

# 剩余电流保护断路器电流采集系统设计

陈建进

(杭州世创电子技术股份有限公司, 浙江 杭州 311121)

**摘要:** 由于受铁心饱和、涡流、磁滞等因素的影响, 剩余电流保护断路器的电流互感器传变特性呈现非线性, 为此提出了基于分段线性拟合技术的电流数据采集系统设计, 包括自生电源和电流信号调理的电路设计以及微处理器软件非线性补偿技术方法。采样电路对电流信号调理以及微处理器软件对采样数据的一次函数分段线性拟合, 解决了因电流互感器非线性引起电流检测不准问题。电流自生电源的冗余设计大大提高了产品可靠性。

**关键词:** 剩余电流保护断路器; 电流互感器; 非线性; 分段线性拟合; 自生电源; 电流采样

**中图分类号:** TM561.1

**文献标识码:** B

**DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed19558

## Design of Current Acquisition System for Residual Current Protection Circuit Breaker

CHEN Jianjin

(Hangzhou Century Electronic Technology Co., Ltd., Hangzhou 311121, Zhejiang, China)

**Abstract:** Due to the saturation of iron core, eddy current, hysteresis and other factors, the current transformer characteristics of residual current protection circuit breaker are non-linear. Therefore, the design of current data acquisition system based on piecewise linear fitting technology was proposed, including the circuit design of self-generating power supply and current signal conditioning, and the method of microprocessor software non-linear compensation technology. The sampling circuit adjusts the current signal and the microprocessor software fits the sampling data piecewise linearly, which solves the problem of current detection inaccuracy caused by the nonlinearity of current transformer. The redundant design of current self-generating power supply greatly improves the reliability of the product.

**Key words:** residual current protection circuit breaker; current transformer; nonlinearity; piecewise linear fitting; self-generating power supply; current sampling

剩余电流保护功能断路器能够对设备过载、短路起到保护作用<sup>[1]</sup>, 而且还能对供电线路中的剩余电流进行精确检测和可靠保护<sup>[2]</sup>。为防止人身触电事故和电气引起的火灾事故的发生, 需要在供配电系统中装配相应的剩余电流动作断路器<sup>[3-4]</sup>。

剩余电流保护断路器通过电流互感器来检测负载电流大小, 当电流达到预定保护脱扣阈值, 微处理器输出脱扣信号给执行机构使断路器断开<sup>[5]</sup>, 起到过载长延时、短路短延时、短路瞬动保护的作用。由于电流互感器铁心饱和、涡流、磁滞以及励磁电流的存在, 使得电流互感器传变特性

呈现非线性<sup>[6]</sup>, 导致电流数据采集系统在全工作电流范围内电流检测的误差非常大。

关于电流互感器传变特性非线性问题, 曲线拟合是最常用的处理方法<sup>[7]</sup>, 即根据电流互感器输入输出的测试数据找出相应的隐含函数关系<sup>[8]</sup>。其中多项式曲线拟合又是一种较常用的数据拟合方法, 但若拟合的数据点较多时, 多项式阶数太低, 拟合精度和效果不太理想, 要提高拟合精度和效果就需要提高曲线阶数, 但阶数太高又带来计算上的复杂性及其他方面的不利。因此, 如果只采用一种多项式曲线函数拟合较多的数据点, 难以取得较好的拟合精度和效果<sup>[9]</sup>。

本文提出基于分段拟合法<sup>[10]</sup>的电流数据采集系统设计,即用分段曲线拟合<sup>[11]</sup>电流互感器输入输出传变特性,可有效解决因电流互感器非线性特性引起电流检测不准的问题。该方法简单,计算量又少<sup>[12]</sup>,同时给出了电流互感器信号调理的硬件电路和自生电源电路设计。

## 1 原理

电流采集系统电路原理框图如图1所示。电流互感器将交流电A相、B相、C相大电流转换成二次侧小电流,通过整流输出直流电流,再经过电流电压转换和信号调理输入至微处理器ADC(analog-to-digital converter)管脚进行数字采样,最后由微处理器软件对ADC采样数据进行分段线性拟合处理,实现了对剩余电流保护断路器负载侧的电流采集。

