

高频磁电耦合电流传感器调理电路设计与实现

刘苏婕¹, 莫锦涛², 吴金根², 李福超¹

(1. 国网四川省电力公司营销服务中心, 四川 成都 610045; 2. 西安交通大学电子科学与工程学院 电子陶瓷与器件教育部重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要:针对新型电力系统中兆赫兹级高频暂态电流分量的探测需求,介绍了一款剪切模式高频磁电耦合电流传感器的敏感机理和结构设计。为有效提升该电流传感器的灵敏度、探测极限等核心性能,设计并研制了一款高频调理电路,通过仿真分析对其性能做出判断,进一步搭建了一套高频电流试验系统对其进行了试验验证。试验结果表明,经过调理后的灵敏度达到 14.24 mV/mA,线性拟合度(R 平方)达到 0.999 68,0.9~1.1 MHz 频率范围内输出信号有效值的变化波动小于 3%,探测极限达到 10 μ A 以内。该调理电路显著提升了磁电耦合电流传感器的高频探测性能,对于新型电力系统中高达 MHz 频率的高频暂态电流分量探测具有很好的应用潜力。

关键词:磁电耦合; 电流传感器; 高频电流; 调理电路

中图分类号: TP 212 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2025)01-0093-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20250113

Design and Implementation of Conditioning Circuit for High-frequency Magnetolectric Coupling Current Sensor

LIU Sujie¹, MO Jintao², WU Jingen², LI Fuchao¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company Marketing Service Center, Chengdu 610045, Sichuan, China;
2. Electronic Materials Research Laboratory, Key Laboratory of the Ministry of Education, School of Electronic Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

Abstract: The sensing mechanism and structure design of a d_{15} mode high-frequency magnetolectric coupling current sensor is introduced for detection needs of high-frequency transient current component up to MHz level in new power system. In order to effectively improve sensitivity, detection limit and other core performances of current sensor, a high-frequency conditioning circuit is designed and developed, and its performances are estimated by simulation. Furthermore, a high-frequency current test system is established to verify its performances. The experimental result shows that the sensitivity under conditioning reaches 14.24 mV/mA, the linear regression coefficient reaches 0.999 68, the fluctuation of output signal RMS is less than 3% within the frequency range of 0.9 MHz to 1.1 MHz, and the detection limit is within 10 μ A. This conditioning circuit significantly improves the high-frequency detection performance of magnetolectric coupling current sensor, which has great potential for high-frequency transient current component detection up to MHz frequency in new power system.

Key words: magnetolectric coupling; current sensor; high-frequency current; conditioning circuit

0 引言

在新型电力系统中,为了实现对系统扰动的快速感知以及电力设备故障的协同诊断,针对高频暂

态电流分量的探测需求日益迫切。电磁式互感器、直流分流器等传统技术能够很好地实现工频和直流电流的探测^[1],但难以满足诸如谐波电流、雷击电流、故障电弧电流、特快速暂态电流等高频暂态电流分量的探测需求^[2]。罗氏线圈、全光纤电流传感器等已有的高频电流探测手段,存在弱信号探测能力不足、成本较高、安装维护难度大等缺点。磁电耦

基金项目:国网四川省电力公司科技项目“基于磁电耦合效应的新型高灵敏无源交直流电流传感技术研究”(5219722000V)

合电流传感器基于磁电复合材料的磁-力-电多场耦合效应,具有高灵敏度、低功耗、低成本、安装维护便捷等突出优势,近年来在高频电流探测领域受到关注^[3]。

目前,国内外已有一部分学者开展了磁电耦合电流传感器的研究。文献[4]提出了一种基于自偏置磁电耦合效应的电流传感器,该传感器采用了 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{FeCuNbSiB}/\text{PZT}$ 磁电复合材料,对工频电流探测的灵敏度达到 198.91 mV/A ,分辨率为 0.01 A 。文献[5]在环形电流传感器的基础上,研究了一种用于检测载流电缆或导体涡流磁场的环形磁电耦合电流传感器,该传感器在 $1\text{ Hz}\sim 30\text{ kHz}$ 的频率范围内具有 12.6 mV/A 的非谐振灵敏度,在 67 kHz 时具有 92.2 mV/A 的谐振灵敏度。文献[6]研究了一种零偏置磁电耦合电流传感器,该电流传感器无需外界供能,可用于 50 Hz 工频输电线路电流检测,在 $0\sim 10\text{ A}$ 电流范围内灵敏度达到 330 mV/A 。文献[7]基于环形磁电复合材料设计了一款极高灵敏度的电流传感器,在 174.4 kHz 频率下的灵敏度达到 5.426 V/A ,探测极限达到 $10\text{ }\mu\text{A}$ 。文献[8]设计并制造了一种基于T-T型圆盘式磁电复合材料的大量程直流电流传感器,通过设计反馈电路可将非线性输入输出映射到 $0\sim 500\text{ A}$ 的线性范围,最终实现对 $0\sim 1000\text{ A}$ 大量程范围直流电流的线性探测,灵敏度为 1.014 mV/A 。总体而言,国内外在磁电耦合电流传感器领域已开展的研究主要集中于敏感机理及器件制备方面,并且频率范围主要是面向 0 至几百千赫兹的频段,对于 1 MHz 及以上频段的传感器件及其调理电路方面的研究较少。

