

基于隧道磁电阻效应的宽频带电流无线测量装置

毕岚溪,曾祥君,喻 锐,刘 丰,吴湘君
(长沙理工大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:宽频带电气量数据包含大量故障暂态信息,传统互感器带宽受限难以精确全面地测量宽频暂态信号。针对该问题,提出一种含精确时标的非侵入式电流测量方法并设计原理样机。通过隧道磁电阻(TMR)芯片测量线路电流感生磁场,根据被测导体与TMR传感器的相对位置计算变比并通过微处理器进行录波和读数。设计低噪声、可变增益的传感器模组电路和暂态录波无线测量传输模组电路,精确感知宽频信号;根据传感器实际安装位置推导传变关系式,实现对一次电流的精确计算。搭建测试平台对测量装置直流、交流及暂态信号传变能力开展测试,在10 kV配电网进行接地故障电流测量对比实验。分析了影响磁阻传感器测量精度的主要因素,结果表明其直流和工频信号测量误差小于1%,高频信号测量误差小于3%。

关键词:隧道磁电阻;传感器;宽频带;暂态;非侵入式测量

中图分类号:TM93

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202306010

0 引言

近年来,大量非线性电力电子装置接入导致电网波动性和随机性显著增加^[1-2]。受此影响,电力系统出现了严重的谐波、三相不平衡及暂态冲击事件,对输变电设备造成了威胁,电力系统的安全稳定运行面临巨大挑战^[3]。充分挖掘电网数kHz至MHz级宽频暂态信号有助于更精准地评估设备状态和研究更有效的继电保护技术^[4-6],因此实现精确的电气量宽频测量是保障新型电力系统安全运行的重要基础^[7]。

针对电流检测,传统测量使用电磁式电流互感器,但由于其分布参数等影响,难以传变高频暂态信号^[8-9];为提高测量带宽和可靠性,研发了光学电流互感器、罗氏线圈(Rogowski)等电子式互感器,但依然存在需要改变接线、造价高、结构复杂、难以兼顾交直流测量等问题^[10-13],无法适应新型电力系统对传感器非侵入、小体积、精确测量的需求;随着智能电网技术的发展,近年来相关学者结合先进传感技术提出了基于微机电系统(micro electro mechanical systems, MEMS)的多种智能传感方案,电流传感器迅速向小型化、微型化发展^[14]。

在众多MEMS电流传感器技术中,隧道磁电阻

(tunneling magnetoresistance, TMR)技术由于其高灵敏度、低功耗、受分布参数影响微弱等特点备受关注。TMR在电力系统首先被应用于测量工频大电流信号,通过有线连接数据采集仪实现了对开关柜母排电流的测量^[15];随着新型电力系统的发展,有关学者针对其微型化应用^[16-17]、极小电流测量^[18-19]、宽频带特性和抗干扰分析^[20-21]等方面均进行了一定研究,促进了输变电设备电流数字化测量的智能化发展。但针对TMR测量技术的研究大多集中于优化布置等理论分析试验阶段,宽频采样的数据难以与实际电网的时间和空间相结合,对其宽频带特性的利用较少,可用于配电网暂态保护分析的宽频带电流无线测量装置尚未提出。亟需针对以上需求研发含精确时标的非侵入式电流无线测量装置,充分挖掘电网宽频暂态信号,为输变电设备状态评估、输电线路保护等研究提供强有力的数据支持。

为实现对线路宽频带电流信号多点全息感知的需求,本文提出一种非侵入式测量的宽频带电流无线测量方法并设计原理样机:首先阐述基于TMR效应的电流测量原理;然后针对宽频带大量程测量需求设计了宽频带传感器模组电路和暂态录波无线测量传输模组电路,其次根据被测导体与TMR传感器的相对位置计算一二次传变关系式及变比;最后对TMR传感器进行直流、交流及暂态信号宽频带响应测试并进行误差分析。测试结果和10 kV配电网现场实验结果证明了本文所提基于TMR效应的宽频带电流无线测量装置的可行性。

1 TMR传感器测量原理

1.1 传感器特性

基于TMR效应的TMR传感器由线性TMR传感芯片构成,TMR传感芯片是一种测量外界磁场强度

收稿日期:2023-01-06;修回日期:2023-04-19

在线出版日期:2023-06-19

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB3206800);国家自然科学基金重点资助项目(52037001);湖南省研究生科研创新重点项目(CX20210740)

Project supported by the National Key R&D Program of China(2022YFB3206800), the Key Program of the National Natural Science Foundation of China(52037001) and the Key Program of the Hunan Provincial Innovation Foundation for Postgraduate(CX20210740)

的微型传感元件,利用MEMS技术制备成型,其电压输出幅值随外界磁场强度变化而变化,在一定范围内具有优良的线性度。TMR传感芯片由自旋阀结构的多层膜封装而成,芯片内部采用4个TMR组成惠斯通电桥^[20],如附录A图A1所示。单轴TMR传感芯片具备一个固定的磁敏感方向,当外界磁场方向与芯片磁敏方向相同时,桥臂阻值发生变化并输出正电压,磁场方向相反时输出负电压。

1.2 电流测量原理分析

导体通过电流时,会在其周围产生旋转磁场,磁场方向可由右手螺旋定则确定。根据毕奥-萨伐尔定律可计算得到导体周围任一点处的磁感应强度,如图1所示的长直导体周围空间中的点P处的磁感应强度大小 B_p 可表示为:

$$B_p = \frac{\mu I}{2\pi r} \quad (1)$$

式中: μ 为磁导率系数,取 $0.4\pi \mu\text{H}/\text{m}$; I 为流经导体的电流; r 为点P与导体的距离。本文采用单轴TMR传感芯片贴近被测导体的测量方式,TMR传感芯片与被测导体的距离 r 远小于与其他相线路导体的距离,可避免导体间的干扰。

