

[电缆附件]

电缆附件高频局部放电检测技术及应用

文/胡磊磊
深圳市沃尔核材股份有限公司

局部放电检测是电缆附件绝缘检测的重要手段，其中高频局部放电检测方法能有效发现电缆附件的潜伏性缺陷。利用电缆故障模拟装置获取检测数据，分析不同局部放电故障的时域统计特征，得到不同故障的特征向量，建立局部放电故障特征数据库，为电缆故障诊断提供有力的数据支撑，并通过缺陷模型检测数据验证其检测方法的有效性。

随着经济高速发展，城市电网建设的加快，电网网络的负荷逐步增加，电力企业对电缆诊断测试的要求越来越多。随着电缆长期运行，出现缺陷次数明显增多，主要是电缆内部绝缘老化以及配件材料老化导致的电缆绝缘能力变弱，产生对地击穿故障。为了对电力电缆的状态进行正确的评估，保证在发生灾难性的故障之前进行适当的维护，需要采用适当的诊断检测技术。为了保证电力电缆在电网中安全可靠运行，各电力公司采取了多种局部放电检测手段，其中主要有对电缆进行高频局部放电带电检测。高频局部放电检测对运行中的电缆绝缘诊断及安全运行具有十分重要的意义。

电缆附件高频局部放电检测原理

在高压电缆附件中，导线和金属屏蔽之间由绝缘材料隔开形成分布电容，该电容约为几百皮法，利用分布电容高频信号在电缆内部形成通路。因此，高频的局部放电信号由分布电容对接地引线构成回路传输，在电缆接头屏蔽接地线上安装高频电流传感器，可检测到电缆附件内部放电脉冲信号，并能够确定局部放电性质。检测原理如图1所示。

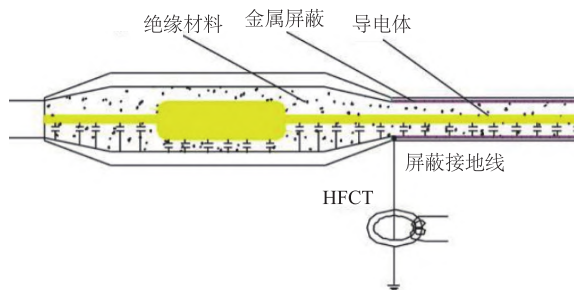


图1 电缆附件高频局部放电检测原理图

高频局部放电传感器研制

高频局部放电传感器通用的有效检测频带一般为3~30 MHz，高频传感器等效电路如图2所示。图2中， $I(t)$ 为传感器耦合的高频脉冲电流； M 为被测试导体与高频电流互感器线圈之间的互感； L_s 、 R_s 、 C_s 分别为高频互感器线圈的自感、等效电阻及等效杂散电容； R 为负载积分电阻； $u_o(t)$ 为高频电流传感器的输出电压信号。

高频电流传感器为开口式设计，能够随时开合，方便测试时安装和拆卸，适合长期使用。高频传感器性能参数为：检测带宽为1~50 MHz；传输阻抗大于5 mV/mA；匹配阻抗为50 Ω同轴电缆。

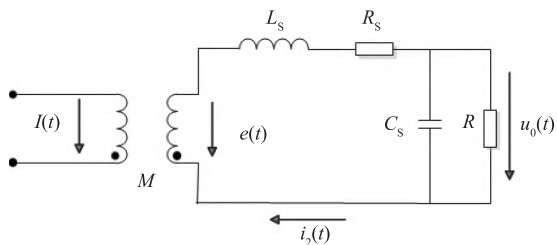


图2 高频电流传感器局部放电检测等效电路图

传感器选择磁导率高的磁心，可有效提高高频传感器的传输阻抗和频带宽度，同时合理的匝数设计也能提高频带范围和传输阻抗。高频传感器设计剖面图如图3所示。其中屏蔽铝外壳起到屏蔽干扰信号作用，采用高强度磁铁快速连接上下两部分，耦合线圈和输出调节线圈控制互感器匝数比，输出接口采用BNC端子，方便连接。

