

# 测量用电流互感器数字补偿算法

吕建虎, 胡忠林

(国网电力科学研究院, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 为了提高测量用电流互感器(CT)的精度, 通常采用高磁导率的材料和大横截面积的核心使励磁电流最小化, 这种做法会增加 CT 的制造成本。提出了一种提高测量用 CT 精度的数字补偿算法, 根据副边电流测量值和铁心磁化特性, 通过算法计算并补偿励磁电流来提高测量用 CT 的精度, 仿真和实验验证了该算法的有效性。

**关键词:** 测量; 电流互感器; 励磁电流; 数字补偿

**中图分类号:** TM452

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-0665(2012)03-0027-04

互感器是基于电磁感应定律实现能量的转移, 为了最大化原边绕组和副边绕组之间的耦合磁链, 在绕组中插入了铁心, 而铁心磁滞特性造成的非正弦励磁电流是测量用电流互感器(CT)产生误差的原因。采用高磁导率材料和大横截面积的核心, 可以提高测量用 CT 的精度, 得到最小化励磁电流, 但会增加测量用 CT 的成本, 增大其规格。电子式 CT 例如 Rogowski 线圈和光学 CT, 消除了核心的磁滞效应, 没有造成误差的问题, 目前虽得到了应用, 但长期运行的可靠性未得到很好的解决<sup>[1]</sup>。

若能够计算并补偿励磁电流, 则可以在铁心规格不变的情况下, 有效地提高测量精度, 或者设计出相同精度等级但铁心规格更小的测量用 CT。有源和无源零磁通 CT 就是利用了这一原理, 有源零磁通 CT 在普通电流传感器的基础上, 增加了一个检测绕组, 利用电子线路动态跟踪铁心中的励磁电流并通过补偿绕组进行补偿, 使铁心动态地达到零磁通状态<sup>[2-4]</sup>, 但是有源零磁通 CT 补偿电路复杂, 成本较高, 可靠性也难以保证。无源零磁通 CT 无需外部电路提供补偿电流, 可靠性和稳定性优于有源零磁通 CT, 但也有其不足, 对制造工艺要求较高, 补偿的动态范围较窄。基于补偿励磁电流这一思想, 提出了一种提高测量用 CT 精度的数字补偿算法, 不需要改变测量用 CT 的电气结构, 实现简单, 只需对采集的数据进行数字处理, 即可以提高测量用 CT 的精度。

## 2 数字补偿算法

分析测量用 CT 稳态运行时误差产生的主要原因, 根据 CT 等效电路(如图 1 所示), 可以得到:

$$i_1(t) = i_0(t) + i_{21}(t) = i_0(t) - \frac{N_2}{N_1} i_2(t) \quad (1)$$

式中:  $i_1(t)$  为原边电流;  $i_2(t)$  为副边电流;  $i_0(t)$  为励

磁电流;  $i_{21}(t)$  为折算到原边的副边电流值;  $N_1$  为原边匝数;  $N_2$  为副边匝数。从式(1)可以看出, 误差是由励磁电流  $i_0(t)$  造成的。而文中提出的数字补偿算法能够补偿励磁电流造成的误差, 其基本思想为: 根据测量得到的副边电流和测量用 CT 铁心磁化特性, 计算出励磁电流  $i_0(t)$ , 由此得到的原边电流为折算到原边的副边电流加上励磁电流, 可以实现比副边电流简单地乘以测量用 CT 变比对原边电流更精确地评估。

