

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.08.020

泄漏电流与高频脉冲信号联合检测的集成式传感器研究

王智晖¹, 刘若溪¹, 桂媛¹, 徐兴全¹, 李修震², 徐若旋², 唐志国²

(1. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100075; 2. 华北电力大学, 北京 102206)

摘要: 柱上开关内部受潮导致绝缘失效是引发设备故障的主要原因,设备受潮后其泄漏电流会增大,并引发电场畸变从而产生放电。为此,文中研制了一种基于泄漏电流和高频脉冲电流联合检测的集成型传感器,针对该传感器的泄漏电流和高频脉冲电流耦合单元搭建了实验平台,研究了其泄漏电流耦合单元的线性度、灵敏度、准确度和重复性,以及高频脉冲电流耦合单元的检测频带和传输阻抗参数;通过同时加载泄漏电流和高频脉冲电流信号的方式分析了二者的交叉影响,进而对该传感器的综合性能进行了评估。结果表明:文中研制的传感器的泄漏电流检测范围为0~12 mA,线性度小于1%,经拟合后分辨率达到0.1 mA,满足电流传感器的线性度误差不超过 $\pm 1\%$ 的标准;高频电流检测频带不低于32 MHz,平均传输阻抗不低于5 Ω ;同时施加泄漏电流与高频脉冲电流时泄漏电流测量的最大偏差为3.47%,平均偏差百分比为1.61%,高频脉冲电流测量的最大偏差为9.91%,平均偏差百分比为3.91%,文中开发的传感器能够有效地对泄漏电流和高频脉冲电流进行同步检测,为柱上开关绝缘状态监测提供了技术支持。

关键词: 柱上开关; 绝缘泄漏电流; 局部放电; 受潮检测

Research on Integrated Sensor for Combined Detection of Leakage Current and High Frequency Pulse Signals

WANG Zhihui¹, LIU Ruoxi¹, GUI Yuan¹, XU Xingquan¹, LI Xiuzhen², XU Ruoxuan²,
TANG Zhiguo²

(1. State Grid Beijing Electric Power Company Electric Power Science Research Institute, Beijing 100075, China; 2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Internal moisture ingress leading to insulation failure in pole-mounted switch is the main cause of equipment fault. Once the equipment becomes moisture, its leakage current increases, inducing electric field distortion and subsequently generating discharge. To address this issue, in this paper an integrated sensor based on the combined detection of leakage current and high-frequency pulse current is developed. An experimental platform is built for the leakage current and high-frequency pulse current coupling unit of the sensor. The linearity, sensitivity, accuracy, repeatability of the leakage current coupling unit and detection band width and transfer impedance parameters of the high-frequency pulse current coupling unit are investigated. The cross influence between the two signals is analyzed by simultaneously applying leakage current and high frequency pulse current signals and the comprehensive performance of the sensor is subsequently evaluated. The results show that the leakage current detection range of the sensor developed in this paper is 0~12 mA, with a linearity of less than 1%. After fitting, the resolution reaches 0.1 mA, which meets the standard that the linearity error of a current sensor shall not exceed $\pm 1\%$. The high-frequency current detection frequency band shall not be less than 32 MHz, and the average transmission impedance shall not be less than 5 Ω . At the same time, in case of simultaneous application of both leakage current and high-frequency pulse current, the maximum deviation of leakage current measurement is 3.47%, with an average deviation percentage of 1.61%. The maximum deviation of frequency pulse current measurement is 9.91%, with an aver-

age deviation percentage of 3.91%. The sensor developed in this paper can effectively perform synchronous detection of both leakage current and high-frequency pulse current, providing technical support for insulation condition monitoring of pole-mounted switches.

Key words: pole-mounted switches; insulation leakage current; partial discharge; moisture detection

0 引言

电力设备中的柱上开关^[1],由于运行位置在室外,长期运行易受到多种因素的作用,导致绝缘性能逐渐下降。其内部受潮时,泄漏电流^[2]会增加,电场出现畸变,内部电场不均匀性加剧,导致局部电场强度过高,超过其耐电强度而产生放电,进一步增加了设备故障的风险。2019年以来,北京供电公司发生柱上开关故障约230次,占公司配电设备故障总量的20%,在38件故障解体分析中,因为柱上开关存在密封性能缺陷使其内部受潮导致绝缘失效的情况共有32件,占比86.7%。根据解体报告统计可知,内部受潮是引发故障的主要原因。柱上开关故障的发生,如局部放电^[3-5]、绝缘老化、绝缘受潮^[6]等,会导致设备损坏、输电线路短路,从而影响了配电网正常供电,社会经济效益受到严重损失。

现有的柱上开关绝缘状态检测手段主要有红外热成像、紫外成像、声学成像3种。红外热成像^[7]反映表面的温度状态和发热状况,而无法有效反映设备内部的发热情况;紫外成像^[8]技术测试的是套管、金具、线路等裸露于空气中的放电紫外光信号,不能反映柱上开关内部受潮及引发的放电缺陷;声学成像^[9]技术可以检测到柱上开关内部放电,但柱上开关装设于杆塔上,采集极易受到距离、背景噪声的影响,且振动声纹信息本身无法反映设备内部的受潮情况。因此,现有的检测手段难以反映柱上开关内部受潮情况。

