着计算机技术的日新月异,其在数据获取、理论计算和仿真模拟方面具有极大的优越性。在实验时,既可以利用计算机进行数据采集和后处理,显著提高实验效率;也可以利用计算机进行数值模拟,预测实验现象,降低实验成本,提高容错率。

在电缆空间电荷分布以及电场分析预测方面,文献[39]建立了电导率模型和双极电荷传输模型,利用有限元仿真结合电场和热场影响得到了和实验结果相一致的仿真结果,如图8(a)所示,验证了双极电荷传输模型在高压电缆空间电荷分布研究中的适用性,利用仿真可以代替复杂的实验过程。文献[40]通过建立双极电荷传输模型,利用有限元法模拟了不同激励下的电荷积聚程度,得到了不同时刻的空间电荷分布,如图8(b)、(c)所示,在直观展示绝缘内部空间电荷密度分布的同时,还显著提高了研究效率。文献[41]建立了一种电缆寿命计算模型,设计了一款专门计算电缆寿命的软件,可对在役电缆进行实时监测,保证电缆的安全稳定运行。

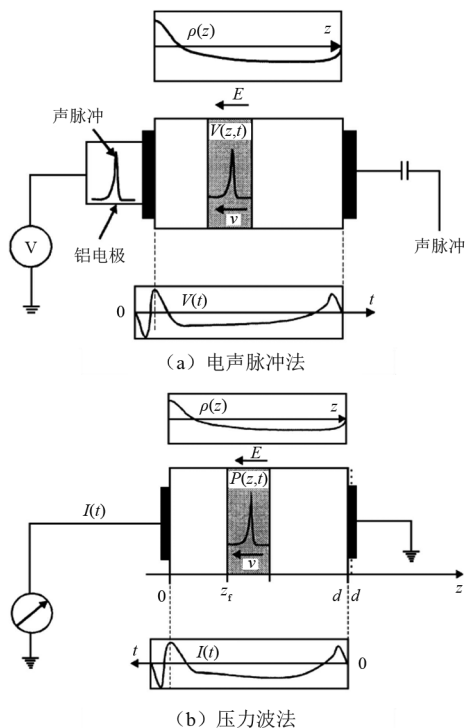


图7 电缆空间电荷测量方法^[38]

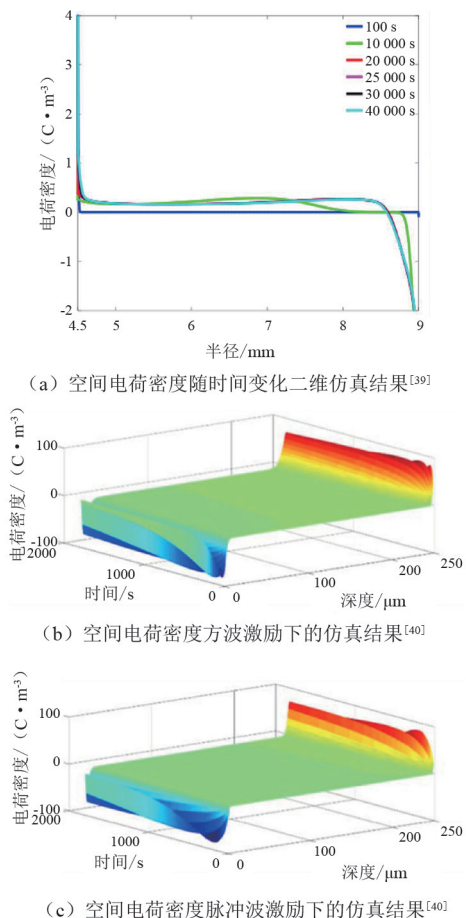


图8 利用有限元仿真获得的空间电荷密度分布

综上所述,无论是实验测量还是仿真模拟,都是为了全面准确地掌控电缆中的电荷分布情况,并对

存在异常电荷聚集的电缆进行及时干预,避免其进一步发展成局部放电甚至绝缘击穿,从而保障电缆运行安全,延长电缆使用寿命。

3 电荷释放

电荷的消散与电缆绝缘的陷阱深度、陷阱密度以及载流子迁移率有关。通常,电力电缆两端都设有接地装置用来释放残留的空间电荷,但是对于长时间运行的电力电缆,电荷消散到安全运行指标以下往往需要很长的时间^[42]。因此,大长度直流电缆需采取额外措施。现阶段,电荷释放主要有两种途径:1)基于电荷产生机理,从源头处尽可能减少电荷的积聚;2)基于电荷测量手段,实现及时电荷释放。

