

基于一二次融合的电 缆局部放电和接地环流智能传感器的研制

文/贵州电网有限责任公司凯里供电局 唐煊阳 丁志敏 杨 诚 袁一方 顾光荣

针对目前接地环流和局部放电的信号单独安装两种监测装置的现状，研制了基于一二次融合的局部放电和接地环流智能传感器，传感器将超宽频复合耦合线圈和信号处理电路等模块集成在一个壳体内，并进行灌封，从而大大提高了设备的安装使用便捷程度和抗环境能力。

电能 在现代社会中起着越来越重要的作用，电能传输作为整个电力系统配送电能的中间环节，其重要性毋庸置疑。随着城市化进程的加速，电网升级改造也将同步进行，为适应未来的技术发展和需求变化，电力电缆将逐步取代传统的架空线路，尤其是依托电力电缆的独特优势，可以大幅优化城市空间布局，为城市规划提供便利，并且能够在使用中避免外部因素的影响，降低电力故障及安全事故产生的风险。但需要注意的是，电力电缆虽然具有显著优势，但由于其长期埋于地下，极易受到潮湿土壤、气体杂质和自身结构等因素影响，久而久之便易导致绝缘性能下降，如若再出现破损的问题，则将严重影响城市电力安全，因此，电力电缆在线监测势在必行。

在以往的电力电缆监测中，将侧重点集中于绝缘性能的监测上。而随着监测需求的变化，传统的预防监测周期难以与现代电力电缆监测相契合，因此，需要借助电学技术手段，加强对电力电缆绝缘性能及运行状况进行实时测量，以达到最佳运行状态和安全运行目的。从技术结构上看，电力电缆与架空线路存在结构上的差异，其主要由绝缘层、电线芯导体、填充层、多层护层及外保护层等构成。当线芯在输电状态时，其将在一定空间产生电

磁场，并通过对电缆金属护层的影响而产生感应电压。通常情况下，感应电压的强弱与线芯电流大小具有直接关系，电流越大则产生的电磁场越强，所产生的感应电压也就越大，反之亦然。而如若电缆线路出现故障，或者存在与金属护层损坏处短接时，将使电缆与大地形成电流通路，在感应电压的影响下将产生回路电流，即电缆的接地环流。这种故障的产生，不仅会对电缆效率产生显著影响，还会使电缆线芯载流量下降，甚至导致电缆绝缘性能大幅下降，使电缆难以达到预期的寿命，增加电力系统投资成本。

因此，对接地环流的测量可以反映短路故障等严重故障。此外，很大一部分潜隐性或者发展性绝缘故障会表现为电缆的局部放电，因此，对局部放电的测量能够动态反映、跟踪和监视电缆绝缘故障的发生和发展，避免电缆事故发生。在实际应用中，接地环流对绝缘的劣化发展状况反映不明显，仅能够响应突发的相间或对地的护层绝缘故障，而局部放电虽然能够监测绝缘的劣化发展，但缺乏量化表征能力，另外，接地环流和局部放电的信号耦合方式相近，且信号传输方式一致，单独安装两种监测装置和线路会增加现场施工、安装、调试和维护成本，且信号之间相互孤立，不利于进行电缆的

绝缘综合诊断。

本文介绍一种基于一二次融合的局部放电和接地环流联合检测装置，旨在解决现有技术中针对局部放电以及接地环流的监测需要分别进行，造成施工维护成本大、诊断效果差的问题，节省监测装置安装成本，有利于快速、综合且准确地进行电缆绝缘状态监测，兼具实用性、可靠性和功能性。

