

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2312608

用于变压器状态监测的 RFID 传感器设计*

左秀江¹ 杨帆² 周一童¹ 朱力³(1. 国家电网集团内蒙古能源有限公司 呼和浩特 010010; 2. 重庆大学电气工程学院 重庆 400044;
3. 重庆川仪自动化股份有限公司 重庆 401121)

摘要: 油浸式变压器发生故障时会导致铁芯和绕组振动异常、温升过大并传递到箱体,为了能够同时对变压器运行时的振动和温度状态进行在线监测,设计了一种基于双天线的 RFID 传感器,集成温度和加速度传感器芯片,并增加一块“L”型金属反射板以增强辐射效率。在实验室对 RFID 传感器准确度进行测试,结果表明振动和温度的测试误差仅为 0.7% 和 1.6%,并以 OFPSZ-150000/220 变压器为实验对象进行了现场监测实验。结果表明:RFID 传感器监测到的变压器箱体振动信号主要集中在以 100 Hz 为基频,100~500 Hz 之间;而箱体的温度在越靠近中间位置越高,越接近边缘越低。实验结果表明所测数据与现场数据非常接近,加速度和温度测量误差仅为 6.25% 和 1.9%,证明了 RFID 传感器的可靠性。

关键词: 振动;温度;RFID 传感器;双天线;状态监测

中图分类号: TM930.12 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.4

Design of RFID sensor for transformer condition monitoring

Zuo Xiujiang¹ Yang Fan² Zhou Yitong¹ Zhu Li³(1. State Power Investment Group Inner Mongolia Energy Co., Ltd., Hohhot 010010, China;
2. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
3. Chongqing Chuanyi Automation Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

Abstract: When the oil immersed transformer fails, it will cause abnormal vibration of the iron core and winding, excessive temperature rises and transmission to the box. In order to simultaneously monitor the vibration and temperature status of transformers during operation, an RFID sensor based on dual antennas is designed, which integrates temperature and acceleration sensor chips. In addition, an "L" shaped metal reflector is added to enhance the radiation efficiency. The accuracy of the RFID sensor was tested in the laboratory, and the results showed that the test errors for vibration and temperature were only 0.7% and 1.6%. Finally, OFPSZ-150000/220 transformer is taken as the experimental object for field monitoring. The results show that the vibration signals of the transformer box monitored by RFID sensors are mainly concentrated in the range of 100~500 Hz with 100 Hz as the fundamental frequency; The temperature of the box is higher when it is closer to the middle and lower when it is closer to the edge. The experimental results show that the measured data is very close to the field data, the measurement errors of acceleration and temperature are only 6.25% and 1.9% which proves the reliability of the RFID sensor.

Keywords: vibration; temperature; RFID sensor; double antenna; condition monitoring

0 引言

随着电力物联网、电力设备数字孪生技术的快速发展,电网设备尤其是变压器运行状态的实时监测亟需可靠的新传感器^[1-3]。变压器在正常运行或异常运行工况下都会有不同的振动频率、温度数值,而且都会从变压器内部传递

到变压器箱体。目前大分别采用加速度传感器、温度传感器单独对振动和温度进行监测,需要大量的传感器,且使用较为繁琐。因此研究新型可靠的、与变压器无电气连接的传感器实现变压器箱体上的振动和温度双参量的便捷监测具有很大工程应用价值^[4-6]。

而射频识别技术(radio frequency identification, RFID)

收稿日期:2023-01-11

* 基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2401701)项目资助

与传感技术相结合的应用逐渐被广泛关注^[7],诸多学者、研究机构都提出了带有温度或加速度传感功能的RFID标签或传感器设计方案^[8-13]。Konstantinos等^[14]设计出了一款以天线为感温材料的RFID温度传感器。凭借其独特的优点,RFID传感器逐渐在电力行业展开应用。何怡刚等^[15]和王泉智等^[16]分别研制了一种RFID加速度传感器,用来对变压器振动、导线舞动进行监测分析。Deng等^[17]设计了一个可用于金属氧化物避雷器在线监测的RFID传感器。将RFID传感技术用于电力设备在线监测尤其是变压器的状态监测是一个极具发展前景的方向。

