

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.05.001

# 长段电缆中局部放电脉冲信号的传输特性及耦合研究

高旭泽<sup>1</sup>, 段然<sup>1</sup>, 任明<sup>1</sup>, 谭笑<sup>2</sup>

(1. 电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学), 陕西 西安 710049;  
2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:**对于交联聚乙烯(XLPE)电缆,通过局部放电的测量,可以检测到电缆本体或附件中多种潜在的绝缘缺陷。当局部放电脉冲在电缆中传播时,脉冲波形会发生畸变。文中针对局部放电脉冲在电缆本体传播时的脉冲波形变化进行分析,同时讨论不同耦合带宽对信号检测的影响,得出以下结论:当电缆发生局部放电时,脉冲信号幅值随着传播距离的增加迅速衰减,但脉冲视在放电量衰减幅度相对较小;宽带耦合具有较高的灵敏度,但是其电荷校准曲线误差较大,并且会导致信噪比降低,缺陷检出度下降;窄带耦合虽然能够获得较为准确的电荷校准曲线,却会导致脉冲波形发生叠加,影响故障点定位。

**关键词:**长段电缆;局部放电;传输特性;高频衰减;匹配带宽

中图分类号:TM854

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)05-0002-08

## 0 引言

近年来,随着我国工业化和城市化水平的不断提高,电力需求也随之激增,相比于架空线路,交联聚乙烯(cross linked polyethylene, XLPE)土地占用率小,具有优越的电、机械和热性能,在6~35 kV配电网和110 kV及以上区域性输电网中得到迅速推广<sup>[1-3]</sup>。然而,无论是直流电缆还是交流电缆,由于制造工艺、敷设条件的限制,运行过程中受到电场、温度、水分等因素的影响,都会不可避免地发生绝缘老化或劣化,而内部潜在性绝缘缺陷还会加速电缆老化<sup>[3-5]</sup>,近年来电缆类故障高发,已严重威胁配电网甚至主电网安全运行。局部放电检测对及时发现电缆绝缘类故障起到了较为积极的作用,在电缆本体、接头或终端的绝缘状态诊断中成效显著<sup>[6]</sup>。

近年来的电缆故障统计表明,电缆附件的绝缘问题较为突出,电缆本体造成的事故相对较少。因此,采用大段长敷设的方式成为避免电缆附件故障的手段之一。然而,当电缆本体存在放电类缺陷时,由于高频信号在电缆传播中的衰减、畸变以及背景噪声的影响,基于IEC 60270标准的脉冲电流离线检测或基于高频电流的带电检测都可能存在检测盲区,尤其是对千米级段长的电缆本体故障的检测甚至失效<sup>[7]</sup>。因此,有必要研究局放信号在长段电缆中的衰减畸变特性及其影响因素,从而为提

高电缆局部放电信号耦合效率和优化传感器带宽匹配方法提供指导意见,提高电缆局部放电测量的有效性。

在前期的研究工作中,国内外学者们对电缆中局部放电的产生和发展机制、基于不同电源类型的电缆局部放电诊断和定位以及电缆信号传输的分布参数模型方面开展了相关研究<sup>[8-11]</sup>,但针对大段长电缆的局放脉冲信号传播特性和信号耦合带宽匹配方面缺乏深入研究。此外,以往分布参数模型中较少考虑屏蔽层对信号传播的影响<sup>[12-13]</sup>。

文中基于多层电介质结构的电缆频变分布参数模型,对电缆本体缺陷局部放电的脉冲信号在长段电缆中的传播特性进行了仿真分析,并提出针对脉冲电流法的信号耦合带宽优化方法,为长段电缆局部放电的离线检测和在线监测提供了理论依据。

## 1 基于频变参数的电缆仿真模型

电缆的局部放电脉冲信号含有较多的高频分量,其高频分量的波长远小于电缆段长,因此电缆中的高频信号传播一般由分布参数模型来描述。由于电缆具有较大的横纵比,电磁高次模波驻波谐振对电流波或电压波传播过程的影响不予考虑<sup>[14-16]</sup>,文中仅针对局部放电脉冲信号的电流或电压波过程进行讨论。图1为理想的同轴传输线波过程分布参数模型。

图1中,中心导体单位电阻 $R_0$ ,传输线单位自感 $L_0$ ,单位对地电导 $G_0$ 以及单位对地电容 $C_0$ 作为4个基本参数,用来描述同轴传输线分布参数模型的微分单元,电缆中脉冲传播特性则由上述4个参

收稿日期:2020-03-03;修回日期:2020-04-15

基金项目:国家自然科学基金委员会-国家电网公司智能电网联合基金资助项目(U1866603)