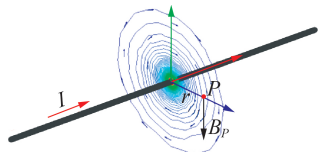


图1 载流导体空间磁感应强度

Fig.1 Conductor space magnetic induction intensity

对位于点P的线性TMR传感器芯片施加电压为 E 的恒定激励电源,其输出的差分电压信号 u_d 为:

$$u_d = EkH_p = Ek \left(\frac{B_p}{\mu} - M \right) = \frac{EkI}{2\pi r} \quad (2)$$

式中: k 为线性TMR传感芯片灵敏度系数,单位为 $\text{mV}/[\text{V} \cdot (\text{A} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}]$,表示在单位磁场强度和激励电压下传感器的输出电压值; H_p 为点P的磁场强度; M 为磁化强度,无铁磁性介质存在时 $M=0$ 。

I 可由 u_d 表示为式(3)所示的形式。

$$I = \frac{2\pi r u_d}{Ek} \quad (3)$$

与传统互感器、罗氏线圈利用电磁感应定律进行测量不同,本文所述TMR传感器基于电流感生磁场利用TMR效应进行磁场测量反推电流值,结构上无复杂绕组,受杂散电感电容分布参数影响较小。因此可测量直流到数MHz的宽频电流信号,除具备常规电流互感器的测量工频电流能力外,还具备准确测量小信号、直流分量和高频暂态信号的能力。

2 宽频带电流无线测量装置设计

TMR传感芯片内的惠斯通电桥在外部电源的激励下,感应平行于磁敏方向的磁场强度并输出毫伏级差分电压信号,再经过传感器模组内多级运算放大器进行信号处理后,传入末端无线测量传输模组,最终实现对一次线路中宽频电流信号的无线测量的功能。为保证传感器测量精度,减少外部电路引入的测量误差,下面将在电源系统设计、宽频带传感器模组设计和无线测量传输模组设计方面进行研究和探讨。

2.1 低噪声电源系统

考虑多种工况下的供电情况,本文提出的宽频带电流无线测量装置使用太阳能电池联合电流互感器在线取能供电,可提供高达10W的取能功率,储能模组将能量汇集在内部集成的锂离子聚合物电池中。然后进行两级电源转换:第一级采用开关电源将电池电压转换为正负双电源;第二级使用线性电源稳压输出,滤除噪声并将纹波限制在 $\pm 50 \mu\text{V}$ 的极小范围,再供给运算放大器和激励电源使用。两级电源和放大电路相互独立封闭在屏蔽壳中。激励电源采用5V基准电源芯片提供,具备极低的噪声和温漂,最大限度地确保不同装置的TMR传感芯片不受外电路影响。经实际测试可知,包含模拟前端、数字处理、通信及定时系统的装置模组总功耗小于1W。

2.2 宽频带传感器模组

惠斯通电桥在5V激励下输出含2.5V共模直流偏置的微弱差分电压信号,由于电桥特性,其输出阻抗(即TMR阻值)可达数十k Ω ,因此必须采用具有极高输入阻抗特性的信号处理电路,避免运放输入偏置电流对TMR传感器的输出造成影响。综合以上因素,宽频带传感器模组使用的宽频带信号放大器采用了仪表放大拓扑,在消除共模电压的同时对信号进行放大,且具备G Ω 级高输入阻抗。考虑到常规单片式仪表运放在10倍增益条件下-3dB带宽过低,无法满足MHz级的暂态信号测量需求。因此本文最终使用分立的3个运算放大器搭建仪表运放,从而获得较高的带宽。

针对TMR传感器装置所测量电流 I 的范围和安装位置参数 r 的不同,设计了5~200倍可调增益档位的测量模组。针对传感器易受地磁影响引入直流偏置的情况增加偏置调零电路。宽频带信号放大电路原理图见附录A图A2,图中:OPA₁—OPA₃构成分立式三运放仪表放大器;OPA₄为跟随器,用于调节直流偏置;OPA₅负责调控传感器模组整体增益;运算放大器反馈电阻 $R_{16}=R_{22}$ 、 $R_{17}=R_{25}$ 、 $R_{18}=R_{19}$,确保TMR传感芯片输出的差分信号对称放大。宽频带信号放

大电路电压增益 A_u 可表示为式(4)。

$$A_u = \frac{u_{OUT}}{(u_{SA} - u_{SB}) - u_{VB}} = \frac{R_{17}}{R_{16}} \left(1 + \frac{2R_{18}}{R_G} \right) \frac{R_S}{R_{20}} \quad (4)$$

式中: u_{OUT} 为宽频带传感器模组输出电压; u_{VB} 为偏置调节电压,用以调节TMR传感器芯片直流偏置; R_G 为仪表放大器前级增益反馈电阻; R_S 、 R_{20} 为增益调节反馈电阻; u_{SA} 和 u_{SB} 分别为TMR传感芯片A、B端输出电压, $u_{SA} - u_{SB}$ 即为TMR传感芯片输出的电压信号 u_d 。

