Design and Research of Smart Grid Monitoring Sensors*

WEN Congzong[1*], SHEN Yafeng[2], DIN Xun[3]
(1.College of Innovation Education, Anhui University of Technology, Maanshan Anhui 243000, China;
2.State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing Jiangsu 210000, China;
3.Ma'anshan Power Supply Company of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Ma'anshan Anhui 243000, China)

Abstract: A distributed smart grid monitoring sensor based on iron core optimization is proposed. With high energy efficiency, the sensor has the features of high signal acquisition accuracy, convenient engineering installation and long service life. The establishment of mathematical model of the monitoring sensor, the analysis on the mechanism of error formation by measurement after introducing air gap into the sensor iron core, and the simulation optimization are carried out. The sampling and energy acquisition circuit and the overall structure of the sensor are fully designed in line with the working principle of the sensor, so its long-term use in harsh field environment can be guaranteed. The sensor prototype is made and verified by experiments. The experimented results indicate that the optimized sensor can operate normally with the minimum starting current of 2 A, the measurement accuracy of proportion error is 0.2, the measurement accuracy of angular difference reaches level 1 and has good linearity.

Key words: distributed monitoring sensor; sampling energy; iron core air gap simulation; current transformer
EEACC: 7230 **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2023.02.007

智能电网监测传感器设计与研究*

温从众[1*], 沈雅峰[2], 丁 迅[3]
(1.安徽工业大学创新教育学院, 安徽 马鞍山 243000; 2.国家电网南京供电公司, 江苏 南京 210000;
3.国网安徽省电力有限公司马鞍山供电公司, 安徽 马鞍山 243000)

摘 要: 本文提出了一种基于铁芯优化的分布式智能电网监测传感器, 该传感器取能效率高同时具有较高的信号采集精度, 并具有方便工程安装, 使用寿命长的特点。建立监测传感器的数学模型, 分析传感器铁芯引入气隙后测量后误差形成的机理, 并对其进行仿真优化。根据传感器工作原理全面设计了传感器的采样取能电路和整体结构, 保障其在野外恶劣环境中, 长时间使用。制作了传感器样机并进行实验验证, 结果表明, 优化后的传感器, 最小启动电流 2 A 可正常取能运行, 比差测量精度达 0.2 级, 角差的测量精度达到 1 级且具有良好的线性度。

关键词: 分布式监测传感器; 采样取能; 铁芯气隙仿真; 电流互感器
中图分类号: TM933.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2023)02-0210-08

随着我国智能电网高速发展, 10 kV 配网线路负荷需要进行在线监测[1-2]。使用负荷传感器分布悬挂安装在 10 kV 线路节点上实现对监测线路电流信息的同步采集, 并将采集的数据发送到负荷监测系统主站, 和电表采集的数据进行分析比对[3-4]。电流传感器的野外工作性质决定, 在承受极端恶劣条件的同时还需不间断地获得电能使相关耗电模块维持正常运行。传感器安装在一次的高压侧线路上, 由于在高压侧需要对地绝缘, 所以无法从低压侧通过导电线给电源模块供电; 解决方式一般采用太阳能、激光、电容器、CT 从一次侧线路取能等形式[5]; 考虑到监测装置需隐蔽性好、安装便利、脱离用电用户视野等使用场景要求, CT 取能是通过铁芯和输电线的耦合, 铁芯的绕组从待监测的输电线提取所需电能[6], 是上述几个取能方式中最适用的方式。目前存有以下问题:

①待监测的输电线电流过小, 取能 CT 无法获取电能, 存在供能盲区, 导致传感器无法正常运行。

②待监测的输电线大电流, 取能 CT 过早饱和导致铁芯发热影响功率输出及缩短使用寿命。

③在保证取能的同时还需满足采样的精度, 减少采样误差, 测量范围为 0~100 A 无法适应高压电

项目来源: 国网公司双创项目(AH20-GWMAS11-FZB001)
收稿日期: 2022-04-10 **修改日期**: 2022-05-27

流线路监测[2],且安装不便。

针对以上问题,很多学者进行了相关的研究,如王文等[7]研制出了一种零磁通微电流传感器;陆霞飞等[8]研制出了基于巨磁阻效应的电流传感器,提高了电流测量精度;还有为防止磁芯过早饱和采用泄流电路[9];为小电流时提高取能效率采用纳米晶材料制作磁芯[10];采用 3 个截面积为 5 cm 的硅钢片铁芯做成开合式取能线圈来提高取能效率[11]最小启动电流为 10 A;为了改善启动电流特性采用 DC-DC 优化[12];通过控制法拉电容充电电流,使电流互感器取电电源适应较大的导线电流范围[13];为提高测量精度通过对铁芯参数进行优化设计和对铁芯线圈采用误差补偿[14-15]。