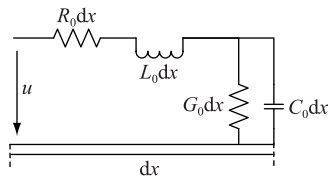


图1 传输线分布参数模型

Fig.1 Transmission line distributed parameter model

数确定的特征阻抗  $Z_0$  来决定。波阻抗  $Z_0$  表示无限长均匀传输线任意微分节点的电压和电流之比,由式(1)计算得到。

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \quad (1)$$

由式(1)可知,特征阻抗  $Z_0$  与信号频率  $\omega$  相关,低频和低频信号传输时电缆特征阻抗存在明显差异,将复数形式的特性阻抗转换为矢量表达,如式(2)所示:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} = |Z_0| e^{j\varphi_c} \quad (2)$$

其中,集肤效应主要体现在导体单位电阻  $R_0$  的参量变化上,其值随频率变化而变化。在屏蔽同轴电缆中,波过程的损耗主要来自集肤效应和介质损耗。在低频分量传播过程中,中心导体的电导损耗占损耗主要部分;在高频分量传播损耗中,绝缘介质损耗逐渐凸显,成为波过程损耗中的主要部分。对于局放脉冲而言,其电流频带分布较宽,高频分量(大于 10 MHz)在传播过程中的损失是信号衰减的主要原因。

由上述分析可知,当集肤效应及色散效应存在时,图1模型难以解释电力电缆中高频信号的损耗。尤其对 XLPE 电缆而言,XLPE 材料的介质损耗在总体损耗中的贡献较低,此时屏蔽层中的损耗将不可忽略,因此高频分量在电缆中的介质损耗包含绝缘材料介质损耗和半导体屏蔽层中的介质损耗,并由绝缘材料和半导体的容抗决定。

电流波在不同介质中行进速度不同所导致的频域色散是脉冲信号时域上产生畸变的原因。根据波过程理论可知,波速由电缆介质径向单位自感和电容决定,如式(3)所示:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3)$$

式中: $L$  为电缆单位长度的电感; $C$  为电缆单位长度的电容。导体与屏蔽层间的电容以及屏蔽层对地电容随频率的变化对 100 MHz 以下的色散都具有显著的影响,而由集肤效应引起的自感变化相对较小。半导体屏蔽层的介电特性随着频率的升高由

电导主导变为电容主导,其色散的中心频率由式(4)决定:

$$\omega = \frac{\delta(\omega)}{\varepsilon(\omega)} \quad (4)$$

式中: $\delta(\omega)$  为半导体屏蔽层电导率随频率的函数; $\varepsilon(\omega)$  为半导体屏蔽层介电常数对频率的函数。对于 XLPE 电缆而言,色散发生在大于 10 MHz 的频率范围内。图2给出了半导体屏蔽层材料相对介电常数和电导率随频率的变化关系,仿真中以图2的拟合数据来计算半导体层的介电特性<sup>[17]</sup>。

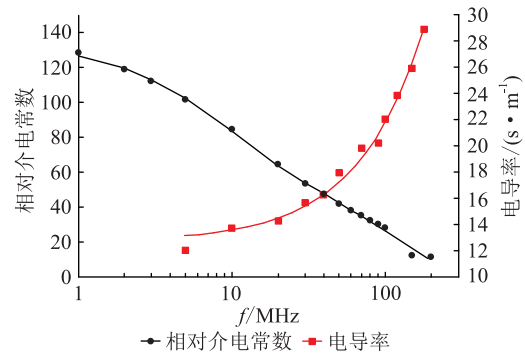


图2 半导体层材料相对介电常数和电导率随频率的变化关系

Fig.2 The relative dielectric constant and conductivity of the semi-conductive layer material change with frequency

通过分析可知,色散及高频信号迅速衰减导致脉冲波形时域上产生畸变,而损耗则是脉冲幅值下降的原因。上述2个因素与电缆信号耦合的带宽和灵敏度(信噪比)直接相关。基于脉冲波过程在电缆分层介质结构中的损耗和色散效应,文中采用“导体-介质-半导体”的频变分布参数模型对长段电缆局放脉冲信号传播特性进行仿真分析。图3为分层结构的频变分布参数模型的微分单元。

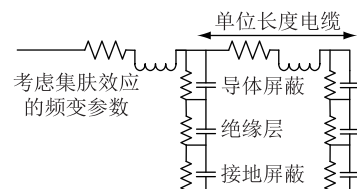


图3 中压电缆频变参数模型

Fig.3 Frequency variable parameter model of MV cable

## 2 仿真结果分析

### 2.1 电缆中局放信号传播衰减与畸变

局部放电的电流脉冲具有指数型脉冲特征,其上限频率由脉冲上升沿决定<sup>[18-20]</sup>,在仿真中采用上升沿为 20 ns,脉宽为 300 ns 的双指数电流脉冲作为初始激励,其时域波形和频域分布见图4。