下面针对兆赫兹级高频电流的探测需求,介绍了高频磁电耦合传感元件^[9]的敏感机理和电流探测原理,针对性地设计了一款高频调理电路,通过仿真分析了调理电路的性能,进一步研制出调理电路板,并开展了试验验证。

1 高频磁电耦合电流传感器设计

由于磁电耦合传感元件在谐振频率下具有超高灵敏度的特殊优势,因此可以充分利用这种选频特性,使单个传感器工作在谐振频率下,进一步使用不同谐振频率的多个传感器进行组合拓宽探测频率范围。据此思路,以 1 MHz 作为目标谐振频率典型

值,设计了一款磁电耦合传感器。该传感器的敏感元件是由1个磁致伸缩层、2个压电层和1个刚性层组成的磁电复合多层结构。其中磁致伸缩层由12层金属玻璃非晶合金层逐层结合在一起,压电层选用锆钛酸铅压电陶瓷,2个压电层夹在磁致伸缩层和刚性层之间,通过环氧树脂粘接并在室温下固化 24 h 。制备完成的敏感元件总长度约为 15 mm ,总厚度小于 5 mm 。该敏感元件工作在剪切模式(d_{15})下,当敏感元件暴露于外部磁场中时,其磁致伸缩层在磁场激励作用下产生长度纵向振动,进一步作用于压电材料产生厚度剪切振动,此时连接到2个压电层的顶表面和底表面的柔性电极将产生差分电压信号输出,该传感器的准静态磁电耦合系数(mV/cm Oe)可表达为

$$\alpha_{\text{ME},15} = kd_{33,m}Eg_{15}/[2(1+\nu)] \quad (1)$$

式中: k 为压电陶瓷和非晶合金之间的界面耦合系数, $0\leq k\leq 1$; $d_{33,m}$ 为非晶合金的纵向压电应变系数; E 为压电陶瓷的弹性模量; g_{15} 为压电陶瓷的压电电压系数; ν 为压电陶瓷的泊松比。由此,可实现磁场到电信号的变换。

为准确探测电流,进一步设计并制备了带气隙的聚磁环,聚磁环材料选用了锰锌铁氧体,内径为 25 mm ,外径为 44.3 mm ,厚度为 14.3 mm 。将上述的磁电耦合敏感元件置于聚磁环气隙中,形成了完整的磁电耦合电流传感器,如图1所示。

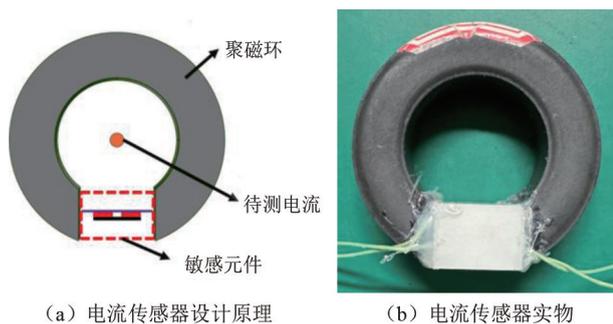


图1 高频磁电耦合电流传感器

通过性能试验研究可知,该磁电耦合电流传感器对于兆赫兹级高频电流信号具有良好的线性响应,并在 1.029 MHz 附近达到明显的谐振峰,但灵敏度仅有 11.42 mV/A 。这是因为当锰锌铁氧体聚磁环工作于高频磁场中时,其涡流损耗和法拉第效应显著增大,对传感器的灵敏度产生了一定程度的削弱。另外,由于电路噪声的影响,磁电耦合电流传感器的输出电压波形在波峰和波谷处显示出轻微的信

