

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.05.017

基于太赫兹波技术的高压电缆外护套进水状态检测方法研究

陈大兵¹, 刘建军¹, 郭东亮¹, 王磊², 梅红伟², 王黎明²

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 南京 211103; 2. 清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要:近年来,电网频繁发生水分进入高压电缆缓冲层引发本体故障的情况。高压电缆的结构决定了很难采用无损检测方式获得内部缓冲层进水状态以及电蚀损情况,但可以通过外护套进水状态来初步判断高压电缆缓冲层是否存在隐患。文中对外护套材料以及水进行了太赫兹光谱特性分析,对110 kV高压电缆进行了太赫兹波成像检测试验。研究发现,水对太赫兹波具有强烈的吸收作用,干燥与进水状态下电缆外护套的太赫兹响应特性存在明显差异,例如:单个扫描点太赫兹波形、电缆整体的太赫兹特征参数等。对电缆的太赫兹波成像有效区分了进水外护套与干燥外护套,并识别了外护套的进水状态。

关键词: 太赫兹波; 高压电缆; 外护套; 进水状态

Research on Detection Method of Water Ingress in the Outer Sheath of High Voltage Cable Based on Terahertz Wave Technology

CHEN Dabing¹, LIU Jianjun¹, GUO Dongliang¹, WANG Lei², MEI Hongwei², WANG Liming²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China; 2. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Guangdong Shenzhen 518055, China)

Abstract: In recent years, water ingress into the buffer layer of high-voltage cables of power grid has frequently occurred, leading to the failure of the cable itself. It is difficult to use non-destructive testing method to obtain the water ingress status and electrical erosion of the internal buffer layer due to the structure of the high-voltage cable. However, the presence of potential hazards in the buffer layer of high-voltage cables can be preliminarily assessed based on the water ingress status of the outer sheath. In this paper, the teraherza spectral characteristics of the outer sheath material and water are analyzed, and terahertzwave imaging detection tests are conducted on 110 kV high-voltage cables. It is found by research that the water has a strong absorption effect on terahertz waves, and the terahertz response characteristic of the cable sheath has significant difference under the dry and water ingress conditions, such as the terahertz waveform of a single scanning point and the overall characteristic parameters. The water ingress outer sheath and the dry outer sheath are effectively distinguished by the terahertz imaging and the water ingress status of the outer sheath is identified.

Key words: terahertz wave; high voltage cable; over sheath; water ingress status

0 引言

电力传输网络是生产和消耗电能的重要纽带,承担了实现电力传输并提高电力系统可靠性的重要作用。受限于城市地上空间资源紧张的现状,架空输电线路无法在城市中大范围的架设^[1-2]。为满足经济发展需求,高压电缆无疑被视为建设高效安全城市电网的必选方案,同时也是未来智能电网发

展不可缺少的关键基础,被广泛应用于城市供电^[3-5]。

水分进入高压电缆缓冲层进而引发本体故障的情况在近年来频繁出现^[6-8]。据国家电网公司2019年统计,累计发生高压电缆缓冲层烧蚀缺陷及故障共32起,造成约60 km电缆更换,高压电缆供电可靠性面临严峻挑战。现有研究表明,水是引起缓冲层烧蚀故障的关键因素。在电缆运行过程中,当缓冲层受潮后,其性能会显著下降,导致电容电

收稿日期:2025-09-08; 修回日期:2025-11-22

基金项目:国家电网公司科技项目(5500-202118134A-0-0-00)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation(5500-202118134A-0-0-00).

流集中引起发热、电化学腐蚀、外护套与金属护套放电等现象,进而引发烧蚀故障^[9-10]。针对缓冲层烧蚀缺陷检测,江苏电科院等单位采用X射线技术进行了初步探索。但面对大规模、长距离的高压电缆,X射线技术无法实现对故障的快速识别^[11]。高压电缆的结构决定了很难采用其他无损成像的方式获得内部缓冲层进水烧蚀的情况,但基于烧蚀与进水状态有关这个特点,可以通过对进水状态进行检测来当作高压电缆缓冲层是否存在隐患的预判手段。在电力设备无损检测领域,太赫兹波以其良好的瞬态性、宽带性、低能性、相干性、吸收性、穿透性等优点适合应用于电力绝缘设备的检测^[12-13]。此外,由于水与电力绝缘设备材料对太赫兹波的响应差异很大,太赫兹技术对电力绝缘设备中水分的检测更是具有独特的优势^[14-16]。

因此,在综合考虑高压电缆结构、材料特性的基础上,文中采用太赫兹波技术对高压电缆外护套进水状态进行检测研究。

1 太赫兹波检测原理与平台

1.1 检测原理

太赫兹波本质上属于电磁波,基本物理性质与其他频段的电磁波相同。在大多数情况下,可以用平面单色波近似处理电磁波与物质的相互作用^[17]。因此太赫兹波由物体A进入物体B的电场强度为

$$E_B = E_A t_{AB} \exp\left[\frac{-j\tilde{n}_A(\omega)\omega L}{c}\right] \quad (1)$$