TMR传感芯片使用国产TMR2103,其灵敏度系数 $k=0.024\pi \text{ mV} / [\text{V} \cdot (\text{A} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}]$,选择合适的档位调节增益 A_u ,取 $u_{VB}=0$ 、 $E=5 \text{ V}$,结合式(3)可得一次电流 i 与传感器输出电压的关系为:

$$i = \frac{2\pi r u_{OUT}}{E k A_u} = \left(\frac{5r}{3A_u} \times 10^4 \right) u_{OUT} \quad (5)$$

在TMR传感器与被测线路导体安装位置固定的情况下,TMR传感器输出电压与待测一次电流呈固定系数比例关系。为满足不同安装距离下的最大测量精度,可通过调节前端运放增益 A_u ,改变后端处理电路单片机内整定值,准确测量磁感应强度并计算一次电流值。

2.3 无线测量传输模组

该部分模组主要包含高精度卫星授时单元、高性能嵌入式处理器及静态随机存取存储器(static random-access memory, SRAM)缓存和低功耗无线通信芯片。高精度卫星授时单元配合处理器自守时程序实现对采集波形信号的纳秒级时标标定,实现广域设备测量数据在时间上的对齐。为实现在低功耗条件下对电网电流信号进行宽频带测量,选取集成高速模数转换功能的STM32G4系列嵌入式处理器,实现在最少外设条件下对TMR传感器模组输出信号进行每秒高达 4×10^6 次的高速采样和运算,通过即时的数字滤波减少测量误差,同时可根据TMR芯片特性曲线进行误差补偿和自校准,提高测量精度。

测量传输模组可配合各类保护算法的需要设计录波启动判据并将波形保存至板载存储器中,通过无线通信将数据传输至上位机汇集单元。宽频带电流无线测量装置原理框图如图2所示。

3 实验测试及误差分析

3.1 宽频带电流无线测量装置与测试环境

依据TMR传感器测量原理和模组设计部分试制了宽频带传感器模组和无线测量传输模组,共同组成宽频带电流无线测量装置样机,如附录A图A3所示。宽频带传感器模组前端通过航空插头可连接多种类型的TMR探头,可针对架空线、电缆和母排等场景进行针对性的工装设计,满足多种测量需要;尾部航空插头用于信号传输和连接取能模块,可连

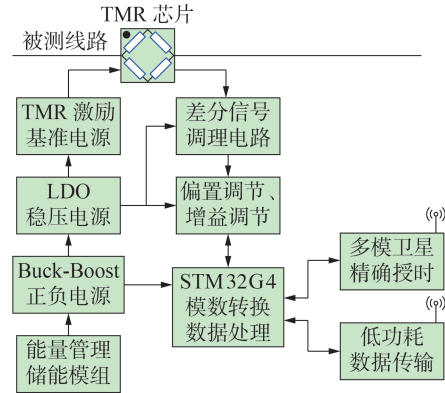


图2 宽频带电流无线测量装置原理图

Fig.2 Schematic diagram of wideband current wireless measuring device

接测量传输模组进行数据分析和无线传输,也可连接示波器直接进行观测。

验证本文所提基于TMR效应的宽频带电流无线测量装置对一次电流信号的测量结果,设计测试线路板,缩比模拟测量装置贴敷于架空线的非侵入式测量场景。TMR传感芯片放置在测试线路板顶层,测试电流信号通过测试线路板底层的加厚覆铜层线路,线路中心至TMR传感芯片内磁敏感点的距离 $r=2 \text{ mm}$,电流感应产生的磁场强度方向与芯片磁敏感方向平行。

TMR传感芯片输出的模拟量信号经过宽频带传感器模组处理放大后输入无线测量传输模组,进行计算后向上位机传输电流值等数据。为便于观察被测线路的真实电流,在线路中串入阻值为 2Ω 、精度为 0.1% 的精密无感采样电阻 R_s 接示波器通道1(CH_1),测量直流精度时串入万用表作为电流测量基准。使用相同的2组TMR传感器进行对比测量采样,将宽频带传感器模组1和2分别接入示波器通道2(CH_2)和示波器通道3(CH_3)。电流测量实验接线图如图3所示。

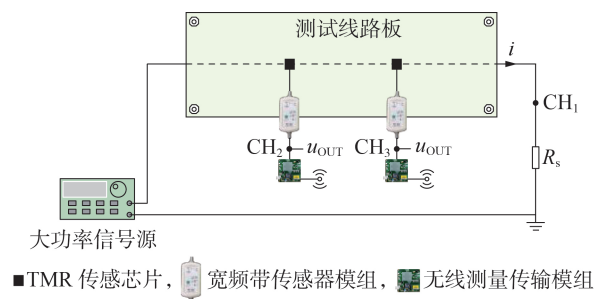


图3 电流测量实验接线图

Fig.3 Current measurement experiment wiring diagram

大功率信号源采用 240 MHz 任意波形/函数发生器AFG3251与OPA549T功率放大器串联组成,产生 $[-8, 8] \text{ A}$ 的一次线路电流信号。直流、交流测试

分别使用满量程精度为0.09%的万用表F179C和500 MHz示波器MDO4054高分辨率模式协同上位机获取波形进行读数和测量,测试环境见附录A图A4。

3.2 测试方法及结果分析

本文设计的宽频带电流无线测量装置应具有精确测量各类电流信号的能力,本节实验分为直流精度测试、交流带宽测试和雷电波脉冲测试3个部分。

图3所示的电流测量实验测试线路板一次线路至TMR传感芯片内磁敏感点距离 $r=2\text{ mm}$,设置放大增益 A_u 为20倍,调节直流偏置控制器抵消地磁影响,将 r 和 A_u 代入式(5)得到该测试环境下测量的一次电流表达式为 $i=1.67u_{\text{OUT}}$,即电流测量实验中宽频带电流传感器待测一次电流与二次输出电压变比为5 A/3 V,按此值设置测量传输模组微型处理器(microcontroller unit, MCU)整定值。