号毛刺。为获得更好的输出特性,先后制备了多只磁电耦合电流传感器,其中性能最优的传感器灵敏度达到约 35 mV/A。但对于高频弱信号探测而言,该灵敏度仍未达到理想范围。

从上述研究结论可以看出,虽然所研制的磁电耦合电流传感器能够实现兆赫兹级高频电流信号的探测,但仍需进一步提升灵敏度、探测极限等性能指标。同时,磁电耦合敏感元件的输出信号为高阻抗的电荷信号,难以直接匹配后续电路。因此,设计了一款具有深度负反馈的低噪声调理电路,对传感器输出信号进行进一步放大、噪声抑制和直流偏置补偿,并将传感器输出信号转换为低阻抗的电压信号,以满足实际工程中对于高频电流探测的应用需求。

2 高频调理电路设计与实现

2.1 放大电路设计

所设计高频磁电耦合电流传感器的谐振频率为 1 MHz,因此需采用高频模拟器件设计放大电路以满足工作频率范围的要求,并保证放大电路在 1 MHz 附近具有平坦的响应。所设计放大电路,单级放大增益设计为 20 倍左右,如图 2 所示。该电路采用了 ADI 公司生产的 AD8421 仪表放大器,该放大器芯片具有成本、低功耗、极低噪声、超低偏置电流、高处理速度等优点,芯片共有 8 个引脚,其中引脚 1 和 4 用于接收传感器输出信号。该电路中磁电耦合元件的输出电压信号和接地端分别串联 1 个 20 Ω 电阻后连接到引脚 4 和引脚 1,以减小过冲信号。引脚 2 和 3 连接可调电阻器 R_3 ,用于调节放大倍数。引脚 5 和 8 是芯片电源,分别连接 VCC 和 VEE,引脚 7 是放大电路输出信号,连接到由 R_8 和 C_6 组成的高通滤波器用于去除低频噪声,高通滤波器截止频率根据式(2)计算。

$$f = \frac{1}{2\pi R_8 C_6} \quad (2)$$

式中: f 为低频截止频率,取值 80 kHz; R_8 为 100 Ω 。则根据式(2)可以计算电容 C_6 为 20 nF,同时电容 C_6 可以隔断直流信号。由于无源带通滤波器的频率响应通常不够平坦,所设计的放大电路采用了具有合适高频截止频率的仪表放大器芯片来实现带通滤波,实际选用的 AD8421 仪表放大器的高频截止频率在 4.9 MHz,满足设计需求。

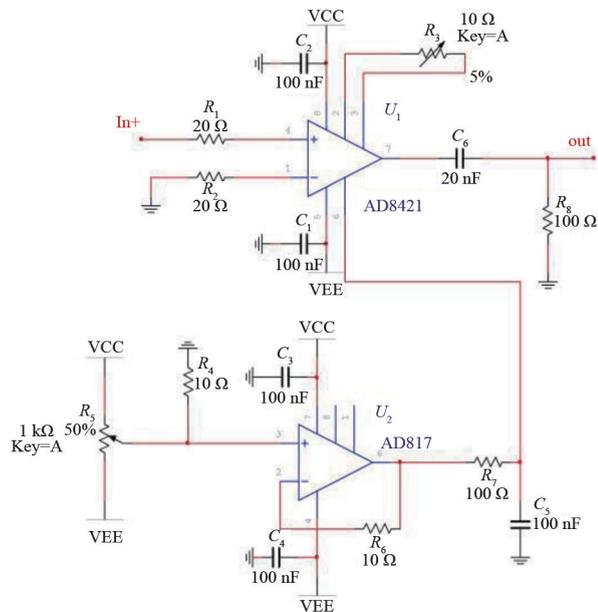


图 2 高频调理电路

2.2 直流偏置调节电路设计

为实现放大电路的直流偏置调节,选用 AD817 运算放大器构建了一个电压跟随器,通过固定电阻 R_4 和可调电阻 R_5 构成电压调节回路,连接到 AD817 的引脚 3,如图 2 所示。AD817 的引脚 6 为输出,通过电阻 R_6 连接到引脚 2 构成负反馈。输出信号通过 R_7 与 C_5 构成的低通滤波器,连接到放大电路 AD8421 的引脚 6。由此,可通过调整可调电阻 R_5 的值来调整放大电路输出信号的直流偏置电压。