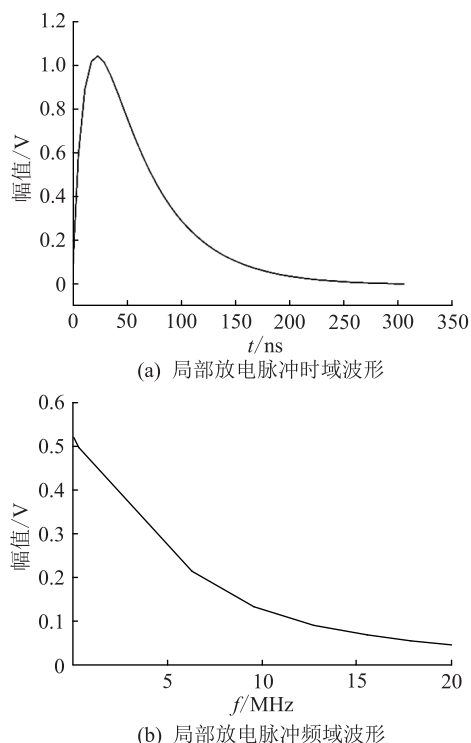


图 4 局部放电脉冲波形

Fig.4 Partial discharge pulse waveform

图 5 为局放电流脉冲信号在不同长度处耦合得到的脉冲波形。仿真中采用两端开路的方式,每个耦合位置处得到的电流脉冲序列由多个前行波和反射波构成,其间隔时间由脉冲中心频率和电缆结构决定。由于电缆长度与脉冲波过程中的衰减程度正相关,文中以前行波首次到达不同位置处的电流脉冲作为依据来研究电缆本体中局部放电脉冲信号的传播特性。此外,为了分析传播距离对传播的影响,在信号耦合中首先采用宽频带的方式来消除检测带宽对结果的影响。由图 5 可知,传播距离对局放脉冲幅值的衰减较为明显,在 500 m 处的衰减幅值超过 50%,但随着传播距离的增加,衰减程度有所缓和。

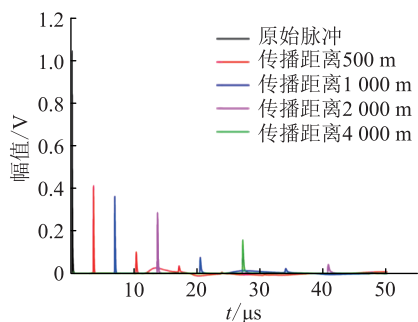


图 5 局部放电脉冲波形随传播距离变化过程

Fig.5 The process of partial discharge pulse waveform changing with propagation distance

将仿真得到的首次前行波脉冲展开,如图 6 所

示。随着传播距离的增加,脉冲幅值的下降较为明显,由于色散作用,脉冲宽度也有所增加,通过积分得到的视在放电量的差距并没有放电幅值的差距那么明显。因此,脉冲幅值的降低并非单纯来源于介质损耗,色散造成的频率移位也是造成幅值降低的重要原因。这一结果意味着采用通过 IEC 标准标定得到的校准因数对长段电缆放电进行计算时,会引入一定的误差,尤其是对于宽带局部放电耦合,其得到的视在放电量与实际视在放电量存在明显的差距,且该差距随电缆长度的增加而增加。

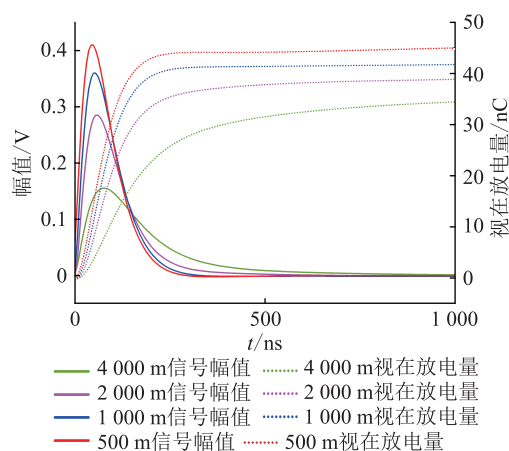


图 6 脉冲及其波形积分

Fig.6 Pulses and their integral

由于色散效应的存在,局放脉冲信号的衰减随长度的变化并非线性,图 7 中分别为仿真得到的脉冲幅值(IEC 视在放电量)和积分放电量与传播距离的关系。

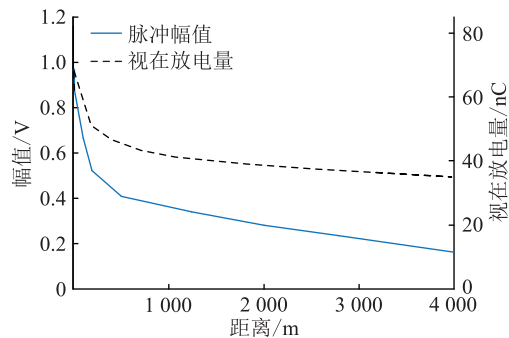


图 7 脉冲幅值及放电量变化形式

Fig.7 Pulse amplitude and discharge variation form

由图 7 可知,对于宽频耦合得到的信号,放电幅值和放电量均随传播距离的增加而迅速下降,且放电幅值的下降程度相比放电量更加明显。二者先都随着传播距离的增加呈指数型衰减,到达一定距离后,则呈线性衰减。这主要是因为色散造成脉冲信号频率移位,其中高频分量衰减相对较快,随着信号的传播,脉冲逐渐被拉宽但幅值下降速率逐渐降低。