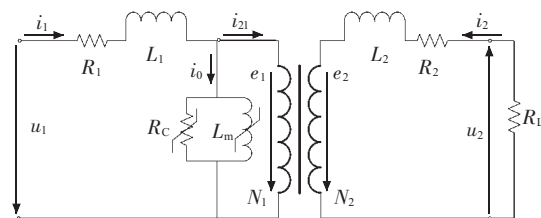


图 1 CT 等效电路图

测量用 CT 的电气参数已知, 则副边感应电压  $e_2(t)$  为:

$$e_2(t) = R_L i_2(t) + R_2 i_2(t) + L_2 \frac{di_2(t)}{dt} \quad (2)$$

$$e_2(t) = N_2 \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (3)$$

式中:  $R_2$  为副边绕组的等效电阻;  $L_2$  为副边绕组的漏感;  $R_L$  为负载电阻;  $\Phi(t)$  为铁心中磁通。则测量用 CT  $t_0$  时刻以后的磁通为:

$$\Phi(t) = \frac{R_2 + R_L}{N_2} \int_{t_0}^t i_2(\tau) d\tau + \frac{L_2}{N_2} (i_2(t) - i_2(t_0)) + \Phi(t_0) \quad (4)$$

式中:  $i_2(t_0)$  为  $t_0$  时刻的副边电流, 常数;  $\Phi(t_0)$  为  $t_0$  时刻的初始磁通, 未知, 需要先确定初始磁通值。测量用 CT 正常运行时, 磁通在 1 个周期  $T$  内的均值为 0, 据此可推导出初始磁通值。令:

$$\varphi(t) = \frac{R_2 + R_L}{N_2} \int_{t_0}^t i_2(\tau) d\tau + \frac{L_2}{N_2} (i_2(t) - i_2(t_0)) \quad (5)$$

则  $\varphi(t)$  在 1 个周期  $T$  的均值为:

$$E[\Phi(t)] = E[\varphi(t)] + \Phi(t_0) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \varphi(t) dt + \Phi(t_0) = 0 \quad (6)$$

初始磁通为:

$$\Phi(t_0) = -\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \varphi(t) dt \quad (7)$$

$i_2(t_0)$  直接测量得到, 根据式(7)计算出初始磁通  $\Phi(t_0)$ , 则可以由式(4)确定 CT 的瞬时磁通  $\Phi(t)$ 。

为了便于数字实现, 对式(4), (6), (7)离散化, 假设副边电流  $i_2(t)$  的周期为  $T$ , 每周期采样点数为  $n$ , 采样间隔为  $\Delta T$ , 若  $n$  足够大, 经过推导, 得到测量用 CT 的磁通在第  $k$  个采样时刻离散表达式为:

$$\Phi(k) = \frac{R_2 + R_L}{N_2} \sum_{i=1}^k \Delta T \cdot \frac{i_2(i-1) + i_2(i)}{2} + \frac{L_2}{N_2} (i_2(k) - i_2(k_0)) + \Phi(k_0) \quad (8)$$

式中: 常数  $i_2(k_0)$  为初始副边电流;  $\Phi(k_0)$  为铁心初始磁通。

为了计算式(8)中的磁通离散值, 需要预先获得测量用 CT 副边绕组的阻抗漏感和铁心的磁化特性, 这些数据为互感器的标称参数, 也可以通过一系列简单的实验室测试得到。其中, 铁心的磁化特性一般有 2 种描述方式: 一是简单的单值磁化曲线, 如文献[5]; 二是含有更多铁心磁化特性的磁滞回线。为了保证补偿的精度, 文中采用铁心的磁滞回线描述铁心的磁化特性。

结合测量用 CT 误差产生的原因和上述公式推导过程, 数字补偿算法主要步骤为:

(1) 前期准备工作: 辨识测量用 CT 参数: 副边绕组阻抗和漏感、铁心磁滞回线, 磁滞回线数据以磁通-励磁电流的形式保存在存储器中;

(2) 采集副边电流离散值  $i_2(k)$ ;

(3) 按式(8)计算铁心磁通  $\Phi(k)$ , 并结合保存在存储器中的磁滞回线数据, 确定铁心的当前磁化轨迹;

(4) 将磁通  $\Phi(k)$  映射到铁心的当前磁化轨迹中, 结合磁通变化趋势确定相应的励磁电流值  $i_0(k)$ ;

