

[电力互感器]

电力互感器误差特性在线监测装置设计

文/景彪¹ 李康¹ 阳俊辉¹ 赵静² 林聪²

1. 云南电网有限责任公司玉溪供电局; 2. 云南电网有限责任公司计量中心

作为电能计量装置的组成部分，电力互感器运行中误差的准确性直接关系电能量贸易结算的准确可靠。近年来，采用机器学习预测运行中互感器误差成为互感器计量领域研究的热门。针对现有的电力互感器在线监测装置的不足之处，研制了一套可实现电压互感器、电流互感器计量绕组二次输出信号的在线监测装置。该装置的电信号采集单元通过试验证明，电压部分满足0.05级准确度等级，电流部分满足0.1级准确度等级，满足为电力互感器运行误差分析计算提供电信号的要求。该装置的应用不仅可以为电力互感器运行误差预测技术提供硬件，还可以为电力互感器的状态检修提供数据支撑。

随着用电量的快速增长，用户对电能量贸易结算的准确性关注程度越来越高。作为电能计量装置关键设备之一，互感器运行环境下的真实误差直接影响着电能量贸易结算的准确性。仅通过采集运行环境下互感器的参数，通过机器学习的方法获得互感器运行误差成为近些年互感器计量领域的热门研究方向。国际上，弗吉尼亚理工大学两位IEEE终身会士A.G. Phadke和James S.Thorp教授于2012年提出了基于精确建模的电压互感器运行误差评估方法。国内方面，学者提出了包括基于信号处理、基于知识、基于数据驱动和基于物理信息量等多种运行互感器误差分析方法，并以科技项目为依托在浙江等多个省电力公司开展试点，取得初步成效^[1-4]。然而，现阶段大部分信号采集装置仅具备采集运行中电压互感器二次输出信号的功能，缺少采集二次电流信号功能。相对于目前已经出现的多种分析方法，现有设备采集的对象数量较少，已不能完全支

撑电力互感器运行误差分析方法的发展需求。

本文提出一种支持电力互感器运行误差分析技术用的，可同时监测电压、电流互感器计量绕组输出的在线监测装置。该装置电压互感器（PT/CVT）信号采集准确度等级为0.05%；电流互感器（CT）信号采集准确度等级为0.1%。采集数据可本地存储显示，也可远程传输。本装置的研制为电力互感器运行误差特性在线监测技术提供数据支撑。

电力互感器在线监测装置设计方案

在线监测装置安装运行在控制室屏柜中，其基本要求是在采集运行中电力互感器计量绕组输出信号时保证安全。电力互感器运行要求规定，电压互感器二次不能短路，电流互感器二次不能开路。电力互感器误差特性在线监测装置结构框图如图1所示。

基金项目：云南电网公司科技项目（YNKJXM20220176、YNKJXM20220163）

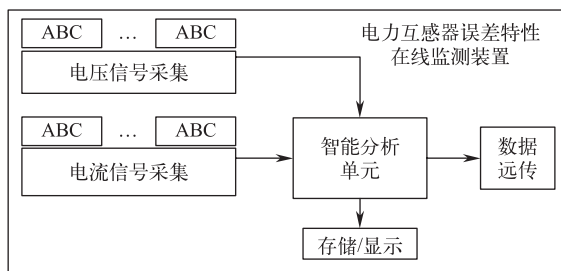


图1 电力互感器误差特性在线监测装置结构图

该装置主要部分包括信号采集单元、智能分析单元、存储/显示单元和数据远传单元。信号安全采集主要负责信号的安全接入、信号高准确度采集和信号数字化转换。信号安全采集一方面保证在线监测采集运行中电力互感器二次信号时，不会对电力互感器运行产生影响；另一方面当电网中出现异常时，在线装置具备自动保护功能。高准确度信号采集负责采集运行中电力互感器幅值、相角和频率。信号数字化转换是将输出处理后以数字量的形式传输给信号分析处理单元。智能分析单元负责计算分析被监测电力互感器的计量性能，并将数据及结果推送到本地存储单元；当数据或结果需要远传时，将其推送到传输单元。

