

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209399

## 计量电流互感器二次回路在线监测技术研究\*

王斌武 刘俭 张军

(中国电力科学研究院有限公司 武汉 430074)

**摘要:** 计量电流互感器二次回路异常状态不仅会给电网企业造成经济损失,而且还会酿成安全事故。为实现对二次回路状态的准确在线监测,通过理论研究不同状态下的回路等效电路,提出了一种基于10 kHz阻抗特征的二次回路状态监测方法,采用了基于微型互感器耦合和矢量电压电流法的回路10 kHz阻抗测量技术,研制了电流互感器回路状态监测装置。实验结果表明:研制的装置可在电流互感器变比为30/5~2 000/5、环境温度为-40℃~60℃、二次电流为0%~120%  $I_{2n}$ 的全工况下准确识别二次回路的正常连接、二次端子短接、二次开路和一次旁路状态。

**关键词:** 二次回路;计量回路;在线监测;回路监测;回路阻抗测量;电流互感器

**中图分类号:** TM645.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

## Research on on-line monitoring technology of secondary circuit of metering current transformer

Wang Binwu Liu Jian Zhang Jun

(China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The abnormal state of the secondary circuit of metering current transformer will not only cause economic losses to power grid enterprises, but also lead to safety accidents. In order to realize the accurate on-line monitoring of the secondary circuit state, through the theoretical study of the circuit equivalent circuit under different states, a secondary circuit state monitoring method based on the 10 kHz impedance characteristics is proposed. The circuit 10kHz impedance measurement technology based on micro transformer coupling and vector voltage current method is adopted, and the current transformer circuit state monitoring device is developed. The experimental results show that the developed device can accurately identify the normal connection of secondary circuit, short circuit of secondary terminal, secondary open circuit and primary bypass under the full working conditions of current transformer transformation ratio of 30/5~2 000/5, ambient temperature of -40℃~60℃ and secondary current of 0%~120%  $I_{2n}$ .

**Keywords:** the secondary circuit; measurement circuit; online monitoring; loop monitoring; loop impedance measurement; current transformer

## 0 引 言

计量电流互感器二次回路(以下简称“二次回路”)是电能计量系统的关键组成部分,但长期以来,其异常状态一直无法得到准确、及时监测,不仅会给供电企业造成不可忽视的经济损失<sup>[1-2]</sup>,提高供电成本,增加其他用户的负担,影响公平、有序用电,而且还会酿成安全事故,当电流互感器二次开路未得到及时处理时,可能导致电流互感器绕组烧毁、绝缘击穿等严重后果,威胁人身安全<sup>[3-5]</sup>。

二次回路监测领域,国内外众多学者开展了深入研究,提出很多技术方案。前几年比较有代表性的如多特征模糊

识别法<sup>[6]</sup>、高频信号幅值法<sup>[7]</sup>、异频法<sup>[8]</sup>、幅频特性曲线法<sup>[9]</sup>、阻抗特性法<sup>[10]</sup>和感应电流法<sup>[11]</sup>等,分别存在技术可靠性差、容易误报漏报、现场适用范围窄、易受环境温度及分布参数影响、易受铁磁材料及二次电流影响和存在明显技术缺陷等诸多问题,技术无法大面积推广;近两年最新提出的方案如基于变分模态分解和样本熵的方法<sup>[12]</sup>、基于小波变换和RBF神经网络法的方法<sup>[13]</sup>、热点位置分类法<sup>[14]</sup>、基于多维 Hausdorff 距离算法的方法<sup>[15]</sup>和改进卷积神经网络法<sup>[16]</sup>,共同存在技术可靠性差、对数据处理芯片算力要求较高、异常状态模型还不完善等亟待解决的问题,仍然达不到成熟应用的条件。

收稿日期:2022-03-25

\* 基金项目:国家电网公司科技项目(JL71-21-014)资助

为解决二次回路无法有效在线监测的问题,现提出一种基于 10 kHz 阻抗特征的电流互感器回路在线监测方法,通过对不同连接状态下二次回路等效电路展开分析,采用微型互感器耦合激励信号、检测响应信号<sup>[17]</sup>,通过矢量电压电流法<sup>[18-20]</sup>测量二次回路 10 kHz 阻抗,运用软件补偿技术对阻抗进行环境温度、二次电流补偿,实现对二次回路状态在线监测。实验设计分别从电流互感器变比、环境温度、二次电流 3 个维度展开,以测试本技术方案在不同工况下的适用效果。相比其它技术方案优点在于,是通过微型互感器将 10 kHz 信号注入到二次回路进行直接监测,具备准确性高、实时性好、技术稳定可靠等特点,且有效避开工频 50 Hz、不影响计量、可长期在线监测,同时受环境温度、二次电流等工况影响较小。