在抑制电荷产生方面,典型措施是在电缆绝缘中添加极性基团,人为制造捕获电荷的陷阱,当电荷陷入这些人造的绝缘陷阱后,就可以达到均匀分布的效果,进而有效抑制空间电荷积累。文献[43]研究发现,在交联聚乙烯绝缘电缆中接枝氯乙酸烯丙基酯(CAAE)可以使电缆绝缘中产生大量电荷陷阱,从而降低电荷迁移率,提高电荷注入势垒,抑制空间电荷积累和电荷载流子输运。文献[44]通过在交联聚乙烯绝缘电缆中引入三羟甲基丙烷三甲基丙烯酸酯(TMPTMA)作为交联剂,引入电荷陷阱,有效抑制了空间电荷积累。值得注意的是,上述手段只能尽量减少电荷产生,随着时间的发展以及环境因素的逐渐恶化,仍须采取额外手段及时释放已产生的电荷。

如今,对于残留电荷的释放问题,研究人员仍在积极开展探索。对离线电缆的电荷快速消散,目前已有研究学者提出两种可行思路。第一种思路是采用脉冲刺激法,即在高压直流电缆停止运行时,通过在电缆两端施加高频脉冲电压刺激电荷脱陷。目前,该方法主要用来测量固体绝缘的表面电位,但对未来研究电荷释放问题提供了较大启发。文献[45]利用高频脉冲观察油纸绝缘中电荷输运特性,如图9所示。结果表明,随着脉冲频率的增加,绝缘陷阱数量逐渐减小,陷阱深度也出现变化。在一定的频率范围内,可同时减小陷阱密度和陷阱深度,从而降低陷阱对电荷的束缚作用,加速电荷的脱陷过程。

第二种思路是采用交流放电法,该方法是基于绝缘水树等效电阻具有非线性特性。文献[46]研究表明,直流电缆线芯的放电回路等效电阻极小,线芯等效电容 C_x 积累的电荷会瞬间释放;绝缘层放电回路由绝缘水树等效电阻 R 以及水树枝等效电容 C 构成,放电时间常数通常较大,进而导致放电时间较长。通过给直流电缆施加交流电压,利用绝缘水树的非线性特性,可有效减小绝缘水树等效电阻,从而实现电荷的快速释放,如图10所示。

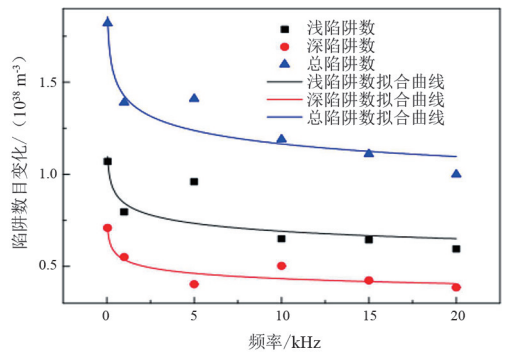


图9 高频方波脉冲下油纸试样陷阱数目变化^[45]

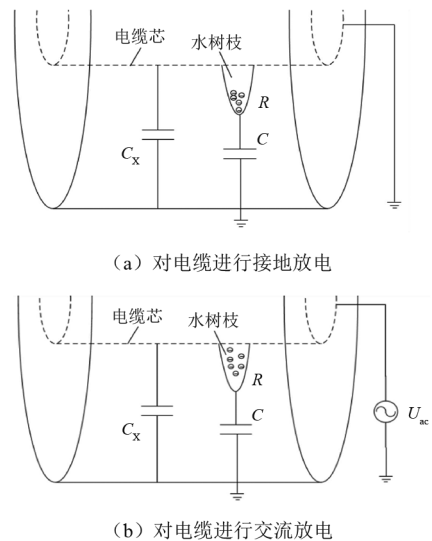


图10 交流放电法的等值回路^[46]

当前,电缆电荷释放研究仍存在两个尚未解决的关键问题:1)如何实现在役电缆的电荷释放,现有的相关电荷释放研究均为离线电缆的电荷释放,不免造成工程延误、工程效率低等问题;2)如何评估已释放电荷的电缆剩余使用寿命,需要系统深入地研究电缆剩余寿命和电缆绝缘之间的关系,准确预估电缆剩余寿命对减少工程成本,避免资源浪费具有重要的工程意义。