原理

设备由双频带电流线圈、信号处理模块、通信模块和电源管理模块构成，具体工作原理如图1所示。

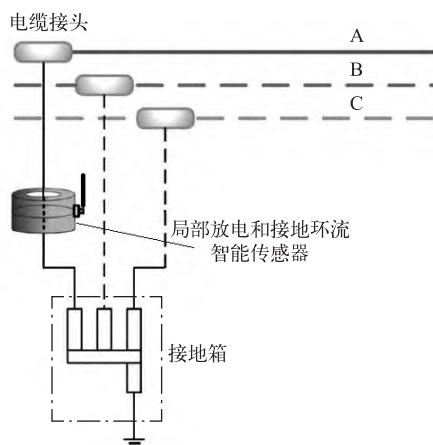


图1 检测装置工作原理

智能传感器将双频带电流线圈、信号处理模块、通信模块和电源管理模块集成在同一个壳体内，用环氧树脂灌封，防护等级高于IP68，适合于在浸水、霉变等恶劣环境下工作。

双频带电流传感器

首先设计制作一个接地环流、超宽频复合传感器，用来检测电缆附件局部放电产生的高频电流脉冲信号和接地环流信号，传统的罗戈夫斯基线圈选用的磁心材料通常为铁氧体磁心材料或玻莫合金磁心材料。铁氧体磁心材料具有电阻率高、导磁率高和高频损耗小等优点，可以用作高频脉冲传感器磁心。为了降低设备重量，接地环流传感器采用“铁基纳米晶”合金材料替代铁氧体制成磁心。纳米晶材料属于新型材料的一种，其主要源自于特殊的材料处理技术，即采取以1 000 000 ℃/s的急冷技术，对熔融的钢水实施急速冷却，通过这种技术形成厚度在微米级的薄带。该材料在使用中具有显著的综

合性优势，能够有效替代坡莫合金、铁氧体及硅钢等常用材料，为电力电子技术提供了全新的选择。以铁元素为主的铁基纳米晶合金在镍元素后，再借助合金快速凝固工艺获取非晶态材料。并且，该材料在经过相关的热处理后，便可以形成直径在1 nm的微晶，在非晶态的基体上弥散分布，因此，该材料也被称为微晶或纳米晶材料。纳米晶材料具有优异的综合磁性，能高饱和磁感、高初始磁导率。用这种纳米晶材料制成的电流传感器具有频带宽、噪声小和线性度好的特点。Rogowski线圈的结构通常有闭合式和两半圆环状结构两种，如图2所示。

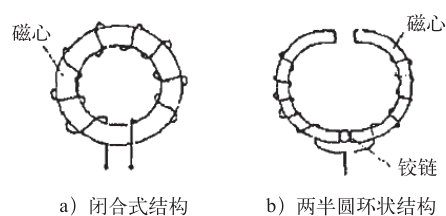


图2 Rogowski线圈结构

为了现场安装方便，本文采用半圆形结构，将高频和工频绕组结合在一起，构成信号耦合模块，用于将局部放电产生的脉冲电流信号和接地环流的工频信号耦合到装置内部。

根据现阶段的高频电流传感器使用的现状看，其仍然存在诸多的缺陷，包括抗干扰性弱、灵敏度不高等问题。因此，为适应今后电力系统发展的需要，提升电缆局部放电信号检测的质量与效率，本文提出一种新型高敏性高频电流传感装置（见图3），其技术性能上能够达到1~30 MHz的带宽，灵敏度达1 V/A，能够有效提升抗干扰性能，实现电缆局部放电检测保障能力的提升。

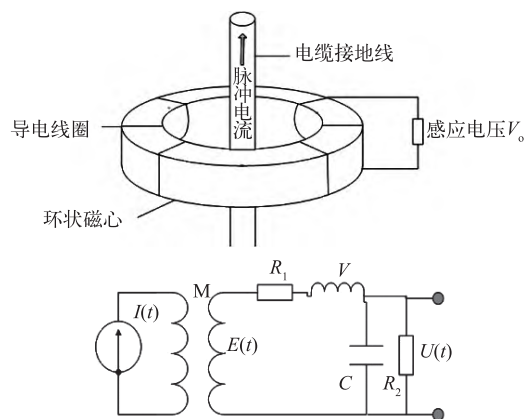


图3 高频电流传感装置

当传感器尺寸确定后,可以借助对线圈匝数和线圈磁导率的增大来提升 L ,或者通过减小积分电阻 R_2 来提升频带宽度;可以通过减小磁导率和线圈匝数或者增大积分电阻 R_2 ,从而提高传感器灵敏度。