上述的研究已经解决了部分取能问题,然而大多数研究仅考虑如何提高取能效率,并没有考虑到满足取能同时保证采样精度的问题。本文对传感器铁芯引入气隙后进行理论分析,其次再结合仿真分析气隙引入后误差的机理及优化气隙形状提高取能效率和测量精度,最后通过实验验证在输电线 500 A 以内电流可以稳定运行,优化后的铁芯最小启动电流为 2 A,并且测量精度可达 0.2 级,具有良好工程应用价值。

1　分布式电网监测传感器原理介绍

如图 1 所示,传感器通过 CT 将所在待监测的输电线节点的电流转化成小电流,再通过一个低温漂无感标准电阻生成电压信号,再通过 A/D 转换模块转化成数据信号,并将采集的数据信息存储在 MCU 芯片内,MCU 芯片将数据压缩后通过 4G 通讯模块发送给负荷监测系统主站,负荷监测系统主站将数据同步到用电信息采集主站[16]。数据采集及处理的核心 MCU 及数据发送的 GPRS 模块采用低功耗处理,MCU 和 GPRS 模块等工作都需要恒定的电源。

MCU 和 GPRS 模块采用低功耗处理,系统静态功耗为 200 μA×3.3 V,4 g 模块工作功耗为 400 mA×3.3 V,期间支持数据每日报告和对时。

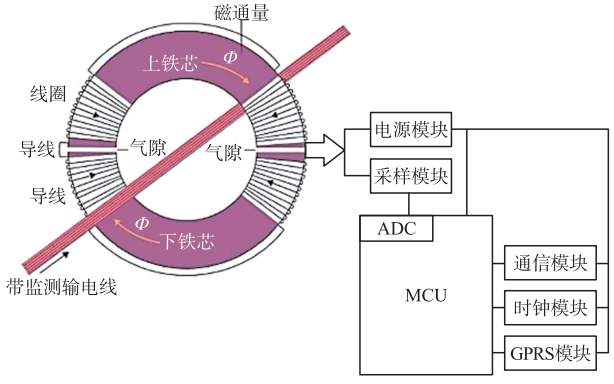

图 1　传感器原理

分布式传感器采用上、下半圆铁芯设计,通过卡扣式结构,将待监测输电线卡合在线槽内,保证采样电线固定在上、下铁芯的中间位置处,防止一次绕组偏心误差[17],可保证采样准确度。

通信模块采用 RTC 实时时钟单元,为监测传感器提供标准时间信号,通过 GPS 对信号采集时间进行校准。

4G 通信模块集成多个工业标准接口、采用 LTE 3GPP Rel.11 技术的 EC20 模块,最大上行速率为 50 M/S,最大下行速率为 1 G/S,并内置 TCP/IP 通信协议,可通过 UART 接口和 MCU 实现通讯数据。

2　采样及取能 CT 理论分析

考虑到本设计安装使用的特殊性,需考虑方便后期电力工程改造加装,本文采用开合式双铁芯结构,和传统的闭合铁芯结构相比,开合式双铁芯结构在铁芯接触位置存在两个气隙。

饱和励磁电流导致铁芯发热,不仅会影响功率输出还会影响影响其使用寿命。而输电线电流范围一般为 2 A~500 A,传感器需保证在输电线大电流时防止铁芯过早饱和,为了使传感器在非饱和励磁电流下工作,需尽量增大铁芯的最大饱和电流值,同时保证铁芯在输电线小电流时也能满足传感器输出功率要求,气隙如何对最大饱和电流值产生影响[18],本文分析如下:

假设铁芯在线性区内工作且磁力线均匀分布,铁芯的横截面积为 S,高度为 h,外径为 D,内径为 d;由磁导定义式 $G=\mu_0\mu_r S/l$ 推导可得铁芯的磁导为:

$$G=\int_{d/2}^{D/2}\mu_0\mu_r\frac{h}{2\pi r}\mathrm{d}r=\frac{\mu_0\mu_r S}{2\pi a}\ln\left(\frac{D}{d}\right) \tag{1}$$

假设刚进入饱和的铁芯的磁感应强度为 B_m,磁通量 $\Phi_m=B_m S$,由磁路欧姆定律推导可得到最大励磁电流 I_m 为:

$$I_m=\frac{\Phi_m}{G}=\frac{\pi B_M(D-d)}{\mu_0\mu_r\ln(D/d)} \tag{2}$$

由式(1)、式(2)可获知,最大励磁电流值和磁感应强度 B_m、铁芯尺寸外径 D,内径 d 等参数相关,为避免铁芯过早达到饱和状态,需通过改变以上相关参数从而提高最大励磁电流。