1. 电压信号采集单元设计方案

电压信号是并联获取，电压信号采集单元的信号输入端设计包含过电流保护、短路保护和电压隔离功能。

(1) 过电流保护

在现有变电站设计规范中对于中性点不接地系统，电压互感器的二次回路一般加装快速熔断器作为二次电压保护，熔体额定电流整定为最大二次负荷电流的1.5倍。在线监测装置保护模型中包含快速熔断器，其熔体额定电流的整定值参考现有电压互感器最小二次电流0.173 A的1.5倍，向下选取0.2 A的熔断器型号，保证在线装置本体故障时能够快速熔断保护，不对变电站的安全运行造成影响。

(2) 短路保护

在变电站设计规范中，电压互感器二次回路的保护断路器的自动脱扣器动作电流整定值为其二次最大负荷电流的1.5~2.0倍。根据现在CVT设计的二次总容量，变电站电压互感器二次回路的保护断路器的动作电流整定值均在3 A以下。为保证测试装置的安全性，保证保护灵敏度和防止越级跳闸，

在线装置的短路保护部分整定值选取现有保护断路器中整定值最小型号0.3 A，以最大限度提高测试装置的安全性。

(3) 电压隔离

在线装置的电压隔离部分参考变电站二次系统设备电压模块，采用高准确度微型电压互感器对CVT的二次电压进行电气隔离和精密转化。其安全绝缘性能的参数选型参考JB/T 10667—2016《微型电压互感器》的7.1.2部分：交流耐压试验。第7.1.2条要求微型电压互感器一次绕组与二次绕组间、一次二次绕组与外壳间应能承受4 kV（方均根值）的交流电压试验^[5-7]。为保证测试装置的安全性，在线装置的电压隔离绝缘水平从4 kV提高至5 kV，并要求在初级和次级之间放置静电屏，且有效接地可以抑制传递过电压，以保证电压互感器二次信号转换装置的绝缘水平高于变电站内的二次设备电压端口。

电压隔离部分的输入阻抗对CVT误差检测有一定的影响，其输入阻抗越大，从CVT吸取的二次电流越小，对CVT误差检测影响越小。现阶段，CVT二次负荷容量以特高压等级CVT最低，每绕组为10 V·A，额定二次电流约173 mA。输入阻抗取1 MΩ，输入电流约50 μA，占电压互感器额定二次电流的0.03%，远小于CVT实际运行二次电流。电压隔离部分的误差须计入系统误差，对于0.2级电力互感器计量绕组进行信号采集时，电压信号采集单元误差设计不低于0.05级，因此电压隔离部分的准确度级别应高一级，为0.02级。

2. 电压信号采集单元设计方案

电流信号串联获取，电流信号采集单元的信号输入不能改变现有运行方式，不能短路以免影响电能表电费计量，因此电流信号采集试用开口式电流传感器或非接触式电流传感器。

(1) 开口式电流传感器

电流钳是使用量最大的开口式电流传感器。在测量一次电流较大，且回路难以打开的电缆电流时经常用到，但由于其铁心为开口式结构，为了提高测量准确性需要增加开口铁心截面积，导致这种传感器的卡口处较粗大。实际操作中，电流屏柜内的二次信号线紧密排列，普通的电流钳难以插入，而微型开口电流传感器准确度普遍在1级以下，难以满足0.2级电流信号的采集要求。

(2) 非接触式TMR电流传感器

TMR是一种新型非接触式传感器，它通过交换偏置效应和惠斯通电桥结构设计突破了AMR磁传感器的性能瓶颈，大幅增加了AMR的线性和抗干扰能力。该传感器具有体积小，抗磁饱和裕度大，优良的线性度和输出零位的稳定性能。TMR2150隧道磁电阻线性传感器芯片是采用一种独特的推免式惠斯通全桥结构设计，包含四个非屏蔽高灵敏度TMR传感器原件。当外加磁场沿平行于传感器敏感方向变化时，惠斯通全桥提供差分电压输出，并该输出具有良好的温度稳定性。以温度漂移为例，控制TMR传感器系统的反馈流程如图2所示。

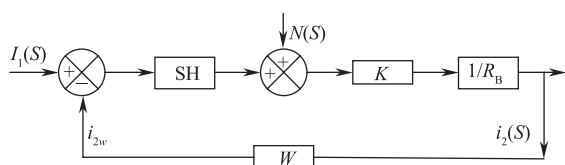


图2 TMR传感器系统反馈图

图3中圆圈表示加法环节，方框表示传递函数。其中： $I_1(S)$ 是被测电流的拉氏变换； $i_1(S)$ 是反馈电流的拉氏变换； K 是移相和功放合成放大倍数； R_B 是二次线圈和二次取样电阻总阻值； W 是二次线圈匝数； S_H 是TMR芯片的电流电压转换； $N(S)$ 是温度扰动。

