文章编号:1000-582X(2008)07-0760-06

# 检测电缆附件局部放电内置传感器的特性分析

唐 炬,邓志勇,龚宁涛,张晓星,魏 钢

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400030)

摘 要:针对高压交联聚乙烯(cross-linked polyethylen,XLPE)电缆的结构及其附件内部易出 现绝缘缺陷而导致放电的特点,基于电容耦合原理研制出用于电缆附件局部放电(partial discharge,PD)信号检测的宽频带电容型内置传感器,通过建立传感器特性分析的电路模型,全面 分析了影响传感器性能的各个因素,对其响应的频率特性进行了实测,并在实验室 110 kV XLPE 电缆 PD 试验平台上对电缆接头内部沿固体复合介质表面产生的放电进行试验研究。测试结果表 明:研制的内置电容型传感器频率响应特性优异,能传感纳秒级暂态脉冲信号,其有效频带达 500 MHz,可以用于 XLPE 电缆及附件 PD 超高频(Ultra-high frequency, UHF)信号的检测。

关键词:交联聚乙烯电缆;电容型传感器;局部放电;频率响应;超高频 中图分类号:TM835 
文献标志码:A

# Performance analysis of inner sensors used for partial discharge detection in cable accessories

TANG Ju, DENG Zhi-yong, GONG Ning-tao, ZHANG Xiao-xing, WEI Gang

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipments and System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: The structure of high voltage cross-linked polyethylene (XLPE) cable and the characteristics of partial discharge (PD) mean that such discharges are very likely to happen in cable accessories due to insulation defects. The authors designed a wideband inner capacitive coupler for PD detection in cable accessories, and analyzed the characteristics of the coupler using an equivalent circuit model. The frequency response characteristics of the coupler were measured by square wave response. In addition, the measured results of the surface discharge produced along the dielectric interface in joints are given in 110 kV XLPE cable accessories. It is shown that the couplers work well in bands up to 500 MHz and can detect nanosecond transient pulse signals effectively. The couplers are available for ultra-high frequency (UHF) measurement of PD in cables and cable accessories.

**Key words**: cross-linked polyethylene cable; capacitive coupler; partial discharge; frequency response; ultra-high frequency

随着城市电网改造和升级步伐的进一步加快, XLPE 电缆以其优越的电气性能,良好的热、机械效 应和安装维护方便等特点被广泛应用于电力系统各 种电压等级的输电线路和配电网中。然而,在电缆 投入运行后,由于长期受到水分、潮气以及各种腐蚀 性物质的侵蚀渗透,加上制造或安装时的局部缺陷,

收稿日期:2008-02-26

基金项目:重庆市自然科学基金重点资助项目(CSTC,2006BA3018)

作者简介:唐炬(1960-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事高压电气设备绝缘在线监测及故障诊断研究, (Tel)023-65112739; (E-mail)cqtangju@vip. sina. com。

如杂质气泡、毛刺凸起、应力锥移位等,在运行中经 常使电缆绝缘 PD 并引发击穿闪络的严重事故。大 量统计数据表明,PD 是造成电缆绝缘破坏的主要原 因之一,而电缆附件又是电缆线路绝缘品质最薄弱 的环节<sup>[1-3]</sup>。因此,对电力电缆线路尤其是附件的绝 缘进行 PD 监测有着重要意义。

XLPE 电缆 PD 时会产生持续时间仅为纳秒级的陡脉冲电流,其等值频率可达到吉赫兹级。对电缆而言,虽然内部 PD 信号具有很宽的频谱,但是由于电缆独特的分层半导电绝缘以及复杂的金属屏蔽结构,使得高频电磁波信号不易向外辐射且沿电缆本体传输时严重衰减<sup>[4-7]</sup>。为了有效检测电缆 PD 信号,目前,国外普遍采用将测量单元装设在电缆或附件的内部,研究方法包括有电容耦合法,方向耦合法、超高频电感法等;国内则主要采用外置电磁耦合法<sup>[8-11]</sup>,与内置传感器相比外部电磁耦合法检测频带窄,且易受到现场干扰的影响,灵敏度和抗干扰能力较差。