气隙附近的磁力线会产生对外扩散,由于本文铁芯的横截面积 S 远大于气隙宽度 ε,磁力线扩散可忽略不计,进而可假设气隙磁力线均匀分布且和铁芯内部的相同。

由磁阻定义式可获知气隙及铁芯的磁阻分别为:

$$R_{\mathrm{Fe}}=l/\mu_0\mu_r S \tag{3}$$

$$R_{\varepsilon}=\varepsilon/\mu_0 S \tag{4}$$

式中:ε 为铁芯气隙的宽度,l 为铁芯的周长,S 为铁芯的横截面积。

假设本文设计的气隙铁芯的等效磁导率为 μ_{eq},由安培环路定理以及磁路欧姆定律:

$$F=\sqrt{2}N_1I_1=Hl=\frac{Bl}{\mu_0\mu_{eq}} \tag{5}$$

$$\Phi=BS=\frac{F}{R_{\mathrm{Fe}}+R_{\delta}}=\frac{F}{\dfrac{l}{\mu_0\mu_r S}+\dfrac{\varepsilon}{\mu_0 S}} \tag{6}$$

将式(3)、式(4)代入式(5)、式(6)后,得到等效磁导率 μ_{eq} 为:

$$\mu_{eq}=\frac{\mu_r}{\dfrac{\varepsilon}{l}\mu_r+1}=\frac{1}{\dfrac{\varepsilon}{l}+\dfrac{1}{\mu_r}}\approx\frac{l}{\varepsilon} \tag{7}$$

式中:μ_{eq} 为加入气隙后的等效磁导率,ε 为铁芯气隙的宽度。由式(7)可得加入气隙后铁芯的最大励磁电流值 I_m 为:

$$I_m\frac{\Phi_m}{G}=\frac{\pi BS(D-d)\delta}{\mu_0\ln(D/d)l} \tag{8}$$

结合式(2)、式(8)可知,由于远远大于 ε,所以气隙引入使得取能 CT 的最大励磁电流值大于没有气隙的,即在待监测输电线大电流的时候避免铁芯过早饱和。

3 采样及取能 CT 误差分析及仿真优化

3.1 采样及取能 CT 误差分析

如仿真图 2、图 3 所示,采用 COMSOL Multiphysics 软件对铁芯气隙引入后进行仿真模拟,铁芯尺寸为内径 55 mm,外径 80 mm,宽度 20 mm,绕线 550 匝,材质选用坡莫合金,设定中心母线最小电流为 2 A;随着气隙的引入,铁芯闭合处存在 2 个开口,所以无法和闭合铁芯一样实现完全分布绕组,励磁电流除了在铁芯中建立磁场外,还需额外地在气隙中建立磁场,使得励磁电流变大。气隙周围产生边缘磁通,气隙的磁导率比铁芯磁导率低,同时绕组的漏阻抗变大,会使励磁电流变大[19]。

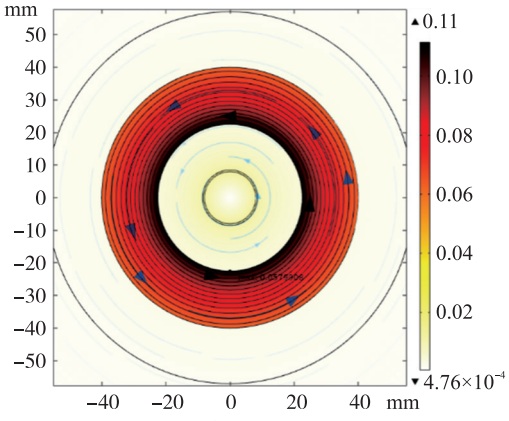

图 2 无气隙铁芯磁感应图

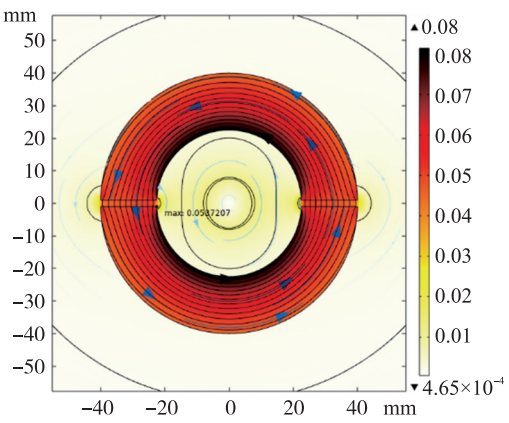

图 3 气隙铁芯磁感应图

虽然气隙可有效防止铁芯过早饱和,然而气隙的引入会使得测量误差变大[20];采集及取能 CT 使用时,母线的电流在转化成二次侧电流时会损失一小部分电流用于产生铁芯磁通的励磁电流,伴随励磁电流还产生涡流损失及磁滞损失等损耗,励磁电流是采集及取能 CT 产生误差的主要原因,减少励磁电流即可减少误差。