根据闭环系统框图，计算可得

$$i_2(S) = \{ [I_1(S) - i_2(S)] S_H + N(S) \} K / R_B$$

$$= I_1(S) K / R_B - i_2(S) w S_H K / R_B + N(S) K / R_B \quad (1)$$

拉氏变换得到

$$i_2 = i_1 \frac{1}{w + R_B / S_H K} + N \frac{1}{w S_H + R_B / K} \quad (2)$$

根据式(2)可知测量的显示量由两个分量组成， $i_1 \frac{1}{w + R_B / S_H K}$ 是被测电流造成的影响量， $N \frac{1}{w S_H + R_B / K}$ 为测量系统温度漂移造成的响应量。在这样的闭环系统中，每一个输入量都有一个确定的输出量与之对应，要获得并只需获得对应于被测电流的输出，就必须对 N 的对应量 $\frac{1}{w S_H + R_B / K}$ 进行矫正。从式(2)中可以看出，合理选取 R_B 、 w 、 S_H 、 K 的参数值，可以使得温度造成的影响量减小到所允许的程度，即被测电流响应量 i_1 准确到所需要程度。假设系统温度漂移造成的影响量为0时，根据

式(2)得到系统输入输出的关系为

$$i_2 = i_1 \frac{1}{w + R_B / S_H K} \quad (3)$$

整理可得

$$\frac{i_1 - w i_2}{i_1} = \frac{1}{w S_H K / R_B} \times \frac{1}{1 + R_B / w S_H K} \quad (4)$$

式(4)左边为系统测量 i_1 的相对误差记为 ε ， $\frac{w S_H K}{R_B}$ 为闭环系统开环放大倍数，记为 $k_{开}$ ，则式(4)

测量系统相对误差为

$$\varepsilon = \frac{1}{k_{开}} \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{k_{开}}} \right) \quad (5)$$

对式(5)用泰勒公式展开

$$\varepsilon = \frac{1}{k_{开}} \left[1 - \frac{1}{k_{开}} + \frac{1}{k_{开}^2} - (-1)^n \frac{1}{k_{开}^n} + \dots \right]$$

$$= \frac{1}{k_{开}} - \frac{1}{k_{开}^2} + \frac{1}{k_{开}^3} - \dots (-1)^n \frac{1}{k_{开}^n} + \dots \quad (6)$$

显然对 i_1 的测量，其相对误差 ε 呈收敛序列，表明系统的开环放大倍数越大其误差越小。由于 $k_{开} = w S_H K / R_B$ ，可根据测量需要来设定 R_B 、 w 、 S_H 、 K 的参数值，以获得高准确度的电流比率。根据分析可知系统参数 w 、 S_H 、 K 取值很大， R_B 取值很小时，温度干扰 $\frac{N}{w S_H + R_B / K}$ 很小，此时被测电流的响应趋势为 $1/w$ 。

对TMR传感器实际误差进行测量，将芯片放置在一台500 A/1 A的电流互感器二次侧附近，改变额定一次电流大小获得TMR传感器误差见表1。

表1 TMR传感器误差试验数据

额定电流 (%)	比值差 (%)	相位差 (°)
11.30	-0.148	6.77
25.40	0.009	0.41
36.10	0.063	-2.21
44.00	0.083	-3.64
60.50	0.117	-5.42
71.20	0.133	-5.44
78.70	0.134	-5.57
87.60	0.107	-4.57
98.00	-0.077	-2.69
102.50	-0.098	-2.21

试验结果显示TMR传感器准确度为0.2级，不满足对运行中CT计量性能的监测需求，因此互感器二次电流信号采集方面，采用开口传感器加闭环系统

实现。

多维参量在线监测装置研制

1. 电压信号采集单元

每台电压互感器的计量绕组二次输出电压信号为57.7 V，采用微型PT隔离的方式。输入通道电流保护采用125 V/250 mA的一次性保险管，抗浪涌设计采用TVS双向二极管SMJC100CA，吸收电压互感器二次信号端子接入时产生浪涌电压。电压信号采集保护模块结构如图3所示。电压互感器计量绕组输出信号进过快速熔断器、保护断路器和精密微型PT进入在线装置的信号采集单元内的信号调理模块。信号调理模块（调理电路呈高阻抗，功耗小）如图4所示。之后进行A/D转换输出数字信号，数字信号进入智能分析单元。