现有内部受潮检测技术,如针对避雷器内部受潮,存在通过对单一泄漏电流^[10]或单一高频局放^[11]的检测,可判断其受潮状态,但对泄漏电流与高频脉冲信号^[12]的联合检测仍为空白领域。因此,针对柱上开关内部受潮而产生的泄漏电流与高频^[13]脉冲电流变化特征,且考虑现场检测的便捷性,在确保两种电流测量精度以及互不干扰的情况下,研究了一种泄漏电流与高频脉冲信号联合检测的集成型传感器。在短时接地信号^[14]频发时,有针对性的开展状态监测,并精准定位受潮缺陷开关,从而对其进行合理安排检修或更换,快速排除隐患,保证柱上开关安全运行。有望解决柱上开关内部受潮检测的问题。

为满足现场检测的便捷性和高效性需求,解决传统传感器安装方式的局限性,考虑到停电安装的

不便,传感器需要方便带电安装。目前常见的电流传感器^[15-19]主要有:开口式穿芯结构和闭口式结构。闭口式结构虽测量精度高、稳定性好,但安装需停电且操作复杂,不适用于频繁检测或难以停电的设备。而开口式穿芯结构^[20-21]可在设备带电运行时直接套接导线,安装便捷、效率高,尤其适合柱上开关等户外电力设备的现场检测。但其磁芯对接处可能引入磁阻和电感变化,影响测量精度和频带宽度。近年来,通过优化磁芯设计和信号处理算法,开口式传感器的性能已得到显著提升。

为实现对泄漏电流和高频脉冲信号的联合检测,兼顾两方面的测量性能,进行磁芯选择、匝数设计及减小交叉干扰的影响,磁环^[22]通过双半环^[23]对接实现,选用低频导磁性好,高频损耗低的超微晶材料作为磁芯,双半环一边测量低频泄漏电流,一边测量高频脉冲电流,采用多种检测手段来监测柱上开关的受潮情况,包括但不限于湿度传感器监测、绝缘泄漏电流检测、高频局部放电信号检测^[24-25]等。在此设计基础上,特别注意了确保不同检测手段间的独立性,通过精心布局和信号处理技术,最大限度地减少了它们之间的相互影响。

为保障柱上开关受潮检测装置的准确性与可靠性,需对其核心性能指标进行全面且严格的测试与评估。这些性能参数可能包括传感器的线性度、准确性、测量范围、稳定性、长期工作的可靠性以及两耦合单元间的交叉影响等。通过对集成传感器的一系列测试,可以评估其性能优劣,为柱上开关的受潮检测提供有力的技术支持。

文中旨在研究一种泄漏电流与高频脉冲信号联合检测的集成式传感器的性能,明确其关键性能参数,评估其性能表现。这将为柱上开关的受潮检测提供科学的依据,指导电力运维人员合理选择和使用检测装置,确保电力系统的安全稳定运行。同时,该研究也将推动柱上开关受潮检测技术的不断进步和发展。

1 集成传感器工作原理

当前广泛应用的泄漏电流传感器^[26]大多采用整

体环形磁芯结构。然而,这种结构的传感器在实际工程应用中存在不便,尤其是在现场测试环节,其操作复杂性限制了其更广泛的使用。为便于现场应用,提出双半环对接的设计思想,以实现传感器在检测低频泄漏电流和高频脉冲电流信号的同时,可以套接在柱上开关接地引线上。

磁芯的一次侧是被测导线,二次侧是骨架上的线圈,二次侧负载是一个阻值极小的采样电阻。依据电磁感应原理,当被测导线中有变化的电流通过时,其周围会产生随电流变化而变化的磁场信号,变化的磁场会在均匀绕制的线圈内感生出电动势,用二次负载采样。其等效电路见图1。图1中: i_1 、 i_2 分别为传感器一、二次侧电流; R 为线圈绕线的内阻; L 为线圈的自感; M 为线圈的互感; C_0 为线圈的杂散电容,其中包括线圈与屏蔽层之间的杂散电容值和相邻匝间的杂散电容值两部分; R_s 为线圈的采样电阻。

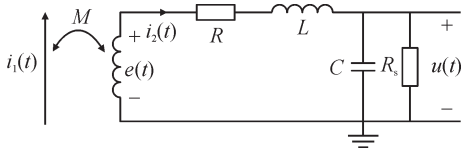


图1 内积分型罗科夫斯基线圈等效电路

Fig. 1 Internal integral Rogowski coil equivalent circuit

磁芯线圈与变压器结构相类似,理想条件下,一、二次侧电流满足

$$i_2 = \frac{i_1}{N} \quad (1)$$

式(1)中: N 为二次侧线圈的匝数。

在采样电阻 R_s 的作用下,将二次侧电流 i_2 转换为 U_2 进行测量,因此可以得到磁芯线圈的输出电压为

$$U_2 = R_s \cdot i_2 = \frac{R_s}{N} i_1 \quad (2)$$

电流传感器的自感和互感分别为:

$$L = \mu_r \mu_0 \cdot \frac{N^2}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (3)$$

$$M = \mu_r \mu_0 \cdot \frac{N}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (4)$$

式(3)、(4)中: μ_r 为线圈骨架铁磁材料的相对磁导率; μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$; r_2 为线圈外径; r_1 为线圈内径。