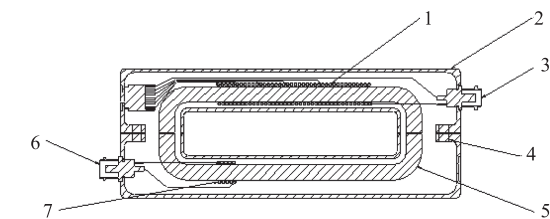
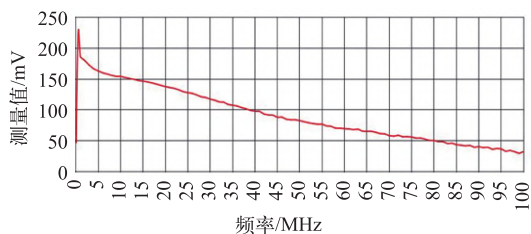


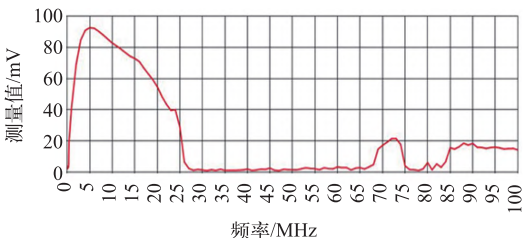
图3 高频传感器设计剖面图

1—输出调节线圈 2—屏蔽铝外壳 3—输出接口 4—磁铁 5—磁芯
6—校准接口 7—耦合线圈

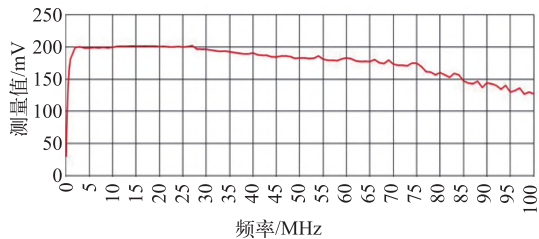
为了获得更宽的频带和更高的传输阻抗，选择不同的磁心材质进行测试。取匝数比为7，选择铁氧体磁心、铁硅铝磁心、钼坡莫合金磁心和铁镍合金磁心进行测试，幅频特性测试对比如图4所示，传输阻抗、幅频特性及灵敏度对比见表1。



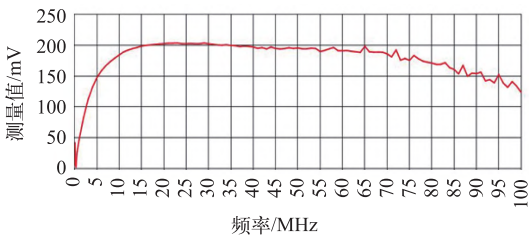
(a) 铁氧体磁心的高频传感器幅频曲线



(b) 铁硅铝磁心的高频传感器幅频曲线



(c) 钼坡莫合金磁心的高频传感器幅频曲线



(d) 铁镍合金磁心的高频传感器幅频曲线

图4 不同磁心材质高频传感器幅频曲线对比图

表1 不同磁心材质测试数据对比表

磁心材质	传输阻抗/ (mV/mA)	灵敏度/ pC	频率特性
铁氧体	3.48	3.2	6 dB带宽结果为39 MHz， 对应频段为1~40 MHz
铁硅铝	7.28	1.2	6 dB带宽结果为20 MHz， 对应频段为1~21 MHz
钼坡莫合金	9.88	0.5	6 dB带宽结果为99 MHz， 对应频段为1~100 MHz
铁镍合金	8.88	1.0	6 dB带宽结果为96 MHz， 对应频段为4~100 MHz

经数据对比分析，钼坡莫合金磁心的高频传

感器传输阻抗、灵敏度及幅频特性最优。

高频检测方法有效性分析

1. 电缆附件尖端故障缺陷

电缆附件尖端故障缺陷模型如图5所示。将长度为40 mm的铜丝安置于电缆终端的高压处，系统加压至5.8 kV，缺陷模型产生局部放电，放电量约为38 pC，高频检测幅值约28.5 mV，高频局部放电检测图谱如图6所示（包括高频局部放电 $Q-\phi$ 统计图、 $N-\phi$ 统计图、PRPD图谱及PRPS图谱，下同）。