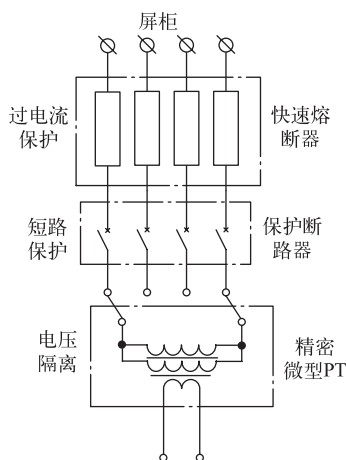


图3 电压信号采集保护模块结构

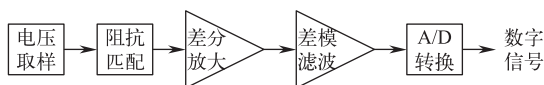


图4 电压信号调理模块

电压互感器二次侧额定负载一般为30~100 V·A。其中，电能表功率消耗0.5~10 V·A，而文中设计的电压信号回路负载测量小于0.2 V·A，不影响原有计量回路，满足电压互感器二次侧负载要求，不会对现有计量工作产生影响。

2. 电流信号采集单元

在电流信号采集方面，采用开口微型传感器加闭环系统以提高传感器监测准确度水平，闭环系统原理如图5所示。开口电流钳采集的二次电流信号

为 I_p ，经过一个电流比为1:1的磁性线圈后(该线圈的一次绕组为 N_p ，二次绕组为 N_s)产生修正后的二次电流信号 I_s 进入后续信号处理单元。补偿绕组 N_c 在铁心 C_1 上产生的补偿电流叠加运放 A_1 的短路感应绕组 N_D 和铁心 C_2 产生的电流值形成电流补偿闭环系统，达到提高开口电流传感器的有效磁导率，较低的铁心初始磁导率和两个闭合而非环绕的铁心之间较差的接触面，这种设计均会极大地减小开口传感器的电流比准确度。

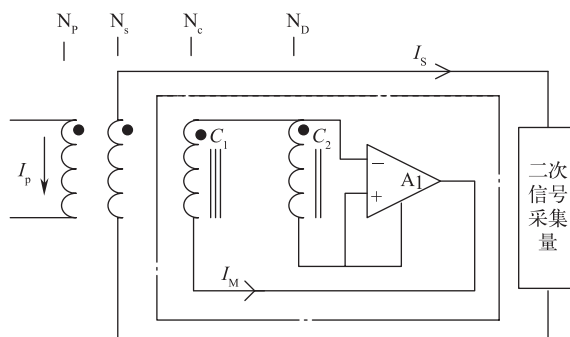


图5 电流信号采集形式

后续的信号处理单元采用研华公司的PCIE-1812-AE数据采集卡实现，结合LABVIEW开发，实现数据采集分析与预处理，后期算法结合Windows平台实现，分析算法采用C++语言编制。PCIE-1812-AE数据采集卡性能指标如下：8路差分模拟量输入，最高可达250 Kbit/s，16位分辨率；2路模拟量输出，最高可达3 Mbit/s，16位分辨率；双极性输入量程：±10 V，±5，±2.5，±1.25，±0.625；单极性输入量程：0~10，0~5，0~2.5，0~1.25；输入内阻：1 GΩ；最大浪涌电压：30 Vp-p；自动校准功能；2个模拟触发器和2个数字触发器32个可编程数字I/O通道，带中断功能；4个32位可编程计数器/定时器/编码器；支持BoardIDTM开关。

在线监测装置电信号采集单元误差测试

1. 电压信号采集单元测试

采用准确度等级为0.02级的三相标准电压源对在线装置中电压信号采集单元开展基本误差检测。被测试电压通道为3个，分别于标准源的A、B、C三相对接，标准信号误差均调整至0，进行10组测试，这10组数据的平均值见表2。