2.3 调理电路仿真分析

为验证所设计调理电路的响应特性,使用 Multisim 仿真软件对调理电路的频率响应和时域波形进行了仿真分析。首先,使用 Multisim 中的频域扫描分析(AC sweep)进行了频域仿真,起始频率设置为 1 Hz,终结频率设置为 10 MHz。调理电路的 R_3 设置为 500 Ω ,根据理论计算,调理电路在 1 MHz 频率下的放大倍数为 20.3 倍。实际仿真结果如图 3 所示,可以看出调理电路在 1 MHz 下的放大倍数仿真结果为 20.36,与理论放大倍数接近,-3 db 带宽为 80 kHz~4.9 MHz。同时,仿真结果显示该调理电路具有良好的噪声抑制效果。

其次,使用 Multisim 中的交互仿真(Interactive simulation)进行了时域波形仿真。输入信号的有效值设置为 2 mV,频率设置为 1 MHz。仿真结果如图 4 所示,可以看出输入信号经过调理电路进行了有效放大,波形未失真,输出电压幅值是输入电压的 20.56 倍,接近理论放大倍数。

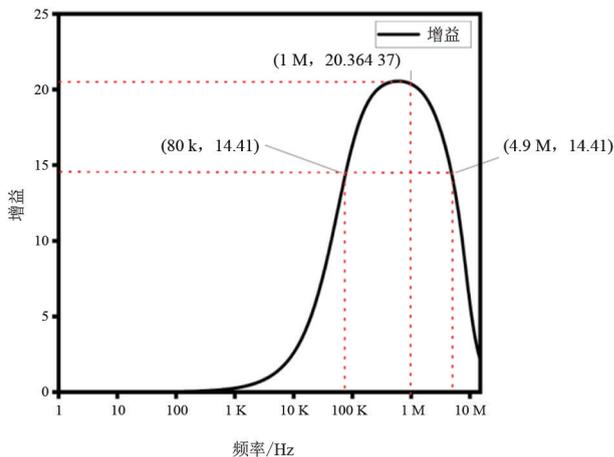


图 3 调理电路的频率响应仿真

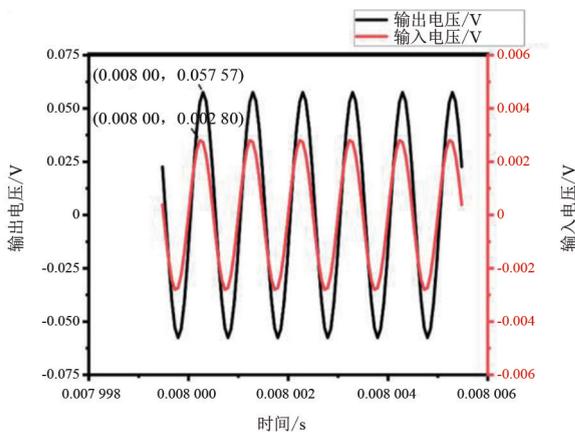


图 4 调理电路的时域波形仿真

2.4 传感器及调理电路整体等效电路分析

所设计的磁电耦合电流传感器等效电路为一个 RLC 回路与等效电容的并联,如图 5 所示。其中 R_9 、 L_1 及 C_7 形成 RLC 串联回路,在频率达到谐振频率处时, C_7 与 L_1 发生谐振,阻抗抵消,进而使输出电压增大形成谐振峰。根据磁电耦合敏感元件的各项物理特性,通过计算得出各等效元件参数为: $C_7 = 14.6 \text{ pF}$, $L_1 = 1.542 \text{ mH}$, $R_9 = 130.15 \text{ } \Omega$, $C_8 = 2.536 \text{ pF}$ 。

将传感器等效电路与调理电路结合,得到整体等效电路,如图 6 所示。通过对整体等效电路进行频率响应特性仿真分析,并以谐振频率输出为参考值,做归一化处理,结果如图 7 所示。仿真结果显示,传感器及调理电路整体的谐振频率为 1.07 MHz,而上述传感器性能试验测得的谐振频率为 1.029 MHz,可以看出调理电路与传感器的频率特性实现了较好的匹配。