笔者从电气测量的角度,对检测 110 kV XLPE 电缆附件 PD 用的内置传感器进行研究,利用高压 电力电缆的皱纹金属屏蔽结构研制了一种宽频带电 容型内置传感器,在建立的传感器电路模型上系统 深入地分析了影响传感器性能的各种参数;通过暂 态方波响应法分析传感器响应的频率特性,并在实 验室对构建电缆附件绝缘缺陷产生的 PD 信号进行 实测,以此检验传感器的综合性能。

#### 1 内置传感器结构与电路模型

研制的电容型内置传感器安装方式和结构如 图 1 所示。切开电缆外护套和皱纹金属屏蔽,置入 厚度为 0.5 mm、宽度为 30 mm 的金属铜环并用聚 丙烯薄膜支撑将其固定在电缆外半导电层上,再通 过 2 个钳式圆形法兰跨接金属断层,恢复电缆屏蔽。 在工频电压下,由于外半导电层与金属外屏蔽电位 几乎相等,所以置入的圆环电极不会对电缆主绝缘 性能产生影响。

考虑到电力电缆的同轴结构,且内置圆环电极 的尺寸较小,传感器的作用在整个测量频域内可视 为一电容分压器,以静电耦合的方式传感 PD 信 号<sup>[12-14]</sup>。对于电容型的耦合传感器,影响其频率特 性最主要的因素是杂散电感  $L_s$ ,而在本传感器设计 中, $L_s$  主要存在于圆环电极到信号电缆接头间的金 属连线,为了防止与低压臂电容形成高频振荡,在圆 环电极和金属法兰之间并联有 2.0 kΩ 阻尼电阻 R, 其等效电路模型如图 2 所示。

图 2 中  $C_1$  为圆环电极与缆芯之间形成的耦合 电容; $C_2$  为传感器与金属法兰之间的等值杂散电 容; $Z_L$  为测量系统总的输入阻抗; $Z_0$  为 XLPE 电力 电缆的特性阻抗,其值可以通过电缆单位长度下的



图1 内置传感器



图 2 传感器等效电路

电容 C<sub>0</sub>和单位长度下的电感 L<sub>0</sub>来计算:

$$\begin{cases} Z_0 = \sqrt{L_0/C_0}, \\ C_0 = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r/\ln(D_i/D_c), \\ L_0 = \mu_0\mu_r\ln(D_i/D_c)/2\pi_s \end{cases}$$
(1)

式中: $D_i$ 为绝缘层外径; $D_c$ 为导电线芯外径(含内半 导电层); $\epsilon_r$ 为绝缘层的相对介电常数; $\epsilon_0$ 为真空介 电常数; $\mu_r$ 为绝缘层的相对磁导率; $\mu_0$ 为真空的磁 导率。

当电缆某处(A 点)发生 PD 时,其脉冲信号沿 电缆线芯传播,当到达 B 点时,径向位移电流流经 C 点产生电压输出 U<sub>0</sub>,根据图 2 中传感器的等效电路 模型可得到传感器在频域的传递函数为

$$H(\omega) = U_0 / U_i =$$
(2)

 $\overline{j\omega Z_{\rm L}(C_1+C_2)-\omega^2 L_{\rm s}(C_1+C_2)+(j\omega L_{\rm s}+Z_{\rm L})/R+1}^{\circ}$ 

依据式(2)可计算当  $L_s = 8 \text{ nH}(曲线 a) \mathcal{D} L_s = 0 \text{ nH}(曲线 b)$ 时的传感器幅频响应特性曲线,如图 3 所示(其中  $C_1 = 7 \text{ pF}, C_2 = 21 \text{ pF}, Z_L = 50 \Omega$ )。

从图 3 中曲线的变化趋势可以看出,传感器在 整个测量频率的幅频响应特性近似一高通滤波器, 频率越高,输出的增益也就越大。当 f < 100 MHz 时,a、b 曲线几乎同为一条上升的直线,表明圆环传 感器在该频带内具有优异的频率响应特性,且  $L_s$  影 响也可以忽略;当 f > 100 MHz 时, $L_s$  的影响逐渐增



图 3 内置传感器幅频响应特性

大,曲线 a 的响应输出比曲线 b 略高;当 f>450 MHz 时,L<sub>s</sub> 的存在使得传感器的灵敏度大为降低,因此,为 了保证传感器在整个测量频域内都获得较高灵敏度和 保持良好传输特性,应使 L<sub>s</sub> 尽可能地减小。