表2 电压采集通道基本误差数据

量程/V	通道	误差	额定电压		
			80%	100%	120%
57.7	1	$f(\%)$	+0.037	+0.038	+0.036
		$\delta(')$	+0.50	+0.48	+0.46
	2	$f(\%)$	+0.038	+0.038	+0.037
		$\delta(')$	+0.64	+0.62	+0.62
	3	$f(\%)$	+0.034	+0.024	+0.022
		$\delta(')$	+0.57	+0.57	+0.60

测试中电压范围根据JJG 1021对电力互感器误差检测电压范围要求,变电站内运行的电压互感器额定电压百分数的80%~120%之间变动,因此测试电压在额定电压的80%~120%之间变动。根据表2数据可知,在线监测装置的电压信号采集部分准确度满足0.05级水平。

2. 电流信号采集单元测试

根据JJG 313《测量用电流互感器》检定规程中基本误差试验方法对电流信号采集单元开展基本误差测试。电流传感器的误差检测按照JJG 1021对电力互感器误差检测电流范围要求,在额定电流百分数的5%~120%之间变动,结果发现在80%以下时电流信号采集准确度满足0.2级水平,在80%额定电流以后准确度能满足0.1级水平。通过从电能采集系统中统计的变电站内电流互感器一次额定电流年度变化范围发现,通常情况下变电站内电流长期处于额定电流20%以内,最高达到80%。在最近的5年中未出现超过额定电流80%的情况,即实际中电流互感器长期处于低电流及中等电流运行水平。根据此情况再次对电流传感器反馈参数进行调整,降低采集电流额定值,将输入的额定电流点从5 A调整到2.5 A,调整后的电流传感器在20%~160%额定电流时进行误差检测试验,试验电流传感器数量为3支,试验数据见表3。结果显示电流传感器在全部测试点时满足0.1级准确度等级。

表3 电流采集通道基本误差数据

量程/V	编号	误差	额定电压		
			40%	100%	160%
2.5	1	$f(\%)$	0.087	0.060	0.062
		$\delta(')$	3.80	2.50	2.52
	2	$f(\%)$	0.079	0.0051	0.050
		$\delta(')$	4.22	2.67	2.60
	3	$f(\%)$	0.082	0.077	0.074
		$\delta(')$			

结束语

1) 本装置同时具备采集运行中电压互感器、电流互感器计量绕组输出信号的功能。为保证信号采集的安全性,电压信号采集单元设计了过电流保护、短路保护和电压隔离功能等多重安全措施,避免信号采样时装置异常产生的危险;同时也对当电网出现波动时在线监测装置起到自我保护功能。

2) 电流信号采样考虑到屏柜内电流信号线紧密排列,不适合较大的开口电流钳,现有的小型开口传感器准确度太差,本文设计了一款闭环系统的开口电流传感器,通过后续调理电路中补偿绕组形成电流闭环,达到提高开口电流传感器的有效磁导率,较低的铁心初始磁导率和两个闭合铁心的接触面,有效提升传感器的准确度。

3) 该装置不仅为电力互感器误差周期检测提供新思路,还可以为电力互感器的状态检修提供数据支撑,具有显著的经济效益和社会效益。EA

(收稿日期: 2023-08-22)

参考文献

- [1] 项琼,王欢,杜砚,等. 电力电压互感器在线群校准技术研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(629): 32-37.
- [2] 陈俊,叶利,申莉. 电子式互感器现场误差校准装置的研制[J]. 电测与仪表, 2009, 46(10): 31-33.
- [3] 郭克勤,刘翔,陈鹏,等. 电容式电压互感器传递过电压试验研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 30(4): 25-28.
- [4] 张福州,刘琨,黄家鹏,等. 电容式电压互感器误差在线监测系统的研制[J]. 电测与仪表, 2016, 56(15A): 53-57.
- [5] 李璿,余春雨,王晓琪,等. CVT附加相差对容性设备介质在线监测的影响[J]. 电测与仪表, 2013, 50(575): 10-13.
- [6] E. Anderson, J. Karolak, J. Wroblewski, et al. Metrological properties of high voltage instrument transformers after many year's service [J]. CIGRE session 2004, A3-113.
- [7] 陈艳,范娟,王欢. 发电机出口侧电压互感器绝缘性能在线监测方法[J]. 变压器, 2022, 59(8): 64-68.