图5 电缆尖端故障缺陷模型图

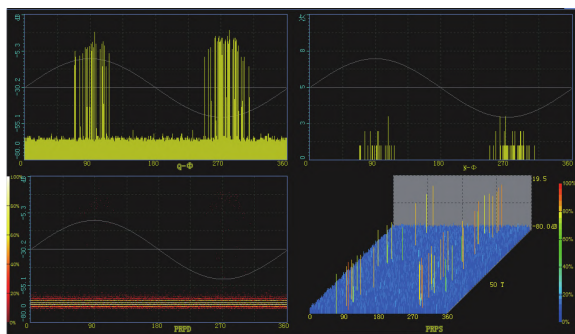


图6 电缆尖端故障缺陷高频局部放电检测图谱

2. 电缆附件沿面故障缺陷

电缆附件沿面故障缺陷模型如图7所示。电缆绝缘屏蔽层与交联聚乙烯（XLPE）电缆绝缘层交界处插入两根约10 mm的铜丝，一根连接高压，一根连接大地，两根针尖距离约2 mm，系统加压至7.2 kV，缺陷模型产生局部放电，放电量约为105 pC，高频检测幅值约99.6 mV，高频局部放电检测图谱如图8所示。



图7 电缆沿面故障缺陷模型图

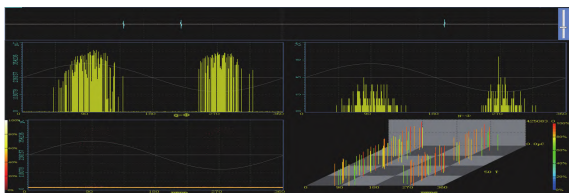


图8 电缆沿面故障缺陷高频局部放电检测图谱

3. 电缆附件悬浮故障缺陷

电缆附件悬浮故障缺陷模型如图9所示。电缆高压端部用绝缘胶布固定铝金属箔片，金属片长20 mm，宽15 mm，厚度2 mm，系统加压至8.6 kV，缺陷模型产生局部放电，放电量约为86 pC，高频检测幅值约59.6 mV，高频局部放电检测图谱如图10所示。



图9 电缆悬浮故障缺陷模型图

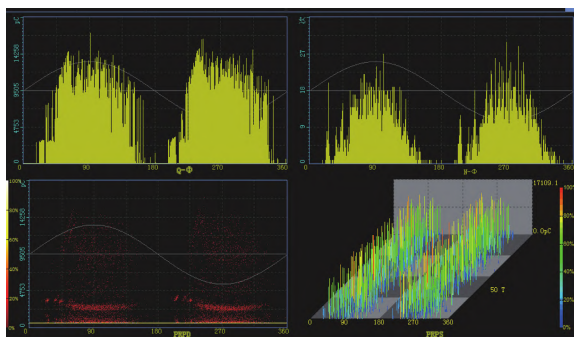


图10 电缆悬浮故障缺陷高频局部放电检测图谱

4. 检测有效性分析

通过检测图谱及数据得知，高频局部放电检测能有效检出电缆不同缺陷故障，但受电缆本身的材料及结构影响，不同缺陷的检测灵敏度有所区别，悬浮缺陷检出灵敏度最高。高频局部放电现象主要集中在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 及 $180^\circ \sim 270^\circ$ ，统计图谱形状有所区别， $Q-\phi$ 统计图呈现矩形分布， $N-\phi$ 统计图呈现正态分布。

结束语

本文介绍了电缆附件高频局部放电的检测方法，研制了高频局部放电传感器，并通过电缆缺陷故障模型进行试验验证，得出结论：

- 1) 高频电流传感器磁心材质采用钕坡莫合金，性能参数最优。
- 2) 电缆三种不同缺陷故障高频局部放电法都能

(下转第130页)