式(1)中: E_A 为太赫兹波初始场强; L 为太赫兹波在物体A中经过的距离; c 为电磁波在真空中传递的速度; $\tilde{n}_A(\omega)$ 为物体A的复折射率,表达式为

$$\tilde{n}(\omega) = n(\omega) - jk(\omega) \quad (2)$$

式(2)中: $n(\omega)$ 为折射率; $k(\omega)$ 为消光系数。二者分别为太赫兹波在介质中的色散与吸收性质^[18]。

t_{AB} 为物体A到物体B的透射率,反映了太赫兹波在界面处反射与折射的性质,其表达式为

$$t_{AB} = \frac{2\tilde{n}_A(\omega)}{\tilde{n}_A(\omega) + \tilde{n}_B(\omega)} \quad (3)$$

由式(1)-(3)可知,太赫兹波在物质中传输时,其能量损耗主要包括3种形式,即:界面的反射、物质的吸收和散射。这些损耗会对太赫兹波的传输产生影响,特别是在被探测物体内部存在损伤、杂质等情况时,接收到的太赫兹波会发生相应的变化,这些变化可以在时域与频域上体现出来,主要包括时域谱上的脉冲峰值、飞行时间、包络面积,频域谱上的幅值、能量等,也被称为太赫兹特征参数。太

赫兹时域信号 $f(t)$ 见图1。

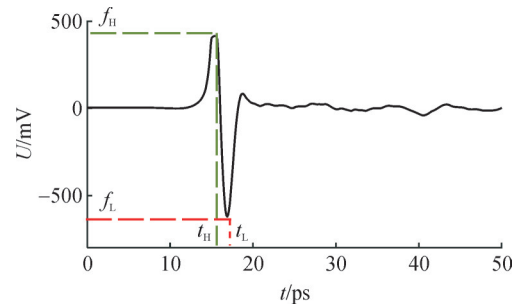


图1 太赫兹时域信号

Fig. 1 Terahertz time domain signal

图1中,脉冲峰值分别为 f_H 、 f_L ,反映太赫兹脉冲的最大电场强度,对应时间分别为 t_H 、 t_L 。太赫兹波飞行时间是指一束太赫兹波从发射到返回太赫兹接收器所需的时间,反映了太赫兹波在传播过程中所经历的散射、吸收、折射等过程。信号的包络面积为^[19]

$$E_a = \sum_T |f(t)| \quad (4)$$

对太赫兹时域信号 $f(t)$ 进行傅里叶变换,可以得到太赫兹频域信号 $F(\omega)$

$$F(\omega) = |F(\omega)|e^{-j\varphi} \quad (5)$$

式(5)中: $|F(\omega)|$ 为幅值; φ 为相位。

1.2 检测平台

文中使用的检测平台包括两种型号的太赫兹时域光谱系统,分别是T-Ray5000和QT-TO1000,用来产生和探测太赫兹波。硬件系统主要由以下部分组成:飞秒激光器、太赫兹波发生器、太赫兹波探测器、时间延迟系统、发射探头、探测探头等^[20]。

太赫兹检测通常可采用透射和反射两种模式^[21]。透射式与反射式测量方法示意图见图2。

与透射方式相比,反射方式可以采集到待测样品每个界面处的反射波,因此包含完整的界面信息。在探测护套进水后存在的多界面情况时,反射方式更为适合^[22]。此外,由于高压电缆皱纹铝套对太赫兹波的阻挡作用,透射法测量无法穿透电缆到达接收器处。因此,本研究采用反射模式进行护套进水状态检测。然而,反射模式下界面信息的存在干扰了太赫兹光谱对待测样品材料属性的准确表征,因此需要通过透射模式进行光谱特征的提取与分析,以获取更准确的样品材料特征参数^[23]。综上所述,在对实际情况和不同探测模式的利弊考虑后,本研究选择采用反射模式进行外护套进水状态检测,通过透射模式进行光谱特征的提取与分析,以获取更准确的结果。

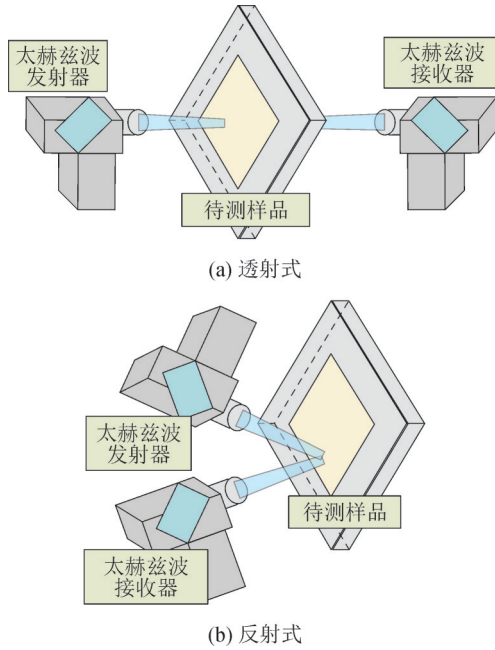


图2 两种太赫兹检测模式

Fig. 2 Two terahertz detection modes

太赫兹脉冲的产生与探测原理见图3。首先, 飞秒激光器产生一束飞秒激光脉冲, 经过半波片1和偏振镜1后, 被分为泵浦光和探测光两个互相垂直的光束。其中, 泵浦光经过半波片2的透射和偏振镜2的分光后, 经过多个反射镜的时间延迟以及透镜的聚焦后射向待测样品。探测光束感应经由样品反射回的太赫兹电场, 实现了光谱信息的采集。通过探测器的检测和信号处理, 可以获取待测样品的太赫兹光谱特征^[24]。