由上分析可知,铁芯设置气隙后比相同尺寸没有气隙的铁芯误差要大,误差计算公式计算如下[21]:

$$f_L=\frac{-I_0\sin(\alpha+\theta)}{I_1}\times100\% \tag{9}$$

$$\delta=\frac{I_0\cos(\alpha+\theta)}{I_1}\times3\ 438' \tag{10}$$

式中:F_L 为比差;δ 为角差;I_0 为励磁电流;I_1 为一次电流;θ 为铁芯损耗角;θ 为二次回路的阻抗角。

根据磁动势平衡方程:

$$I_1N_1=I_2N_2+I_0N_2 \tag{11}$$

式中:N_1 为一次绕组线圈的匝数,N_2 为二次绕组线圈的匝数;I_1 为一次电流方均根值,I_2 为二次电流方均根值,I_0 为励磁电流方均根值;

$$I_0=\frac{\varphi_i L}{\sqrt{2}N_1\mu_r S} \tag{12}$$

式中:φ 为励磁电流产生的磁通量;L 为铁芯的平均磁路长度;μ_r 为相对磁导率;S 为铁芯截面积。

比差 f_L、角差 δ 和励磁电流 I_0 成正比,所以要减小误差需减小励磁电流。由公式(12)可知,在铁芯材料和尺寸已确定的前提下,铁芯的平均磁路长度、一次绕组匝数、相对磁导率、铁芯截面积均为定数;而励磁电流产生的磁通量和气隙相关。

3.2　采样及取能 CT 仿真优化

本文设计的普通水平气隙铁芯(一号铁芯)如图 4 所示,凹凸状气隙铁芯(二号铁芯)如图 5 所示,尺寸、参数、材质均和 3.1 章的相同,采用 COMSOL Multiphysics 软件对其进行仿真模拟,二号铁芯相比一号铁芯在气隙中间出多了 5 mm 正方形凹槽部,气隙宽度均为 0.2 mm。仿真结果如图 4、图 5 所示,在其他相同的条件下,随着气隙形状的改变,产生的磁感应强度不同,一号铁芯产生的最大磁感应强度为 0.006 6 T,而二号铁芯产生的最大磁感应强度为 0.034 T 是一号铁芯的 5 倍左右。二号铁芯的气隙形状为磁通线提供了更大的表面积,从而减少了气隙周围的边缘磁通,减少励磁电流的产生,进而减少误差,同时可提高取能效率。

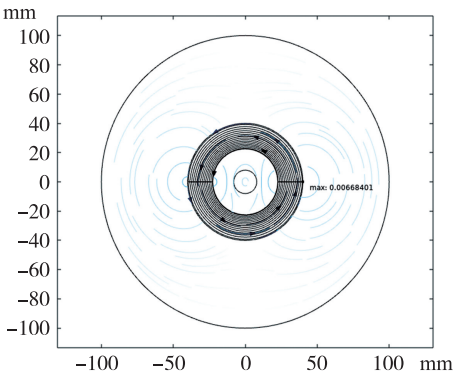

图 4　一号铁芯磁感应仿真图

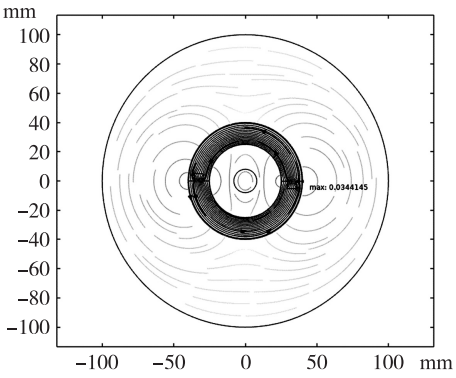

图 5　二号铁芯磁感应仿真图

4　分布式传感器设计

4.1　采样取能电路设计

传感器的 CT 同时用作取能和采样,如图 6 所示,本文的传感器 CT 和普通的传感器相比多了 1S1 与 1S2 接口用于采集二次电流值,2S1 与 2S2 接口用于取能,内部包含三个线圈,其中一个线圈连接到 CT 模块,以便为整个模块供电。