的可行性，将施工实施依据由传统纸质图样转变为手持终端以及计算机端的立体三维模型，实现图样数据智能化获取分析的无纸化工作新方式。

3. 实施智慧建造，强化智慧现代工地管理

新型项目群在工地现场布设信息采集终端，对工地现场进行图像的采集、录像存储、网络传输，实时监测工地现场的温度、湿度、PM2.5、风力、风向、噪声等环境信息，通过现场智能监控屏，远程实时查看施工进度情况和操作情况，监控现场物资材料的安全与机械设备的使用安全。基于海量工程现场图像，利用人工智能自主学习，不断迭代数据分析能力，实现智能识别工地中的安全风险与人员违规操作行为，以及自动报警接收和发送功能。

结束语

本文以系统论、协同理论、项目管理理论和全生命周期管理理论为基础，以主体、资源、管理和时间四个要素为主要维度，构建四维理论内涵框架模型，并通过数字手段保障与引领，进一步优化了无形资源（停电窗口、施工空间等）和有形资

源（人、财、物等）的配置效率，强化了造价、进度、质量和安全管控能力，提升了电力工程项目群效益最大化。EA

（收稿日期：2023-10-27）

参考文献

[1] 常绍舜. 从经典系统论到现代系统论[J]. 系统科学学报, 2011, 19(3): 1-4.

[2] 白列湖. 协同论与管理协同理论[J]. 甘肃社会科学, 2007(5): 228-230. DOI: 10.15891/j.cnki.cn62-1093/c.2007.05.065.

[3] 丁锐. 项目管理理论综述[J]. 合作经济与科技, 2009(7): 50-51.

[4] 魏光兴. 企业生命周期理论综述及简评[J]. 生产力研究, 2005(6): 231-232. DOI: 10.19374/j.cnki.14-1145/f.2005.06.094.

[5] 魏丽丝. 生命周期理论文献综述[J]. 合作经济与科技, 2014(24): 155-156. DOI: 10.13665/j.cnki.hzjjykj.2014.24.091.

（上接第122页）

有效检出，由于电缆本身特性的影响，悬浮缺陷检出灵敏度最高，沿面缺陷、尖端缺陷次之，高频局部放电脉冲主要集中在两个区域， $Q-\phi$ 统计图呈现矩形分布， $N-\phi$ 统计图呈现正态分布。EA

（收稿日期：2023-11-16）

参考文献

[1] 刘火良, 杨森. STM32库开发实战指南: 基于STM32F103[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.

[2] 但敏, 郝建, 廖瑞金, 等. 直流电压下矿物油和天然酯中纤维颗粒运动及成桥特性的差异[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 665-672.

[3] 李斯盟, 李清泉, 刘洪顺, 等. 正极性直流电压下油纸绝缘针板电极局放脉冲波形与局放机理[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(20): 6173-6187.

[4] 李军浩, 韩旭涛, 刘泽辉, 等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2583-2601.

[5] 李鹏, 谷琛, 陈东, 等. $\pm 1\ 500\ \text{kV}$ 特高压直流输电技术前期研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3139-3148.

[6] 施萱轩, 孟军, 梁浩, 等. 配电网故障抢修质量与效率评价体系研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(5): 143-147, 154.

[7] 齐波, 魏振, 李成榕, 等. 交直流复合电压作用下油纸绝缘典型缺陷放电现象及特征[J]. 高电压技术, 2015, 41(2): 639-646.

[8] 李清泉, 李斯盟, 司雯, 等. 基于局部放电的电力变压器油纸绝缘状态评估关键问题分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(8): 132-139.

[9] 熊庆, 祝令瑜, 汲盛昌, 等. 直流及复合电压作用下油纸绝缘局部放电研究综述[J]. 绝缘材料, 2017, 50(1): 1-7.

[10] 王少华, 叶自强, 梅冰笑. 输变电设备在线监测及带电检测技术在电网中的应用现状[J]. 高压电器, 2011, 47(4): 84-90.