### 1 回路状态监测原理

二次回路连接电流互感器和电能表,是电流测量的重要组成部分。二次回路正常及异常连接状态包括回路正常连接、二次端子短接、二次开路和一次旁路等。

二次回路处于正常连接状态时等效电路如图 1 所示,  $I'_0$ 、 $I'_1$ 、 $Z'_1$ 、 $Z'_m$  分别为一次折算到二次的励磁电流、一次电流、一次绕组阻抗和励磁阻抗,  $I_2$ 、 $Z_2$ 、 $Z_{load}$  分别为二次电流、二次绕组阻抗和二次负荷阻抗。

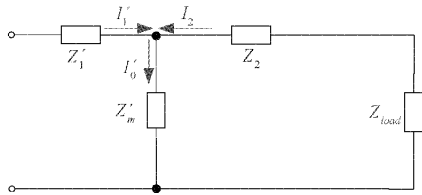


图 1 电流互感器二次回路等效电路

从电流互感器二次侧看,电流互感器一次侧等效为开路,则二次回路阻抗为:

$$Z_{loopz} = Z'_m + Z_2 + Z_{load} \quad (1)$$

正常连接时二次回路实际阻抗和测量阻抗分别用  $Z_{loopz}$ 、 $Z_{loopm}$  表示,有:

$$f_x = \frac{|Z_{loopm}| - |Z_{loopz}|}{|Z_{loopz}|} \quad (2)$$

$$\delta_x = \angle Z_{loopm} - \angle Z_{loopz} \quad (3)$$

式中:  $f_x$ 、 $\delta_x$  分别为测量阻抗的比差和角差。则存在合适的  $f_m$ 、 $\delta_m$  值,当  $Z_{loopm}$  满足  $|f_x| < f_m$ 、 $|\delta_x| < \delta_m$  时,可判定二次回路处于正常连接状态。

二次回路短接时等效电路如图 2 所示,图中  $Z_{s2}$  为二次端子短接支路阻抗,  $I_{21}$  为分流后的二次电流,  $I_{22}$  为分流后的支路电流。

二次端子短接时二次回路阻抗可表示为:

$$Z_{loopd} = (Z'_m + Z_2) // Z_{s2} + Z_{load} \quad (4)$$

式中:对于  $Z'_m$  而言,并联的二次端子短接支路阻抗很小,并联总阻抗约等于二次端子短接支路阻抗,式(4)可简化为:

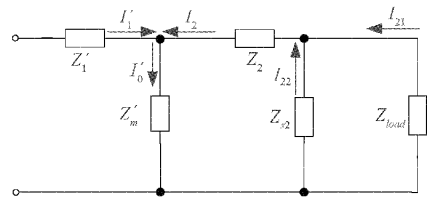


图 2 电流互感器二次端子短接等效电路

$$Z_{loopd} \approx Z_{s2} + Z_{load} \quad (5)$$

可知二次回路阻抗略大于二次负荷阻抗,与其处于同一量级,远小于正常连接时二次回路阻抗,且几乎不受电流互感器变比、环境温度和二次电流变化影响,存在合适阻抗阈值  $Z_{lm}$ ,当  $|Z_{loopd}| < |Z_{lm}|$ ,可判定二次端子短接。此时  $Z_{loopd}$  越小,分流支路所分电流  $I_{22}$  的值越大,而原回路  $I_{21}$  的值越小。

二次开路时等效电路如图 3 所示,二次电流  $I_2$  为 0,一次电流  $I'_1$  等于励磁电流  $I'_0$ 。此时二次回路阻抗无穷大,用  $Z_{loopk}$  表示,远大于正常连接时二次回路阻抗,存在合适阻抗阈值  $Z_{hm}$ ,当  $|Z_{loopk}| > |Z_{hm}|$ ,可判定二次开路。

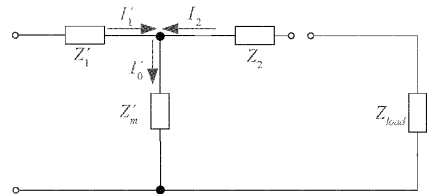


图 3 电流互感器二次开路等效电路

一次旁路时等效电路如图 4 所示,图中  $Z'_{s1}$ 、 $I'_{11}$ 、 $I'_{12}$  分别为一次折算到二次的一次旁路阻抗、分流后的一次电流、分流后的支路电流。

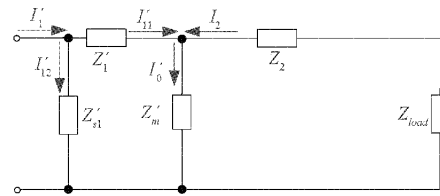


图 4 电流互感器一次旁路等效电路

一次旁路二次回路阻抗可表示为:

$$Z_{loopyd} = (Z'_1 + Z'_{s1}) // Z'_m + Z_2 + Z_{load} \quad (6)$$

式中:对于  $Z'_m$  而言,并联的一次旁路与一次绕组阻抗和很小,并联总阻抗约等于一次旁路与一次绕组阻抗和,式(6)可简化为:

$$Z_{loopyd} \approx Z'_1 + Z'_{s1} + Z_2 + Z_{load} \quad (7)$$

此时二次回路阻抗很小,但大于二次端子短接阻抗,小于正常连接阻抗,且与二次端子短接及正常连接阻抗存在数量级差距,关系式为:

$$|Z_{loopyd}| \approx K_n^2 |Z_{loopd}| \approx \frac{l}{u\omega S} |Z_{loopz}| \quad (8)$$