此外,在上述电路模型中,考虑到  $C_2$  和 R 对传 感器特性的影响,分别计算了不同  $C_2$  和 R (其中  $C_1 = 7 \text{ pF}, L_s = 8 \text{ nH}, Z_1 = 50 \Omega$ )下传感器的频率响 应特性,如图 4、5 所示。





图5 R对传感器频率响应的影响

从图 4、5 中曲线的变化趋势可以看出,随着  $C_1/C_2$  值的增加,传感器高频段响应曲线平移上升, 输出特性得到显著改善。相比 R 的影响范围主要 集中在 100 MHz 以下,且当R 高于 2 k $\Omega$  时,响应增 益变化很小。对于设计的内置圆环传感器, $C_1$  主要 取决于电力电缆结构参数及圆环电极宽度, $C_2$  与圆 环电极离法兰的距离有关,距离越大,其等值杂散电容越小。因此,在传感器实际应用测试中,针对所要研究的频率范围和电缆类型的不同,可以在不影响电缆工作场强情况下,通过适当增大圆环电极尺寸或调整电极与金属法兰之间的距离来增大 C<sub>1</sub> 或减少 C<sub>2</sub> 的值,从而改善传感器高频响应输出特性,以便在所选定的测量频带内都获得最佳灵敏度和传感特性。

## 2 内置传感器性能测试

为实际考核所研制的传感器对暂态高频脉冲信号的耦合能力,采用方波响应特性法对传感器频率 响应特性进行实测,其试验方法是在电缆末端匹配 32 Ω的电缆波阻抗电阻后,用示波器直接观测记录 传感器对电缆线芯注入方波信号的响应输出。图 6 显示了传感器对下降沿为 2 ns,幅值为 350 mV 方 波信号的响应输出结果。



图 6 传感器方波响应测试结果

从图 6 可以看出,设计的内置传感器的高频暂态响应特性优异,传感器响应波形的下降沿时间与 方波源信号下降沿时间基本相同,可以认为传感器 能真实反映方波信号的下降沿,有较理想的方波响 应特性,且振荡较小,具备了很强的耦合高频暂态信 号能力。图 6(b)中信号到达暂态幅值后迅速下降 到零是因为阻尼电阻 R 和示波器的输入电阻对 C<sub>2</sub> 上的电荷放电所致,这并不影响传感器对脉冲信号 的响应。

为检验传感器在不同幅值下的暂态输入输出特性,用 TekCFG280 产生的方波信号进行测试,通过记录不同方波幅值 U;下的传感器响应输出电压幅值 U。得到传感器的输入输出特性曲线如图 7 所示,结果表明传感器对于高频暂态信号有很好的线性耦合输出,具有良好的幅值响应线性度。



图 7 传感器暂态输入输出特性曲线

### 3 XLPE 电缆 PD 信号的测量

3.1 电缆 PD 内置传感器测量系统

整个电缆 PD 测试系统的原理接线如图 8 所示,2 段总长为 4.2 m 的 110 kV XLPE 电缆通过一 个模拟的中间接头连接在一起,末端通过应力锥接 入试验变压器。检测 PD 的 2 个内置传感器安装在 接头的左端,距放电源为 0.8 m 和 2.9 m。模拟接 头是基于电缆接头内部绝缘分布按照多层固体复合 介质绝缘状态设计的<sup>[15-16]</sup>,其结构如图 9 所示。当 试验电压达到一定值时,PD 会在主绝缘与增绕绝缘 之间的界面发生。为验证传感器的特性,输出信号 不进行任何前置放大处理,直接由同轴射频电缆传 输至示波器。此外,为观察 PD 发生的相位或相对 位置,通过分压器获取工频试验电压信号,用 Tektronix 7104 数字存储示波器同时采集两传感器 和分压器的信号。



图 8 110 kV 电缆 PD 测量接线图



图 9 模拟的电缆中间接头

当试验电压升至 5.2 kV 时,两传感器同时观测 到 PD 脉冲信号。图 10 为传感器 1 的单个放电脉

冲的纳秒级波形展开图,从图中看出传感器耦合到 陡度约为 2 ns 的放电脉冲信号,其结果进一步证实 内置圆环传感器超强的耦合高频暂态放电信号 能力。



图 10 传感器 1 的 PD 信号

图 11、12 分别显示两传感器检测到 PD 信号脉 冲波形和频谱能量分布图。



由图 11、12 可看出,在没有对信号进行预处理的情况下,PD 信息还是比较明显,传感器检测到 PD 信号能量包含了从低频到超高频段的丰富频率成分,且从其放电波形形状上就能很容易分辨出多个终端反射脉冲。在 PD 沿电缆经过 2.1 m 距离的传