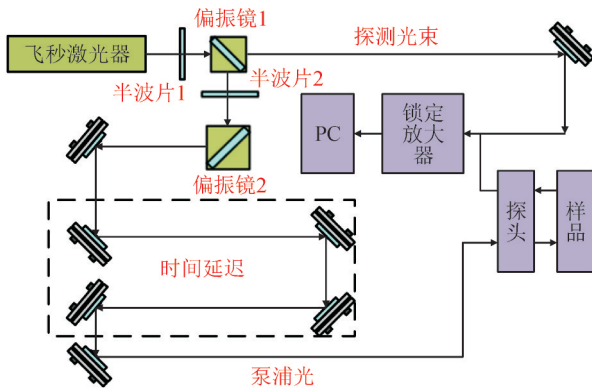


图3 太赫兹脉冲产生与探测原理图

Fig. 3 Schematic diagram of terahertz pulse generation and detection

2 太赫兹光谱特性分析

2.1 外护套材料的光谱特性

太赫兹波通常采用垂直入射的方式进行检测, 但电缆皱纹铝套呈波纹状, 外护套也不平整, 这增加了实验研究的复杂度。为了便于观察和研究, 将

实际的含水护套抽象为平板护套进行实验研究, 并且通过分析实际含水护套的太赫兹响应来进一步研究其光学性质。这种方法能够有效降低实验的难度和提高数据的准确性, 更好地研究和分析电缆的太赫兹特性。PE、PVC平板材料模拟高压电缆外护套, 铝的平板材料模拟高压电缆的皱纹铝套。在反射式测量中, 通过将护套材料板与铝板贴合模拟高压电缆护套结构。外护套材料太赫兹波测量示意图见图4。

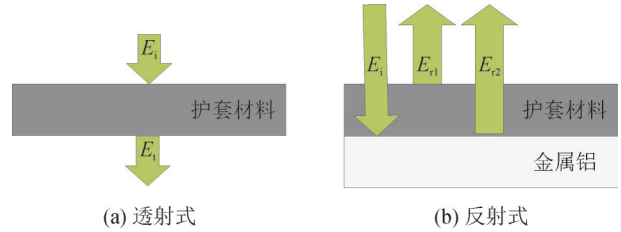


图4 外护套材料太赫兹光谱测量示意图

Fig. 4 Terahertz spectrum measurement diagram of the outer sheath material

PVC材料透射时域波形见图5。虚线为参考信号, 即太赫兹发射探头与接收探头间为空气时测量得到的信号; 实线为将PVC平板材料置于两探头间测得的透射波形。

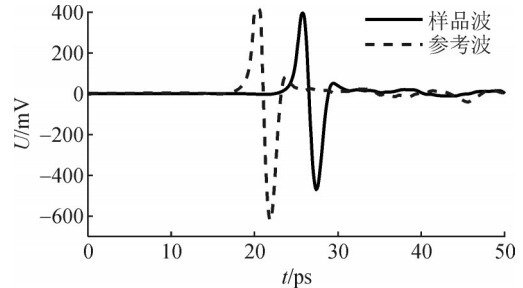


图5 PVC材料透射时域波形

Fig. 5 Time domain waveform of PVC by transmission method

PVC材料透射频域波形见图6, 包括幅值谱、相位谱。

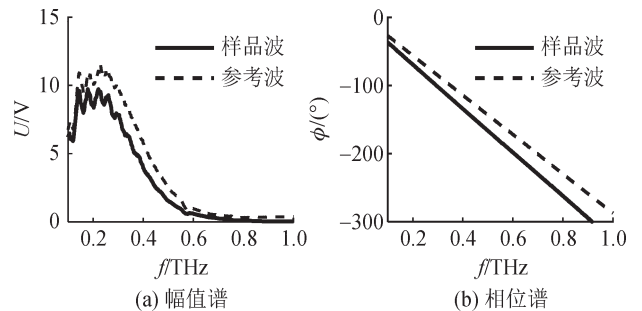


图6 PVC材料透射频域波形

Fig. 6 Frequency waveform of PVC by transmission method

PVC材料反射时域波形见图7。虚线为参考信

号,实线为PVC平板材料的反射波。反射波与参考波时域波形的差别体现在太赫兹波的飞行时间、波形峰值数量、波形幅值方面。入射太赫兹脉冲 E_i ,在样品界面处会先后产生两个反射波 E_{r1} 、 E_{r2} ,分别对应:空气与PVC板的界面、PVC板与铝板之间的界面,第3个反射波 E_{r3} 为太赫兹波在PVC材料内部二次反射后形成的。

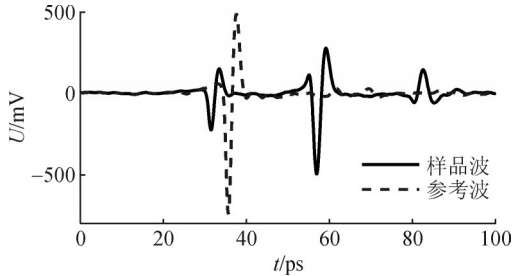


图7 PVC材料反射时域波形

Fig. 7 Time domain waveform of PVC by reflection method

在波形幅值方面,参考波峰值为740 mV,样品波的3个反射脉冲对应的峰值分别为220、490、140 mV。入射太赫兹波的一小部分在PVC上表面发生反射,大部分穿过PVC表面继续传播,因此第1个反射波峰值小于参考波峰值;穿过PVC表面的太赫兹波继续传播至下表面,由于下表面与金属材料贴合,而太赫兹波在金属材料上的传播可以近似认为发生全反射,因此这一部分太赫兹波几乎全部发生反射,传播至PVC上表面,大部分太赫兹波穿过界面被测量探头接收,因此第2个反射峰幅值较高;小部分太赫兹波重复上述过程,这部分信号的能量由于在样品内部衰减若干次也比较微弱。