基于上述分析,本文设计了一款双天线取能,集成温度和加速度双参量的RFID传感器,并以OFPSZ-150000/220变压器为对象,进行了RFID传感器的现场测试和应用。

1 RFID传感器天线设计

1.1 RFID传感器整体架构

集成温度和加速度芯片的RFID传感器设计方案如图1所示,传感器工作频率为915 MHz,箭头方向表示信号的流动方向,且天线1、2都可以取能,但只有天线1进行传感数据的返回。双天线通过接口协议ISO 18000-6协议与ImpinjR420阅读器进行通信。温度和加速度传感器芯片型号分别选用LIS3DH、EVAL01-FENIX-RM,射频芯片为ROCKY100,MCU选用MSP430主控芯片。

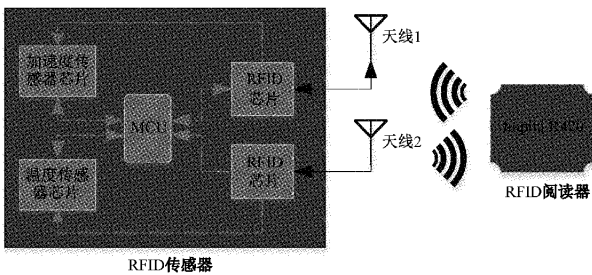


图1 RFID传感器架构

1.2 射频前端巴伦电路设计

在进行天线设计时,初步选定高度为180 mm的单极子天线,仿真得到其阻抗实部为60.133 6 Ω,虚部为-15.872 1 Ω。通过在天线端口并联14.0 nH电感,串联6.5 pF电容,实现天线到传输线50 Ω特性阻抗的匹配。

如图2所示的RF+、RF-两个端口是射频芯片的差分信号输入端,射频芯片ROCKY100的阻抗为52-j479,需要在其与天线端口J2之间搭建巴伦电路,从而实现单端信号到双端差分信号的转换。

在巴伦电路中,将阻抗匹配完成后的天线端阻抗写为: $Z_s = R_s + jX_s$;两个差分信号端的阻抗都是52-j479,记为: $Z_d = R_d - jX_d$;串联电容后的等效天线端阻抗写为: $Z'_s = R_s + jX'_s$ 。

根据以下巴伦电路计算公式可算出所有电感值和电容值:

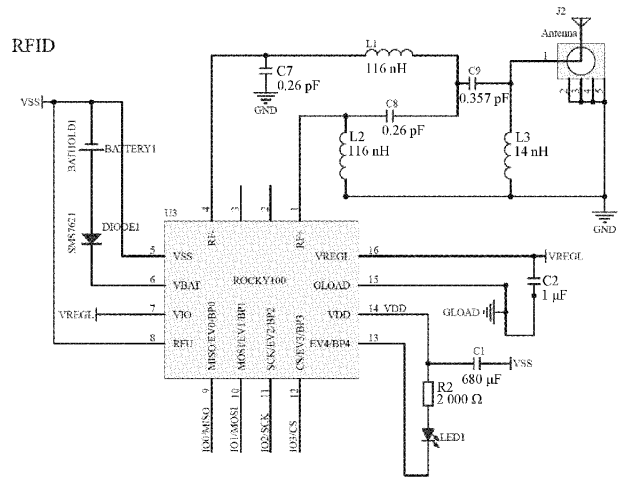


图2 RFID射频芯片主电路

$$\begin{cases} X'_s = \frac{X_d R_s}{R_d} \\ C_{ms} = \frac{1}{\left(\frac{X_d}{R_d} R_s + X_s\right) \omega} \\ Z_d Z'_s = R_d R_s + X_d X'_s \\ L = \frac{\sqrt{2 Z_d Z'_s}}{\omega}, C = \frac{1}{\sqrt{2 Z_d Z'_s} \omega} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\omega = 2\pi f$, f 为天线的工作频率。计算得出 $C_{ms} = C_{m0} = 0.378 \text{ pF}$, $L = L_{m1} = L_{m2} = 116 \text{ nH}$, $C = C_{m1} = C_{m2} = 0.26 \text{ pF}$ 。