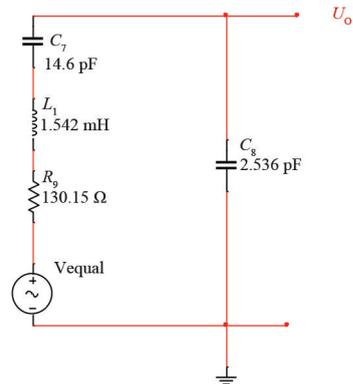


图 5 前端器件的等效电路

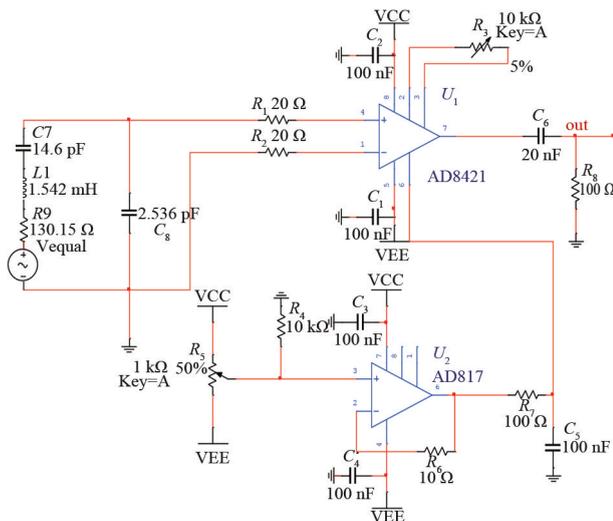


图 6 传感器及调理电路整体等效电路

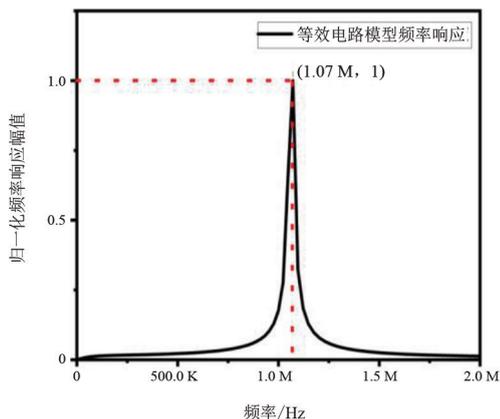


图 7 传感器及调理电路整体等效电路频率响应仿真

综上所述,所设计的调理电路能够有效满足磁电耦合电流传感器的频率范围和单级放大增益。通过放大电路级联,能够将磁电耦合电流传感器的输出信号放大至满足要求的范围,并与后端 AD 采样电路实现阻抗匹配。实际制备出的调理电路板如图 8 所示。在实际工程应用中,可将 2 块调理电路板进行级联,实现 400 倍以上的放大增益。

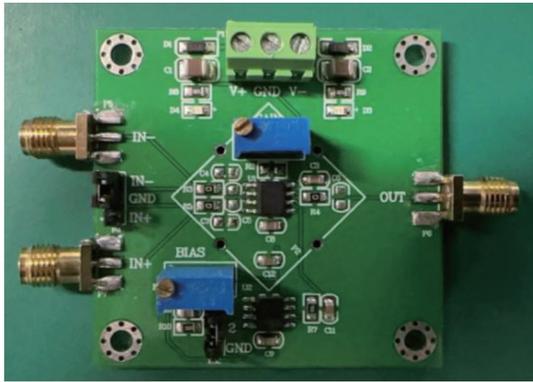


图 8 调理电路板实物

3 高频调理电路性能试验研究

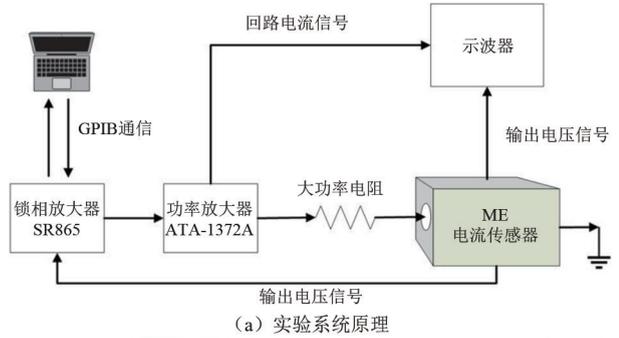
为验证所设计高频调理电路的实际性能,将磁电耦合电流传感器和 2 级级联的高频调理电路板集成为一整套电流检测单元,并搭建了高频电流试验系统,对电流检测单元的灵敏度、频率范围、探测极限等核心性能参数进行了验证。该试验系统由锁相放大器、功率放大器、示波器、大功率电阻等设备组成,原理框图如图 9(a)所示,实际场景如图 9(b)所示,为了减小外界信号的干扰,整套电流检测单元放置于屏蔽测试腔体当中。