4 结 论

随着“双碳”目标的提出,电力能源广泛应用于生产生活的各个方面,电能需求量的逐年提升对大长度直流高压电缆提出了更高要求。上面对大长度直流高压电缆的电荷问题进行了综述。首先,阐述了直流高压电缆内部表面电荷和空间电荷的产生机理;其次,系统梳理了国内外对于表面电荷和空间电荷测量的研究成果;最后,从抑制电荷积聚和电荷释放两个方面分别论述了减少电缆电荷集聚的重要性与挑战性。

未来,大尺度直流高压电缆中的电荷研究主要集中在如下关键问题:首先,如何实现在役电缆的电荷释放,现有的相关电荷释放研究均为离线电缆的电荷释放,不免造成工程延误、工程效率低等问题;其次,如何对已释放电荷的电缆进行剩余寿命评估,以最大程度地避免资源浪费;最后,如何利用数字模拟计算电缆内部残留空间电荷,以寻求更可靠的电荷释放方案。

参考文献

- [1] WANG X, HAO J Q, XIONG J Z, et al. Comparison and analysis of three pulse injection methods in the pulsed electroacoustic technique used for long cables[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2018, 34(4): 17-31.
- [2] LI Zhonglei, DU Boxue. Polymeric insulation for high-voltage dC extruded cables: challenges and development directions [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2018, 34(6): 30-43.
- [3] LUX J, OLSCHESKI M, SCHAEFER P, et al. Real-time determination of depth of burial profiles for submarine power cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(3): 1079-1086.
- [4] WANG Shuchao, ZHOU Quan, Liao Ruijin, et al. The impact of cross-linking effect on the space charge characteristics of cross-linked polyethylene with different degrees of cross-linking under strong direct current electric field[J]. Polymers, 2019, 11(7): 1149-1177.
- [5] HE Dongxin, MENG Fansong, LIU Hongshun, et al. The influence mechanism of semiconductive material on space charge accumulation in HVDC cable accessory[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(5): 1479-1486.
- [6] 刘继平,王浩鸣,唐庆华,等.热老化对直流XLPE绝缘性能的影响研究[J].电力系统及其自动化学报, 2020, 32(7): 80-85.
- [7] GAO Chaofei, HE Dongxin, ZHOU Yifan, et al. A study on the space charge characteristics of AC sliced XLPE cables[J]. IEEE Access, 2019, 7: 20531-20537.
- [8] YU Jingzhe, CHEN Xiangrong, MENG Fanbo, et al. Numerical analysis of thermo-electric field for AC XLPE cables with different service times in DC operation based on conduction current measurement[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(3): 900-908.
- [9] KANEKO D, MAEDA T, ITO T, et al. Role of number of consecutive voltage zero-crossings in propagation of water trees in polyethylene[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(4): 708-714.
- [10] 陈曦,王霞,吴锴,等.温度梯度场对高直流电压下聚乙烯中空间电荷及场强畸变的影响[J].电工技术学报, 2011, 26(3): 13-19.
- [11] BHUTTA M S, YANG L J, MA Z P, et al. Significance of space charge accumulation DC endurance of XLPE under varying insulation thickness [C]. 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), IEEE, 2019: 1-4.
- [12] 高宇,王明行,赵宁,等.固体绝缘材料表面电荷特性的研究进展[J].高电压技术, 2018, 44(8): 2628-2645.
- [13] LIU Yanqin, WU Guangning, GAO Guoqiang, et al. Surface charge accumulation behavior and its influence on surface flashover performance of Al₂O₃-filled epoxy resin insulators under DC voltages[J]. Plasma Science and Technology, 2019, 21(5): 055501.
- [14] 周远翔,吴优,张灵,等.预交联对XLPE直流电缆料空间电荷特性的影响[J].绝缘材料, 2022, 55(3): 23-31.
- [15] CHEN Xiangrong, DAI Chao, YU Linwei, et al. Effect of thermal ageing on charge dynamics and material properties of 320 kV HVDC XLPE[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(6): 1797-1804.
- [16] MEUNIER M, QUIRKE N. Molecular modeling of electron trapping in polymer insulators[J]. Journal of Chemical Physics, 2000, 113(1): 369-376.
- [17] LI Kangle, ZHOU Kai, ZHU Guangya. Toward understanding the relationship between the microstructure and propagation behavior of water trees [J]. IEEE

- Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(4): 1116–1124.
- [18] 易姝慧, 王亚林, 彭庆军, 等. 温度对交联聚乙烯中的空间电荷积累以及迁移的影响[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5796–5803.
- [19] 王霞, 余栋, 张宇巍, 等. 硅脂涂覆料对 XLPE/EPDM 复合介质界面电荷积聚和击穿特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14): 4281–4287.
- [20] FABIANI D, MONTANARI G C, LAURENT C, et al. Polymeric HVDC cable design and space charge accumulation. Part 1: insulation/semicon interface[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2007, 23(6): 11–19.
- [21] 杜伯学, 李忠磊, 杨卓然, 等. 高压直流交联聚乙烯电缆应用与研究进展[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 344–354.
- [22] DELPINO S, FABIANI D, MONTANARI G C, et al. Feature article-Polymeric HVDC cable design and space charge accumulation. Part 2: insulation interfaces[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2008, 24(1): 14–24.
- [23] MA Wenzuo, LU Tiebing, WANG Donglai, et al. Experimental study on surface charge distribution of insulating film under the HVDC test wire[C]. 2014 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE), IEEE, 2014: 1–6.
- [24] YANG Chun, ZHANG Ying, HE Lijuan, et al. Study on the trap distribution in polyimide thin film based on TSDC method[C]. 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Harbin University Science and Technology, 2009: 911–913.
- [25] Zhu Yuanwei, Li Shengtao, Li Tengfei, et al. Trap parameters analysis of oil-paper insulation by thermally stimulated depolarization current[C]. 2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), IEEE, 2015: 108–111.
- [26] 周凯, 吴广宁, 邓桃, 等. 纳米复合绝缘材料的热刺激电流测试研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(18): 76–82.
- [27] GAO Y, DU B X, MA Z L, et al. Effect of cross-linking temperature on charge decay behavior in XLPE[C]. Proceedings of the 2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics IEEE, 2010: 1–4.
- [28] 汪泓, 邱毓昌, 张乔根, 等. 冲击电压作用下绝缘子表面电荷的积聚[J]. 高电压技术, 2002, 28(8): 7–8.
- [29] 王新新, 刘微粒, 王强, 等. 绝缘子表面电场及电荷的测量[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 732–738.
- [30] ANDO N, NUMAJIRI F. Experimental investigation of space charge in XLPE cable using dust figure[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1979, EI-14(1): 36–42.
- [31] 徐洋, 刘卫东, 高文胜. 使用粉尘图法测量交流电压下 GIS 绝缘表面电场电荷分布的影响因素研究[J]. 电瓷避雷器, 2020(3): 205–212.
- [32] 胡明, 刘淑军, 杨建军, 等. 挤包绝缘高压直流电缆应用现状与研究展望[J]. 中国电力, 2021, 54(4): 42–55.
- [33] 任瀚文, 李庆民, 李承前, 等. 电声脉冲法测量系统的等效传输线模型及声学特性分析[J]. 高电压技术, 2021, 47(4): 1485–1495.
- [34] COLLINS R E. Analysis of spatial distribution of charges and dipoles in electrets by a transient heating technique[J]. Journal of Applied Physics, 1976, 47(11): 4804–4808.
- [35] 郁利超. 160 kV 直流电缆绝缘材料老化特性及击穿特性研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2017.
- [36] CHEN Zelong, ZHOU Kai, YIN You, et al. Review of insulation rejuvenation technology of water tree aged XLPE cables[J]. Insulating Materials, 2019, 51(10): 1–6.
- [37] 张治文, 潘佳萍, 郑飞虎, 等. 固体绝缘介质中空间电荷分布测量技术及其在电气工业中的应用[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2603–2618.
- [38] ZHU Zhien, YANG Liming, GUO Shizhong, et al. Comparison between PEA and PWP method of space charge measurement in model cable[C]. 2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), IEEE, 2015: 907–910.
- [39] ZHAN Yunpeng, CHEN George, HAO Miao, et al. Comparison of two models on simulating electric field in HVDC cable insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(4): 1107–1115.
- [40] REN Hanwen, LI Qingming, LI Chengqian, et al. Numerical simulation of the space charge accumulation inside solid insulation subjected to special polarization conditions[J]. Physica Scripta, 2020, 95(4): 045807.
- [41] PARISE G, MARTIRANO L, PARISE L, et al. A Life loss tool for an optimal management in the operation of insulated LV power cables[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(1): 167–173.
- [42] 刘刚, 谢月, 杨婉琪, 等. 高压退役电缆空间电荷特

性[J]. 高电压技术, 2016, 42(11):3607-3615.