基于集总参数的电磁感应型电流传感器等效电路模型,可推导出传感器的传递函数为

$$H(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{i_1(j\omega)} = - \frac{M \cdot j\omega}{LC_0 \omega^2 + \left(\frac{L}{R_s} + RC_0 \right) \cdot j\omega + \left(\frac{R}{R_s} + 1 \right)} \quad (5)$$

其幅频特性为

$$H(j\omega) = \frac{MR_s}{L + RR_s C_0} \cdot \frac{1}{1 + \left[\omega \cdot \frac{LR_s C_0}{L + RR_s C_0} - \left(\omega \cdot \frac{L + RR_s C_0}{R + R_s} \right)^2 \right]^{-1/2}} \quad (6)$$

根据传感器的幅频特性式(6),可得磁芯线圈的截止频率表达式。其中,高频截止频率 f_H 的计算需要考虑传感器的杂散电容参数 C_0 的影响,等效电路与高频信号并联谐振电路类似,截止频率可以表示为采样电阻 R_s 和杂散电容 C_0 并联回路的谐振频率;使自积分条件成立的下限频率为低频截止频率 f_L 。

低频截止频率为

$$f_L = \frac{R + R_s}{2\pi(L + RR_s C_0)} \approx \frac{R + R_s}{2\pi L} \quad (7)$$

高频截止频率为

$$f_H = \frac{L + RR_s C_0}{2\pi LR_s C_0} \approx \frac{1}{2\pi R_s C_0} \quad (8)$$

结合式(2)、(7)、(8)可以推导出灵敏度 U_2/i_1 和工作频带BW的表达式分别为:

$$\frac{U_2}{i_1} = \frac{R_s}{N} \quad (9)$$

$$BW = \frac{1}{2\pi R_s C_0} = \frac{R + R_s}{2\pi L} \quad (10)$$

由式(10)可以得到,减小采样电阻 R_s 、线圈绕线内阻 R 、杂散电容 C_0 以及增加线圈自感 L 均可以拓宽传感器的带宽BW。在设计过程中,应在保证传感器灵敏度的前提下,尽可能地拓宽其工作频带。

2 集成传感器设计

2.1 磁芯设计

2.1.1 磁芯材料

常见的电流传感器磁芯材料包括硅钢、锰锌铁氧体、坡莫合金、铁基纳米晶,其主要特性参数见表1。不同磁芯材料在磁导率、饱和磁感应强度(B_s)、矫顽力(H_c)、居里温度(T_c)、剩磁(B_r)等参数上存在差异,这些参数的变化会直接影响传感器的工作频带和传输阻抗,进而对电流传感器的整体性能产生显著影响。此外,磁芯的各项参数及性能也会受到磁芯尺寸的影响。

表1 不同铁磁材料比较

Table 1 Comparison of different ferromagnetic materials

材料分类	饱和磁感应强度 B_s/T	初始磁导率 μ_i (mH·m ⁻¹)	居里温度 $T_c/^\circ\text{C}$
硅钢	1.80~2.10	1.0×10^3	750
坡莫合金	1.50	$1.0 \times (10^4 \sim 10^5)$	450
锰锌铁氧体	0.35~0.40	$(5.0 \sim 15.0) \times 10^3$	130~250
铁基纳米晶	1.14	120.1×10^3	570

从饱和磁感应强度 B_s 来分析,锰锌铁氧体材料

制成的磁芯 B_s 最低,铁基纳米晶初始磁导率较好,磁芯的磁导率越高,精度越高。鉴于本设计研究设定的传感器工作频率上限为30 MHz,且强调了宽频带内的稳定响应特性,经过详尽的材料评估,选择铁基纳米晶作为磁芯材料,考虑到地线的电流信号微弱,需要选择低频导磁性好,高频损耗低的磁芯材料,选择了牌号为1k107的超微晶材料作为铁心。

本研究选择的牌号为1k107的超微晶材料,该材料低频导磁性好,能够有效感应低频泄漏电流信号,确保传感器在低频段的高灵敏度;高频损耗低,在高频段表现出低损耗特性,确保传感器在高频脉冲电流检测中的高精度和宽频带响应;具有宽频带稳定性,能够在宽频带内保持稳定的磁性能,能够满足上述的技术要求。

2.1.2 线圈参数

本设计所采用磁芯尺寸为:磁环的外径为90.75 mm,内径为60.25 mm,高度15.4 mm,见图2。

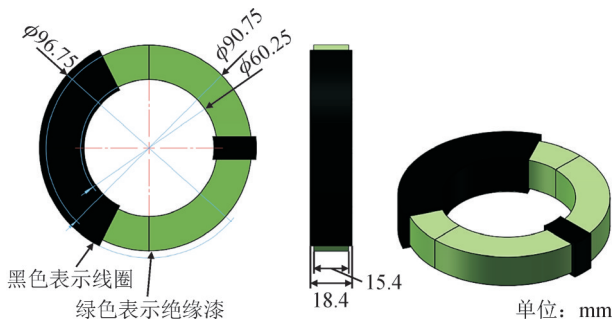


图2 传感器结构图

Fig. 2 Diagram of the core structure

通过式(3)、(7)-(9)确定传感器线圈匝数,线圈匝数 N 增加,线圈的自感 L 会增大,线性度和稳定性会变好,在线圈响应的低频截止频率下降的同时,也会提高线圈的杂散电容 C_0 ,使高频截止频率下降。通过式(9)、(10)可知,采样电阻阻值的增大在线圈匝数一定的条件下,可以提高灵敏度,但线圈的工作频带也会相应缩小。