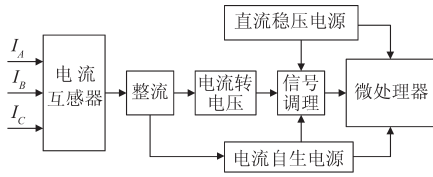


图1 电流采集系统电路原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of current acquisition system

微处理器软件所采用的分段线性拟合,即根据分段线性插值原理,在相邻两点间进行线性拟合,两点之间的线性拟合相当于将两点直接用直线相连<sup>[13]</sup>。

### 1.1 分段线性插值定义

设已知函数 $f(x)$ 在区间 $[a, b]$ 上的 $n+1$ 个节点, $a=x_0 < x_1 < \dots < x_{n-1} < x_n=b$ 上的函数值 $y_i=f(x_i)$ ,作一个插值函数 $\phi(x)$ 使其满足:

- 1)  $\phi(x_i)=y_i (i=0, 1, \dots, n)$ ;
- 2) 在每个小区间 $[x_i, x_{i+1}] (i=0, 1, \dots, n-1)$ 上, $\phi(x)$ 是线性函数。

则称函数 $\phi(x)$ 为区间 $[a, b]$ 上关于数据 $(x_i, y_i)$ 的分段线性插值函数<sup>[14]</sup>。

### 1.2 分段线性拟合技术方案

剩余电流保护断路器的电流检测与保护范围一般在 $0.2I_n \sim 16I_n$ 之间,其中 $I_n$ 为额定电流。由剩余电流保护断路器的电流互感器输入输出测试数据可知,在 $5I_n$ 以上电流输入时,电流互感器输入输出特性开始呈现非线性,如图2所示。由于剩余电流保护断路器的电流短延时、瞬动保护设定值一般分别为 $5I_n, 8I_n$ ,综合考虑计算量少、微处理器软件算法简单等工程因素,本方案采用5

个数据特征点( $I_n, I_1, I_2, I_3, I_4$ ,其中 $I_1 \approx 5I_n, I_2 \approx 8I_n, I_3 \approx 10I_n, I_4 \approx 12I_n$ )进行分段线性拟合,并且每个分段的线性插值函数 $\phi(x)$ 采用简单的正比例函数 $y=kx$ ,通过修正每个分段区间的比例系数 $k$ 值,实现对电流互感器非线性区间的线性补偿,满足全电流输入范围的电流检测精度要求。

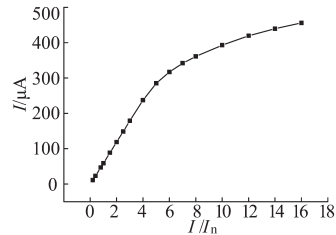


图2 电流互感器输入/输出特性

Fig.2 Input / output characteristics of current transformer

分段线性拟合的具体实现技术方法由样机额定电流校准、样机补偿系数计算、生产额定电流校准3部分组成。

#### 1.2.1 样机额定电流校准

选一台剩余电流保护断路器样机,在电流延时测试台输入额定电流 $I_n$ ,通过剩余电流保护断路器线路控制面板的按键进入液晶菜单栏的生产测试模式,选中液晶菜单里的“电流校准”,按【确认】键执行电流校准程序,微处理器软件对负载电流实时ADC采样,得到给定额定电流 $I_n$ 条件下的采样值 $A_n$ ,根据下式,软件自动计算出比值系数 $k_n$ :

$$k = A \times 8192 \div I \quad (1)$$

式中: $k$ 为给定电流条件下的比例系数; $A$ 为给定电流条件下对应的微处理器软件ADC采样值; $I$ 为输入给定电流值。

根据实际电路参数和电流互感器特性参数可知,给定额定电流条件下 $A \div I$ 得到的值在0.3左右,为了微处理器软件无需进行浮点运算又能确保 $k$ 值的计算精度,先把 $A$ 值左移13位,即 $A$ 值先乘上常量8192后再与 $I$ 相除,保证了 $A \div I$ 得到商值的小数点后3~4位有效性。