由式(1)计算得到电流测量实验中6 A电流在距离导线2 mm位置的TMR传感芯片磁敏感点处可形成0.6 mT磁感应强度,与现场测量场景中150 A电流在50 mm处TMR传感器安装位置形成的磁感应强度值一致,因此本实验可较好地反映实际测量场景下的测量精度。TMR传感器在不同电流测量场景下的推荐装设距离、增益和变比见附录A表A1。首先测试TMR传感器直流精度:控制大功率信号源逐级输出 $[-6,6]\text{ A}$ 可覆盖TMR传感器装置120%磁场量程的直流电流信号,通过对比上位机电流读数与万用表测得的电流测量基准值计算平均相对误差。然后测试TMR传感器对不同频率信号的传变特性:控制信号源输出恒定1 A电流,从0.1 Hz逐级提高一次电流频率至100 kHz进行测试,在50 Hz条件下改变电流幅值进行工频精度测试,宽频带暂态信号使用国标规定的250/2 500 μs 标准操作冲击电压全波进行测试^[22],模拟线路常见的过电流波形,通过对比上位机电流读数与示波器测量计算的电流测量基准值计算平均相对误差。实验结果如表1—4所示,直流精度测试波形如图4所示,交流和暂态电流实验数据波形图见附录B图B1,观察对比波形并计算TMR传感器测量误差。

表1 TMR传感器直流精度

Table 1 DC accuracy of TMR sensors

直流给定值 / A	测量基准值 / A	电流读数 / A	相对误差 / %
-6	-5.994	-5.996	0.03
-4	-3.997	-4.007	0.25
-2	-2.000	-2.014	0.70
0	0	0	0
2	2.001	1.992	-0.45
4	3.997	3.995	-0.05
6	5.995	5.984	-0.18

表2 TMR传感器工频精度

Table 2 Power frequency accuracy of TMR sensors

交流给定值 / A	测量基准值 / A	电流读数 / A	相对误差 / %
1	0.996	1.003	0.70
2	1.990	1.984	-0.30
3	2.980	2.958	-0.74

表3 TMR传感器宽频带精度

Table 3 Wideband accuracy of TMR sensors

交流给定值 / A	给定频率 / kHz	测量基准值 / A	电流读数 / A	相对误差 / %
1	1×10^{-4}	1.010	1.016	0.59
1	5×10^{-2}	1.001	1.005	0.40
1	1×10^{-1}	1.001	1.003	0.20
1	1	0.997	1.000	0.30
1	10	0.993	0.991	-0.20
1	100	0.964	0.960	-0.41
1	1000	0.822	0.801	-2.55

表4 操作冲击电流暂态精度

Table 4 Transient accuracy of switching impulse current

峰值给定值 / A	测量基准值 / A	录波电流读数 / A	相对误差 / %
1	1.000	0.982	-1.80
2	1.995	2.025	1.50
3	2.914	2.910	-0.14

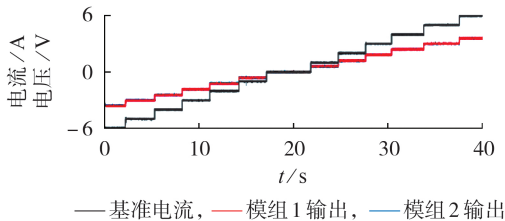


图4 直流精度测试波形

Fig.4 Waveforms of DC accuracy test

3.3 10 kV 配电网对比试验

依托于10 kV配电网真型试验场开展宽频带电流无线测量实验,试验场配有2段10 kV母线、12条出线,本节将通过装置现场示范测试其与传统变电站录波设备的测量效果。

配电自动化一次接线简图见附录B图B2。通过操作336分相断路器可模拟多种配电网真实故障,断路器后设有传统电磁式电流互感器,在10 kV配电线路上安装3套宽频带电流无线测量装置,装置01安装于336分相断路器后,装置02、03安装于故障点两侧A相线路上,测量线路中的暂态信号。控制336 A断路器进行A相单相接地故障(过渡电阻为1 k Ω)测试,对比现有录波装置与本文提出的宽频带电流无线测量装置测量的故障电流波形如图5所示,可观察到宽频带电流无线测量装置测量波形中包含更多故障暂态信息,而故障后稳态信号则与传统设备一致。

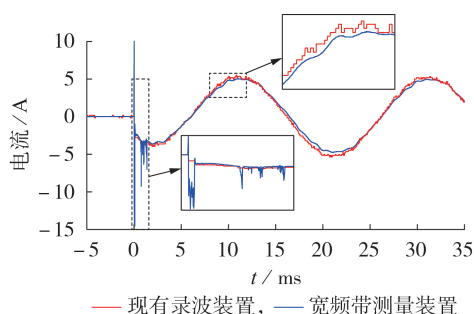
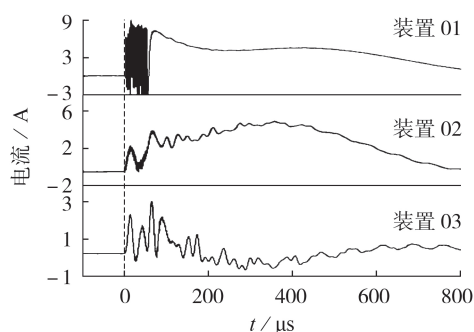