分别定制了600匝和1200匝两种磁环进行测试。采用 0.15 mm^2 的漆包线,分别绕制2层和3层,每层300匝的LCR817电桥对副边线圈的参数进行测量得到: $R=173.47\ \Omega$, $L=2613.4\text{ mH}$ 。

2.2 泄漏电流检测电路设计

泄漏电流检测电路板,能够将低频泄漏电流的测试数据发送检测仪的树莓派Zero主板,Zero同时将局部放电结果一起打包发送到云端数据库进行储存和分析;接收来自北斗授时模组,根据其通信协议,读取精确时间。北斗授时模组时间脉冲Time Pulse输入端子,通过该信号可以使位于不同位置的

柱上开关检测集成传感器实现同步测量。泄漏电流检测电路设计图见图3。

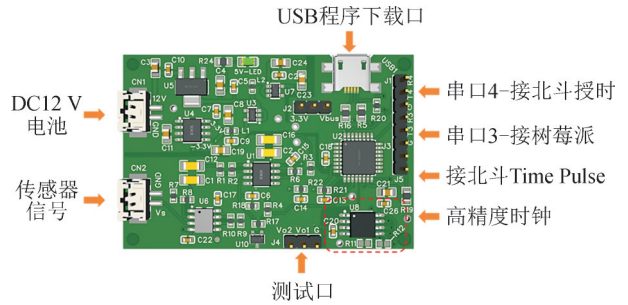


图3 泄漏电流检测电路设计图

Fig. 3 Leakage current detection circuit design diagram

2.3 集成传感器结构设计

通过电动推杆完成磁环开合功能,可实现遥控自动开合,铁心闭合后自动停机,如果出现紧急情况,脱扣装置能保证装置从地线上取下。开合机构组成原理见图4。集成传感器实物见图5。

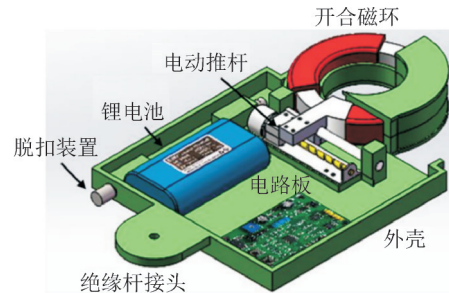
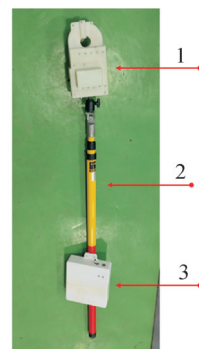


图4 开合机构组成原理

Fig. 4 The principle of the composition of the opening and closing mechanism



1—集成传感器(用于检测泄漏电流和高频脉冲电流);
2—绝缘杆(用于连接、支撑集成传感器和数据处理端);
3—数据处理端(可将传感器输出的数据上传到云端并可在手机app上查看检测数据)。

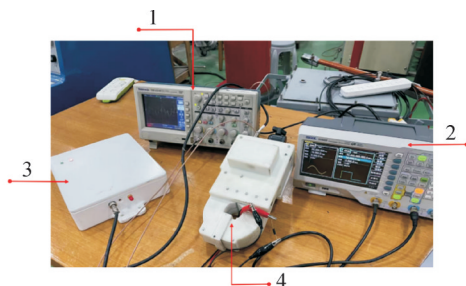
图5 集成传感器实物图

Fig. 5 Physical image of integrated sensor

3 集成传感器性能测试

目前集成传感器比对检验平台主要由任意波形发生器、示波器、匹配电阻组成。对集成传感器的检验分为3部分:对低频泄漏电流的响应、对高频

脉冲电流信号的响应、两耦合单元同时加载时的交叉影响。检验平台见图6。



1—示波器(用于观察传感器输出波形及数据); 2—任意波形发生器(用于输出所需的信号); 3—数据处理端(可将传感器输出的数据上传到云端并可在手机app上查看检测数据); 4—集成传感器(用于检测泄漏电流和高频脉冲电流)。

图6 集成传感器对比检验平台

Fig. 6 Integrated sensor comparison and inspection platform

3.1 工频绝缘泄漏电流耦合单元性能测试

首先将待测传感器接入检测回路,将信号源的输出频率设定为50 Hz,并输出峰—峰值在0~20 V范围内的正弦波信号。在测量过程中,以0.5 V为步长逐点调节信号源的输出电压,针对每个设定电压值进行5次重复测量,并取其平均值作为该点的测量结果。电流测量的范围设定为0~12 mA。通过示波器的CH₁通道采集电压信号 U_1 ,并结合匹配电阻 R_1 计算得到回路中的电流 I ,该电流值即为最终测量的电流值。工频绝缘泄漏电流耦合单元检测原理见图7。