<sup>3.2</sup> 电缆 PD 模拟测试结果与分析

播后,传感器响应脉冲信号存在约 11.3 ns 的时延, 以此 计 算 可 以 得 到 脉 冲 沿 电 缆 传 播 速 度 为 1.86 m/ns,与理论值 1.89 m/ns 基本吻合。此外, 由于电力电缆自身滤波效应,PD 信号高频分量严重 衰减,传感器检测的首个放电脉冲峰值从 11 mV 变 为5 mV,衰减程度达到一半;而在超高频段,对应信 号能量几乎衰减完毕。

图 13、14 为传感器输出加入 0.3~1 GHz、 20 dB的超高频放大滤波单元后的 PD 脉冲时域波 形及频谱。





图 14 PD 信号脉冲的频谱

从图 13、14 可以看出,受超高频滤波单元影响, PD 输出信号的波形发生了畸变,脉冲信号振荡加 剧,尽管传感器 1 检测信号的信噪比有所提高,但传 感器 2 信号能量严重削弱,幅值极低,PD 信号几乎 淹没在背景噪声中。因此,采用电容耦合方式在选 取超高频段对电缆 PD 检测时,一方面可以提高系 统检测的灵敏度,增强其抗干扰能力,但同时也限制 了传感器检测有效距离。从上述测试结果来看,笔 者研制的圆环内置传感器性能可靠,包含频率丰富, 可以作为电缆附件或短距离电缆 PD 超高频信号 测量。

#### 4 结 论

1) 基于电容耦合原理研制了用于高压 XLPE 皱纹金属屏蔽电力电缆及其附件 PD 检测的内置圆 环传感器,通过电容耦合的电路模型,分析了影响传 感器性能的各参数。实测结果表明,研制的传感器 频率响应特性优异,能有效传感纳秒级暂态脉冲信 号,且振荡较小,其检测频带可达到 500 MHz,能用 于电缆附件 PD 的超高频检测。

2) 在选取超高频段对 XLPE 电力电缆附件进行 PD 监测时,为避免放电脉冲因长距离传播衰减带来传感器信号减小而引起的灵敏度降低,传感器应尽可能安放在接头附近。同时,可利用电缆对超高频衰减较快的特点,来提高对电缆接头内部缺陷产生 PD 检测的抗干扰能力。

3) 通过研制的 2 个传感器对发生在电缆接头 内部的沿介质表面的滑闪放电检测表明,传感器检 测的 PD 信号能有效区分入射与反射信号,可以利 用检测放电脉冲波形的时延分析实现对 PD 源的 定位。

参考文献:

- [1]罗俊华,邱毓昌,杨黎明. 10 kV及以上电力电缆运行 故障统计分析[J].高电压技术,2003,29(6):14-16.
   LUO JUN-HUA, QIU YU-CHANG, YANG LI-MING. Operation fault analysis of XLPE power cable above 10 kV[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29 (6):14-16.
- [2]李华春,周作春,陈平. 110 kV及以上高压交联电缆 系统故障分析[J]. 电力设备,2004,25 (8):9-13.
  LI HUA-CHUN, ZHOU ZUO-CHUN, CHEN PING.
  Fault analysis for 110 kV and the above HV crosslinking cable system[J]. Electrical Equipment, 2004, 25(8):9-13.
- [3] 蒋佩南. 国产交联聚乙烯电力电缆击穿故障的评定和 分析[J]. 电线电缆, 2007(2): 1-5.
   JIANG PEI-NAN. Analysis and assessment of the breakdown fault of homemade XLPE power cables[J].
   Electric Wire & Cable, 2007(2): 1-5.
- [4] AMETANI A, MIYAMOTO Y, NAHAOKA N. Semiconducting layer impedance and its effect on cable wave-propagation and transient characteristics [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19 (4): 1523-1531.
- [5] BOGGS S, PATHAK A, WALKER P. Partial discharge XXII: high frequency attenuation in shielded solid dielectric power cable and implications thereof for PD location [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1996, 12(1): 9-16.