随着脉冲信号的传播,放电脉冲的宽度逐渐增加,放电时域波形逐渐由双指数脉冲波形变为对称的高斯脉冲波形。在传播过程中高频分量衰减相比于低频分量衰减更加严重,导致在脉冲传播过程中,脉冲波性发生变化。与此同时,信号中不同频率分量在传播过程中波速不一,也是导致脉冲波形变化的主要原因。在高频范围内集肤效应所占比例逐渐下降,其损耗主要由介电损耗为主,因此电缆在中低频段的频域分布特性将直接影响局部放电信号远端耦合的效果。

## 2.2 长段电缆对信号耦合的影响

### 2.2.1 长段电缆的耦合带宽匹配

IEC 60270 规定了局部放电视在放电量的校准方法,由 2.1 节中的仿真分析可知,随着信号的传播采用宽频带耦合的方法获得的放电幅值和视在放电量之间的校准因数不再保持不变,这意味着对于长段电缆的局部放电,测量的误差将随故障点与测量点距离的不同而不同。

IEC 60270 对信号耦合带宽有较为明确的规定:(1) 窄带测量,见式(5)和式(6);(2) 宽带测量,见式(7)一式(9)。

$$9 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 30 \text{ kHz} \quad (5)$$

$$50 \text{ kHz} \leq f_m \leq 1 \text{ MHz} \quad (6)$$

式中: $\Delta f$ 为耦合带宽; $f_m$ 为中心频率。

$$30 \text{ kHz} \leq f_1 \leq 100 \text{ kHz} \quad (7)$$

$$f_2 \leq 500 \text{ kHz} \quad (8)$$

$$100 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 400 \text{ kHz} \quad (9)$$

式中: $f_1$ 为下限截止频率; $f_2$ 为上限截止频率。IEC 标准信号耦合所占带宽范围仅为局部放电频谱分布的低频段极小区域,如图 8 所示,信号耦合的时间响应相比放电脉冲本身大很多。

相比于上文中采用宽频带耦合得到的信号衰减,采用 IEC 60270 带宽耦合得到的信号衰减随传播距离的增加明显较低,如图 9 所示。

在信号传播过程中,采用宽频带耦合得到的信号幅值的衰减幅度远远大于采用 IEC 宽带测量时信号幅度。由于屏蔽层对信号高频分量具有显著的衰减作用,因此 IEC 信号耦合相比宽频带耦合对校准因数的误差影响相对较小,能够较为线性地在较远的信号传播范围内反映放电量的大小。

局部放电信号耦合的实际带宽由耦合电容器、试品电容和测量阻抗决定,其高频测试回路构成了高通滤波器。该滤波器的下限截止频率在实际测量中大于工频电源信号及其中的谐波成分。假设所有工作电压均作用于耦合电容器上,则通过测量

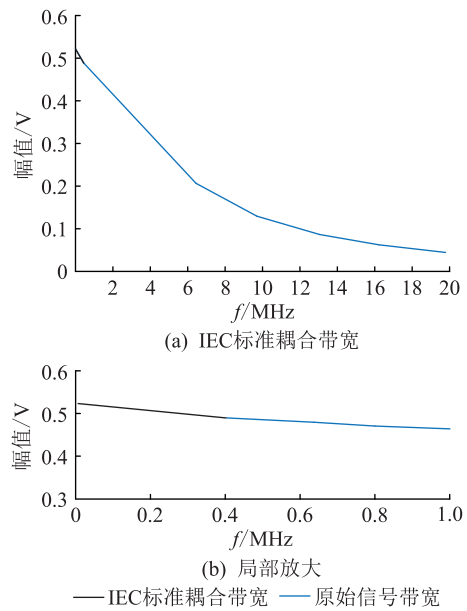


图 8 IEC 标准耦合带宽与信号带宽

Fig.8 IEC standard coupling bandwidth and signal bandwidth

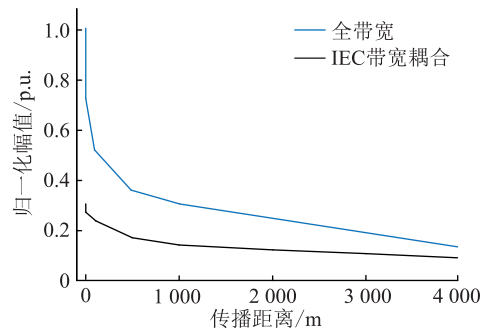


图 9 全带宽耦合以及 IEC 标准耦合衰减情况

Fig.9 Full bandwidth coupling and IEC standard coupling attenuation

阻抗与耦合电容器的谐波电流为:

$$I_{\max} = U_{\max} 2\pi f C_{\text{coupling}} \quad (10)$$

式中: $U_{\max}$ 为电源(谐波)电压峰值; $f$ 为电源(谐波)频率; $C_{\text{coupling}}$ 为耦合电容值。

由上述分析可知,电缆所构成的信号系统对波形相同但幅值不同的脉冲响应是线性的,这是固定频率下该系统的本质特征,而该系统对不同波形、相同放电脉冲响应的一致性才是决定信号耦合带宽与信号本身相匹配的关键。因此,在局部放电校准时,采用相同波形脉冲、不同放电量所得到的校准因数对于长段电缆不再具有测量学意义。