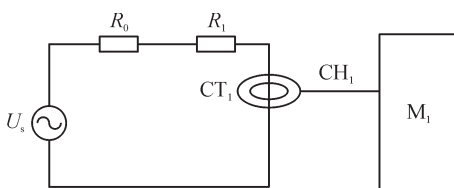


图7 工频绝缘泄漏电流测量部分检测原理图

Fig. 7 Schematic diagram of the detection part of the power frequency insulation leakage current measurement

图7中: U_s 为任意波形发生器; R_0 为50 Ω 内阻; R_1 为500 Ω 电阻; CT_1 为泄漏电流耦合单元; M_1 为示波器。

1) 线性度

$$\text{线性度}(\%) = \left(\frac{\Delta_{\max}}{FSO} \right) \times 100\% \quad (11)$$

式(11)中: $\Delta_{\max}$ 为最大偏差用; FSO 为满量程输出。

工频绝缘泄漏电流耦合单元线性度见图8。工频绝缘泄漏电流耦合单元线性度为0.98%,意味着在工频绝缘泄漏电流的测量范围内,输出信号与输入电流之间呈现出显著的线性关系,能够精确地体

现输入电流的实际数值。

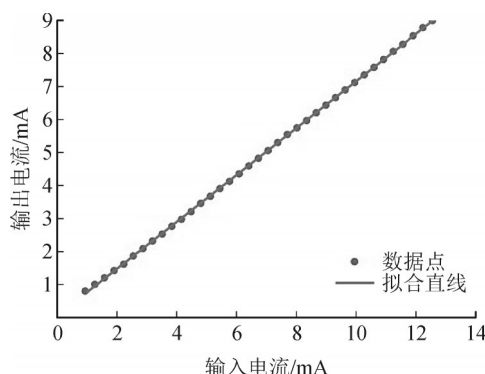


图8 工频绝缘泄漏电流测量部分线性度

Fig. 8 Power frequency insulation leakage current measurement partial linearity

2) 准确度。采用平均相对误差来量化数据准确度,用于衡量测量值与真实值之间的平均偏差程度,数值越小,表明测量结果的准确性越高,其计算公式为

$$e_{\text{MRE}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{M_i - T_i}{T_i} \right| \quad (12)$$

式(12)中: n 为测量值的数量; M_i 为第 i 个测量值; T_i 为第 i 个真实值; $\sum_{i=1}^n$ 为对 i 从1到 n 的求和。

工频绝缘泄漏电流耦合单元准确度见图9,经过拟合处理后,平均相对误差为0.004 0 mA,分辨率为0.1 mA。拟合公式为

$$y = 0.0015x^3 - 0.0258x^2 + 1.5367x - 0.2300 \quad (13)$$

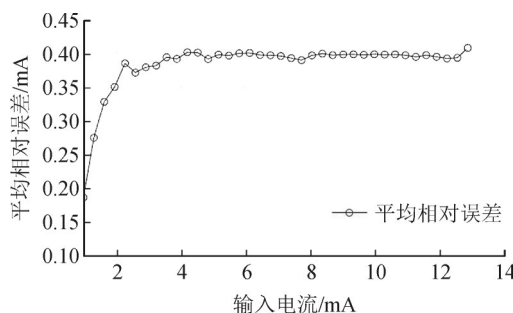


图9 工频绝缘泄漏电流测量部分准确度

Fig. 9 The accuracy of the power frequency insulation leakage current measurement part

通过该平台检验集成传感器对于工频绝缘泄漏电流测量,经过拟合处理后,平均相对误差为0.004 0 mA,分辨率为0.1 mA,线性度为0.98%。

3.2 高频脉冲电流信号耦合单元性能测试

1) 传输阻抗测试方法。信号发生器 U_s 能够产生频率可调的电压信号,通过调节其输出频率,使得电路中产生相应频率的正弦波电流,且该电流的峰峰值控制在10~30 mA的范围内,在0.1~100 MHz范围内调频,利用示波器测量高频电流耦合单元在

不同频率下的输出电压及电阻 R_0 两端的电压,通过式(14)计算相应频率下的传输阻抗值,并绘制出传输阻抗曲线。具体实验测试示意图见图10。图10中: U_s 为正弦信号发生器; R_0 为无感电阻; M_1 为示波器。

$$Z(f) = R_0 \frac{U_2(f)}{U_1(f)} \quad (14)$$

式(14)中: $Z(f)$ 为输入正弦信号频率下的传输阻抗值; R_0 为电阻; $U_1(f)$ 为输入正弦信号频率 f 下电阻 R_0 两端的电压; $U_2(f)$ 为输入正弦信号频率 f 下被检传感器二次侧的输出电压。

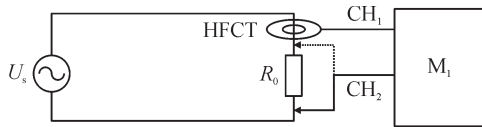


图10 传输阻抗测试原理图

Fig. 10 Schematic diagram of transmission impedance test

将信号发生器 U_s 接至高频局放检测装置标定系统的输入端,将集成传感器接入高频局放检测装置标定系统,其内阻 R_0 为 50Ω ,示波器的通道1接高频电流耦合单元的输出端,通道2接高频局放检测装置标定系统的输出端。集成传感器的高频传输阻抗曲线见图11。