PE材料在太赫兹波下的性质与PVC类似,且对太赫兹波吸收更少,具有更优越的穿透性。

2.2 水的光谱特性

本小节采用透射式太赫兹时域光谱系统对水进行了光谱特征分析,采集到的太赫兹波形见图8。

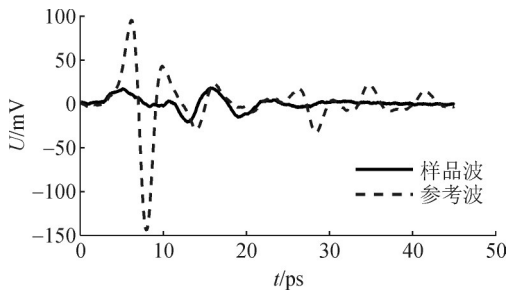


图8 水的透射时域波形

Fig. 8 Time domain waveform of water by transmission method

时域波形的时间延迟是由于太赫兹波在水与空气中的传播速度差异造成的,在频域谱图上表现为相位的延迟。波形的幅值差异是由于太赫兹波

在空气和水中的吸收系数不同造成的,在频域谱图上表现为幅值和能量的衰减。

水的透射频域波形见图9,包括幅值谱、相位谱。太赫兹波穿过1 mm水相较于穿过同样厚度空气产生的时域信号幅值衰减为130 mV,衰减幅度达88.3%。

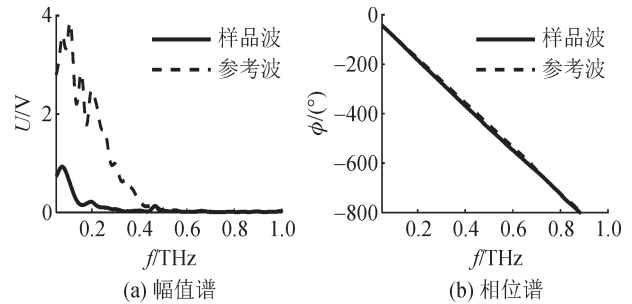


图9 水的透射频域谱图

Fig. 9 Frequency waveform of water by transmission method

参考波与样品波的能量有明显差异,因此对参考波与样品波的能量密度进行定量分析。

参考波与样品波的能量密度比值见图10。在频率0.1~0.5 THz区间参考波总能量与水的透射波总能量比值为22.68,最大能量密度比值达850以上。

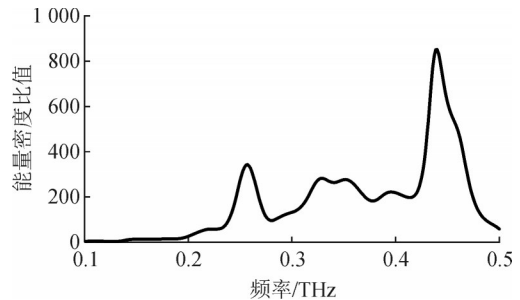


图10 样品波与参考波的能量密度比值

Fig. 10 Energy density ratio of sample wave to reference wave

吸收系数是一种描述介质对太赫兹波吸收能力的物理量,该参数能够更加准确地分析和比较不同材料的太赫兹特性。水、PVC、PE在0.1~0.5 THz波段的吸收系数见图11。由图11可知,水对太赫兹波的吸收系数远高于PVC、PE材料。

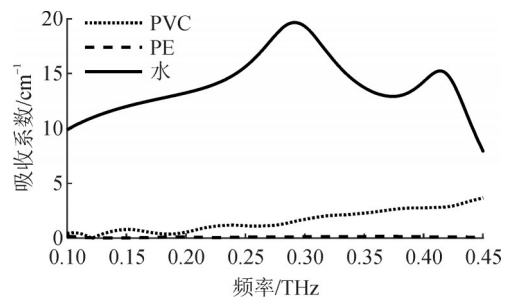


图11 外套材料与水的吸收系数

Fig. 11 Absorption coefficient of outer sheath material to water

3 110kV 高压电缆太赫兹波特特性分析

3.1 干燥与进水电缆整体太赫兹波形分析

为控制水分在护套间的分布尽可能均匀,在护套间放入对太赫兹波几乎无吸收的吸水纸,再使用胶头滴管在吸水纸上滴水,最后将外护套置于皱纹铝套上。实际护套间含水样品制备方法,见图12。