在优化取能线圈的基础上,本文还设计了在大电流时可充电的后备电源模块;电源模块通过 CT

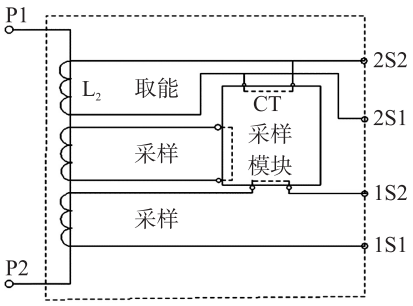

图 6　采样及取能 CT 接线图

取能的形式通过整流电路、限流限压电流 TVS 瞬态保护电路,获得恒定直流电压对主板电路进行供电。

本文具体电路设计如图 7 所示。电源模块采用主辅备三级供电,用 CT 取能并辅以大容量超级电容作为主供电源,当线路负荷电流为 2 A 时,CT 取能可满足系统启动,当取电能力足够时,除去满足系统工作的电量,多余电量会储存到超级电容中,在 4G 通信大电流需求时,超级电容可以提供瞬时大电流;同时采用锂-亚硫酰氯电池+电容器作为后备电源,在超级电容电量不足时,切换后备电源维持系统全功能工作。

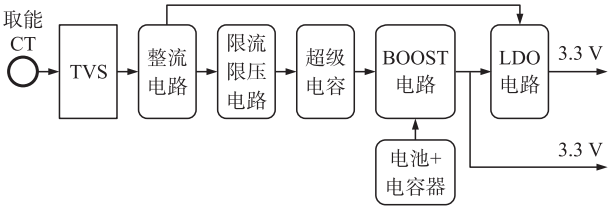

图 7　电源工作原理

图 8 中,L_1 为取电 CT 线圈,本文选取型号为 P6KE68CA 的双向 TVS 二极管瞬态保护电路,箝位最大电压为 92 V,击穿电压为 64.6 V,最大反向电压为 58.1 V;在一次侧出现大电流,传感器出现高峰值的冲击电压时,可瞬间限制到安全的电压范围内,并联在取能线圈的输出端,保护后端电路。

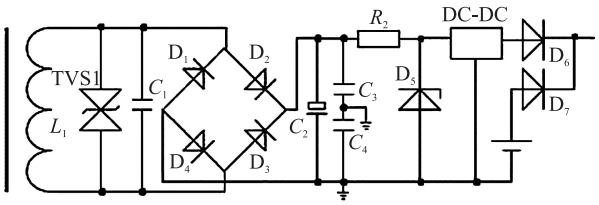

图 8　感应取电电路

C_1 消除差模干扰,C_2 消除直流脉动信号,C_3 C_4 消除共模干扰,D_1-D_4 组成整流电路将取电 CT 线圈感应工频交流电获得的电能转化成直流电提供给后面电路使用,D_5 用于限制过电压,将随着一次侧电流变化而变化的不稳定的整流电路输出电压,转化成稳定的直流电压提供给后端电路,保护 DC-DC

模块,DC-DC 模块选用 LM2576HV-3.3,该型号具有转换效率高、输入范围宽等优点,可以将 6 V~63 V 电压转换成+3.3 V 稳定电压输出。

4.2 分布式传感器整体结构设计

如图 9、图 10 所示,根据传感器工作原理进行了全面设计,将控制主板 MCU 及通信模块、时钟模块、GPRS 模块、电源模块等放置在全密封的安装盒内,形成密闭测量空间,可以防止使用过程中进水导致其故障,保障其在野外恶劣环境中长时间使用。

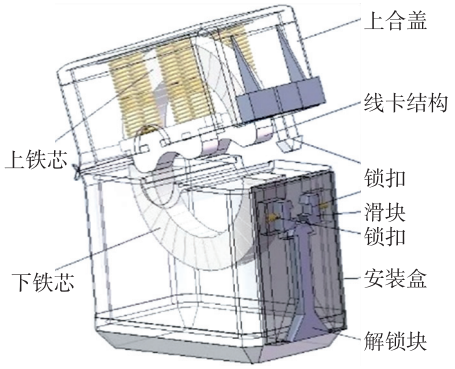

图 9 传感器设计图

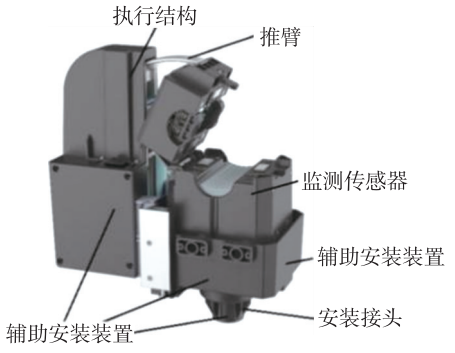

图 10 传感器成品图

考虑到传感器在有气隙情况下会受到振动、环境变化等因素的影响。采用锁扣设计,通过执行机构的齿轮推臂推动监测传感器的上盒盖和安装盒锁定,使上下铁芯位置固定不动,防止振动因素对其采集精度造成影响。