图5 暂态录波对比图

Fig.5 Comparison graph of transient recording waves

进行接地故障试验,获取安装在同相线路上的3台装置波形,典型的中性点不接地系统高阻接地故障(过渡电阻为 $1\text{ k}\Omega$)波形片段如图6所示,对应启动时标见附录B表B1。进行多次实验,利用装置02、03时标进行双端行波定位并与精确测量的实际线路长度进行对比,其定位精度普遍可达 100 m 以内,装置录波波形有较高应用价值。

图6 中性点不接地系统高阻接地故障(过渡电阻为 $1\text{ k}\Omega$)波形Fig.6 Waveforms of neutral ungrounding system grounding fault with $1\text{ k}\Omega$ high resistance

3.4 试验结果分析

由试验结果可知,本文所提出基于TMR效应的宽频带电流无线测量装置输出电流值与一次信号呈固定比例关系,工频和直流测量误差在 $\pm 1\%$ 以内,高频信号测量误差在 $\pm 3\%$ 以内,证实了基于TMR效应的宽频带电流无线测量装置的可行性。实际应用中若TMR传感芯片至线路距离较远或一次电流较小时,可切换使用更高倍率放大增益,获得更高测量精度。

通过分析示波器波形数据,结合样机试制时发现的问题,总结基于TMR效应的宽频带电流无线测量装置所受的主要影响如下。

1)环境干扰因素:地球本底磁场约为 0.05 mT ,TMR传感芯片磁敏方向与地球南北极磁感线平行时将引入直流偏置,量程越小时该干扰因素引入的误差占比越高,因此TMR传感器安装完成后需通过

无线校零程序消除偏置。后续研究将重点关注复杂磁场环境和导线舞动下TMR传感器的抗干扰和自校准技术,提高TMR传感器鲁棒性。

2)芯片制备技术:受当前MEMS芯片制备工艺影响,本文所采用的TMR2103芯片磁阻值差异较大,实验中发现阻值与 k 成正比,直接影响测量精度,在无软件整定的情况下可能导致 $\pm 10\%$ 的误差。除通过筛选的方式获得一致性好的芯片外,还可通过在芯片所在的线路板布置旁路自校准回路进行动态TMR灵敏度系数校准消除一致性和温漂的影响,相关试验正在进行中。

3)TMR传感芯片特性:一次电流大小超过量程限值时,受传感器芯片磁滞影响导致 k 下降的影响,TMR传感芯片输出信号变比降低导致相对误差逐渐增大,此误差可通过MCU拟合磁滞曲线实时补偿完成修正,TMR2103芯片的响应曲线见附录B图B3。

4)传输线高频损耗:一次电流频率提高至MHz级时,平均相对误差有所增加,考虑为高频信号插入损耗增加和线路特征阻抗等因素导致测量值偏小,通过优化布线和线缆连接、使用带宽更大的运算放大器可减小误差。

5)宽频带传感器模组运放时延:雷电波测试时观察到TMR传感器输出波形上升沿存在约 $1\text{ }\mu\text{s}$ 滞后的固定信号传输时延,经查阅放大器芯片数据手册后发现为运算放大器固有延时,对测量影响较小,可通过MCU算法进行相位补偿或采用传输时延更小的器件减小时延。

6)测量和采样精度:受限于低功耗和高速采样的要求,无线测量模组仅使用MCU自身12位分辨率的模数转换器,因此其最小一次电流分辨率为 $I_{\text{res}} = 2I_{\text{max}}/2^{12}$,其中 I_{max} 为电流最大值,满量程时引入的相对误差可达 0.05% ,50%量程时该误差将增大为 0.1% ,导致相对误差呈现中间高、两边低的特点。此误差可通过优化MCU高分辨率测量算法进行削弱,同时将在后续研究中尝试寻找低功耗、高分辨率模数转换器(analog to digital converter, ADC)与现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)组合的方式进行高分辨率高速采样。

4 结论

针对新型电力系统对线路电流宽频带、非侵入式测量的需要,本文提出了一种基于TMR效应的宽频带电流无线测量装置,并研制了原理样机,通过缩比电流测量实验和在真型试验场进行的 10 kV 配电网电流测量实验测试了TMR传感器对各类宽频带电流信号的响应情况并分析测量误差,得出以下结论。

1)TMR传感器芯片具有体积小、安装灵活的优

点,无须变动一次线路即可完成测量,特定情况下还可实现非接触式测量,可满足电力系统“数字化”发展对输变电设备电气量多点非侵入式测量的需要。

2)研制的宽频带电流无线测量装置可准确测量直流和宽频带暂态电流信号,解决了传统电流互感器带宽低、无法准确测量高频暂态信号的问题,较现有测量录波设备具有高达每秒 4×10^6 次的采样率,可输出含纳秒级精确时标的宽频带完整波形信息。测量装置可深入挖掘电力数据,为多种理论算法提供数据支持,特别是对测量点数量和精度要求较高的行波定位技术、配电网接地故障有源消弧技术和电力设备状态监测技术等领域。