图2为仿真设计完成后的RFID射频芯片主电路。将巴伦电路和天线前端的阻抗匹配电容、电感进行整理后可得如图2所示的L1、L2、L3、C7、C8、C9数值,其中C9是天线前端6.5 pF和0.378 pF电容串联后得到的电容值。

2 RFID传感器实物分析

考虑到变压器环境下的电磁干扰问题,在传感器外层用环氧树脂进行屏蔽层的设计,保证RFID传感器工作的稳定性。同时增加一块“L”型铝板金属底座,不仅可以使得天线能够更加集中的朝一个面辐射,还能够有效导热,使温度传感器更加准确的监测到变压器箱体温度,同时保证天线的架设方式为十字交叉摆放。

集成温度和加速度芯片后的RFID传感器工作电压为2.5 V,电流为4 mA,功耗约为10 mW。其中加速度传感器工作电压为1.8 V,电流随着测量振动频率的不同而有所差别,在100 Hz时电流为20 μA,1 344 Hz时为185 μA,其功耗位于36~333 μW之间。

RFID传感器内部封装有振动电机,通过图3中的外部振动电机电源接口供电,接入3 V额定电压即可让电机工作,可用以振动频率准确度测试。

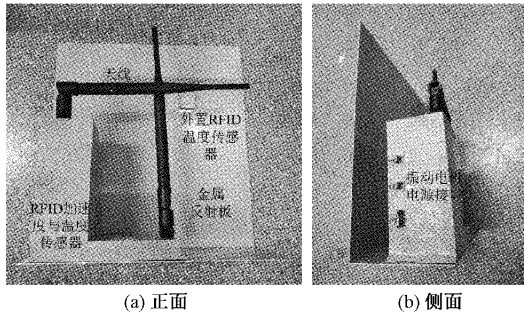


图 3 RFID 传感器实物图

3 振动与温度准确度测试

为对所设计 RFID 传感器的测量准确度进行验证,需在试验室进行振动和温度测试。

电机额定电压下振动频率为 183.3 Hz,将 RFID 传感器测量得到的振动频率与电机额定振动频率的参考值对比,进而得出振动准确度;对于温度的测试,采用第 3 方温度传感器测试环境温度作为温度参考值,将 RFID 传感器测量得到的温度值与参考值对比。

将振动与温度测试结果整理如图 4~5 所示。其中,图 4 为振动频率参考值与测试值的误差对比,温度测试参考值与测试值的误差对比如图 5 所示。

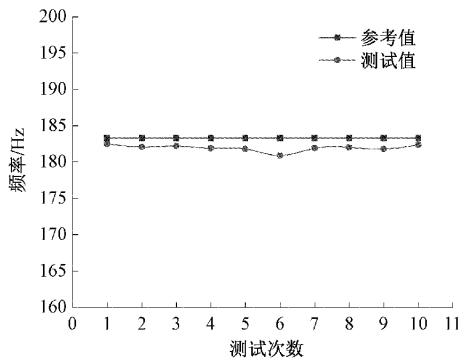


图 4 RFID 振动频率准确度测试

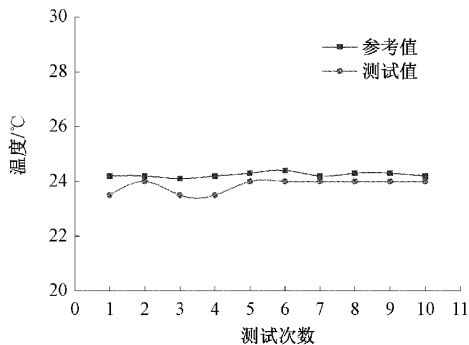


图 5 RFID 温度数据准确度测试

综合振动频率和温度的测试结果,可知所设计的 RFID 传感器测量振动和温度的准确度误差分别只有 0.7% 和 1.6%,因此可认为该传感器测试振动和温度的准确度是可靠的。