执行额定电流校准时,控制线路板的液晶界面显示“校准中”,校准完之后液晶界面显示“校准完成”,并显示校准完之后的电流检测值,操作者通过目测电流值即可判断校准是否成功。

#### 1.2.2 样机补偿系数计算

选同一台样机,在剩余电流保护断路器的电流延时测试台,输入4个给定电流值( $I_1, I_2, I_3, I_4$ ),测试微处理器软件对应的ADC采样值( $A_1, A_2, A_3, A_4$ ),并根据式(1)手动计算出微处理器软件

ADC采样值与实际给定电流值相除得到的商值,即为比值系数( $k_1, k_2, k_3, k_4$ ),然后根据下式:

$$C = k_n - k \quad (2)$$

式中: $C$ 为给定电流条件下的补偿系数; $k_n$ 为给定额定电流条件下的比例系数。

用给定额定电流条件下计算出的比例系数 $k_n$ 与这4个比例系数相减得到对应的4个差值( $C_1, C_2, C_3, C_4$ ),用该差值作为对应的线性补偿系数,并把补偿系数( $C_1, C_2, C_3, C_4$ )和这4个电流ADC采样值( $A_1, A_2, A_3, A_4$ )作为常量手动输入到微处理器软件源代码的FLASH区域表格中,参与分段线性拟合的程序流程计算。程序重新编译,即可批量烧录到这批产品中。

### 1.2.3 生产额定电流校准

批量生产时,首先对每一台剩余电流保护断路器进行额定电流校准,重复前面1.2.1节所述的样机额定电流校准操作,微处理器软件自动计算出额定电流下的每台剩余电流保护断路器比例系数 $k_n$ 。由于电流互感器、线路板元器件的个体差异性,每台剩余电流保护断路器的 $k_n$ 值会略有差异。

额定电流校准完之后,微处理器软件实时采样实际电流值,并将当前电流ADC采样值 $A_0$ 与 $A_n, A_1, A_2, A_3, A_4$ 进行比较,根据下式计算出当前电流的比例系数 $k_0$ :

$$k_0 = k_n - C_0 \quad (3)$$

式中: $k_0$ 为当前电流的比例系数; $k_n$ 为给定额定电流条件下的比例系数; $C_0$ 为当前电流的补偿系数。

当 $A_0 \leq A_1$ 时, $C_0 = 0$ ;当 $A_1 < A_0 \leq A_2$ 时, $C_0 = C_1$ ;当 $A_2 < A_0 \leq A_3$ 时, $C_0 = C_2$ ;当 $A_3 < A_0 \leq A_4$ 时, $C_0 = C_3$ ;当 $A_4 < A_0$ 时, $C_0 = C_4$ 。再通过当前电流采样值 $A_0$ 和下式计算出当前的实际电流值:

$$I_0 = A_0 \times 8\ 192 \div k_0 \quad (4)$$

式中: $I_0$ 为当前电流值; $A_0$ 为当前电流采样值; $k_0$ 为当前电流的比例系数。

## 2 设计

电流数据采集系统设计包含硬件电路设计和微处理器软件设计。

### 2.1 硬件电路设计

硬件电路主要包含电流互感器信号调理电路和电流自生电源电路,如图3所示。

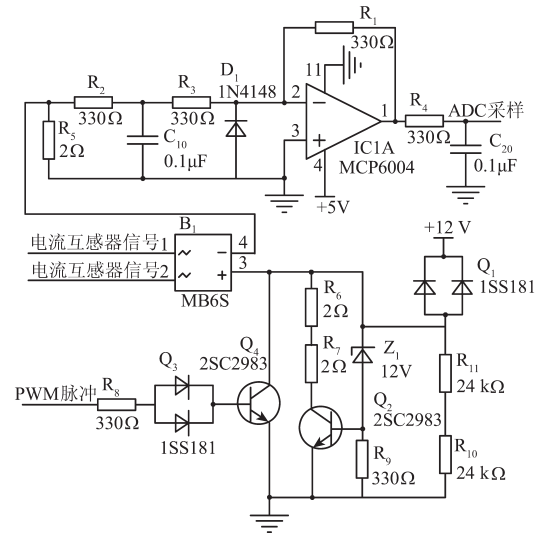


图3 电流信号调理和电流自生电的原理图

Fig.3 Schematic diagram of current signal conditioning and current self generation

图3中,电流互感器信号调理电路主要由整流桥、采样电阻、运算放大器组成,将电流互感器输出的电流信号转换为可供微处理器直接进行ADC采样的电压信号。电流自生电源电路主要由晶体管和12V稳压管组成,将电流互感器输出电流转换为稳定的直流电压12V,作为备用电源为控制线路板系统供电。

电流互感器依据电磁感应原理将一次侧大电流转换成二次侧小电流,通过整流桥 $B_1$ 将电流互感器输出的交流电流信号转换成直流电流信号,流经采样电阻 $R_5$ 将电流互感器输出的电流信号转换成电压信号,再经过运算放大器反相等比例放大,把采样电阻上的负电压信号调理成正电压信号,最后经过 $R_4, C_{20}$ 的滤波输入到微处理器的ADC通道进行采样。

当电流互感器开始输出电流时,通过整流桥 $B_1$ 正极输出电流,先流过 $R_{10}, R_{11}$ 到信号地,再流过采样电阻 $R_5$ 到整流桥 $B_1$ 负极,形成电流回路。 $R_{10}, R_{11}$ 的串联等效电阻为48kΩ,当电流互感器输出电流大于250μA时, $R_{10}, R_{11}$ 的压降超过12V,即 $Z_1$ 的12V稳压管开始导通,进而导致晶体管 $Q_2$ 开通。根据选用电流互感器规格参数可知,当剩余电流保护断路器的负载侧大于5A时,电流互感器二次侧输出则大于1mA,可见,在额定电流100A以上剩余电路保护断路器的实际应用中,只要有一定负载电流流过,电流互感器输出的电流基本上都从晶体管 $Q_2$ 流过,并且 $Z_1$ 的12V稳压管处于导通状态,使得整流桥 $B_1$ 正极输出端电

压稳定在 12 V, 实现了剩余电流保护断路器负载电流自生电源输出直流电压 12 V, 作为后备电源, 通过二极管  $Q_1$  给微处理器系统供电。考虑到  $Q_2$  晶体管发热问题, 当微处理器检测到负载侧有较大电流时, 输出 PWM 脉冲控制  $Q_4$  晶体管反复开通与关断, 使得电流互感器感应输出电流的一部分电流流过晶体管  $Q_4$ , 降低了  $Q_2$  晶体管温升, 确保了电路可靠性。

### 2.2 嵌入式软件设计

微处理器软件采用 C 语言编程, 模块化设计, 电流数据采集系统设计的程序模块主要包括电流 ADC 采样、数字滤波、额定电流校准、分段线性拟合等模块。

电流 ADC 采样, 由微处理器内部自带 10 位 AD 采样完成, 程序触发定时器每 200  $\mu$ s 进中断执行 1 次 AD 采样, 将电流互感器输出的模拟信号转换为微处理器可处理的离散数字信号。

数字滤波, 把微处理器 ADC 采样过来的数字信号, 在程序中通过限幅滤波、加权平均滤波的算法对数字信号进行处理, 将信号中的一些毛刺等干扰信号滤除, 以得到较为平滑的数字信号, 提高电流采样的可靠性。