3)基于TMR效应的宽频带电流测量技术需要针对电力系统高电压、强磁场等复杂环境进行针对性的研究,开发具备高精度同步授时、在线自校准、波形边缘计算、抗电磁干扰和低功耗等特点的小微智能传感器,进一步提升电力系统数字化智能化水平。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 吴克河,王继业,李为,等. 面向能源互联网的新一代电力系统运行模式研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(4):966-979.
WU Kehe, WANG Jiye, LI Wei, et al. Research on the operation mode of new generation electric power system for the future energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4):966-979.
- [2] 郑仙,肖先勇,王杨. 基于谐波阻抗矩阵约束的系统侧谐波阻抗估计方法[J]. 电力自动化设备,2021,41(4):170-176.
ZHENG Xian, XIAO Xianrong, WANG Yang. Utility harmonic impedance estimation method based on harmonic impedance matrix constrain[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4):170-176.
- [3] 卓振宇,张宇,谢小荣,等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化,2021,45(9):171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9):171-191.
- [4] 舒兵成,李海峰,武霁阳,等. 采样频率对直流线路行波保护的影响[J]. 电力自动化设备,2016,36(5):91-95.
SHU Bingcheng, LI Haifeng, WU Jiyang, et al. Influence of sampling frequency on traveling wave protection of DC line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5):91-95.
- [5] 邓丰,曾祥君,李泽文,等. 故障行波全波形时-频特性分析[J]. 中国电机工程学报,2019,39(11):3231-3243.
DENG Feng, ZENG Xiangjun, LI Zewen, et al. Research on characteristics of traveling wave full-waveform in the time and frequency domains[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11):3231-3243.
- [6] 王伟,王全金,尹力,等. 基于零模行波波速量化的高压输电线路双端故障定位方法[J]. 电力自动化设备,2022,42(12):165-170.
WANG Wei, WANG Quanjin, YIN Li, et al. Two-terminal fault location method for high-voltage transmission line based on zero-mode traveling wave velocity quantization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(12):165-170.
- [7] 陈伟根,张知先,李剑,等. 电气设备状态参量智能传感技术[J]. 中国电机工程学报,2020,40(增刊1):323-342.
CHEN Weigen, ZHANG Zhixian, LI Jian, et al. Intelligent sensing technology for power equipment state parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(Supplement 1):323-342.
- [8] 段建东,雷阳,金转婷,等. 电流互感器暂态饱和特性的实证分析[J]. 电力自动化设备,2018,38(7):207-213.
DUAN Jiandong, LEI Yang, JIN Zhuanting, et al. Empirical analysis on transient saturation characteristic of current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7):207-213.
- [9] 和劭延,吴春会,田建君. 电流传感器技术综述[J]. 电气传动,2018,48(1):65-75.
HE Shaoyan, WU Chunhui, TIAN Jianjun. Review of the current transducer techniques[J]. Electric Drive, 2018, 48(1):65-75.
- [10] 童歆,全江涛,徐菁,等. 基于电阻取样法测量变压器中性点直流电流的传感器设计与应用[J]. 电力自动化设备,2015,35(11):169-174.
TONG Xin, QUAN Jiangtao, XU Jing, et al. Design and application of DC sensor based on resistance sampling for measuring neutral DC current of transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11):169-174.
- [11] 朱梦梦,罗强,曹敏,等. 电子式电流互感器传变特性测试与分析[J]. 电力系统自动化,2018,42(24):143-149.
ZHU Mengmeng, LUO Qiang, CAO Min, et al. Test and analysis of transfer characteristics of electronic current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24):143-149.
- [12] YU Binxiong, SU Jiancang, LI Rui, et al. Study on shielded Rogowski coil with return line for measurement of nanosecond-range current pulse[J]. Measurement, 2021, 177:10925.
- [13] 刘世明,赵永森,王波,等. 基于光学电流互感器的有源配电网相差保护方案[J]. 电力系统自动化,2022,46(22):173-181.
LIU Shiming, ZHAO Yongsan, WANG Bo, et al. Phase differential protection scheme of active distribution network based on optical current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22):173-181.
- [14] 郝睿鹏. 基于MEMS技术和磁场梯度力的光纤电流传感器[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2021.
HAO Ruipeng. Optical fiber current sensor based on MEMS technology and magnetic field gradient force[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2021.
- [15] 李东昇,程武山. 基于TMR磁传感器的电力系统大电流测量[J]. 传感器与微系统,2013,32(12):131-134,141.
LI Dongsheng, CHENG Wushan. Large current measurement of power system based on TMR magnetic sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(12):131-134, 141.
- [16] 李鹏,袁智勇,田兵,等. 基于隧道磁电阻的微型电流测量技术[J]. 南方电网技术,2019,13(4):2-10,17.
LI Peng, YUAN Zhiyong, TIAN Bing, et al. Micro current measurement technology based on tunnel magnetoresistance[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(4):2-10, 17.
- [17] XU Xiaopeng, LIU Tingzhang, ZHU Min, et al. New small-volume high-precision TMR busbar DC current sensor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2020, 56(2):1-5.
- [18] 胡军,王博,盛新富,等. 基于隧道磁阻效应的宽频微小量程电流传感器设计及噪声分析[J]. 高电压技术,2020,46(7):2545-2553.
HU Jun, WANG Bo, SHENG Xinfu, et al. Design and noise analysis of weak current sensor with broadband based on tunneling magnetoresistance effect[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7):2545-2553.