(5) 将励磁电流  $i_0(k)$  与折算到原边的副边电流  $i_{21}(k)$  相加, 结果即为补偿后的副边电流  $i_{21c}(k)$  (折算到原边)。

算法实现的流程如图 2 所示, 过程参数  $sum$  用于确定初始磁通, 为了消除式(8)中对副边电流离散积分带来的累积误差, 采用每周波都确定初始磁通

的方法, 即初始时刻  $k_0$  每一个周波改变一次。同时从流程图中可以看出, 该数字补偿算法具有一个信号周期的延时。

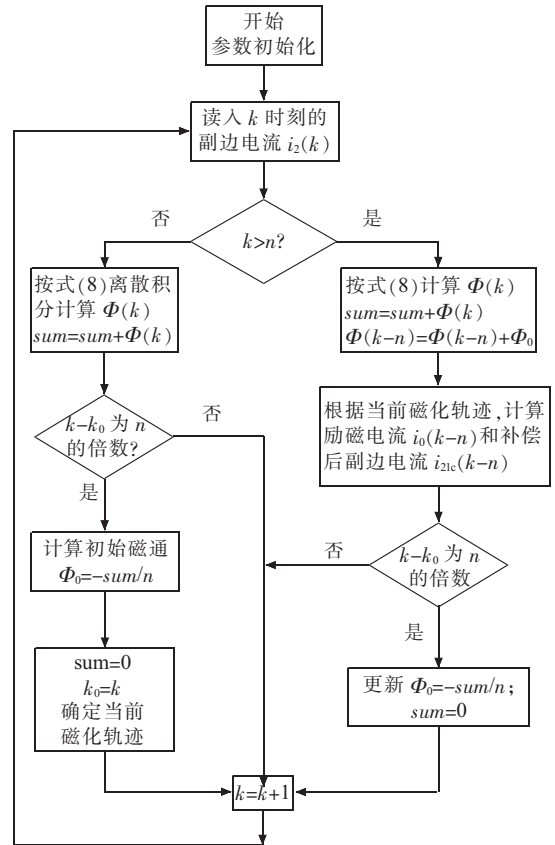


图 2 算法流程

### 3 仿真分析

为了验证该数字补偿算法的有效性, 在基于 MATLAB 平台的 CT 模型上对此补偿算法进行了仿真验证, CT 模型仿真参数如下: 变比为 1 A/100 mA; 额定负载为 10  $\Omega$ ; CT 模型的磁滞回线组如图 3 所示, 一共测量了 10 组数据。

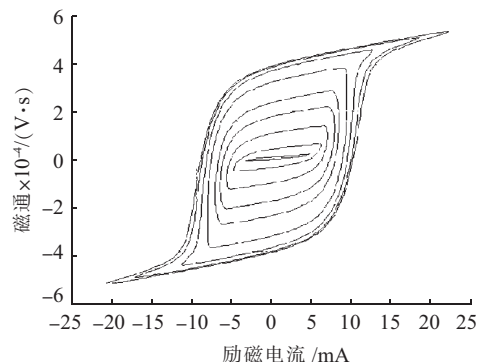


图 3 磁滞回线组

该 CT 模型工作在额定电流下的仿真结果如图 4 所示。从图 4(a)中可以看出, 由于励磁电流的存在, 测量得到的折算到原边的副边电流  $i_{21}(t)$  (虚线) 与原边电流  $i_1(t)$  (实线) 之间有差值; 图 4(b) 和图 4

(c) 展示的是仿真得到的磁通和励磁电流与计算得到的磁通和励磁电流,可以看出仿真值(实线)和计算值(虚线)基本一致;正因为励磁电流的仿真值和计算值基本一致,所以图 4(d)中的补偿后副边电流  $i_{21c}(t)$ (虚线)与原边电流  $i_1(t)$ (实线)近似重合,比差从补偿前的  $-0.63\%$  降低到补偿后的  $0.020\%$ ,角差也从补偿前的  $25.30'$  降低到补偿后的  $1.00'$ 。