4 RFID 传感器现场应用

4.1 测试变压器选型

本文采用西安西电变压器有限责任公司生产的变压器样机进行应用试验,参数如表 1 所示。

表 1 变压器样机参数

名称	参数
变压器型号	OFPSZ-150000/220
变压器容量/MVA	150
冷却方式	强迫油循环风冷
额定电压/kV	220
额定电流/A	681.82

在选择变压器表面监测点时,需要尽可能选择表面温度热点和振动强点,分析可知变压器表面箱体热点主要集中在箱体的中间位置,越往外温度最值降低。对于振动强点的选择上,分析可知在变压器底部的振动信号与额定工况运行下的负载关联性不强、能量较低,且 100 Hz 谐波的占比较低;在外表面的加强筋上,振动能量较高但与其与负载之间的关联较弱,且信号成分复杂;在外表面的平板上,振动信号中的 100 Hz 分量的幅值较大,谐波占比也超过了 50%,能够较好的反映变压器内部运行状态,其与负载之间的关联性较高。

在变压器箱体高、低压侧均可以取得良好的监测效果,但变压器高压侧电压比低压侧高了几倍。虽然本文已经对 RFID 传感器进行了电磁屏蔽等措施,依然会有微弱电磁干扰以及局部放电对振动信号的监测造成负面影响,为了尽可能减少干扰信号对监测效果的影响,并且温度监测点的限制并没有振动监测点这么严格,所以选择变压器箱体低压侧外表面靠近中间的平板位置进行加速度监测,低压侧不仅电压量级较低,也可以保证获取低噪声、频率特征较多的振动信号。结合实际变压器的构造情况,避开油箱外部的风扇等位置,监测点的理论分布点和实际监测位置的摆放位置如图 6 所示,分别将其标号为 1~4 一共 4 个位置,现场试验如图 7 所示。

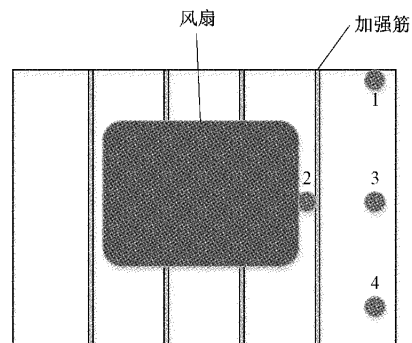


图 6 变压器箱体监测点位置

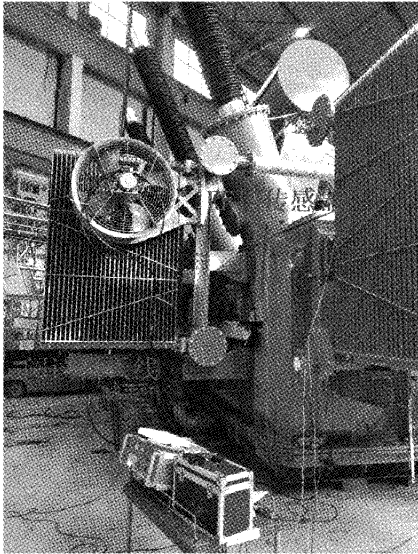


图7 低压侧实验时 RFID 传感器位置

4.2 实验结果分析

因为 RFID 传感器监测到的数据为变压器振动加速度随时间变化的关系,为了得到振动信号的频域信号,需要对加速度时域信号进行傅里叶变换得到频域信号。根据实验所得到的监测点数据,整理出时域信号和频域信号。