线卡结构将母线卡合在传感器 CT 铁芯的圆点中心位置处,可以避免母线偏离中心位置导致的发热情况发生,同时线卡结构可以使传感器适用不同线径的高压电线。

监测传感器放置在辅助安装装置,通过安装接头连接绝缘安装杆,将监测传感器安装在监测电线上即可实现监测,安装方便。

5 实验与分析

5.1 传感器性能试验

验证在相同输电线路负荷电流的条件下,采用相同大小和材料铁芯,优化铁芯取能及采样误差性能。

制作了(一号铁芯)及(二号铁芯)传感器实验测试样机,一号、二号铁芯的绕线均为 550 匝,样机的 MCU 和 GPRS 模块为负载。图中 11、图 12 所示,AC 交流电源经过 T1 调压器保持稳定的电压、T2 升流器转换成实验用大电流,实现 0~500 A 内可调,模拟现场使用电流电压。传感器的取能采样 CT 安装在 T2 的输出电线上,MCU 和 GPRS 模块和取能采样 CT 的输出端连接。A 为钳形电流表用于测量输出电线上的电流值。输出电线上还安装有一个标准电流互感器,标准电流互感器和取能采样 CT 进行比较,通过互感器检验仪(沈阳中川/HESE,测量精度为 0.005 级)测量分析比差和角差。

实验测试如下:调整输出电流为 20 A,调整输出电线的标准电流互感器电流(一号、二号铁芯传感器的量测的 5%、20%、50%、100%、120%),采集到其比差及角差的数据。

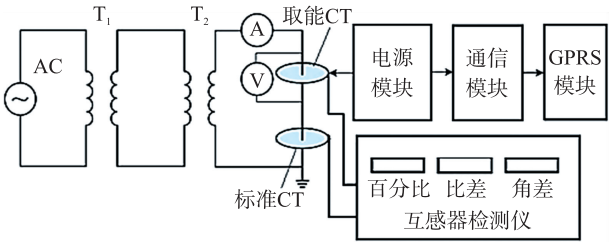

图 11 实验原理图

图 12 实验平台实物图

由图 13、图 14 可知一号、二号铁芯在负载为 20 Ω 时,在没有使用补偿的情况下,一号铁芯最大比差值为-0.38%,最大角差值为 59.34 ′;二号铁芯最大比差值为-0.3%;最大角差值为 54.78 ′。

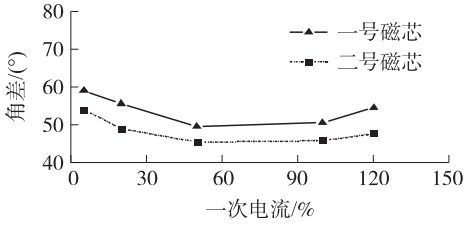

图 13 一次侧电流与角差关系图

比差测量精度均可达 0.2 级,角差的测量精度均可达到 1 级且具有良好的线性度,具体应用时可进行修正,且二号铁芯传感器的比差、角差特性明显优于一号,均符合国家标准[22]。

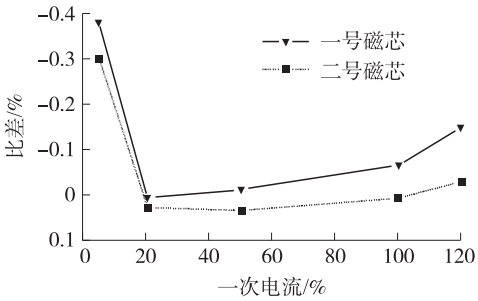

图 14　一次侧电流与比差关系图

由图 15 可知,当调整母线电流到最小启动值 2 A 时,一号铁芯传感器取能 CT 无法获得电压,此时为保证传感器正常工作,需辅助电源提供电能。

由图 16 可知,当启动电流一直调整到 12 A 时,一号铁芯传感器取能 CT 正常工作持续输出 3.36 V 的电压。

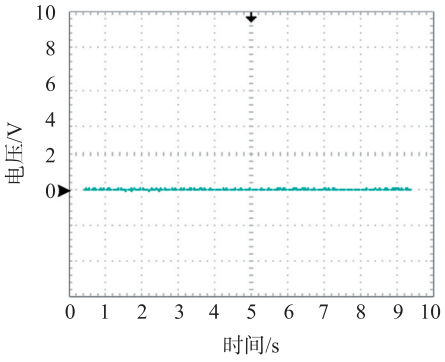

图 15　2 A 时一号铁芯电源输出电压波形

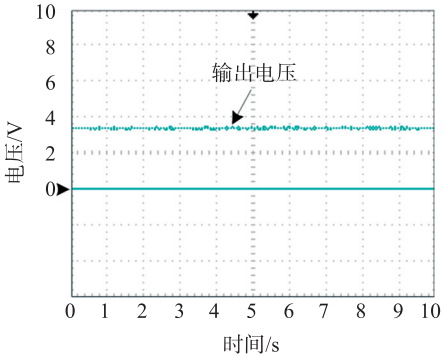

图 16　12 A 时一号铁芯电源输出电压波形

由图 17 可知,在相同条件下,最小启动值为 2 A 时,二号铁芯采集器取能 CT 有 3.36 V 电压输出,持续 0.4 s,间隔 2.2 s,表明二号铁芯采集器取能 CT 可以在 2 A 正常运行,满足负载工作需求。