为了能够保证校准的准确性和适用性,IEC 标准信号耦合带宽应该与校准脉冲的频谱相一致。因此,校准脉冲的上升沿应小于 60 ns,而耦合带宽应具有尽可能低的下限截止频率,保证校准因数的准确性。图 10 为经校准后,耦合带宽分别为 30~

200 kHz, 30~400 kHz, 50~80 kHz 以及全带宽测量时, 放电脉冲幅值随视在放电量变化的情况。

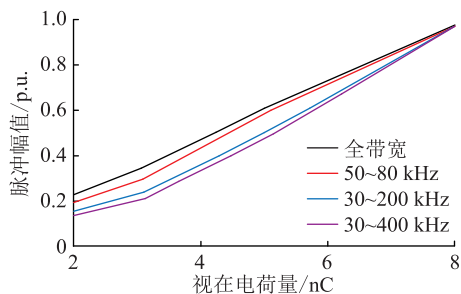


图 10 不同带宽下的放电量校准曲线  
Fig.10 Discharge calibration curve at different bandwidths

由图 10 可知, 耦合带宽为 50~80 kHz 时的曲线与线性校准曲线并不重合, 但与其他耦合带宽的校准曲线相比, 其准确度已经更加接近实际情况。校准因数的准确性取决于所选耦合带宽的范围, 当耦合带宽包含于信号频谱中较平坦的区域时, 校准因数相对准确, 而耦合带宽处在信号频谱斜率较大的区域时, 校准因数误差则较大。不同距离下信号频谱的低频区域相对平缓, 在信号校准时应尽可能保持较低的耦合带宽下限截止频率, 并根据校准脉冲上升沿时间来确定耦合带宽的上限截止频率。以文中所采用的 20 ns 校准脉冲源为例, 在 3 km 的传输范围内, 较平坦的频谱范围为 0~300 kHz, 采用 IEC 窄带宽信号耦合能够较好地保证测量准确性, 得到贴近放电量线性校准曲线的结果。

总体而言, 提高耦合带宽来提高信号灵敏度与降低耦合带宽来提高校准准确度是一对矛盾。在以放电量为考核依据的电缆局部放电离线试验中, 一般采用 IEC 窄带或宽带耦合来提高校准准确度; 而对于在线监测, 提高耦合带宽则有助于提高局部放电监测的灵敏度。

### 2.2.2 脉冲分辨率对定位的影响

由 2.1 节可知, 在局部放电脉冲在电缆的传播过程中, 其高频含量衰减较大。在保证测量准确度的前提下, 耦合带宽所能覆盖的测量频谱中的平坦区域处于较低频段, 且频带较窄。因此, 宽频带测量方法并不适合用于测量经长段电缆传输后的脉冲。由 2.1 节中的分析可知, 当脉冲的传播距离在千米级时, 采用 IEC 宽频带耦合得到的信号不再能够量化放电量的大小, 而采用窄带耦合得到的较低频脉冲虽然具有放电量的标定能力, 但脉冲分辨率相对宽频带耦合较低。

IEC 宽带方法的分辨率脉冲时间为 5~20 μs (由滤波带宽决定), 当连续脉冲间隔大于 20 μs 时,

不会造成脉冲重叠; 而对于 IEC 窄带方法, 其脉冲分辨率将大于 80 μs, 由此造成的脉冲重叠(检测脉冲频次<实际脉冲频次)和定位失败将难以避免。

对于脉冲频次的统计而言, 脉冲间隔时间必须等于或大于脉冲分辨率时间; 对于基于时域反射法的局部放电定位而言, 局部放电所形成的 2 个半脉冲(前行和反行)到达时间的差异必须大于脉冲分辨率的差异。以一根电缆 800 m 处发生局部放电为例, 在电缆一端对电缆局部放电信号进行监测, 采用 IEC 宽带的方法, 检测器时间常数为 10 μs, 检测器检测到的脉冲反射波形, 经过 1 600 m 的传播到达检测装置, Δt = 10 μs, 如图 11 所示, 脉冲波形就会发生重叠, 同时, 一次放电可能会产生多个脉冲信号, 如果检测器带宽过小的话, 可能造成脉冲波形漏测, 导致检测到的放电量远小于实际放电量。