式中: $\omega = 20\,000\pi$ ,  $K_n$  为额定电流比,  $S$ 、 $l$  分别为绕组铁

芯截面积和平均磁路长度;  $u$  为电流互感器磁导率。一次旁路阻抗与正常连接阻抗的级差用  $\nu_x$  表示,有:

$$\nu_n \leq \nu_x = \lg\left(\frac{|Z_{loopz}|}{|Z_{loopyd}|}\right) \approx \lg\left(\frac{u\omega S}{l}\right) \leq \nu_m \quad (9)$$

式中:存在合适的  $\nu_n$ 、 $\nu_m$  值,当  $Z_{loopyd}$  满足式中关系,可判定一次旁路。此时  $Z_{loopyd}$  的值越小,旁路所分电流  $I'_{12}$  的值越大,而原回路  $I'_{11}$  的值越小。

综合分析不同状态下二次回路等效电路可知,通过建立各连接状态下回路阻抗识别特征关系,存在合适的识别特征量  $f_m$ 、 $\delta_m$ 、 $Z_{im}$ 、 $Z_{hm}$ 、 $\nu_n$  和  $\nu_m$ ,可实现对二次回路在正常连接、二次端子短接、二次开路和一次旁路状态的有效区分。

二次回路还存在其它异常状态,包括电流互感器磁饱和、电流互感器二次绕组匝间绝缘击穿、电流互感器变比更换及二次负荷异常等,需要进一步研究分析。

## 2 回路阻抗测量原理

二次回路 10 kHz 阻抗采用基于微型互感器耦合的矢量电压电流法进行测量,通过微型电压互感器(potential transformer,PT)对二次回路施加激励电压信号  $U_{g1}$ ,在 50 Hz 工频上叠加 10 kHz 信号,通过微型电流互感器(current transformer,CT)耦合二次回路响应电流信号  $I_{g1}$ ,与二次回路阻抗  $Z_{loop}$  的关系式为:

$$Z_{loop} = \frac{U_{g1}}{I_{g1}} \quad (10)$$

把微型 PT 一次折算到二次、忽略微型 CT 的影响,可建立信号注入等效电路如图 5 所示。 $Z'_0$ 、 $Z'_{pt0}$ 、 $Z'_{ptm}$ 、 $Z_{pt1}$ 、 $Z_{loop}$  分别为一次折算到二次的信号注入电路的输出阻抗、一次折算到二次的微型 PT 绕组阻抗、一次折算到二次的微型 PT 阻抗、微型 PT 二次绕组阻抗、二次回路阻抗。 $U'_{g0}$  为一次折算到二次的 10 kHz 注入电压信号,  $U_{g1}$ 、 $I_{g1}$  为耦合到二次回路的 10 kHz 电压信号、电流信号。

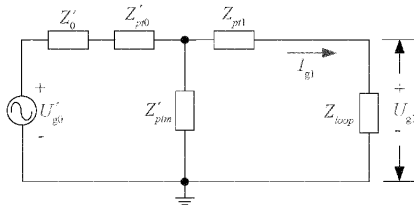


图 5 信号注入等效电路

根据基尔霍夫电压定律,得出注入信号  $U'_{g0}$  与耦合信号  $U_{g1}$  的关系为:

$$U_{g1} = \frac{Z'_{ptm} \cdot Z_{loop}}{Z'_{ptm} + Z_{pt1} + Z_{loop}} \cdot \frac{Z'_0 + Z'_{pt0} + \frac{Z'_{ptm} \cdot (Z_{pt1} + Z_{loop})}{Z'_{ptm} + Z_{pt1} + Z_{loop}}}{Z'_0 + Z'_{pt0} + \frac{Z'_{ptm} \cdot (Z_{pt1} + Z_{loop})}{Z'_{ptm} + Z_{pt1} + Z_{loop}}} \cdot U'_{g0} \quad (11)$$

把微型 CT 二次折算到一次可建立信号检测等效电路如图 6 所示。 $Z_{ct1}$ 、 $Z'_{ctm}$ 、 $Z'_{ct2}$ 、 $Z'_2$  分别为微型 CT 一次绕组阻

抗、二次折算到一次的微型 CT 阻抗、二次折算到一次的微型 CT 二次绕组阻抗、二次折算到一次的信号检测电路输入阻抗。 $I_{g1}$  为耦合到二次回路的 10 kHz 电流信号,  $U'_{g2}$  为二次折算到一次的信号检测电路检测到的 10 kHz 电压信号。