3.1 灵敏度测试

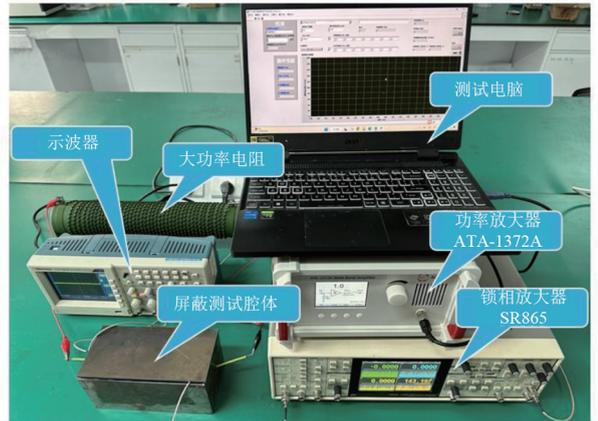
按照图 9(a)所示的试验原理,使用锁相放大器产生高频信号并通过功率放大器放大后作为待测电流信号,将载有待测电流的导线穿过高频磁电耦合电流传感器。试验中,将待测电流的频率设置为 1 MHz,幅值以 25 mA 的间隔从 50 mA 逐步增加至 200 mA。同时,使用示波器的通道 1、通道 2 分别连接功率放大器的电流检测接口和第 2 级调理电路的输出端口,分别测量并记录待测电流及电流检测单元输出信号的有效值。完成测试试验后,将测得的数据点做线性拟合并提取斜率值,得到灵敏度的测试结果。灵敏度计算公式为

$$\beta = V_{out}/I \quad (3)$$

式中: β 为电流检测单元整体灵敏度, mV/mA; V_{out} 为电流检测单元输出电压有效值, mV; I 为被测电流有效值, mA。从图 10 显示的测试结果可以看出,电流检测单元的整体灵敏度达到 14.24 mV/mA,线性拟合度(R 平方)达到 0.999 68,该结果表明经过信号调理后的电流检测单元对高频电流具备了良好检测能力。



(a) 实验系统原理



(b) 实验系统实物

图 9 高频电流试验系统

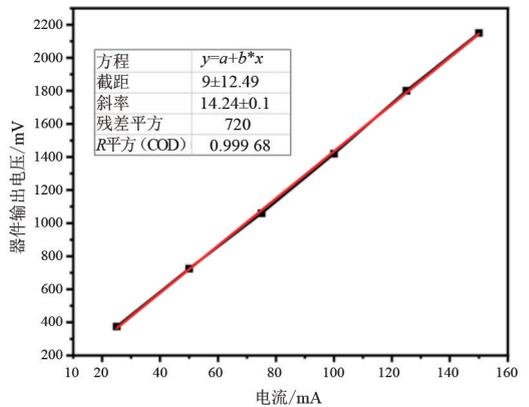


图 10 灵敏度测试结果

3.2 谐振频率响应测试

按照图 9(a)所示的测试原理,使用锁相放大器产生高频信号并通过功率放大器放大后作为待测电流信号,将载有待测电流的导线穿过高频磁电耦合电流传感器。试验中,调节锁相放大器的输出,使待测电流的有效值保持 100 mA,并在上位机中通过程序控制锁相放大器输出信号的频率。为验证传感器在谐振频率(1 MHz)附近的响应是否平坦,试验中将待测电流频率设置为以 0.01 MHz 的间隔从 0.90 MHz 向 1.10 MHz 连续改变。同时,使用示波器的通道 1 连接功率放大器的电流检测接口以测量待测电流有效值,使用锁相放大器的检测端口

况,此时应在分支母线增加测点,对于如“断路器-主母线”这样距离较长且结构较复杂的情况,应考虑适当减少传感器间距。

3 结 论

上面针对近期四川电网 1000 kV 及 500 kV 输变电新建工程使用的局部放电特高频内置传感器开展了响应特性试验和检测灵敏度试验,得到以下结论:

1)所有参与试验的传感器平均有效高度均满足要求。但是部分采用单极子天线原理的内置传感器为满足 GIS 安装要求采取了小型化设计,限制了传感器低频带性能。同时,部分采用圆盘天线原理的内置传感器辐射体尺寸和介质层介电常数选择不佳,导致传感器在低频段仍然有较大的有效高度。在实际应用中,低频段有效高度不足会降低监测系统对于固体绝缘等缺陷的监测灵敏度,而低频段较大的有效高度可能会为监测系统引入空气电晕等噪声风险。