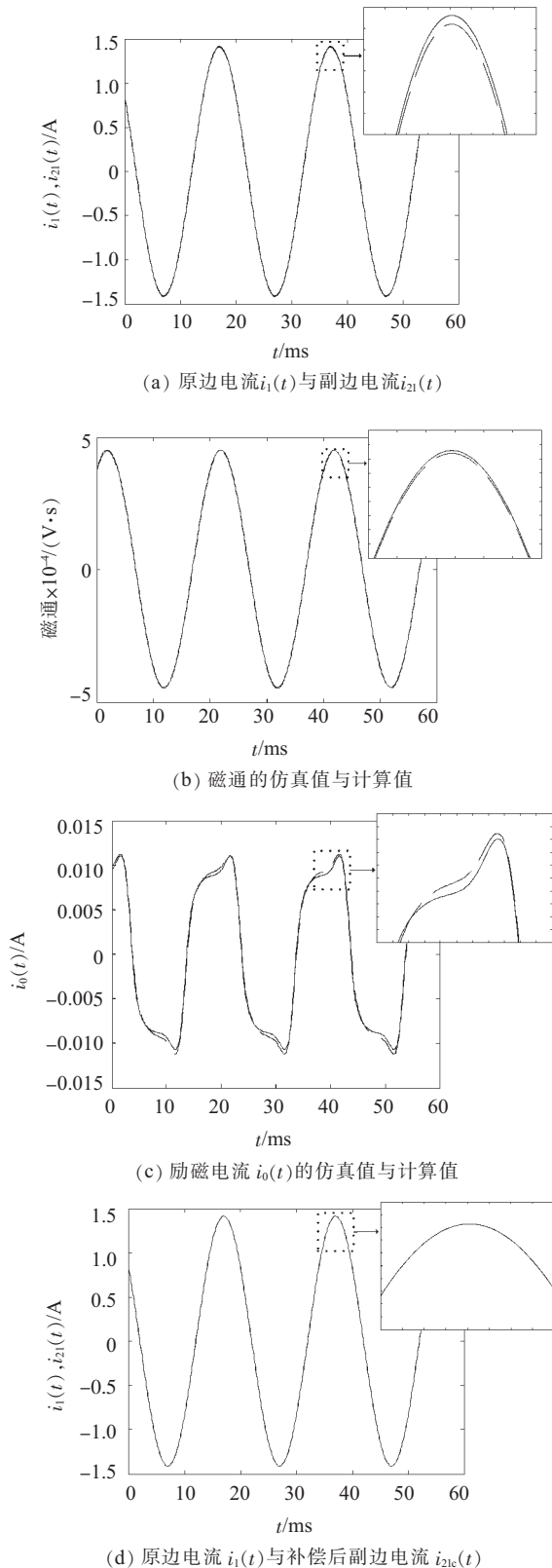


图 4 原边电流为额定电流时仿真结果

CT 模型原边电流为  $120\%$ ,  $20\%$ ,  $5\%$  额定电流时的仿真结果如图 5 所示,从图中可以看出,补偿后副边电流  $i_{21c}(t)$  与原边电流  $i_1(t)$  的一致程度明显好于补偿前的副边电流  $i_{21}(t)$ ,具体的比差和角差改善结果如表 1 所示。