- [19] 鲁文帅, 尤睿, 周扬, 等. 基于单片TMR磁传感器的非侵入电流监测微系统[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 1-9.
LU Wenshuai, YOU Rui, ZHOU Yang, et al. Non-invasive current monitoring microsystem based on a single TMR sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6): 1-9.
- [20] 林伟聪. 基于隧道磁电阻TMR的变换器电流测量技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
LIN Weicong. Research on tunnel magnetoresistance based current measurement technology of converter [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [21] 张哲璇, 陈柏超, 吴煜文, 等. 磁阀式电流互感器抗直流特性研究[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(12): 129-135.
ZHANG Zhexuan, CHEN Baichao, WU Yuwen, et al. Research on anti DC characteristics of magnetic-valve-type current transformer [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(12): 129-135.
- [22] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 高电压试验技术 第1部分: 一般定义及试验要求: GB/T 16927.1—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.

作者简介:

毕岚溪(1998—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统保护与控制、智能传感与测量(E-mail: bilx1998@163.com);

曾祥君(1972—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为电力系统保护与控制、智能传感与测量(E-mail: eexjzeng@qq.com);

喻 钺(1989—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为电力系统保护与控制、智能传感与测量(E-mail: kunyu0707@163.com)。

(编辑 任思思)

Wideband current wireless measuring device based on tunneling magnetoresistance effect

BI Lanxi, ZENG Xiangjun, YU Kun, LIU Feng, WU Xiangjun

(School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Wideband electrical quantity data contains a large amount of fault transient information. Due to the limited bandwidth of the traditional transformers, it is difficult to measure the wideband transient signal accurately and comprehensively. Aiming at this problem, a noninvasive current measurement method with precise time scale is proposed and a principle prototype is designed. The magnetic field induced by the line current is measured by the tunneling magnetoresistance(TMR) chip. The transformation ratio is calculated according to the relative installation position between the measured conductor and the TMR sensor and the wave is recorded and read by the microcontroller unit(MCU). The sensor module circuit with wideband, low noise and variable gain, and the transient recording wireless measurement transmission module circuit are designed to accurately perceive wideband signals. Then, according to the actual installation position of the sensor, the transfer relationship formula is deduced to realize the accurate calculation of the primary current. The testing platform is built to test the DC, AC and transient signal transmission capability of the measuring device, and the grounding fault current measurement comparison experiment is carried out by 10 kV distribution network. The main factors affecting the measurement accuracy of the TMR sensor are analyzed. The results show that the measurement error of DC and 50 Hz signals of TMR sensor is less than 1% and the measurement error of high frequency signal of TMR sensor is less than 3%.

Key words: tunneling magnetoresistance; sensors; wideband; transients; noninvasive measurement

附录 A

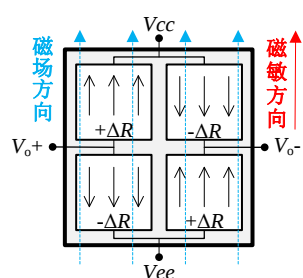


图 A1 TMR 传感器芯片敏感元件结构

Fig.A1 Sensitive element structure of TMR sensor chip

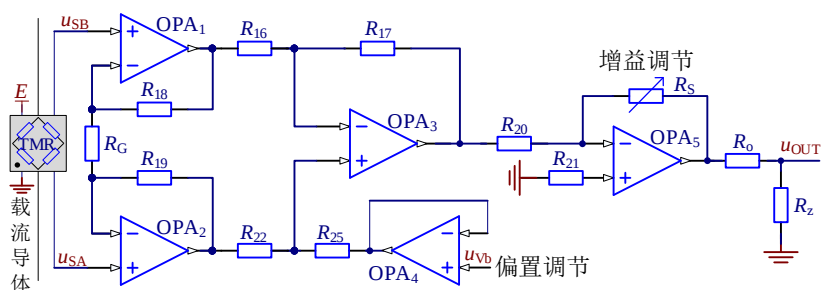


图 A2 宽频带信号放大电路原理图

Fig.A2 Schematic diagram of wideband amplifier circuit



图 A3 宽频带电流无线测量装置样机

Fig.A3 Prototype of wideband current wireless measuring device

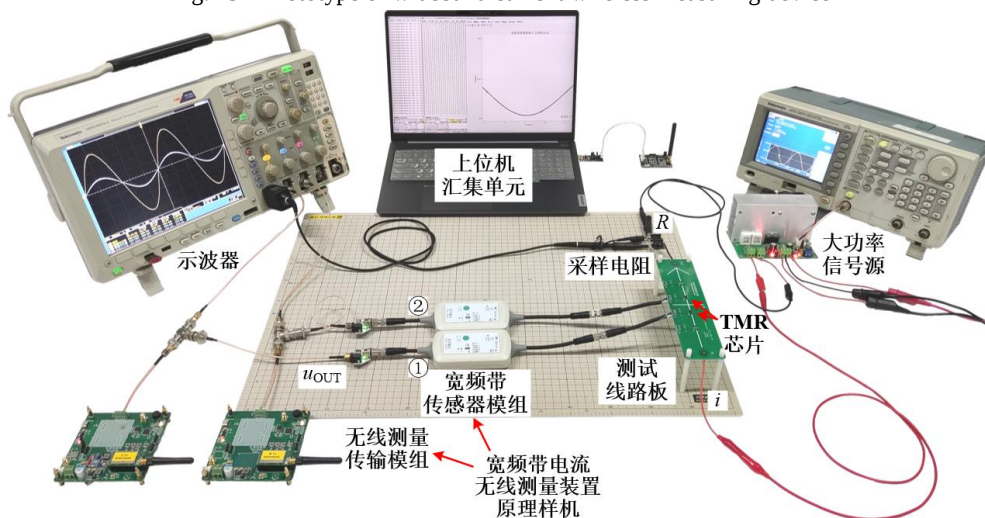


图 A4 实验场景示意图

Fig.A4 Schematic diagram of experimental scene

表 A1 测量装置推荐装设距离和变比

Table A1 Recommended installation distance of measuring device and transformation ratio