- [43] ZHAO Xindong, SUN Weifeng, SUN Hong. Enhanced insulation performances of crosslinked polyethylene modified by chemically grafting chloroacetic acid allyl ester[J]. *Polymers(Basel)*, 2019, 11(4):592.
- [44] QIU Peng, CHEN Junqi, SUN Weifeng, et al. Improved DC dielectric performance of photon-initiated crosslinking polyethylene with TMPTMA auxiliary agent[J]. *Materials(Basel)*, 2019, 12(21):3540.
- [45] 李晓楠, 刘凯, 杨雁, 等. 高频表面电荷输运对油纸绝缘局部放电的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(3):1223-1233.
- [46] 霍振星. 基于 10 kV XLPE 电缆的绝缘老化分析研

究[D]. 天津:天津大学,2009.

作者简介:

- 王浩铭(1997),男,硕士研究生,研究方向为高电压技术;
- 刘巧珏(1991),女,博士,副研究员,研究方向为高电压与绝缘技术、脉冲功率及放电等离子体技术;
- 崔智桐(1999),男,硕士,工程师,从事电力电子变换相关研究工作;
- 蔡致坤(1995),男,硕士,工程师,从事电力电子变换相关研究工作;
- 胡武生(1996),男,硕士,工程师,从事高电压与绝缘技术的研究工作。

(收稿日期:2023-09-03)

(上接第 27 页)

- [7] MAO S, DONG Z W, SCHULTZ P, et al. A finite-time distributed optimization algorithm for economic dispatch in smart grids[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(4):2068-2079.
- [8] GARCIA-TORRES F, BAEZ-GONZALEZ P, TOBAJAS J, et al. Cooperative optimization of networked microgrids for supporting grid flexibility services using model predictive control[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(3):1893-1903.
- [9] SHUAI H, FANG J K, AI X M, et al. Stochastic optimization of economic dispatch for microgrid based on approximate dynamic programming[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(3):2440-2452.
- [10] 胡维昊, 曹迪, 黄琦, 等. 深度强化学习在配电网优化运行中的应用[J]. *电力系统自动化*: 2023,47(14):174-191.
- [11] FU Q M, HAN Z C, CHEN J P, et al. Applications of reinforcement learning for building energy efficiency control: A review[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 50:104165.
- [12] 阮应君, 侯泽群, 钱凡悦, 等. 基于深度强化学习的分布式能源系统运行优化[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(17):7021-7030.
- [13] 刘俊峰, 陈剑龙, 王晓生, 等. 基于深度强化学习的微能源网能量管理与优化策略研究[J]. *电网技术*, 2020, 44(10):3794-3803.
- [14] LIN X Y, XU X H, WANG Z R. Deep Q-learning network based trip pattern adaptive battery longevity-conscious strategy of plug-in fuel cell hybrid electric vehicle[J]. *Applied Energy*, 2022, 321:119378.

- [15] SANTOS O L D, DOTTA D, WANG M, et al. Performance analysis of a DNN classifier for power system events using an interpretability method[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 136:107594.
- [16] YEO T, SHIGEMATSU N, KATORI T. Dynamically recrystallized grains identified via the application of Gaussian mixture model to EBSD data[J]. *Journal of Structural Geology*, 2023, 167:104800.
- [17] FUJIMOTO S, Hoof H V, MEGER D. Addressing function approximation error in actor-critic Methods[J]. <https://arxiv.org/pdf/1802.09477v3.pdf>
- [18] HONG J C, ZHANG T Z, ZHANG Z, et al. Investigation of energy management strategy for a novel electric-hydraulic hybrid vehicle: Self-adaptive electric-hydraulic ratio[J]. *Energy*, 2023, 278:127528.
- [19] DING Y P, DANG Y G. Forecasting renewable energy generation with a novel flexible nonlinear multivariable discrete grey prediction model[J]. *Energy*, 2023, 227:127664.

作者简介:

- 李龙胜(1976),男,硕士,高级工程师,研究方向为新型电力系统;
- 冯文韬(1996),男,硕士,研究方向为新型电力系统;
- 潘可佳(1982),男,硕士,高级工程师,研究方向为新型电力系统;
- 郑言蹊(1994),女,硕士,研究方向为电力数据服务;
- 邓冰妍(1996),女,硕士,研究方向为电力大数据分析;
- 景致远(1999),男,硕士,研究方向为电子信息、智能电网。

(收稿日期:2023-06-27)