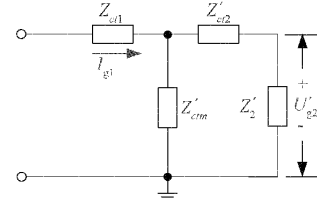


图 6 信号检测等效电路

根据基尔霍夫电流定律,得出二次回路电流信号  $I_{g1}$  与检测到的电压信号  $U'_{g2}$  的关系为:

$$I_{g1} = \left(\frac{1}{Z'_2} + \frac{Z'_{ctm}}{Z'_2(Z'_{ct2} + Z'_2)}\right) \cdot U'_{g2} \quad (12)$$

令微型 PT 的折算系数为  $K_{ptm}$ ,微型 CT 的折算系数为  $K_{ctm}$ ,根据式(10)~(12)得出二次回路阻抗  $Z_{loop}$  与注入电压信号  $U_{g0}$ 、检测电压信号  $U_{g2}$  的关系为:

$$Z_{loop} = f(Z'_{ptm}, Z'_{ctm}) \cdot \frac{k_{ctm}}{k_{ptm}} \cdot \frac{U_{g0}}{U_{g2}} - g(Z'_{ptm}) \quad (13)$$

式中函数  $f(Z'_{ptm}, Z'_{ctm})$ 、 $g(Z'_{ptm})$  分别为:

$$f(Z'_{ptm}, Z'_{ctm}) = \frac{Z'_{ptm} \cdot Z'_2 (Z'_2 + Z'_{ct2})}{(Z'_2 + Z'_{ct2} + Z'_{ctm})(Z'_0 + Z'_{pt0} + Z'_{ptm})} \quad (14)$$

$$g(Z'_{ptm}) = \frac{(Z'_{ptm} + Z_{pt1})(Z'_0 + Z'_{pt0}) + Z'_{ptm} \cdot Z_{pt1}}{Z'_0 + Z'_{pt0} + Z'_{ptm}} \quad (15)$$

式(14)~(15)中,参数  $Z'_0$ 、 $Z'_{pt0}$ 、 $Z_{pt1}$ 、 $Z'_{ct2}$ 、 $Z'_2$  为常量,  $Z'_{ptm}$  及  $Z'_{ctm}$  可根据微型铁芯参数算得。

可见,基于微型 PT 注入 10 kHz 信号和微型 CT 检测响应信号的回路阻抗测量方法,可准确测量二次回路 10 kHz 阻抗。

## 3 装置研制

电流互感器回路状态监测装置系统框图如图 7 所示,由微型互感器组、高频信号处理单元和矢量计算及状态识别单元三部分组成。

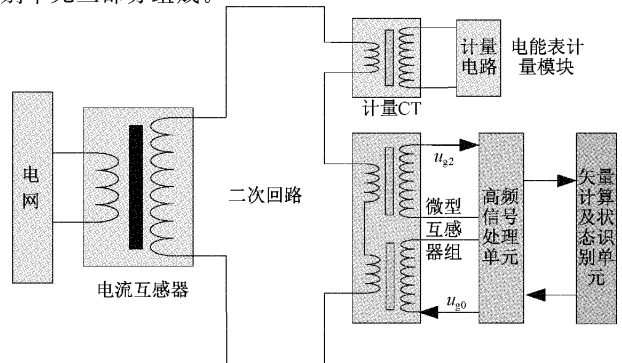


图 7 电流互感器回路状态监测装置系统框图

微型互感器组用于激励信号注入和响应信号检测。高频信号处理单元用于激励信号驱动和响应信号处理。矢量计算及状态识别单元用于回路阻抗矢量计算和回路状态识别。高频激励信号频率为 10 kHz, 避开工频 50 Hz, 保证二次回路正常工作, 不影响计量、测量准确度。 $U_{R0}$ 、 $U_{R2}$  分别为注入的电压信号、检测的电压信号。

### 3.1 微型互感器组

微型互感器组由微型 PT 和微型 CT 组成, 是二次回路状态监测系统的关键部分, 铁芯的选择至关重要。目前常用的铁心材料有硅钢片、坡莫合金、铁氧体、超微晶等, 不同材料性能差异较大。

硅钢片饱和磁密高至 2 T, 但初始相对磁导率仅有 1 000, 且工作频率仅至 400 Hz; 坡莫合金初始相对磁导率高约 80 000, 工作频率约至 8 kHz, 饱和磁密较低, 仅 0.5 T; 铁氧体频率特性好, 高至 1 MHz, 但磁导率不高, 初始相对磁导率仅为 2 000, 饱和磁密较低, 一般小于 0.5 T; 超微晶频率特性较好, 约为 100 kHz, 饱和磁密较好, 约为 1.2 T, 初始相对磁导率约为 50 000。图 8 所示为用超微晶材料微型互感器的磁化特性。