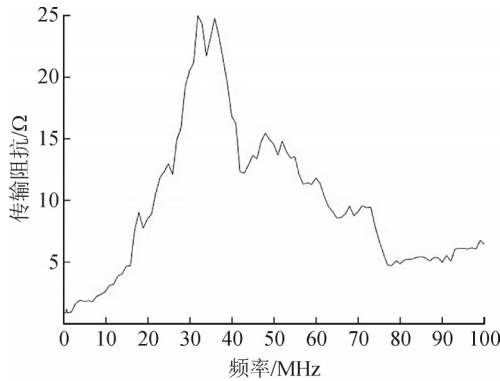


图11 集成传感器的高频传输阻抗曲线

Fig. 11 High-frequency transmission impedance curve of the integrated sensor

2)频带宽度测试方法。回路中接入 50Ω 的无感电阻,信号发生器输出频率可调的正弦信号。随后,在 $0.1 \sim 100 \text{ MHz}$ 的频率区间内对信号发生器进行调频操作,且在调频过程中始终保持电流恒定。记录各频率下传感器输出的电压幅值。基于这些测量数据,绘制出频率特性曲线,进而确定传感器的有效检测频带。频率特性曲线见图12,传感器的检测频带宽度不低于 32 MHz 。

3.3 两耦合单元同时加载时交叉影响测试

为验证两耦合单元间的交叉影响,通过同时加载两耦合单元与单独加载时输出结果的偏差,反映交叉影响。最大偏差百分比反映了测量过程中可

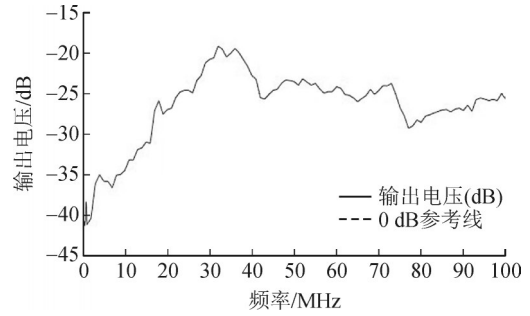


图12 集成传感器的高频幅频特性曲线

Fig. 12 High-frequency amplitude-frequency characteristic curve of the integrated sensor

能出现的最大误差范围,可用于评估测量结果的可靠性。

3.3.1 两耦合单元同时加载下工频绝缘泄漏电流耦合单元测试

工频绝缘泄漏电流耦合单元测试方案同上,同时施加频率为 10 MHz 、电压幅度为 1 V 的方波信号,测量工频绝缘泄漏电流输出结果并计算相对偏差。工频绝缘泄漏电流交叉影响下测量偏差百分比见图13。

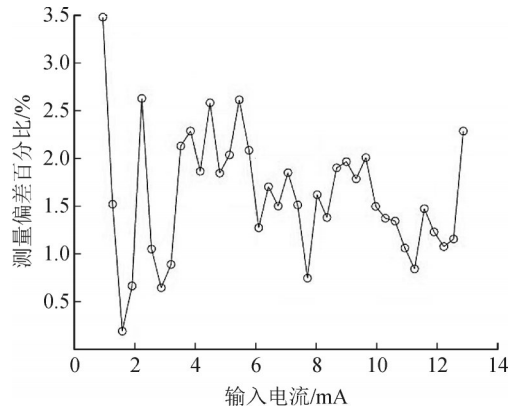


图13 工频绝缘泄漏电流交叉影响下测量偏差百分比

Fig. 13 Percentage of measurement deviation under the cross-influence of power frequency insulation leakage current

$$y_i = \left| \frac{x_i - x'_i}{x_i} \right| \times 100\% \quad (15)$$

式(15)中: y_i 为第 i 次的测量偏差; x_i 为单独加载低频绝缘泄漏电流耦合单元时的第 i 次测量结果; x'_i 为两耦合单元同时加载下工频绝缘泄漏电流耦合单元第 i 次测量结果。工频绝缘泄漏电流耦合单元在交叉影响下的最大偏差百分比为 $\max y_i$ 。

工频绝缘泄漏电流耦合单元在交叉影响下最大偏差百分比 $\max y_i$ 为 3.47% ,可以判断出,工频绝缘泄漏电流耦合单元在两耦合单元同时加载的条件下能够保持测量精度,受到影响极小。

3.3.2 两耦合单元同时加载下高频脉冲电流耦合单元测试

测量高频脉冲电流的条件下,同时施加频率为 50 Hz、电压幅度为 10 V 的正弦交流信号,测量高频脉冲电流输出结果并计算相对偏差。高频脉冲电流交叉影响下测量偏差百分比见图 14。

$$m_i = \left| \frac{n_i - n'_i}{n_i} \right| \times 100\% \quad (16)$$

式(16): m_i 为第*i*次的测量偏差; n_i 为单独加载高频脉冲电流耦合单元时的第*i*次测量结果; n'_i 为两耦合单元同时加载下高频脉冲电流耦合单元第*i*次测量结果。高频脉冲电流耦合单元在交叉影响下的最大偏差百分比为 $\max m_i$ 。