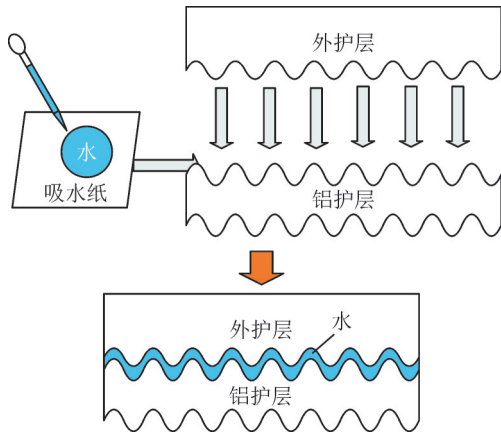


图12 实际护套间含水样品示意图

Fig. 12 Schematic diagram of actual water containing samples in the protective suite

实际护套干燥与含水处的太赫兹响应见图13。为避免由于散射等原因导致接收到的太赫兹波不完整,太赫兹波应尽可能垂直入射,垂直出射。波纹管相对平整的位置为波峰或波谷位置。此外,由于重力作用,高压电缆护套进水后,水分更容易富集在此,因此选取的入射路径应经过波纹管的波峰或波谷位置。尽管如此,由于实际护套表面的不均匀性,反射峰幅值显著小于平板样品。

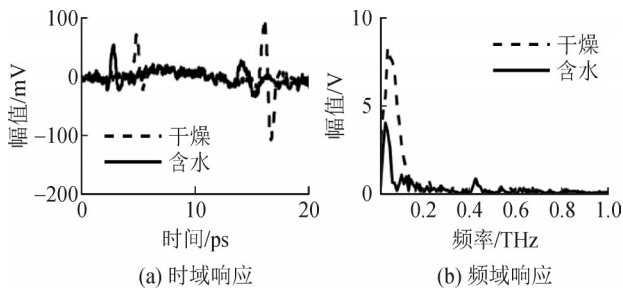


图13 实际护套干燥与含水处的太赫兹响应

Fig. 13 Terahertz response of actual sheath drying and moisture containing areas

图13(a)中参考峰为太赫兹波透过空气直接入射皱纹铝套表面得到的波形,可以看出即使选取了较好的太赫兹入射路径,无论是干燥还是含水护套样品,太赫兹波都出现了明显的衰减,但反射峰幅值变化趋势与平板护套一致。太赫兹波在外护套上表面的反射波,即反射峰1,没有出现明显差异;太赫兹波在夹层间的反射波,即反射峰2,干燥护套

幅值显著高于含水护套,在频域上也是如此。对于太赫兹光路经过非波峰、波谷位置的反射波,由于散射作用,太赫兹波接收器无法接受到完整的太赫兹反射信号,无法用于分析。

对波峰、波谷位置在有无沥青共计4种情况下含水与干燥条件下的波形进行了进一步分析,时域波形见图14。

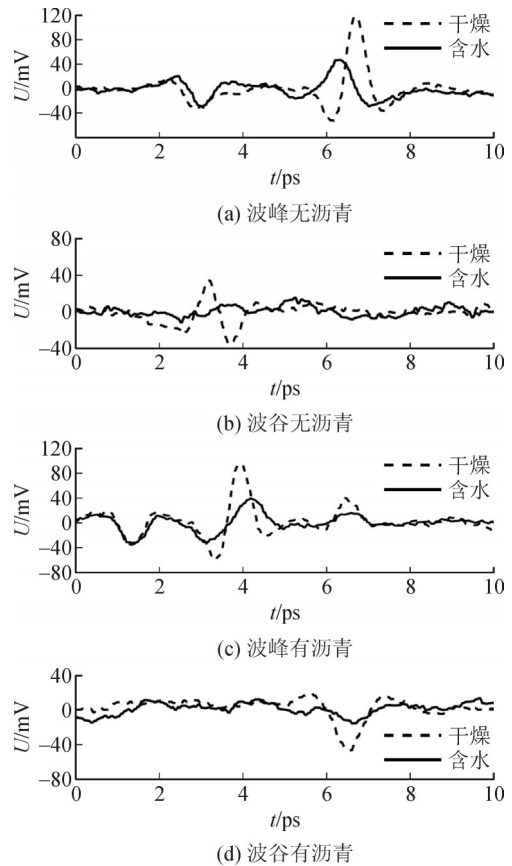


图14 含水与干燥电缆护套太赫兹时域波形

Fig. 14 Terahertz time-domain waveform of water containing and dry cable sheath

实验发现,虽然含水护套的太赫兹波响应出现了明显的衰减,但在波峰、波谷处有着不同的表现。由于波峰处对太赫兹波的衰减作用较小,因此,即使经过水对太赫兹波的吸收,仍能接收到有效的太赫兹脉冲。而波谷处对太赫兹波的衰减作用较大,经过水对太赫兹波的吸收,已无法接收到有效的太赫兹脉冲。

对以上含水与干燥状态下的太赫兹波形特征参数进行提取,获得结果见图15。

3.2 干燥与进水电缆整体太赫兹响应比较

3.1节仅对特殊位置(波峰、波谷位置)处的干燥与进水情况进行了分析,无法反映电缆的整体状态。因此,本小节对真型电缆进水与干燥状态的整体太赫兹响应进行了研究。将干燥状态下的电缆