对于 1 号点,将图 8 所示的时域信号经傅里叶变换后得到图 9 所示的频域信号,可知 1 号点主要是由基频为 100 Hz 的振动信号构成。

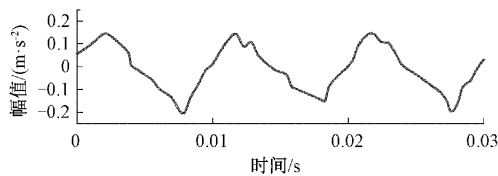


图8 1号点振动时域信号

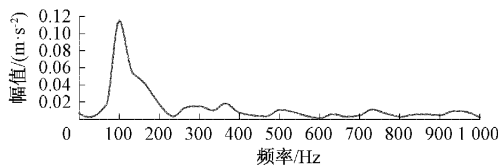


图9 1号点振动频域信号

对于 2 号点,将图 10 所示的时域信号经傅里叶变换后得到图 11 所示的频域信号,可知 2 号点除了由 100 Hz 的振动信号构成,且还有较大的 400 Hz 信号。

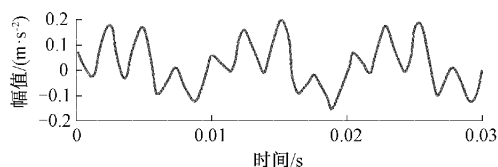


图10 2号点振动时域信号

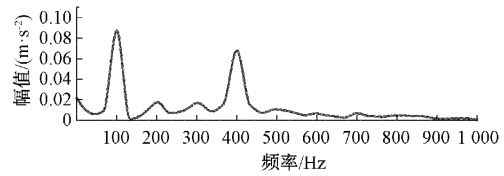


图11 2号点振动频域信号

对于 3 号点,将图 12 所示的时域信号经傅里叶变换后得到图 13 所示的频域信号,可知 3 号点的振动构成较为复杂,主要有 100 Hz、200 Hz、300 Hz 以及 400 Hz 信号构成。

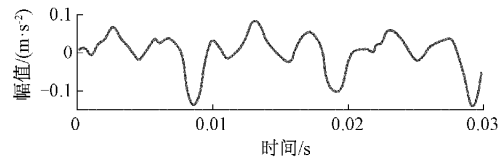


图12 3号点振动时域信号

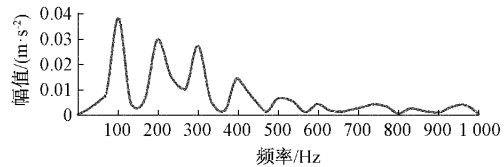


图13 3号点振动频域信号

对于 4 号点,将图 14 所示的时域信号经傅里叶变换后得到图 15 所示的频域信号,可知 4 号点的振动构成中 200 Hz 成分较大,另外还有 100、300、400 Hz 的振动信号。

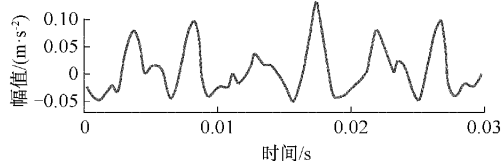


图14 4号点振动时域信号

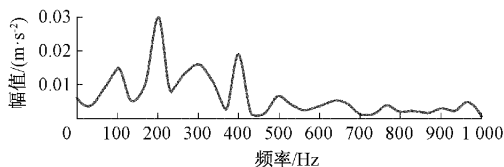


图15 4号点振动频域信号

通过分析加速度振动信号的频域信号可知,RFID 传感器监测到的加速度时域信号经过傅里叶变换后与理论计算的振动规律一致;且从上往下,箱体的振动信号频率构成越复杂。变压器振动信号是以 100 Hz 为基频的,本实验中还含有幅值较大的 200、300、400、500 Hz,大于 500 Hz 的信号幅值已经趋近于 0。

现场实验时,将某时刻监测到的加速度与温度数值整理如表 2 所示。可知在变压器箱体越靠近中间位置的箱体温度越高,越接近边缘位置的温度越低,且 RFID 传感器所

测得的加速度与温度与现场数据误差较小,加速度平均误差为 6.25%,温度平均误差为 1.9%。

表 2 现场监测数据与 RFID 数据对比

监测点	现场加速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	测量加速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	现场 温度/ $^{\circ}\text{C}$	测量 温度/ $^{\circ}\text{C}$
1	0.09	0.08	39.5	38.5
2	0.07	0.06	42.5	42.0
3	0.04	0.04	38.0	37.0
4	-0.03	-0.03	35.5	35.0