由此可见,传感器的灵敏度与频带宽度之间往往保持着相互制约的关系,当频带宽度降低时,传感器灵敏度较高,而当频带宽度减小时,则传感器灵敏度下降。因此,在制作传感器时,应当依据具体的工况优选最佳的 L 和 R_2 设计方案,从而实现灵敏度与频带宽度之间的平衡关系。

环状磁心的内外径尺寸对磁通路长度与截面积具有决定性影响,根据理论上的分析认为,要减少磁损,需要选择尺寸较小的内径,在实际的使用过程中磁环内径需要略大于现场电缆直径。据此,本文在磁环的设定上,内径以52 mm为主,外径为70 mm,高为15 mm。

另外,线圈的直径与匝数同样对传感器互感系数、自感与内阻值等产生显著影响。通过MATLAB仿真研究方法,利用相关的电路参数对传感器频率特性影响进行的研究显示,线圈匝数在相应范围内的增加,将使带宽增大、低频截止频率减小,且传感器灵敏度降低。综合考虑灵敏度、带宽及稳定性等因素,本文以直径0.6 mm的漆包线为主,绕制匝数为10的线圈。同时,为避免测量回路受到外部磁场的干扰,使用铝合金材质作为传感器壳体,将磁心及线圈外部实施包围。高频电流传感器如图4所示。

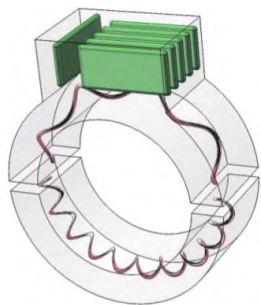


图4 高频电流传感器

信号处理

根据现阶段的研究思路,开发了一套基于

XLPE的电力电缆绝缘缺陷诊断和定位装置,其原理如图5所示。其主要硬件包含复合传感器、前置放大器和采集模块等部分,软件则涉及数据采集、处理和特征提取等模块。

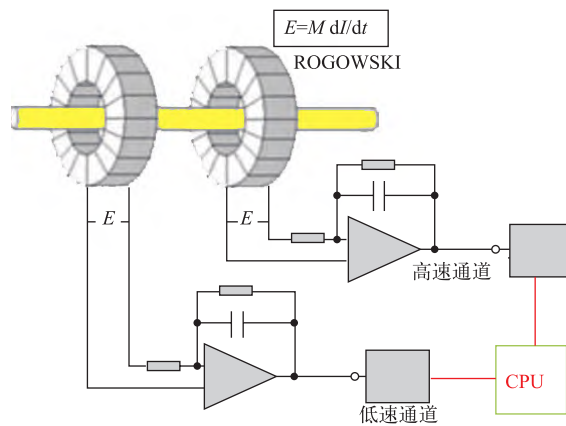


图5 电力电缆绝缘缺陷和定位装置工作原理

测量信号经由双芯同轴电缆到达信号处理模块,对局部放电脉冲信号和环流信号进行滤波、数据采集、数据处理以及无线传输。

由于电缆一般处于地下,有大地的屏蔽作用,因此空间干扰相对较少。主要的干扰为负荷电流中的谐波、电力电子开关器件的动作干扰和附近日光灯的干扰。其中负荷电流和电力电子一般为电流型干扰源,由于频率较低(约为几十赫兹),对局部放电测量影响不大。而日光灯为直接耦合到电缆屏蔽层上的电压型干扰源,且两个电动机之间主要靠放电产生的离子激发荧光粉发光,信号与局部放电信号非常相近,必须想办法进行消除。

从现场的实际局部放电波形来看,局放产生的脉冲信号的主要频率可达十几到上百兆赫兹,而且信号微弱,同时考虑其有上千倍的变化范围,因此需要频带较宽的低噪声对数放大电路对该信号进行预处理,再送给高速A/D采样电路进行模数转换,对转换后的数据进行消噪和识别,从而提取出真正的局部放电信号。

从日光灯的放电信号来看,其放电脉冲波形与一般的局部放电脉冲波形很相似,难以直接区分,但是从整个工频周期来看,局部放电的幅值和放电所处的工频相位的随机性要大一些,而日光灯的幅值和工频相位在不同工频周期内高度一致,且所处工频的正负半周很对称,可利用这一特点对日光灯