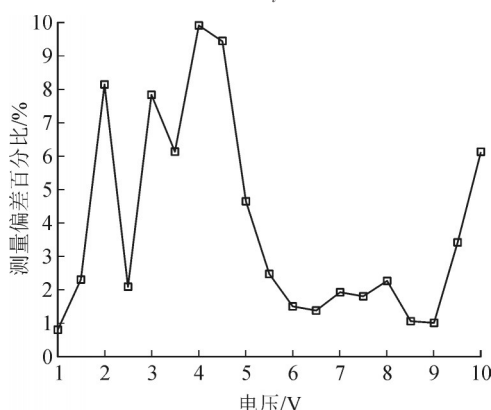


图 14 高频脉冲电流交叉影响下测量偏差百分比

Fig. 14 Percentage of measurement deviation under the crossover influence of high frequency transient pulse currents

在交叉影响下,高频脉冲电流耦合单元在交叉影响下的最大偏差百分比 $\max m_i$ 仅为 9.91%,这表明在两耦合单元同时加载的条件下,该耦合单元能够保持良好的测量精度,尽管受到一定影响,但影响程度相对较小。

4 结语

本设计基于 Rogowski 线圈原理研发了一种泄漏电流与高频脉冲信号联合检测的集成式传感器,并搭建了相应的性能测试平台,能够通过工频绝缘泄漏电流和高频脉冲电流的监测,反映柱上开关内部的受潮情况。实验结果表明,工频绝缘泄漏电流检测范围为 0~12 mA,线性度小于 1%,满足电流传感器的线性度误差不超过 $\pm 1\%$ 的标准^[27],经过拟合后,分辨率达到 0.1 mA;高频电流检测频带不低于 32 MHz,平均传输阻抗不低于 5 Ω ;同时施加泄漏电流和高频脉冲电流激励,泄漏电流测量最大偏差为 3.47%,平均偏差百分比为 1.61%,高频脉冲电流测

量最大偏差为 9.91%,平均偏差百分比为 3.91%。

上述结果表明,集成传感器可用于检测柱上开关由于内部受潮产生的工频绝缘泄漏电流和高频脉冲电流,反映柱上开关内部受潮情况,为故障诊断提供信息,实现早期故障预警,进一步提升故障诊断的智能化水平,对于电力设备柱上开关的绝缘状态监测与故障诊断具有重要的应用价值,可为电力系统的安全稳定运行提供有力保障。

未来的研究将致力于提高设备的测量精度,通过优化传感器的电路设计和信号处理算法,进一步提高测量精度,降低测量误差;同时,将考虑引入更多检测参数,以实现柱上开关绝缘状态的多维度评估;并对传感器的物理结构进行优化,使其更便于现场安装和使用,提高设备的稳定性和可靠性,进一步增强其在实际工程中的应用价值。

参考文献:

- [1] 何俊达,廖肇毅,陈冰心.一种新型局部放电特高频传感器性能分析[J]. 电气技术,2024,25(1):52-55.
He Junda, Liao Zhaoyi, Chen Bingxin. Performance analysis of a new partial discharge ultra-high frequency sensor[J]. Electrical Engineering, 2024, 25(1):52-55.
- [2] Olesz M, Litzbarski S L, Redlarski G. Leakage current measurements of surge arresters[J]. Energies, 2023, 16(18):6480.
- [3] Yan Xuewen, Cheng Chen, Hu Juan, et al. Design and implementation of a novel high-frequency current transformer for partial discharge measurements: letter[J]. IEICE Electronics Express, 2023, 20(23):20230450.
- [4] 张文凯,吴小钊,崔宇,等.内置电子式传感器后ZW20开关局部放电研究[J]. 高压电器,2019,55(3):51-58.
Zhang Wenkai, Wu Xiaozhao, Cui Yu, et al. Research on partial discharge of ZW20 switch after built-in electronic sensor[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(3):51-58.
- [5] 王伟杰,雍明超,何星躲,等.变压器局部放电特高频传感器的研究与应用[J]. 高压电器,2023,59(8):84-90.
Wang Weijie, Yong Mingchao, He Xingduo, et al. Research and application of UHF sensor for partial discharge detection of transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(8):84-90.
- [6] García B, García D, Robles G. Development of a moisture-in-solid-insulation sensor for power transformers[J]. Sensors, 2015, 15(2):3610-3624.
- [7] 曹李伟.基于红外热成像技术的变电设备热故障识别方法[J]. 电工技术,2024(9):130-132.
Cao Liwei. Infrared thermography-based identification of thermal faults of substation equipment[J]. Electric Engineering, 2024(9):130-132.
- [8] 王胜辉,牛雷雷,李浩,等.基于放电紫外成像特征的污秽线路盘形绝缘子绝缘状态评估[J]. 高压电器,2019,55(2):201-207.
Wang Shenghui, Niu Leilei, Li Hao, et al. Insulation condition evaluation of contaminated disc insulator for transmission lines