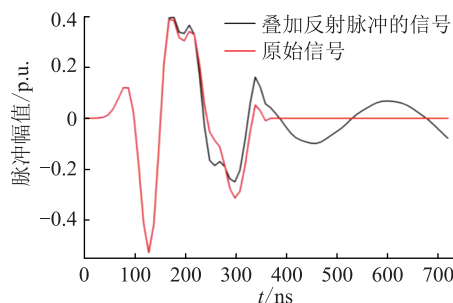


图 11 脉冲重叠现象

Fig.11 Pulse overlap phenomenon

考虑到局部放电脉冲产生的时延也会达到微秒级别, 对于 1~4 km 长度的电缆, 采用传统 IEC 测量方法将难以实现准确的局部放电故障定位。此时, 基于时域反射法的故障定位需依靠宽频带信号耦合方法来实现, 如采用 1 kHz~30 MHz 带宽的高频电流法。

## 3 带宽对测量信噪比的影响

局部放电测量的信噪比决定了实际测量的效果, 这对于放电脉冲的获取和故障定位都极为重要。电缆局部放电测量噪声的下限由电缆的热噪声(约翰逊噪声)水平决定<sup>[21]</sup>, 由式(11)进行估算, 电缆的局部放电脉冲幅值可由式(12)计算得到。

$$\overline{v_n^2} = 4k_B T Z \quad (11)$$

$$V_p = \frac{QZ}{\beta\sqrt{2\pi}} \quad (12)$$

式中:  $k_B$  为波尔兹曼常数, 取  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K;  $T$  为绝对温度;  $Z$  为电缆的传输阻抗;  $V_p$  为局放脉冲幅值;  $Q$  为放电量;  $\beta$  为 60% 峰值脉宽, 其值为信号在电缆中的衰减率或传输距离的函数。对于具有 30 Ω 传

输阻抗的电缆,在 15 MHz(3 dB 截至频率)带宽下,其热噪声水平的均方根值为  $2.7 \mu\text{V}$ (噪声功率  $0.24 \text{ pW}$ )。将信号脉冲幅值与噪声最大值的比值作为信号测量的信噪比  $Q_{\text{SNR}}$ ,则可由式(11)和式(12)计算得到:

$$Q_{\text{SNR}} = \frac{QZ}{2\beta\sqrt{2\pi k_B TZ}} \quad (13)$$

由此可知,耦合信号的带宽(即脉冲宽度系数  $\beta$ )将直接影响信号测量的实际信噪比。耦合信号的带宽越大,信噪比越低。

在实际电缆局部放电测量中,测量系统的带宽会显著影响局部放电测量的信噪比。假设耦合信号带宽小于实际信号带宽,而在长段电缆中可能出现耦合信号带宽大于实际信号带宽的情况,此时,实际测量的信噪比将小于理论计算得到的信噪比。

#### 4 局放信号的衰减传播特性试验分析

文中试验侧重分析局放信号在不同长度电缆中传播时特征参数的变化,即信号波形、波头时间和信号幅值的变化。按照图 12 所示的试验系统,分别对 3 根型号为 YJV62-8.7/15 kV、不同长度(长度分别为 106 m, 160 m, 235 m)的电缆,由匹配阻抗向电缆终端注入脉冲信号,波前时间约为 20 ns,初始信号幅值约为 5 V。根据 IEC 60270 脉冲电流法标准,波前时间为 20 ns 的放电脉冲波形已经能够较为精确地逼近真实电缆线路内部局放信号。

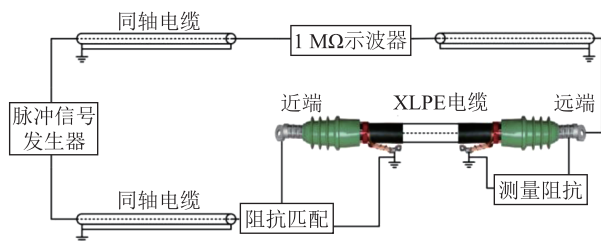


图 12 试验接线示意

Fig.12 Test wiring schematic diagram

由实验结果可知,随着电缆长度的增加,脉冲信号波形存在明显的衰减和畸变(如图 13 所示)。为了方便比较,去除波传播距离对脉冲时延的影响,对测量脉冲起始时间进行规整。在信号幅值上,106 m, 160 m, 235 m 电缆远端脉冲测量幅值分别衰减为原信号(近端)幅值的 72%左右(衰减 1.43 dB), 61%(衰减 2.15 dB), 46%(衰减 3.37 dB);在波前时间上,106 m, 160 m, 235 m 电缆远端脉冲波前分别为原信号(近端)波前 1.55 倍(31 ns), 1.8 倍(36 ns), 2.1 倍(42 ns)。试验所得规律与理论仿真模型所得规律基本一致。