2)相邻传感器检测灵敏度试验结果表明,当相邻测点之间距离较大且设备结构比较复杂时,会降低内置传感器检测灵敏度。

在后续工作中,一是要提高等效性验证试验精细度,完成注入脉冲信号与 5 pC 视在放电量的等效性验证;二是要针对悬浮、固体绝缘、沿面等其他典型缺陷开展验证试验,完善等效脉冲注入信号模型;三是要进一步开展包含互感器、伸缩节、避雷器等设备和结构的验证试验。

(上接第 98 页)

- [5] LEUNG C M, OR S W, ZHANG S Y, et al. Ring-type electric current sensor based on ring-shaped magnetoelectric laminate of epoxy-bonded $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.92}$ short-fiber/ $NdFeB$ magnet magnetostrictive composite and $Pb(Zr, Ti)O_3$ piezoelectric ceramic[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(9):09D918.
- [6] LU C J, LI P, WEN Y M, et al. Zero-biased magnetoelectric composite $Fe_{73.5}Cu_{1}Nb_{3}Si_{13.5}B_9/Ni/Pb(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$ for current sensing[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2014, 589:498-501.
- [7] GIANG D H T, TAM H A, KHANH V T N, et al. Magnetoelectric vortex magnetic field sensors based on the metglas/PZT laminates[J]. Sensors, 2020, 20(10):2810.
- [8] GUO X R, YU X J, LOU G F. A wide range DC current

参考文献

- [1] 许谱名,李欣,崔建华,等. GIS 智能在线监测系统设计与应用研究[J]. 自动化仪表, 2022, 43(8):102-106.
- [2] 冯新岩,孟庆承,李凯,等. GIS 特高频局部放电检测定位方法[J]. 山东电力技术, 2016, 43(10):72-74.
- [3] 任志刚,李伟,徐兴全,等. 不同电压等级 GIS 局部放电 UHF 信号传播特性仿真研究[J]. 高压电器, 2019, 55(5):88-93.
- [4] 丁然,聂鹏飞,李意. 内置式特高频传感器在 GIS 设备上安装布点方案研究[J]. 高压电器, 2017, 53(9):78-84.
- [5] JUDD M D, FARISH O. A pulsed GTEM system for UHF sensor calibration[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1998, 47(4):875-880.
- [6] 李兴旺,黎量,唐志国,等. 外置式 UHF 校验信号注入方法的可行性研究[J]. 高压电器, 2015, 51(5):71-76.
- [7] 王异凡,龚金龙,蒋建玲,等. 基于 GTEM 的局部放电 UHF 标定的场强溯源研究[J]. 高压电器, 2019, 55(2):61-68.
- [8] 张国治,陈康,田晗绿,等. 超小型内置柔性宽频带 UHF 单极子天线传感技术[J]. 高电压技术, 2023, 49(4):1475-1485.
- [9] CIGRE JTF15/33.03.05. Partial discharge detection system for GIS: sensitivity verification for the UHF method and the acoustic method[R]. Electra, 1999.

作者简介:

何宇航(1990), 硕士, 工程师, 从事输变电设备状态检测工作。

(收稿日期:2024-08-20)

sensor based on disk-type magnetoelectric laminate composite with a feedback circuit [C]//2017 IEEE SENSOR, Oct.29-Nov.1, 2017, Glasgow, UK. IEEE, 2017.

- [9] LI F C, WU J G, LIU S J, et al. Magnetoelectric sensor operating in d15 thickness-shear mode for high-frequency current detection[J]. Sensors, 2024, 24:2396.

作者简介:

刘苏婕(1990), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为传感与测量技术;

莫锦涛(1998), 男, 硕士, 研究方向为磁电耦合原理的电流传感器;

吴金根(1991), 男, 博士, 副教授, 研究方向为压电器件、磁电器件;

李福超(1987), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电测量传感器技术、数字化测量技术。(收稿日期:2024-04-25)

连接第 2 级调理电路的输出端以测量并记录电流检测单元输出信号的有效值。

完成测试试验后,以 1 MHz 作为中心频率,按照式(4)绘制频率响应曲线。

$$\gamma = (V_{\text{out}}/V_{1\text{MHz}} - 1) \times 100\% \quad (4)$$

式中: V_{out} 为电流检测单元输出信号的有效值; $V_{1\text{MHz}}$ 为电流检测单元在中心频率(1 MHz)下的输出信号有效值; γ 为幅值波动百分比。从图 11 显示的测试结果可以看出,0.90~1.10 MHz 频率范围内电流检测单元输出信号有效值的变化波动在 3% 以内。