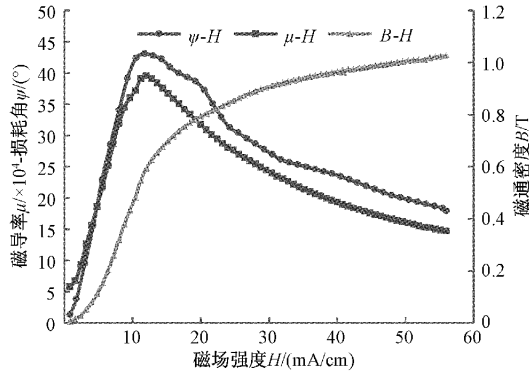


图 8 超微晶材料微型互感器磁化特性

综合来看, 超微晶材质铁心各项性能比较均衡, 再结合成本、材料结构强度、稳定性等因数, 微型 PT 及微型 CT 都选用超微晶作为铁心材料。

图 9 是微型互感器绕组实物图。微型 PT 初级线圈匝数为 18 匝, 次级线圈匝数为 2 匝, 额定电压比  $K_{pm}$  为 9。微型 CT 初级线圈匝数为 2 匝, 次级线圈匝数为 36 匝, 额定电流比  $K_{pm}$  为 18。微型 CT 一次串入到二次回路中, 二次连接信号处理电路。微型 PT 二次串入到二次回路中, 一次连接信号处理电路。

### 3.2 高频信号处理单元

高频信号处理单元由信号检测电路和信号注入电路组成, 如图 10 所示。

通过信号注入电路注入到二次回路的信号为 mV~uV 级, 相对二次电流而言十分微弱, 从工频噪声中提取 10 kHz 信号是信号检测的关键。信号检测电路采用前置放大电路加四阶巴特沃斯高通滤波电路的结构, 信号处理

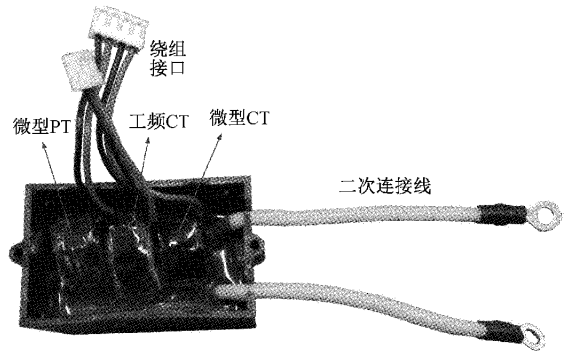


图 9 微型互感器绕组实物

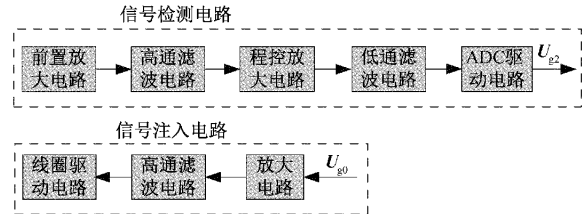


图 10 高频信号处理单元原理框

过程设计为放大加滤波交叉进行。四阶巴特沃斯高通滤波电路如图 11 所示, 滤波器截止频率设计为 5 kHz、放大倍数设计为 25 倍, 可极大抑制工频噪声, 有效放大 10 kHz 信号。运算放大器芯片采用德州仪器公司的 OPA2277。

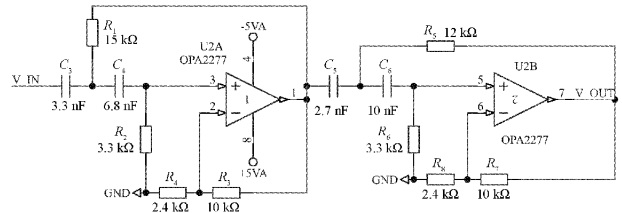


图 11 四阶巴特沃斯高通滤波电路

信号检测电路还包括程控放大电路、低通滤波电路和模拟数字转换器(analog to digital converter, ADC)驱动电路。程控放大电路受控调整信号增益, 芯片选用亚德诺半导体公司的 AD8253ARMZ, 可调增益档位为 1/10/100/1 000 倍; 低通滤波电路滤掉经二次回路耦合和电路本身的高频噪声, 截止频率 15 kHz; ADC 驱动电路将信号幅值放大到适合微控制单元进行 ADC 采集的幅值范围。

信号注入电路由放大电路、高通滤波电路和线圈驱动电路组成, 其作用是将注入的 10 kHz 激励信号放大并提高带载能力, 滤除低频干扰信号, 驱动注入的 10 kHz 激励信号耦合到二次回路。

### 3.3 矢量计算及状态识别单元

矢量计算及状态识别单元硬件核心芯片采用基于 32 位的 ARMCortex-M4 嵌入式处理器 STM32F303CCT6, 是带有数字信号处理器(digital signal processor, DSP)和浮点运算单元(floating-point unit, FPU)指令的 STM32F3 系列