额定电流校准流程, 如图 4 所示, 每隔 500 ms 判断电流采样值的变化, 当连续 3 s 内电流采样值变化小于 5 时, 则认为当前给定输入电流已处于稳定状态, 才执行电流校准, 以确保额定电流校准的准确性。校准完之后, 程序自动把  $k_n$  值保存于微处理器内部的 EEPROM 存储器中, 数据断电不会丢失。

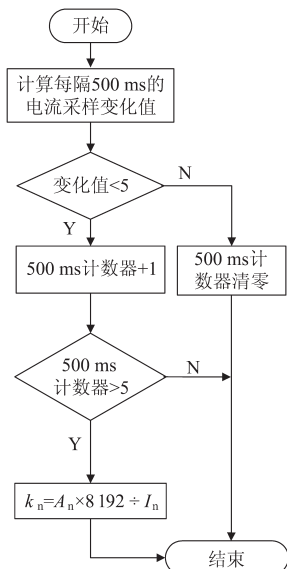


图 4 额定电流校准流程图

Fig. 4 Flow chart of rated current calibration

分段线性拟合流程, 如图 5 所示。将电流实时 ADC 采样值与前面所述的 4 个数值 ( $A_1, A_2, A_3, A_4$ ) 进行比较, 以确定出当前电流值处于哪个分段的线性区间, 并根据额定电流校准系数  $k_n$  和相应补偿系数 ( $C_1, C_2, C_3, C_4$ ) 和式 (3) 计算出当前的比例系数  $k_0$ , 进而通过式 (4) 计算出当前电流实际值。

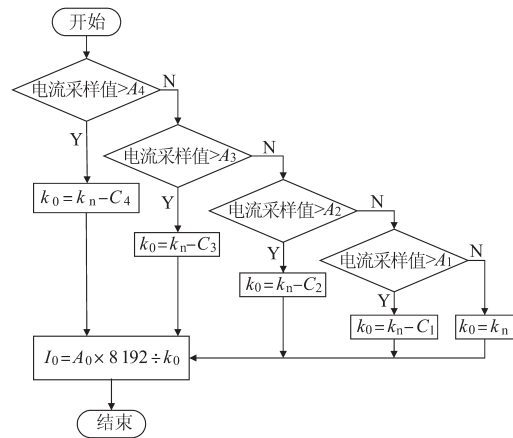


图 5 分段线性拟合流程图

Fig.5 Flow chart of piecewise linear fitting

### 3 实验

以剩余电流保护断路器壳架电流 250 A 为例, 在一批待量产的产品中, 先随机抽取一台进行分段线性拟合实验。首先根据 1.2.1 节内容描述, 在给定额定电流 250 A 条件下进行电流校准, 微处理器软件计算出比例系数  $k_n$ 。然后根据 1.2.2 节内容描述, 输入 4 个给定电流值, 手动计算出相应比例系数、补偿系数, 具体测试数据见表 1, 并把补偿系数、4 个给定电流值的电流采样值手动输入到微处理器软件源代码对应的 FLASH 区域表格中, 程序重新编译后烧录到这批待量产的产品中, 接下来开始批量生产测试。最后根据 1.2.3 节内容描述, 在批量生产时, 先对每一台剩余电流保护断路器进行额定电流校准, 然后依据产品试验标准<sup>[15-18]</sup>进行长延时、短延时、瞬时特性的例行检验生产测试, 通过液晶显示实时电流值或者在液晶上显示的保护跳闸动作电流值与测试台的实际给定电流值进行比较分析, 保护跳闸动作电流误差均在  $\pm 10\%$  以内, 符合产品标准要求。

上述的电流数据采集系统设计技术, 已成功用于剩余电流保护断路器产品 LSKM1L-125, LSKM1L-250, LSKM1L-400, LSKM1L-630, 并

实现量产。公司于2016年初中标江苏省电力公司5 000多台剩余电流保护断路器产品,与集中器智能组网,上传实际电流值等数据,便于江苏省电力公司主站对各台区的实时电流等参数监测,取得了很好的应用效果。除江苏外,剩余电流保护断路器产品在宁夏、浙江、内蒙古等地区也得到广泛应用,电流检测与保护均可靠运行,该电流采集系统技术具有广阔的市场应用前景。