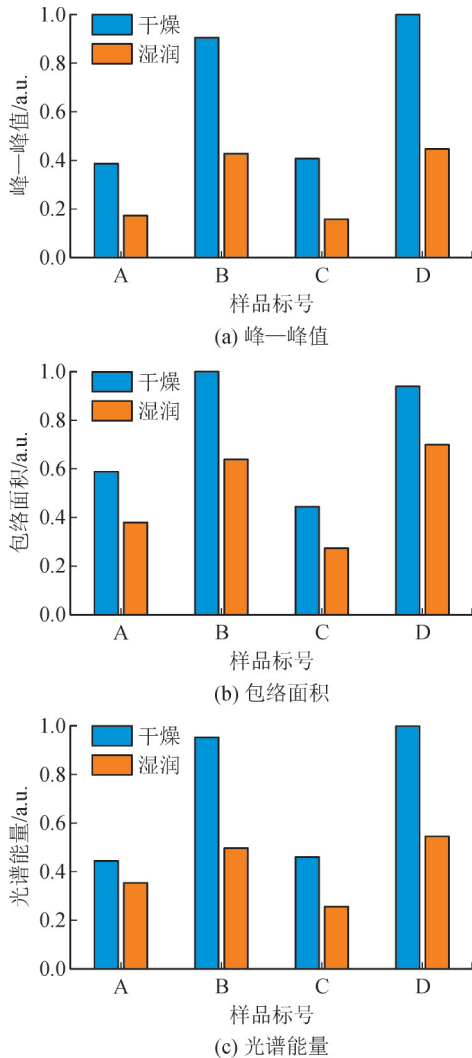


图15 电缆护套含水与干燥状态下的太赫兹特征参数对比
Fig. 15 Comparison of terahertz characteristic parameters of cable sheath in water containing and dry states

作为对照组,将电缆完全浸入水中1 h后取出作为实验组,采用直线扫描的方式对高压电缆进行逐点太赫兹测量。每段电缆扫描长度为3 cm,共8段电缆,编号分别为A、B、C、D、E、F、G、H,每0.5 mm设置一个采样点,每段电缆60个采样点。

在特征参数的选取方面,飞行时间、脉冲幅值不适合作为整体太赫兹响应的衡量指标,主要原因如下:①在皱纹铝套不平整的位置,太赫兹波经过外护套与皱纹铝套界面会发生散射,难以接收到有效的太赫兹反射波;②在含水情况下,即使在波谷位置,太赫兹反射波也会受到高频噪声信号的影响,接收到的太赫兹光谱信噪比较差。以上两个原因导致无法提取准确的飞行时间和峰—峰值参数,适用性比较差。包络面积以及频谱总能量通过对整个反射谱进行计算,更能反映太赫兹光谱的整体状态,减小光谱噪声信号的干扰。

因此,本小节选择太赫兹时域谱包络面积以及太赫兹频域谱总能量作为特征参数,对每段电缆采样点的特征参数取平均值,得到干燥与进水护套特征参数对比柱状图见图16。

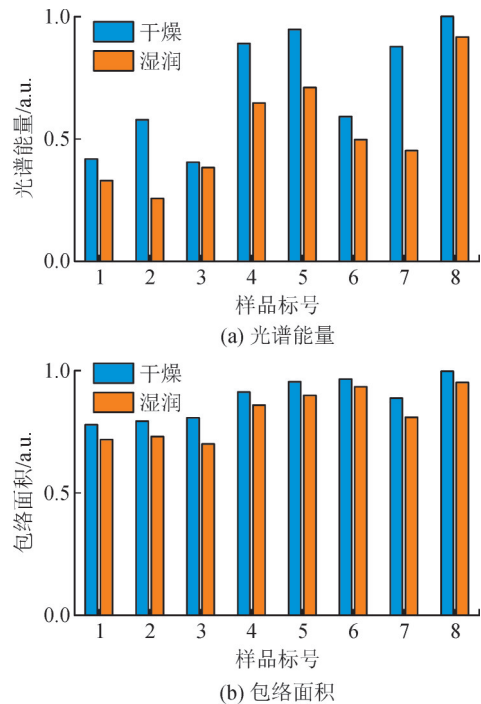


图16 干燥与进水护套特征参数对比柱状图

Fig. 16 Bar chart of characteristic parameters of dry and water inlet sheaths

由图16可看出,干燥与进水护套的包络面积特征参数相差不大,原因在于干燥与进水护套在太赫兹时域谱上的区别主要体现在反射峰处,而包络面积是对整个太赫兹时域谱的幅值模的加和。因此,时域谱上其他的无效数据对包络面积特征参数起到了稀释作用。

此外,该特征参数是对每段电缆样品上的60个采样点取均值得到,而在波峰、波谷以外的区域,干燥与进水护套的太赫兹光谱特征差异不大,也会对特征数据起到一定的稀释作用,光谱总能量特征参数在部分样品段没有明显差异也是由于这个原因。但是虽然由于扫描位置的不同以及取均值对特征数据的稀释作用,部分区域特征参数相差不大,但是8段电缆在湿润情况下的整体特征参数均小于干燥护套,甚至部分区域频谱总能量特征参数相差1倍以上。