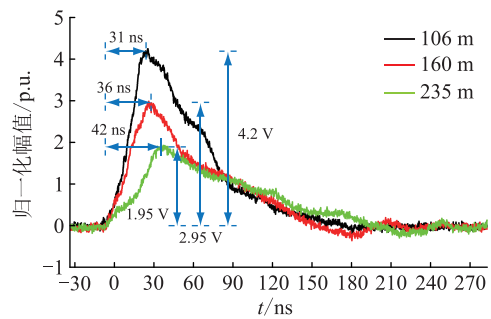


图 13 脉冲波形随电缆长度的变化

Fig.13 Variation of pulse waveform with cable length

#### 5 结语

文中在考虑了电缆集肤效应以及色散效应的前提下,对电缆中局放脉冲传播过程进行了仿真分析。通过仿真,获得了脉冲传播的规律,有助于选择合适的传感器,耦合脉冲信号。

在传播过程中,脉冲的形状和幅值会发生变化。高频衰减非常快,低频保持平坦。这是因为集肤效应,电缆分布参数模型中的电阻会相应增加,导致衰减常数增大,最终导致波形畸变。同时对于高频分量,电缆的介电损耗随着频率的增加而增大,导致脉冲波形幅度减小,脉宽变宽。因此,在实际测量中,使用高截止带宽数值较低的耦合阻抗能够保证对脉冲波形进行较好的测量。

对脉冲波形进行积分观察其放电量发现,脉冲放电量下降速率较脉冲幅值下降速率相对较慢,这主要是因为色散造成脉冲信号的频率移位,而其中的高频分量衰减相对较快,随着信号的传播,脉冲逐渐被拉宽但幅值下降速率逐渐降低。

使用带宽较宽耦合阻抗测量局放信号虽然具有较高的灵敏度,但是得到的电荷校准曲线却误差较大,并且随着检测带宽的增大,带宽内信号的信噪比降低,缺陷检出能力降低;窄带耦合虽然能够获得较为准确的电荷校准曲线,却会导致脉冲波形发生叠加,影响故障点定位。因此,在实际应用中,需要根据实际需求,确定检测带宽。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2018028)资助,谨此致谢!

#### 参考文献:

- [1] 魏钢,唐炬,文习山,等. 局部放电信号在交联聚乙烯高压电力电缆中的衰变及其检测[J]. 高电压技术,2011,37(6): 1377-1383.
- WEI Gang, TANG Ju, WEN Xishan, et al. Decay and detection of partial discharge signal in XLPE high voltage power cable [J]. High Voltage Technology, 2011, 37(6): 1377-1383.
- [2] 陈向荣,徐阳,徐杰,等. 工频电压下 110 kV XLPE 电缆电树