由图 18 可知,大量测试结果还表明,输出功率随输入电流幅值增大而增大,当一次侧电流在 500 A 以内时都可保持良好的线性度,线圈都不会饱和,且整个电源最大可提供 3 W 功率。

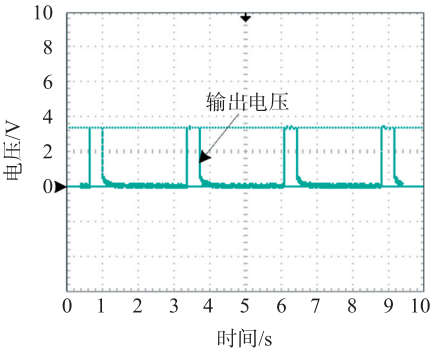

图 17　2 A 时二号铁芯电源输出电压波形

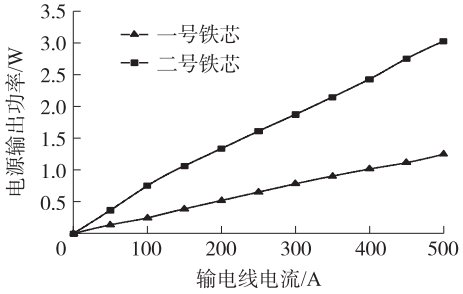

图 18　输出线电流与电源输出功率关系图

综上所述,气隙优化后的二号铁芯传感器与普通一号铁芯传感器相比,由于气隙的优化,气隙形状为磁通线提供了更大的表面积,减少励磁电流,使其取能效果有了大幅提升,从普通一号铁芯的最小启动值 12 A 提升到了 2 A,且其精度从最大比差值为 −0.38%提升到了−0.3%,比差测量精度均达 0.2 级,角差的测量精度达到 1 级,保证了传感器供能需求,同时保证了传感器采样误差精度。

5.2　传感器可靠性测试

采用二号铁芯取能 CT 制作传感器样机进行智能电网监测传感器的可靠性试验,按 JB/T6214—92 中的截尾序贯试验方案中要求的 4:6($\alpha=\beta=0.2$, $D_m=2$)进行,可靠性寿命按 5×10^4 h 执行,已知 $D_m=2.0$, $m_1=5\times10^4$ h,所以 $m_0=1\times10^5$ h。

试验在温度、湿度范围以及工作电压、电流范围等条件下进行,可靠性寿命按 5×104 h 执行,试验环境见表 1。

表 1　试验工作环境条件

物理量	范围
湿度	10%~100%
温度	−25 ℃~75 ℃
电压	电网电压 220 V±30%
电流	最大电流≤500 A
频率	电网频率 50 Hz±5%

试验电流为 $2I_b$ 时,等效试验时间为$(1/2)t$。

根据计算累积试验时间,按表 2 进行下列判定。①如无故障发生,则在 1.40(m_0)时间后可验收;②如在 0.35(m_0)时间内发生两只以上故障则拒收;③其余情况按表 1 确定是否继续试验。

可靠性验证试验的样品数量与等效试验时间如表 3 所示。

表 2 可靠性寿命合格判定表

失效数	累计试验时间(m_0 的倍数)	
	拒收(≤)	接收(≥)
0	—	1.40
1	—	2.09
2	0.35	2.79
…		

表 3 等效试验时间

样品数量	等效试验时间/h	
	最短时间($0.35m_0$)	最长时间($2.79m_0$)
10 台	1 750	13 950
20 台	875	6 975
30 台	585	4 650
40 台	438	3 488
50 台	350	2 790
…		