表1 分段线性拟合测试数据

Tab. 1 Piecewise linear fitting test data

		给定电流/A				
		$I_0=250$	$I_1=1\ 200$	$I_2=1\ 945$	$I_3=2\ 496$	$I_4=3\ 097$
电流 采样值		77	342	509	566	634
比例 系数	$k_n$	2 527				
	$k_1$		2 334			
	$k_2$			2 127		
	$k_3$				1 859	
	$k_4$					1 679
补偿 系数	$C_1$		193			
	$C_2$			400		
	$C_3$				668	
	$C_4$					848

## 4 结论

基于分段线性拟合的电流数据采集系统设计技术,解决了因电流互感器在全工作电流范围内非线性导致电流数据采集不准的问题,有效降低了硬件电路和电流互感器的成本,并能很好地满足电流测量和保护精度的要求。

提出了适合工程应用的5点分段线性拟合算法,程序代码简单,生产操作容易,效率高。

自生电源的电源冗余设计,负载电流经过电流互感器感应输出二次侧电流,流经自生电源电路转换输出稳定电压,作为备用电源给系统供电,大大提高了产品可靠性。

### 参考文献

[1] 王文广,吴健,邱书明,等.具有剩余电流保护功能断路器

测试台[J].电气传动,2016,46(11):61-64.

[2] 余存泰.剩余电流动作断路器电路优化设计[J].低压电器,2013(15):26-28,33.

[3] JGJ/T16—2008.民用建筑电气设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.

[4] GB50054—2011 低压配电设计规范[S].北京:中国计划出版社,2012.

[5] 顾惠民.断路器过电流保护脱扣器的设计研究[J].电器与能效管理技术,2016(2):9-15,22.

[6] 张绍荣.基于分段线性拟合和PID的数字化仪误差校准[J].桂林航天工业学院学报,2015(4):479-483.

[7] 薛丽红.三维空间点中基于最小二乘法的分段直线拟合方法[J].齐齐哈尔大学学报(自然科学版),2015,31(4):84-85,89.

[8] 曾铭,王晋研,王刚志.物理实验数据的线性与非线性拟合[J].大学物理实验,2017,30(2):116-119.

[9] 刘霞,王运锋.基于最小二乘法的自动分段多项式曲线拟合方法研究[J].科学技术与工程,2014,14(3):55-58.

[10] 潘超,王梦纯,蔡国伟,等.变压器直流偏磁场路耦合计算中的磁化曲线拟合[J].电力自动化设备,2014,34(4):49-52,58.

[11] 段振云,王宁,赵文辉,等.一种一阶连续分段曲线拟合方法[J].组合机床与自动化加工技术,2016(5):29-31,35.

[12] 薛丽红.基于最小二乘法的分段直线拟合算法[J].贵阳学院学报(自然科学版),2015,10(4):9-10.

[13] 曾渭平,丁颖,董锁利,等.校准电流-压力传感器的一种新方法[J].计测技术,2012,32(S1):33-34.

[14] 肖峻,李鑫,赵孟坤,等.分段线性拟合在轮对压装机压力标定中的应用[J].组合机床与自动化加工技术,2016(4):146-149.

[15] GB14048.2—2008.低压开关设备和控制设备第2部分:断路器[S].北京:中国标准出版社,2008.

[16] GB16916.1—2003.家用和类似用途的不带过电流保护的剩余电流动作断路器(RCCB)第1部分:一般规则[S].北京:中国标准出版社,2003.

[17] GB16917.1—2003.家用和类似用途的带过电流保护的剩余电流动作断路器(RCBO)第1部分:一般规则[S].北京:中国标准出版社,2003.

[18] GB/Z 6829—2008.剩余电流动作保护电器的一般要求[S].北京:中国标准出版社,2008.

收稿日期:2018-09-28

修改稿日期:2018-12-26