- 枝生长及局放特性[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2436-2443.
- CHEN Xiangrong, XU Yang, XU Jie, et al. Electrical tree growth and partial discharge characteristics of 110 kV XLPE cable under power frequency voltage[J]. High Voltage Technology, 2010, 36(10): 2436-2443.
- [3] DISSADO L A. Understanding electrical trees in solids: from experiment to theory[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2002, 9(4): 483-497.
- [4] 周涛, 曾祥君. 交联聚乙烯电缆局部放电脉冲高灵敏度检测方法研究[J]. 高压电器, 2013, 49(5): 26-30.
- ZHOU Tao, ZENG Xiangjun. Study on high sensitivity detection method of partial discharge pulse in XLPE cable[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(5): 26-30.
- [5] 朱晓辉, 杜伯学, 周风争, 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.
- ZHU Xiaohui, DU Boxue, ZHOU Fengzheng, et al. Research status of high voltage XLPE cable online monitoring and detection technology [J]. Insulation Materials, 2009, 42(5): 58-63.
- [6] 张周胜, 马爱清, 盛戈峰. 高压交联聚乙烯电缆局部放电脉冲的时频特性识别方法[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 1997-2003.
- ZHANG Zhousheng, MA Aiqing, SHENG Gehao. Time frequency characteristic identification method of partial discharge pulse in high voltage XLPE cable [J]. High Voltage Technology, 2011, 37(8): 1997-2003.
- [7] 刘蓉, 李继胜, 田维坚, 等. XLPE 电力电缆典型缺陷局部放电测量与分析[J]. 高压电器, 2015(2): 44-50.
- LIU Rong, LI Jisheng, TIAN Weijian, et al. Partial discharge measurement and analysis of typical defects in XLPE power cable[J]. High Voltage Apparatus, 2015(2): 44-50.
- [8] MONTANARI G C. Partial discharge detection in medium voltage and high voltage cables: maximum distance for detection, length of cable, and some answers[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2016, 32(5): 41-46.
- [9] 罗俊华, 冯江, 袁检, 等. 交联聚乙烯电缆局部放电高频检测技术的研究[J]. 电网技术, 2001, 25(12): 42-45.
- LUO Junhua, FENG Jiang, YUAN Jian, et al. Study on high frequency detection technology of partial discharge in XLPE cables [J]. Power System Technology, 2001, 25(12): 42-45.
- [10] 张伟, 张龙, 黄志伟, 等. 考虑频变参数的交联聚乙烯电缆中局部放电传播特性的时域分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3461-3467.
- ZHANG Wei, ZHANG Long, HUANG Zhiwei, et al. Time domain analysis of partial discharge propagation characteristics in XLPE cables with frequency dependent parameters[J]. High Voltage Technology, 2014, 40(11): 3461-3467.
- [11] 段乃欣, 赵中原, 邱毓昌, 等. XLPE 电缆中局部放电脉冲传播特性的实验研究[J]. 高压电器, 2002(4): 16-18.
- DUAN Naixin, ZHAO Zhongyuan, QIU Yuchang, et al. Experimental study on propagation characteristics of partial discharge pulse in XLPE cable[J]. High Voltage Apparatus, 2002(4): 16-18.
- [12] MUGALA G, ERIKSSON R, PETTERSSON P. Dependence of XLPE insulated power cable wave propagation characteristics on design parameters[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2007, 14(2): 393-399.
- [13] 孙鹏, 李书灵, 梁志伟, 等. 基于电缆传递函数和信号上升时间的电力电缆局部放电在线定位方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1204-1213.
- SUN Peng, LI Shuling, LIANG Zhiwei, et al. Partial discharge online location method based on cable transfer function and signal rise time[J]. High Voltage Technology, 2015, 41(4): 1204-1213.
- [14] 郭灿新, 张丽, 钱勇, 等. XLPE 电力电缆中局部放电检测及定位技术的研究现状[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 56-60.
- GUO Canxin, ZHANG Li, QIAN Yong, et al. Research status of partial discharge detection and location technology in XLPE power cables [J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 56-60.
- [15] 杜浩, 关弘路, 玉林威, 等. 直流电压下 10 kV 交联聚乙烯电缆气隙缺陷局部放电特性研究[J]. 浙江电力, 2019, 38(9): 74-80.
- DU Hao, GUAN Honglu, YU Linwei, et al. Investigation of partial discharge characteristics of void defects in 10 kV XLPE cable under DC voltage[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(9): 74-80.
- [16] 李乃一, 曹俊平, 王少华, 等. 高压交联聚乙烯电缆附件典型缺陷局部放电特性分析[J]. 浙江电力, 2019, 38(1): 58-63.
- LI Naiyi, CAO Junping, WANG Shaohua, et al. Analysis on partial discharge characteristics of typical high-voltage XLPE cable accessory defects[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(1): 58-63.
- [17] OUSSALAH N, ZEBBOUDJ Y, BOGGS S A. Partial discharge pulse propagation in shielded power cable and implications for detection sensitivity[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2007, 23(6): 5-10.
- [18] 马星河, 朱昊哲, 刘志怀, 等. 基于 VMD 的电力电缆局部放电信号自适应阈值降噪方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 145-151.
- MA Xinghe, ZHU Haozhe, LIU Zhihuai, et al. An adaptive threshold value noise suppression method for detecting partial discharge of power cables based on variational mode decomposition [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 145-151.
- [19] 刘震宇, 刘振英, 范贺明. 基于 EMD-ICA 的高压电缆局部放电信号去噪研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 83-87.
- LIU Zhenyu, LIU Zhenying, FAN Heming. Study on signal denoising of high voltage cable partial discharge based on EMD-ICA [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 83-87.
- [20] 廖雁群, 惠宝军, 夏荣, 等. 110 kV 电缆中间接头及本体典

型缺陷局部放电特征分析[J]. 绝缘材料, 2014, 47(5): 60-67.

LIAO Yanqun, HUI Baojun, XIA Rong, et al. Analysis of partial discharge characteristics of typical defects in 110 kV cable intermediate joint and body [J]. *Insulation Materials*, 2014, 47(5): 60-67.

[21] MARDIANA R, SU C Q. Partial discharge location in power cables using a phase difference method[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2011, 17(6): 1738-1746.

作者简介:



高旭泽

高旭泽(1994),男,硕士,研究方向为高压电力设备状态监测与绝缘诊断(E-mail: gaoxz1114@126.com);

段然(1996),男,硕士在读,研究方向为高电压与绝缘技术;

任明(1987),男,博士,研究方向为高压电力设备状态监测与绝缘诊断。

## Transmission characteristics and coupling of partial discharge pulse signals in long cables

GAO Xuze<sup>1</sup>, DUAN Ran<sup>1</sup>, REN Ming<sup>1</sup>, TAN Xiao<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation for Power Equipment(Xi'an Jiaotong University)

Xi'an 710049, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** For XLPE cables, partial discharge can detect various insulation defects, However, when the partial discharge pulse propagates in the cable, the pulse waveform changes due to attenuation. A thorough analysis of the change of pulse waveform when cable partial discharge pulse propagates and the influence of different coupling bandwidths on signal detection is discussed. It is concluded that when cable partial discharge occurs, the amplitude of pulse signal follows. The increase of propagation distance decreases rapidly, but the attenuation amplitude of apparent discharge is relatively small; at the same time, broadband coupling has higher sensitivity, but its charge calibration curve error is larger and it will lead to the decrease of signal-to-noise ratio; although narrowband coupling can obtain more accurate charge calibration curve, it will cause pulse waveforms to overlap, affecting fault location.

**Keywords:** long cable; partial discharge; transmission characteristics; high frequency attenuation; matched bandwidth

(编辑 钱悦)