的干扰进行消除。

考虑电缆绝缘劣化具有不可逆性，局部放电一旦发生，会持续存在，而且会加速绝缘劣化的发展，因此，可以采用间歇性工作模式，从而降低设备的平均功耗，实现微功耗目的。具体处理电路如图6所示。

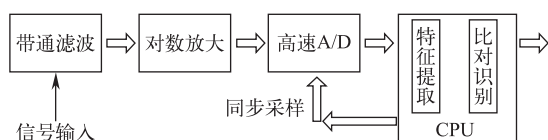


图6 绝缘劣化处理电路

将信号耦合器、处理电路、电源管理模块和电池整个封装在一个壳子内，采用环氧树脂进行灌封，构成一个集局放信号采集、信号处理和无线输出为一体的智能传感器（见图7），同时具有IP68的防护等级。

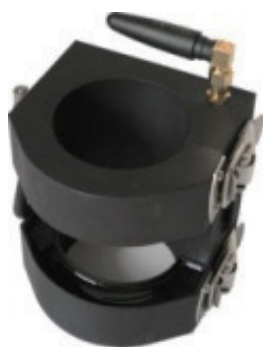


图7 智能传感器

测试

为了检验传感器各个部分的工作可靠性，设计了特殊的检验电路对其进行检验。检验电路如图8所示。

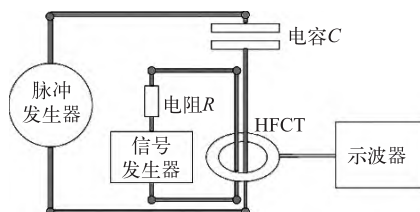


图8 传感器检验电路

图8中，放电脉冲信号源以放电脉冲发生器为主，通过100 pF的注入电容在试验电缆回路中产生高频脉冲放电电流，以信号发生器经电阻R产生正

弦交变的输入端。当设备放电电荷量 Q 达到50 pC时，固定干扰电流峰值为25 mA，并将干扰电流频率由50 kHz逐步调整至40 MHz，对传感器所生产的波形信噪比进行分析。试验结果显示，干扰信号在50 kHz~40 MHz 频段范围内时，传感器可以明显辨别叠加放电脉冲信号，波形示例如图9所示。

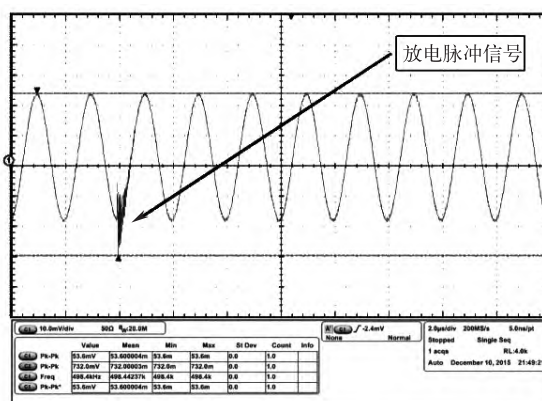


图9 放电脉冲信号波形系列

智能传感器测量金属表面的信号并通过Zigbee将结果发送给手持终端。标准局放校准仪输出的放电脉冲幅值范围为10~1 000 pC，设备检测结果用dB来表示。设备的输入（pC）-输出（dB）特性见表1。

表1 设备检测结果

模拟放电量 (pC)	0	10	50	100	500	1 000
检测结果 (dB/mV)	7	7	31	72	355	680

由于脉冲信号发生器输出的模拟信号放电电量无法连续调节，因此采用离散点进行测试，从整个数据来看，输入和输出属于单调递增的关系，因此，其他放电量的对应结果可以采用插值的办法推算出来。

结束语

采用基于新型“铁基纳米晶”合金材料的双频带局放脉冲和接地环流传感线圈，能够可靠地检测局部放电脉冲电流和工频接地电流，结合微功耗处理电路和一体化设计工艺构成的智能传感器，可以适应浸水、霉变等恶劣环境，对电缆接头运行状态进行实时监测，从而大大简化了现场使用工作。EA

（收稿日期：2021-11-16）