混合信号微控制器(microcontroller unit,MCU),新加了浮点、DSP、并行计算等功能,满足矢量计算要求。该芯片拥有丰富的外设资源,包括 2 个 12 位数字输入、电压输出型的数字模拟转换器(digital to analog converter,DAC)模块,13 个 16 位的定时器,4 个 12 位 ADC 模块等,可有效降低硬件成本。

二次回路状态识别软件流程如图 12 所示。电可擦可编程只读存储器(electrically erasable programmable read only memory,EEPROM)数据为现场第一次上电时写入的二次回路 10 kHz 阻抗及环境参数测量值。不同工况下二次回路 10 kHz 阻抗变化范围极大,为 0.1 Ω~100 kΩ,设计中创新的采用基于 MCU 控制的 DAC 输出幅值与程控放大器增益相组合的增益动态调整技术,MCU 根据被测信号幅值大小动态调整 DAC 输出幅值和程控放大器增益。可扩展测量动态范围,细化信号增益档位,提高测量精度。DAC 输出幅值调整范围为满量程的 1%~100%。

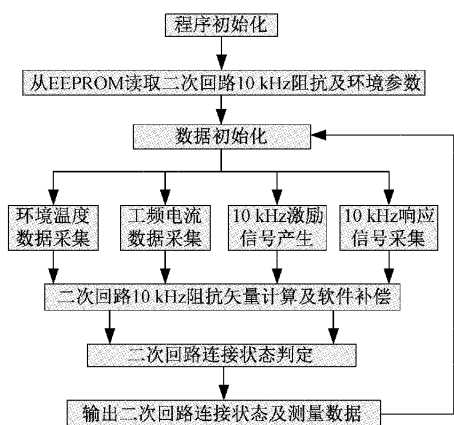


图 12 二次回路状态识别软件流程

二次回路 10 kHz 阻抗测量流程启动后,DAC 通过定时器触发(1 MHz 的触发时钟)输出 10 kHz 的正弦电压信号作为激励信号,一路 ADC 对注入的激励信号进行采样,另一路 ADC 对信号检测电路处理的信号进行同步采样,两路 ADC 采样频率为 5 MHz,用过采样技术,将采样分辨率提高至 16 位(每 4 倍过采样,可以提高 1 位的分辨率),每次采集 2 000 个点的数据获得激励信号和响应信号的幅值、相位,矢量计算出二次回路 10 kHz 阻抗。

二次回路阻抗补偿与测量同步进行。补偿包括温度补偿和电流补偿,采用分段方式。温度补偿从-40℃~60℃均分为 5 段,电流补偿以 50%额定电流为界分为 2 段。阻抗补偿流程启动后,一路 ADC 对环境温度采样,计算当前环境温度,另一路 ADC 对工频电流采样,计算当前二次电流,MCU 根据环境温度、二次电流补偿当前测量阻抗。

#### 4 实验结果与分析

影响二次回路阻抗的主要因素包括电流互感器变比、二次电流和环境温度,实验分别从上述 3 个维度进行验证。

二次开路时,回路阻抗无穷大,省略掉其实验表中数据。

电流互感器全变比实验选用常用全部规格低压电流互感器各 1 个,准确度等级为 0.5 S,其他参数如表 1 所示。

表 1 电流互感器实验参数

变比	型号	尺寸/ mm	二次 负荷/VA	铁心 材料
30/5	LFZ1D	Φ40/70×25	5	超微晶
50/5	LFZ1D	Φ40/70×25	5	超微晶
75/5	LMZ1D	Φ45/77×50	5	超微晶
100/5	LMZ1D	Φ47/77×40	5	超微晶
150/5	LMZ1D	Φ47/71×32	5	超微晶
200/5	LMZ2D	Φ55/82×35	5	超微晶
300/5	LMZ2D	Φ55/75×30	5	超微晶
400/5	LMZ2D	Φ55/75×30	5	超微晶
600/5	LMZ3D	54×104/70×120	25	超微晶
800/5	LMZ3D	54×104/70×120	30	超微晶
1 000/5	LMZ4D	70×125/85×140	25	超微晶
1 500/5	LMZ4D	72×118/88×134	30	硅钢
2 000/5	LMZ5D	72×118/88×134	30	硅钢

实验条件为二次回路无电流、导线长 4 m、额定负荷、环境温度 25℃,用监测装置串口打印 10 kHz 下不同连接状态下的二次回路阻抗,测得实验数据如表 2 所示。