待测电流峰值/A	r 最小值/mm	可选的 A_0 最大值	变比
6.5	2	20	5A/3V
130	40	20	100A/3V
260	40	10	200A/3V
660	100	10	500A/3V
1330	100	5	1000A/3V

附录 B

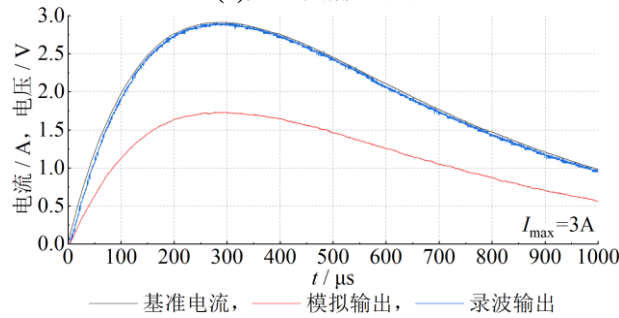
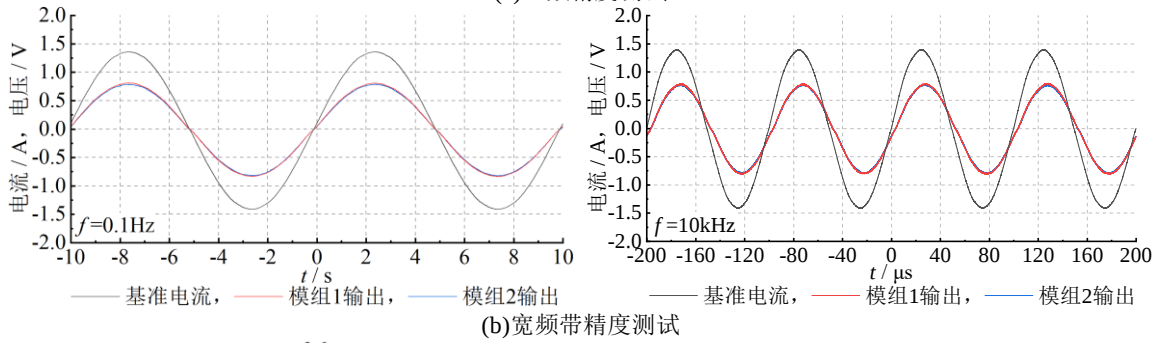
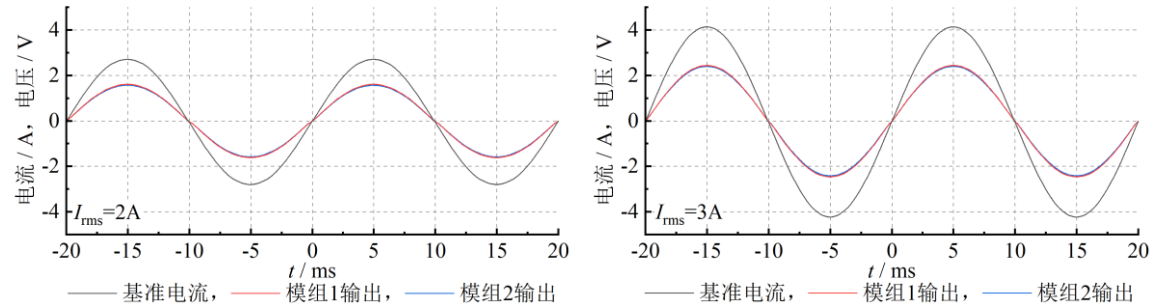


图 B1 部分实验波形

Fig.B1 Partial experimental wavefomrs

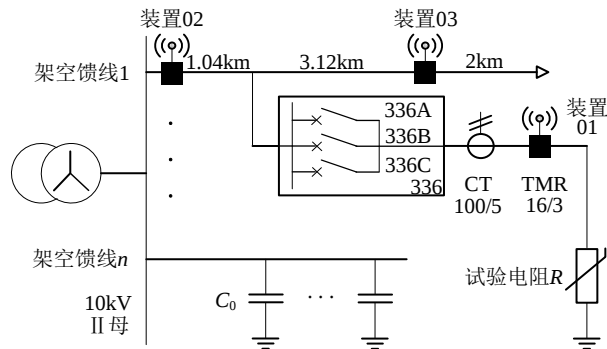


图 B2 配电自动化一次接线简图

Fig.B2 Primary wiring diagram of distribution automation

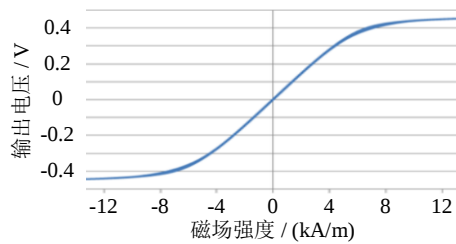


图 B3 TMR2103 典型输出曲线

Fig.B3 Typical output curve of TMR2103

表 B1 录波波形图数据说明

Table B1 Record wave figure data description

录波装置	所在位置	触发时间/s	纳秒时标/ns
装置 01	336 断路器后距故障点 5m 位置	CST 2022/11/15 16:59:49	716,079,463
装置 02	距故障支路 1.04km, 近母线侧	CST 2022/11/15 16:59:49	716,082,856
装置 03	距故障支路 3.12km, 近线路末端侧	CST 2022/11/15 16:59:49	716,090,240