1.0

- [6] STEINBRICH K. Influence of semiconducting layers on the attenuation behaviour of single-core power cables
   [J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2005, 152 (2); 271-276.
- [7] VAKILIAN M, BLACKBURN T R, JAMES R E, et al. Semiconducting layer as an attractive PD detection sensor of XLPE cables [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(4):885-891.
- [8] POMMERENKE D, STREHL T, HEINRICH R, et al. Discrimination between internal PD and other pulses using directional coupling sensors on HV cable systems [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6 (6): 814-824.
- [9] TIAN Y, LEWIN P L, DAVIES A E, et al. Partial discharge detection in cable using VHF capacitive couplers [J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulatio, 2003, 10(2): 343-353.
- [10] 徐阳,钟力生,曹晓珑,等. XLPE 电缆及接头局部放电的超高频测量与分析[J].电工电能新技术,2002,21(1):5-8.
  XU YANG, ZHONG LI-SHENG, CAO XIAO-LONG, et al. UHF partial discharge detection in cable and cable accessories [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2002, 21(1): 5-8.
- [11] 韦斌, 王伟, 李成榕,等. VHF 钳型传感器在线检测 110 kV XLPE 电缆局放[J]. 高电压技术, 2004, 30 (7): 37-39.
  WEI BIN, WANG WEI, LI CHENG-RONG, et al. Partial discharges on-line detection of 110 kV XLPE cables using VHF clamp current transducer [J]. High
- [12] 孙才新, 许高峰, 唐炬, 等. 检测 GIS 局部放电的内置

Voltage Engineering, 2004, 30(7): 37-39.

传感器模型及性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 89-94.

SUN CAI-XIN, XU GAO-FENG, TANG JU, et al. Model and performance of inner sensors used for partial discharge detection in GIS [J]. Proceeding of the CSEE, 2004, 24(8): 89-94.

- [13] 唐炬,侍海军,许高峰,等. GIS 局部放电两种内置传 感器响应特性分析[J]. 高电压技术, 2003, 29(2): 29-31.
  TANG JU, SHI HAI-JUN, XU GAO-FENG, et al. Two couplers for detection of partial discharge in gasinsulated substations [J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(2): 29-31.
- [14] 许高峰,侍海军,唐炬,等.用于 GIS 局部放电检测的 电容型传感器[J].重庆大学学报:自然科学版,2003, 26(4):10-13.
  XU GAO-FENG, SHI HAI-JUN, TANG JU, et al. Capacitive coupler used for detecting partial discharge in GIS [J]. Journal of Chongqing University: Natural
- [15] 韦斌, 李颖. 基于 VHF 的交联电缆附件局放检测的研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(2): 30-31.
  WEI BIN, LI YING. Study on PD detection of HV XLPE cable accessories based on VHF technique[J].
  High Voltage Engineering, 2006, 32(2): 30-31.

Science Edition, 2003, 26(4): 10-13.

[16] 戴征宇,姜芸,罗俊华. 预制型电缆附件沿面放电试验 研究[J]. 高电压技术,2002,28(9):7-9.
DAI ZHENG-YU, JIANG YUN, LUO JUN-HUA. Test and research of surface discharge in pre-moulded power cable accessories[J]. High Voltage Engineering, 28(9):7-9.

(编辑 张 苹)

#### (上接第 748 页)

[13] 唐铭,唐炬,谢颜斌,等.一种用于复小波变换的有效系数阈值[J].重庆大学学报:自然科学版,2006,29(10): 5-9.

TANG MING, TANG JU, XIE YAN-BIN, et al. Effective coefficient threshold for complex wavelet transform[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2006, 29(10):5-9.

[14] 赵海龙,王芳,胡晓光.小波包-能量谱在高压断路器 机械故障诊断中的应用[J].电网技术,2004,28(6): 46-48.

ZHAO HAI-LONG, WANG FANG, HU XIAO-

GUANG. Application of wavelet packet-energy spectrum in mechnical fault diagnosis of high voltage circuit breakers[J]. Power System Technology, 2004,28(6): 46-48.

[15] 孙来军,胡晓光,纪延超.一种基于振动信号的高压断 路器故障诊断新方法[J].中国电机工程学报,2006, 26(6):157-161.

SUN LAI-JUN, HU XIAO-GUANG, JI YAN-CHAO. A new method of fault diagnosis for high voltage circuit breakers based on vibration signals[J]. Proceeding of the CSEE,2006,26(6):157-161.

(编辑 李胜春)