表 2 电流互感器全变比实验数据

变比	$Z_{loopm} / \Omega$	$\alpha / (^{\circ})$	$f_x / \%$	$\delta_x / (^{\circ})$	$Z_{loopd} / \Omega$	$Z_{loopyd} / \Omega$	$u_x$
30/5	175.5	7.2	1.35	1.2	0.182	3.21	1.738
50/5	179.2	6.5	-1.21	0.8	0.186	6.15	1.464
75/5	80.17	12.5	-0.32	-0.5	0.181	10.15	0.898
100/5	163.2	12.5	0.62	-0.8	0.182	20.51	0.901
150/5	466.1	12.1	0.87	-0.6	0.186	47.09	0.996
200/5	1 089	11.1	-0.28	1.5	0.182	94.28	1.063
300/5	2 905	18.2	-1.18	-1.1	0.185	193.05	1.177
400/5	8 356	19.5	1.51	0.8	0.186	383.2	1.339
600/5	25 362	48.7	-0.92	-0.2	0.184	865.7	1.467
800/5	65 235	35.1	-0.65	-0.8	0.185	1 431	1.659
1 000/5	75 623	15.6	0.72	1.1	0.189	2 385	1.501
1 500/5	62 384	-61.5	1.47	2.1	0.183	4 876	1.107
2 000/5	38 521	-80.5	-1.62	-1.9	0.185	7 621	0.704

表 2 中, $\alpha$  为二次回路正常连接时测量的阻抗角。从数据可知,正常连接时, $f_x$ 、 $\delta_x$  为测量系统的精度,都满足  $|f_x| < 2\%$ 、 $|\delta_x| < 3^{\circ}$ ;二次端子短接时,回路阻抗不受变比变化的影响,都满足  $|Z_{loopd}| < 0.2 \Omega$ ;一次旁路时,阻抗与二次端子短接阻抗及正常连接阻抗都有较大级

差,满足关系式  $1.75 > v_x > 0.7$ ;二次开路时,阻抗正常连接阻抗区分只需满足  $|Z_{loopk}| > 100\ 000$ 。可知,在常温、二次无电流等实验条件下,所有常用变比电流互感器组成的二次回路,都存在明显的识别特性,可有效区分识别各连接状态。

二次电流影响实验电流互感器选用表 1 中 150 A/5 A 变比,导线长 4 m、额定负荷、环境温度 25 °C。通过改变二次电流测得实验数据如表 3 所示。

表 3 二次电流影响实验数据

$I_{2n}/$ %	$Z_{loopm}/$ $\Omega$	$\beta/$ (°)	$f_x/$ %	$\delta_x/$ (°)	$Z_{loopd}/$ $\Omega$	$Z_{loopyd}/$ $\Omega$	$v_x$
0	466.1	12.1	0.87	-0.6	0.186	47.09	0.996
1	465.6	11.8	1.02	-0.8	0.182	47.08	0.995
5	466.5	12.2	0.91	-0.6	0.184	47.01	0.997
20	466.2	12.1	0.81	-0.5	0.181	46.86	0.998
50	465.5	11.9	1.08	-0.6	0.185	46.92	0.997
100	442.5	9.6	1.66	-1.1	0.184	45.18	0.991
120	424.3	9.1	2.37	-1.8	0.179	43.15	0.993

表 3 中,  $I_{2n}$  为二次回路额定电流。从数据可知,正常连接时,当二次电流小于 50%  $I_{2n}$  时,回路阻抗受影响很小,当电流大于 50%  $I_{2n}$  时,阻抗开始减小,二次电流增大至 120%  $I_{2n}$  时,阻抗下降至约为无电流时的 10%,此时  $f_x$ 、 $\delta_x$  略有增大,但控制在  $|f_x| < 3\%$ 、 $|\delta_x| < 2^\circ$  以内,影响不大;二次端子短接及一次旁路阻抗几乎不受影响。

环境温度影响实验电流互感器选用表 1 中 150 A/5 A 变比,导线长 4 m、额定负荷、二次回路无电流,通过改变环境温度测得实验数据如表 4 所示。

表 4 环境温度影响实验数据

$T/$ °C	$Z_{loopm}/$ $\Omega$	$\beta/$ (°)	$f_x/$ %	$\delta_x/$ (°)	$Z_{loopd}/$ $\Omega$	$Z_{loopyd}/$ $\Omega$	$v_x$
60	531.2	15.1	-0.35	0.5	0.184	52.97	1.001
40	481.4	13.2	0.24	0.2	0.185	48.16	1.000
20	465.5	12.2	0.78	-0.6	0.187	46.52	1.000
0	443.8	11.9	1.23	-1.1	0.186	44.38	1.000
-20	411.2	10.5	1.72	-1.8	0.187	40.84	1.003
-40	360.7	9.1	2.25	-1.6	0.185	36.15	0.999

表 4 中,  $T$  为环境温度,单位为 °C。由数据可知,正常连接时,回路阻抗受温度影响十分明显,随着温度下降单调递减,  $f_x$ 、 $\delta_x$  在低温时略有增大,但控制在  $|f_x| < 3\%$ 、 $|\delta_x| < 2^\circ$  以内,影响有限;二次端子短接及一次旁路阻抗则几乎不受影响。