实验过程中未发现影响安全控制及分析技术使用的严重缺陷,平均无故障工作时间(MTBF)≥50 000 h,年可用率≥99.99%。

6 结论

本文针对现有智能电网监测传感器的取能采样铁芯易饱和、安装不便、续航不足、采样误差大等问题,通过仿真及实验得出以下结论:①设计采用上、下半圆铁芯,方便工程安装,同时可有效避免监测电线大电流时过早饱和,避免饱和后铁芯发热的问题。②通过仿真和实验样机测试表明二号铁芯传感器取能 CT 具有相对大接触表面积的气隙,取能效果及角差特性具有明显优势,比差测量精度达 0.2 级,角差的测量精度达到 1 级且具有良好的线性度,最小启动电流从 10 A 提高了到 2 A,并且无需携带备用电池,大大减轻了传感器的重量及降低了成本。③可靠性性能高,可满足野外长期检测需求。

采用二号铁芯传感器取能 CT 制作样机,分布应用在 10 kV 线路节点,通过 MCU 和 GPRS 模块监测采集监测线路的电流值并发送给负荷监测系统主站,挂网运行半年正常运行,具有良好的工程应用价值。

参考文献:

[1] 李振华,胡廷和,李春燕,等. 应用于智能电网的高压直流电流及谐波测量方法研究[J]. 中国科学:技术科学,2019,49(11):1361-1371.

[2] 杨晓光,陈玫琪,贾哲,等. 一种开环自激振荡磁通门电流传感器[J]. 传感技术学报,2021,34(4):434-438.

[3] Bo Z Q, Lin X N, Wang Q P, et al. Developments of Power System Protection and Control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems,2016,1(1):7.

[4] Bashir S, Paul S, Chang J. Novel Core Airgap Profiles Design Scheme for Winding and Thermal Loss Reduction in High-Frequency Current Transformer Sensors[J]. IEEE Sensors Journal,2020,20(2):892-898.

[5] Ray W F, Hewson C R. High Performance Rogowski Current Transducers[C]//35th IAS Annual Meeting and Word Conference on Industrial Applications of Electrical Energy, Rome, Italy,2000:3083-3090.

[6] Paul S, Bashir S, Chang J H. Design of a Novel Electromagnetic Energy Harvester With Dual Core for Deicing Device of Transmission Lines[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2019,55(2):8000104.

[7] 王文,吝伶艳,乔记平,等. 基于 Simulink 的零磁通微电流传感器的仿真与实验[J]. 传感技术学报,2017,30(9):1343-1347.

[8] 陆霞飞,鲍丙豪. 基于巨磁阻效应的电流传感器研制[J]. 传感技术学报,2022,35(1):8-13.

[9] 康荣波,杨明发. 高压设备在线监测装置复合式电源设计[J]. 电工电能新技术,2016,35(1):67-73.

[10] 王黎明,李海东,陈昌龙,等. 新型高压输电线路低下限死区大功率在线取能装置[J]. 高电压技术,2014,40(2):344-352.

[11] 郭琳云,尹项根,严新荣,等. 配电网智能设备自取能电源的效率提升研究[J]. 中国电机工程学报,2009,29(S1):217-221.

[12] 娄杰,陈常涛. 基于启动电流的电流互感器取能电源优化分析及实验验证[J]. 高电压技术,2018,44(6):1774-1781.

[13] 刘亚东,盛戈皞,王葵,等. 基于相角控制法的电流互感器取电电源设计[J]. 电力系统自动化,2011,35(19):72-76.

[14] 吴煜文,田翠华,吴凡,等. 磁阀式电磁型电流互感器[J]. 高电压技术,2020,46(9):3154-3163.

[15] 王黎明,杜镇安. 用于高压输电线路现场带电校验的开口式双气隙铁芯结构电子式电流互感器[J]. 高电压技术,2015,41(1):106-114.

[16] 蔡耀年,唐杰,马燕玲,等. 基于无线通信的配电网用户实时防窃电系统设计[J]. 计算机测量与控制,

2019,27(5):173-177.
[17] 王欢,项琼,冯宇,等. 一种特高压用具有自校准功能的电流互感器[J]. 高压电器,2019,55(8):230-236.
[18] 林金树,周懋熹,陈道模,等. 轻型输电线缆感应取电装置参数优化设计[J]. 哈尔滨理工大学学报,2021,26(1):93-99.
[19] Yatchev I,Sen M,Balabozov I,et al. Modelling of a Hall Effect-Based Current Sensor with an Open Core Magnetic Concentrator[J]. Sensors,2018,18(4):1260.
[20] 张志,王平欣. 气隙对钳形电流互感器的性能影响分析[J]. 智能电网,2015,3(5):433-436.
[21] 贺小艳,兰雄. 0.1 级坡莫合金微型电流互感器的设计[J]. 仪表技术与传感器,2018(11):52-54.
[22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会. GB2084.2-2014 互感器 第 2 部分:电流互感器的补充技术要求[S].

温从众(1985—),男,汉族,本文通信作者,安徽工业大学实验师,硕士,主要研究方向为自动化设备设计及有限元优化,164636526@ QQ.com。