- based on the characteristic of discharge UV imaging characteristics [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(2): 201-207.
- [9] 蒋西平, 李永福, 王 谦, 等. 基于声学成像的GIS设备异响振动缺陷检测技术研究[J]. 高压电器, 2023, 59(10): 215-222.
Jiang Xiping, Li Yongfu, Wang Qian, et al. Research on defect detection technology of abnormal vibration of GIS based on acoustic imaging[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(10): 215-222.
- [10] 史志强, 邓 维, 罗日成, 等. 氧化锌避雷器受潮与电气参数的关系[J]. 高压电器, 2019, 55(4): 233-238.
Shi Zhiqiang, Deng Wei, Luo Richeng, et al. Relation between moisture and electrical parameters of zinc oxide arrester[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4): 233-238.
- [11] 李春锋, 方春华, 侯轩达, 等. 基于K-means高频局放10 kV避雷器快速带电检测方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(7): 191-196.
Li Chunfeng, Fang Chunhua, Hou Xuanda, et al. Research on rapid live detection method of high frequency partial discharge 10 kV arrester based on K-means[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(7): 191-196.
- [12] 张 苏. 高速铁路电力电缆局部放电在线监测与模式识别[J]. 高压电器, 2020, 56(10): 104-110.
Zhang Su. Power cable partial discharge monitoring and pattern recognition for high-speed railway[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10): 104-110.
- [13] Wang Wei, Wang Lin, Chen Chuan, et al. Design method of high frequency current sensor based on neural network[C]//2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2020: 1-4.
- [14] Gan Yusen, Li Wenxin, Chen Guojin, et al. Comprehensive monitoring system for high voltage cables based on the ground current signal of the cable metal sheath[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2853(1): 012009.
- [15] 张哲璇, 陈柏超, 田翠华, 等. 基于混合铁心的新型电流互感器研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(1): 9-24.
Zhang Zhexuan, Chen Baichao, Tian Cuihua, et al. Research on a novel current transformer based on composite core[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(1): 9-24.
- [16] 邓稼屹, 王星华, 聂一雄. 用于电缆接头在线监测的高频电流传感器设计[J]. 电力电子技术, 2023, 57(5): 33-36.
Deng Jiayi, Wang Xinghua, Nie Yixiong. Design of high frequency current transducer for online monitoring of cable joint[J]. Power Electronics, 2023, 57(5): 33-36.
- [17] 舒 博, 李嫣然, 赵泓霖, 等. 一种用于电缆局放检测的高频电流传感器的设计[J]. 电气自动化, 2018, 40(3): 105-108.
Shu Bo, Li Yanran, Zhao Honglin, et al. Design of a high-frequency current sensor used for detection of cable partial discharge[J]. Electrical Automation, 2018, 40(3): 105-108.
- [18] 李天辉, 荣命哲, 王小华, 等. GIS内置式局部放电特高频传感器的设计、优化及测试研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5483-5493.
Li Tianhui, Rong Mingzhe, Wang Xiaohua, et al. Design, optimization and experiment study of internal UHF sensor for partial discharge detection in GIS[J]. Proceedings of CSEE, 2017, 37(18): 5483-5493.
- [19] 李振华, 兰 芳, 钟 悦, 等. 基于双骨架共绕技术的测量保护一体化电流传感器[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4427-4436.
Li Zhenhua, Lan Fang, Zhong Yue, et al. Measurement-protection-integrated current sensor based on double-bobbin co-winding technology[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4427-4436.
- [20] 刘国锋, 李丙涛, 陈东旭, 等. 基于开口式霍尔传感器的高精度直流计量技术研究及实现[J]. 电测与仪表, 2024, 61(12): 185-193.
Liu Guofeng, Li Bingtao, Chen Dongxu, et al. Research and implementation of high-precision DC metering technology based on open end Hall sensor[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(12): 185-193.
- [21] 周 俊, 陈 浩. 闭环霍尔传感器设计与优化[J]. 传感器世界, 2020, 26(6): 31-37.
Zhou Jun, Chen Hao. Design and improvement of closed-loop hall sensor[J]. Sensor World, 2020, 26(6): 31-37.
- [22] 江进波, 陈桂丰, 罗 正, 等. 局部放电信号测量的罗氏线圈研究与设计[J]. 高压电器, 2025, 61(1): 163-71.
Jiang Jinbo, Chen Guifeng, Luo Zheng, et al. Study and design of rogowski coil for partial discharge signal measurement[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(1): 163-71.
- [23] 张 鹏. 双半环漏电流传感器检测原理和实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
Zhang Peng. Principle and experimental study of double semi-ring leakage current sensor[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [24] Song Simeng, Chen Xiaoxin, Qian Yong, et al. Research on time-domain transfer impedance measurement technology for high frequency current transformers in partial discharge detection of cables[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2020, 25(1): 10-17.
- [25] 张国治, 鲁昌悦, 周 红, 等. 电力设备局部放电超声、特高频一体化传感技术[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 5090-5101.
Zhang Guozhi, Lu Changyue, Zhou Hong, et al. Integrated ultrasonic and UHF sensing technology for partial discharge of power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 5090-5101.
- [26] 陈 攀, 孙才新, 米 彦, 等. 一种用于绝缘子泄漏电流在线监测的宽频带微电流传感器的特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 144-148.
Chen Pan, Sun Caixin, Mi Yan, et al. Research of broad bandwidth micro-current sensor character for insulator leakage current monitoring system[J]. Proceedings of CSEE, 2005, 25(24): 144-148.
- [27] SJ 20790—2000 电流电压传感器总规范[S].
SJ 20790—2000 General specification for current and voltage sensors[S].
- 王智晖(1992—), 男, 工程师, 研究方向为配电设备运行评估诊断(通信作者)(E-mail: yuelushuyuancom@sina.cn)。