通过分析 3 组实验数据可知,在电流互感器全变比为

30/5~2 000/5、环境温度为 -40 °C~60 °C、二次电流 0%~120%  $I_{2n}$  的全工况下,通过精确测量二次回路 10 kHz 阻抗,结合合适的识别特征量  $f_m$ 、 $\delta_m$ 、 $|Z_{im}|$ 、 $|Z_{hm}|$ 、 $v_n$  和  $v_m$ ,可有效识别二次回路各连接状态,装置批量生产时,各识别特征量需通过调校工装赋值。相比现有技术方案,本技术方案直接对二次回路阻抗进行定量分析,状态识别率更高、工况适用范围更广、技术可靠性更强、技术进一步挖掘潜力更大。

## 5 结 论

研制了基于 10 kHz 阻抗特征的电流互感器回路状态监测装置,采用基于微型互感器耦合和矢量电压电流法的回路 10 kHz 阻抗测量技术,主芯片采用基于 32 位的 ARM Cortex-M4 且带有 DSP 和 FPU 指令的混合信号 MCU,拥有丰富的外设资源,强化了矢量计算和并行处理能力。实验结果表明,该装置可在全工况下准确识别二次回路的正常连接、二次端子短接、二次开路和一次旁路状态。研制的装置可靠性高、适用范围广、实时性强、硬件成本低、体积小、不影响电能计量,可集成于电能表、专变终端等设备在线运行,适用于所有经电流互感器接入的电能计量系统,可大面积推广应用。不足之处在于,装置出厂前需要进行较为繁琐的调校,这是未来需要研究和改善的方向。

## 参考文献

- [1] 李伟,丁涛,赵睿,等. 10 kV 电流互感器内嵌遥控装置的窃电分析[J]. 电测与仪表,2020,57(12):148-152.
- [2] 黄荣国,陆春光,姚力,等. 防窃电仿真试验平台设计与实现[J]. 电测与仪表,2016,53(24):115-120.
- [3] 袁川来,廖庸邑,孔玲爽,等. 时间约束的改进分层模糊 Petri 网的配电网故障诊断方法[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(3):126-134.
- [4] 祁斌,赵灏. 基于神经网络的直流微电网故障诊断方法研究[J]. 国外电子测量技术,2021,40(4):121-124.
- [5] 侯思祖,郭威. 基于改进 EEMD 与混沌振子的配电网故障选线[J]. 仪器仪表学报,2019,40(4):77-87.
- [6] 李恺,万全. 基于多特征模糊识别的计量二次回路状态综合评估[J]. 电网技术,2013,37(6):1694-1699.
- [7] 熊博,姜春阳,周峰,等. 计量用电流互感器二次回路状态监测终端及应用[J]. 电网与清洁能源,2017,33(3):60-65.
- [8] 姜春阳,刘俊杰,周峰,等. 基于异频法的分流窃电监测方法和装置[J]. 电子科技,2017,30(3):185-188.
- [9] 刘超超,赵向阳. 电流互感器二次侧回路状态检测装置研制[J]. 电测与仪表,2018,55(1):121-125.
- [10] 姚腾,李育灵,王婵琼,等. 电能计量互感器二次回路状态识别系统[J]. 沈阳工业大学学报,2020,42(2):143-147.
- [11] 韩兴,王海滨,苏慧琳,等. 计量装置互感器二次回路

- 接线自动检测研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(13): 25-30.
- [12] 唐登平, 蔡文嘉, 周翔宇, 等. 基于 VMD 和样本熵的电磁式电流互感器故障诊断[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(6): 144-150.
- [13] 胡红利, 崔晨辉, 员鹏宇, 等. 电流互感器饱和检测以及畸变电流补偿[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(1): 52-59.
- [14] 许志浩, 罗吕, 袁刚, 等. 基于热点位置分类的电流互感器发热故障判别方法[J]. 激光与红外, 2021, 51(12): 1628-1634.
- [15] 南东亮, 王维庆, 赵启, 等. 基于多维 Hausdorff 距离算法的站域电流回路故障检测[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(11): 63-71.
- [16] 唐登平, 蔡文嘉, 邹立, 等. 改进卷积神经网络在互感器故障诊断中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(11): 239-247.
- [17] 王斌武, 殷小东, 姜春阳, 等. 一种宽动态范围的回路阻抗测量系统和方法[P]. 湖北: CN108957140A, 2018-12-07.
- [18] 王雪军, 顾金良, 罗红娥, 等. 低频低阻抗精确测量系统[J]. 电子测量技术, 2019, 42(10): 110-114.
- [19] 彭庆畅, 刘宇红. 基于 DSP 的阻抗测量系统的研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(8): 17-20.
- [20] 修嘉芸, 谷玉海, 徐小力. 高精度矢量阻抗测量仪的研究与设计[J]. 仪表技术与传感器, 2021(9): 18-22.

### 作者简介

王斌武, 工程师, 主要研究方向为电子测量技术、互感器技术、电子电路设计等。

E-mail: wangbinwu@epri. sgcc. com. cn