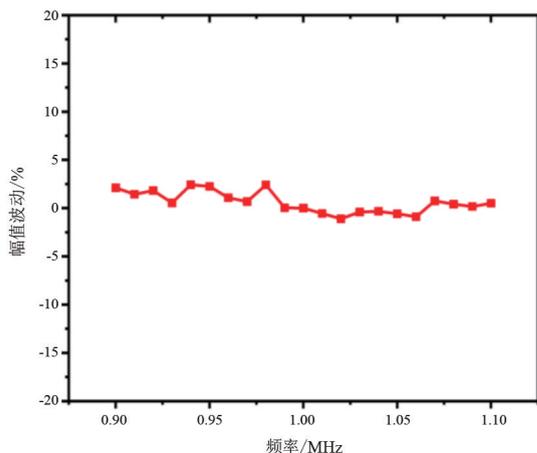


图 11 频率范围测试结果

3.3 探测极限测试

按照图 9(a) 所示的测试原理,使用锁相放大器产生高频信号并通过功率放大器放大后作为待测电流信号,将载有待测电流的导线穿过高频磁电耦合电流传感器。试验中,通过上位机程序控制锁相放大器输出信号的频率固定在 1 MHz,待测电流有效值从 1 mA 开始逐步减小。同时,使用示波器的通道 1 连接功率放大器的电流检测接口以测量待测电流有效值,使用锁相放大器的检测端口连接第 2 级调理电路的输出端以测量并记录电流检测单元输出信号的有效值。

完成测试试验后,将待测电流的有效值、电流检测单元输出信号有效值的实验数据导出,并在计算机中进行数据处理,将电流检测单元输出信号数据绘制为曲线,计算输出电压随电流信号的线性变化终止点,该点对应的电流值,即为探测极限。从图 12 显示的测试结果可以看出,电流检测单元输出信号在待测电流降低至 10 μA 以下时仍呈现线性响应特性,由此可知电流检测单元的整体探测极限达到 10 μA 。

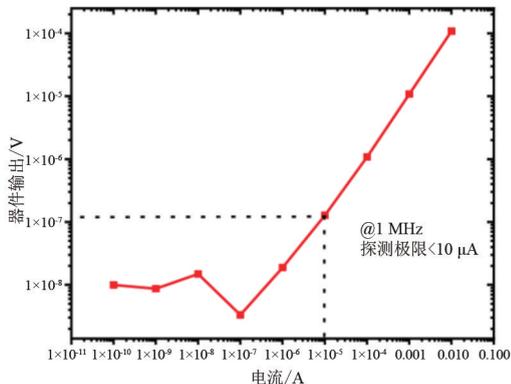


图 12 探测极限测试结果

4 结论

上面针对新型电力系统中兆赫兹频段高频电流的探测需求,介绍了一款工作在剪切模式的高频磁电耦合电流传感器的敏感机理和电流探测原理;针对该电流传感器灵敏度、探测极限等性能提升需求,研制了一款高频调理电路并对其进行了仿真分析,进一步搭建了高频电流试验系统,对高频磁电耦合电流传感器和 2 级高频调理电路组成的电流检测单元的整体性能进行了试验验证。试验结果表明,经过调理后的灵敏度达到 14.24 mV/mA,线性拟合度(R 平方)达到 0.999 68,0.90~1.10 MHz 频率范围内输出信号有效值的变化波动小于 3%,探测极限达到 10 μA 。可以看出,所提出的调理电路有效提升了磁电耦合电流传感器的高频探测性能,对于新型电力系统中高达 MHz 频率的高频暂态电流分量探测具有很好的应用潜力。

参考文献

- [1] 周峰,李鹤,李文婷,等.大电流测量传感技术综述[J].高电压技术,2021,47(6):1905-1920.
- [2] 朱鸿,沙致远,李佳讯,等.基于法拉第效应的宽频光学电流传感器研制及其性能研究[J].高电压技术 2024,50(5):2198-2206.
- [3] 卢诗华,于歆杰,楼国锋.一种基于磁电层合材料的新结构大电流传感器[J].电工技术学报,2016,31(23):70-76.
- [4] 吴宇,杨爱超,欧正宇,等.基于自偏置磁-机-电耦合效应的电流传感器研究[J].传感技术学报,2019,32(1):62-66.