3.3 110 kV 进水电缆太赫兹波成像分析

真型110 kV 电缆护套结构见图17。外护套和皱纹铝套都呈表面凹凸不平的波纹状。为便于区分,文中称皱纹铝套表面凸起部分为波峰,护套表面凹陷部分为波谷。

波峰和波谷处的护套表面形貌较为平整。然而,在波峰和波谷之间的过渡区域,外护套的表面呈现斜面,使得在该区域内太赫兹探测脉冲的垂直入射变得困难。

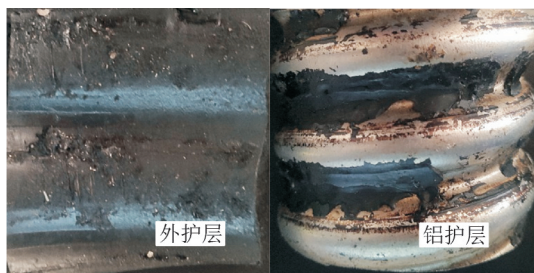


图 17 110 kV 电缆护套结构

Fig. 17 110 kV cable sheath structure

对干燥与含水电缆护套样品进行太赫兹光谱成像扫描,得到各个扫描点的太赫兹信息,提取太赫兹波在该条件下的峰—峰值参数和频域幅值参数进行成像。

不同太赫兹特征参数的电缆护套样品成像彩图见图 18。成像选择扫描步长为 0.5 mm,扫描区域 60 mm×20 mm。图 18 中,横纵坐标表示扫描点的位置,颜色则反映了成像所用特征参数的大小,颜色由深蓝到红色表示特征参数值由小到大。

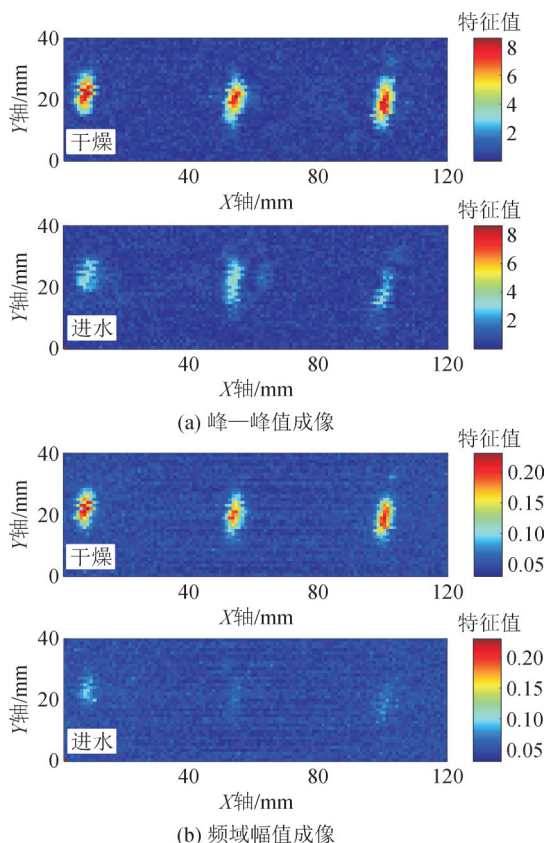


图 18 干燥与含水电缆护套样品成像图

Fig. 18 Image of dry and water containing cable sheath samples

对比电缆护套样品干燥与含水区域处的特征参数成像可以看出,在大多数区域太赫兹特征参数较小,干燥与含水区域成像无明显差异;在电缆波峰、波谷相对平整的区域,太赫兹特征参数相对而言较为明显,含水区域颜色明显浅于干燥区域。

4 结论

对高压电缆外护套进水状态进行识别与评估是预防电缆故障的重要手段。论文测量并分析了高压电缆外护套太赫兹波传播特性,据此提出了外护套进水状态检测方法,结论如下:

1)水对太赫兹波具有强烈的吸收作用,对部分太赫兹频段的吸收是护套材料的 850 倍,护套进水情况下的太赫兹特征参数存在明显衰减现象。

2)干燥与进水状态下电缆护套的太赫兹响应存在明显差异,比如单个扫描点太赫兹波形和电缆整体特征参数。

3)对 110 kV 电缆进行了太赫兹光谱成像,根据成像结果可有效区分进水护套与干燥护套。

参考文献:

- [1] 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.
ZHOU Yuanxiang, ZHAO Jiankang, LIU Rui, et al. Key technical analysis and prospect of high voltage and extra-high voltage power cable[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2593-2612.
- [2] 刘悦,黄新波,刘天娇. 基于深度学习的架空输电线路绝缘子缺陷检测方法研究综述[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(3): 167-177.
LIU Yue, HUANG Xinbo, LIU Tianjiao. Overview on defect detection methods of insulator for overhead transmission lines based on deep learning[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(3): 167-177.
- [3] 邵森安,马颢,丰如男,等. 电力电缆国内外研究综述[J]. 电线电缆, 2021(3): 1-6.
SHAO Sen'an, MA Xie, FENG Runan, et al. Review of researches on power cables at home and abroad[J]. Electric Wire & Cable, 2021(3): 1-6.
- [4] BAK C L, SILVA F M F D. High voltage AC underground cable systems for power transmission: A review of the danish experience: Part 2[J]. Electric Power Systems Research, 2016(140): 995-1004.
- [5] 杜伯学,马宗乐,霍振星,等. 电力电缆技术的发展与研究动向[J]. 高压电器, 2010, 46(7): 100-104.
DU Boxue, MA Zongle, HUO Zhenxing, et al. Recent research status of techniques for power cables[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(7): 100-104.
- [6] 黄宇,尹毅,吴长顺. 高压电缆阻水缓冲层电性能研究[J]. 电线电缆, 2018(6): 6-9.