5 结 论

本文基于双天线取能方案,进行了集成温度和加速度芯片的 RFID 传感器设计,并通过增加一块“L”型金属反射板提高辐射效率。最后以 OFPSZ-150000/220 变压器为例进行了现场实验,结果表明从箱体顶部往下,振动信号频率构成越复杂,但都是以 100 Hz 为基频,含有 200、300、400 Hz 等谐波的信号;此外,变压器箱体越靠近中间位置的箱体温度越高,越接近边缘位置的温度越低。RFID 传感器所测数据与现场数据非常接近,加速度和温度测量平均误差仅为 6.25% 和 1.9%,证明了该新型 RFID 传感器用于变压器箱体振动与温度监测的可行性。

参 考 文 献

- [1] 赵鹏,蒲天骄,王新迎,等. 面向能源互联网数字孪生的电力物联网关键技术及展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 447-458.
- [2] 王伟贤,李钟慎. 改进层次分析法在柱上变压器状态评价的应用[J]. 电子测量技术, 2020, 43(6): 38-42.
- [3] 刘云鹏,刘一瑾,刘刚,等. 电力变压器智能运维的数字孪生体构想[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22): 8636-8652.
- [4] 李鹏,毕建刚,于浩,等. 变电设备智能传感与状态感知技术及应用[J]. 高电压技术, 2020, 46(9): 3097-3113.
- [5] ZHANG X H, XUE W X, WANG S Y, et al. Online monitoring of transmission line operation based on power internet of things [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2108(1): 1-7.
- [6] ZU G Q, SI W, YAO Y, et al. Design of online monitoring system for distribution transformer based on cloud side end collaboration of internet of things [J]. International Journal of Wireless Information Networks, 2021, 28(3): 276-286.
- [7] 谢良波,李宇洋,杨小龙,等. 基于多频点相位距离/

角度联合估计的 RFID 室内定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(7): 112-122.

- [8] 吴翔,邓芳明,何怡刚,等. 应用于 RFID 的超低功耗 CMOS 温度传感器设计[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(2): 106-108, 112.
- [9] 王思睿,薛严冰,宋智,等. 纸基底印刷无芯片 RFID 湿度传感器 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3): 150-158.
- [10] AUNG N N, CROWE E, LIU X B. Development of self-powered wireless high temperature electrochemical sensor for in situ corrosion monitoring of coal-fired power plant [J]. ISA Transactions, 2015, 55: 188-194.
- [11] HUANG C T, HUANG B, ZHANG B S, et al. An electromagnetically induced transparency inspired antenna sensor for crack monitoring[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(1): 651-658.
- [12] 张朝龙,何怡刚,杜博伦,等. 基于深度学习的电力变压器智能故障诊断方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(1): 81-89.
- [13] 郭宗鑫,张丕状,姚金杰,等. 基于 RFID 新型抗金属标签设计[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(12): 115-119.
- [14] KONSTANTINOS Z, YVAN D, SMAIL T. Self-Tuning RFID tag: A new approach for temperature sensing[J]. IEEE Transactions on Micro-wave Theory and Techniques, 2018, 66(12): 5885-5893.
- [15] 何怡刚,汪涛,施天成,等. 基于 RFID 传感器标签与深度学习的变压器状态监测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(9): 72-79.
- [16] 王泉智,何怡刚,邓芳明,等. 基于 RFID 传感器标签的导线舞动在线监测技术研究[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(8): 99-102.
- [17] DENG F M, WEN K Y, ZENG H, et al. Novel metal-oxide arrester monitoring technology based on RFID sensor and mind evolutionary computation[J]. Electric Power Systems Research, 2020: 106859.

作者简介

左秀江,工学硕士,工程师,主要研究方向为特高压输电监测技术等。

E-mail: 18428374984@163.com

朱力(通信作者),工学硕士,助理工程师,主要研究方向为新型传感技术研究。

E-mail: zhuli_personal@126.com