- HUANG Yu, YIN Yi, WU Changshun. Study on electrical properties of water blocking buffer layer in high voltage cables[J]. *Electric Wire & Cable*, 2018(6): 6-9.
- [7] 段肖力, 刘雨丰, 刘三伟, 等. 高压XLPE电缆缓冲层烧蚀机理及检测方法综述[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(5): 1540-1558.
DUAN Xiaoli, LIU Yufeng, LIU Sanwei, et al. Review on ablative mechanism of the buffer layer in high voltage XLPE cable and associated detection methods[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(5): 1540-1558.
- [8] 高建, 张浩然, 张可, 等. 高压电缆缓冲层烧蚀缺陷超声检测实验[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(1): 174-180.
GAO Jian, ZHANG Haoran, ZHANG Ke, et al. Experiments on the ultrasonic detection of buffer layer ablation defects in high-voltage cables[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(1): 174-180.
- [9] 冯尧, 赵鹏, 李文杰, 等. 高压XLPE电缆缓冲层烧蚀故障机理分析与结构优化[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(3): 242-249.
FENG Yao, ZHAO Peng, LI Wenjie, et al. Ablative fault mechanism analysis and structure improvement of buffer layer of high voltage XLPE cable[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(3): 242-249.
- [10] 陈云. 高压XLPE电缆缓冲层故障特征与机理[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
CHEN Yun. Fault characteristics and mechanism of high voltage XLPE cable buffer layer[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [11] 董方旭, 王从科, 凡丽梅, 等. X射线CT成像检测方法对复合材料内部分层缺陷检测结果的影响研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2019(3): 86-91.
DONG Fangxu, WANG Congke, FAN Limei, et al. Influence of X-ray ct imaging detection method on testing results of delamination defects in composite material[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2019(3): 86-91.
- [12] 蔡禾, 郭雪娇, 和挺, 等. 太赫兹技术及其应用研究进展[J]. *中国光学与应用光学*, 2010, 3(3): 209-222.
CAI He, GUO Xuejiao, HE Ting, et al. Terahertz wave and its new applications[J]. *Chinese Journal of Optics And Applied Optics*, 2010, 3(3): 209-222.
- [13] FUSE N, TAKAHASHI T, OHKI Y, et al. Terahertz spectroscopy as a new tool for insulating material analysis and condition monitoring [J]. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2011, 27(3): 26-35.
- [14] GUO Chenjun, XU Wenlong, CAI Mingming, et al. A review: Application of terahertz nondestructive testing technology in electrical insulation materials[J]. *IEEE Access*, 2022(10): 121547-121560.
- [15] 张筱岑, 何淑明, 黄青沙, 等. 太赫兹波在电力检测与分析中的应用研究综述[J]. *电力学报*, 2022, 37(5): 457-464.
ZHANG Xiaocen, HE Shuming, HUANG Qingsha, et al. Review on application of terahertz wave in electric power detection and analysis[J]. *Journal of Electric Power*, 2022, 37(5): 457-464.
- [16] 宗鹏锦, 李宗红, 刘荣海, 等. 六氟化硫气体中水含量的太赫兹时域光谱检测[J]. *电工技术*, 2021(21): 145-147.
ZONG Pengjin, LI Zonghong, LIU Ronghai, et al. Terahertz time-domain spectroscopy detection of water content in sulfur hexafluoride gas[J]. *Electric Engineering*, 2021(21): 145-147.
- [17] SIEGEL P H. Terahertz technology[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, 50(3): 910-928.
- [18] 李岚欣. 复合绝缘子硅橡胶劣化的太赫兹波谱表征方法[D]. 北京: 清华大学, 2020.
LI Lanxin. Characterization methods of degradation of silicone rubber of composite insulator by terahertz spectrum[D]. Beijing: Tsinghua University, 2020.
- [19] 江怀远. 复合绝缘子内部缺陷的太赫兹波识别方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2021.
JIANG Huaiyuan. Research on the identification method of internal defects of composite insulator by terahertz spectrum parameters[D]. Beijing: Tsinghua University, 2021.
- [20] 李猛. 基于太赫兹技术的变压器绝缘油的检测与分析[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
LI Meng. Detection and analysis of transformer insulating oil based on terahertz technology[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [21] 曹灿, 张朝晖, 赵小燕, 等. 太赫兹时域光谱与频域光谱研究综述[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(9): 2688-2699.
CAO Can, ZHANG Chaohui, ZHAO Xiaoyan, et al. Review of terahertz time domain and frequency domain spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(9): 2688-2699.
- [22] 张中浩, 梅红伟, 刘建军, 等. 基于太赫兹波的复合绝缘子界面检测研究[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(3): 989-998.
ZHANG Zhonghao, MEI Hongwei, LIU Jianjun, et al. Detection method of interfacial defects of composite insulators based on THz wave[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(3): 989-998.
- [23] 曹丙花. 基于太赫兹时域光谱的检测技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
CAO Binghua. Study on measurement techniques based on terahertz time domain spectroscopy[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
- [24] 陈锡爱. 太赫兹时域光谱及其成像检测技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
CHEN Xiai. Research on measurement technology based on terahertz time-domain spectroscopy and imaging[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- 陈大兵(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力设备的检测与评估(E-mail: dabingchen@163.com)。
- 梅红伟(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事高电压与绝缘技术、输变电设备状态监测与评估技术的研究(通信作者)(E-mail: mei.hongwei@sz.tsinghua.edu.cn)。