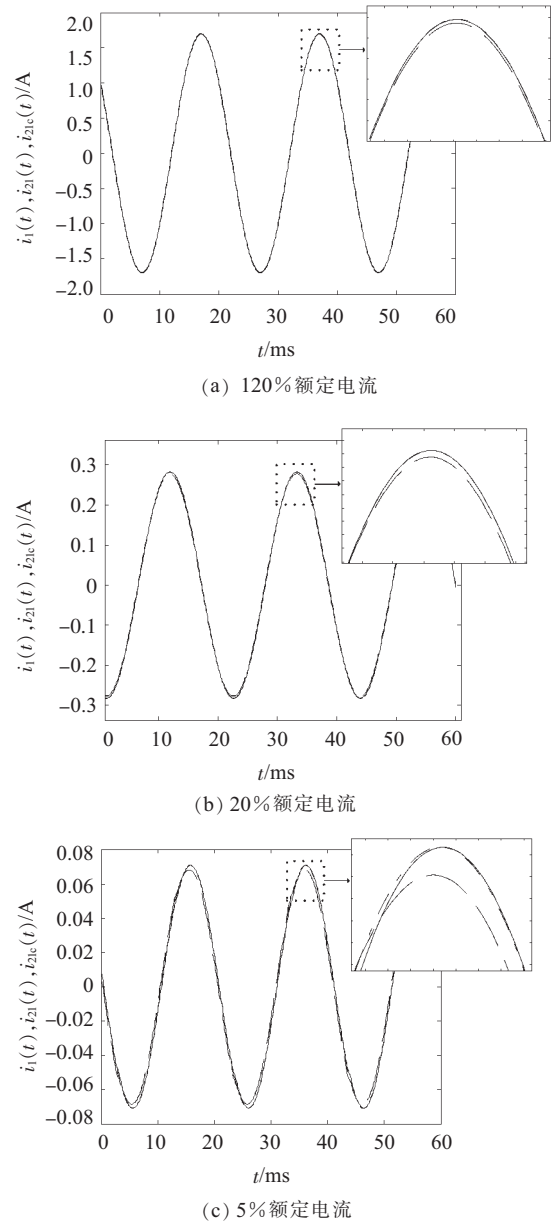


图 5 原边电流  $i_1(t)$ (实线)、副边电流  $i_{21}(t)$ (虚线)和补偿后副边电流  $i_{21c}(t)$ (点划线)对比

表 1 补偿算法仿真结果

额定 电流 /%	补偿前		补偿后	
	比差 /%	角差 /'	比差 /%	角差 /'
120	-0.55	41.86	0.031	0.05
100	-0.63	25.30	0.020	1.00
20	-1.77	70.76	0.044	1.73
5	-2.30	213.75	0.780	12.44

#### 4 实验验证

为了验证该补偿算法,在一个真实的测量用

CT 上进行了一系列实验, 实验中 CT 的变比为 5 A/10 mA, 额定负载为 100  $\Omega$ , 使用丹迪克公司的 DK-51B1 便携式三相交直流标准功率源作为电流信号源, 信号的采样率为 12 800 Hz。

120%, 100%, 20%, 5% 额定电流时的补偿结果如表 2 所示, 可以看出, 比差改善了一个数量级以上, 角差也从补偿前的超过 90' 下降到 1' 左右。结果表明, 提出的数字补偿算法在真实的环境下能有效提高测量用 CT 的测量精度。

表 2 补偿算法实验结果

额定 电流 / %	补偿前		补偿后	
	比差 / %	角差 / '	比差 / %	角差 / '
120	-1.47	90.63	0.0236	0.12
100	-1.50	94.44	0.0265	0.93
20	-2.08	129.81	-0.0315	-1.54
5	-3.82	210.92	-0.0771	-2.73

## 5 结束语

文中提出的数字补偿算法根据测量得到的副边电流计算出铁心中磁通, 再结合铁心磁化特性确定励磁电流并数字补偿到副边电流测量值中, 以更准

确地再现原边电流值。该数字补偿算法的有效性在基于 MTALB 平台的仿真和实验测试中都得到了验证, 结果表明该算法能够改善测量用 CT 的比差和角差。使用文中提出的数字补偿算法可以提高测量用 CT 的精度。

### 参考文献:

- [1] 冯煜理. 电子式电流互感器的特点和存在的问题[J]. 上海电力, 2011, 1(1): 87-90.
- [2] SUZUKI Y, HIRABAYASHI A, YAMASAWA K. Analysis of a Zero-flux Type Current Sensor[J]. IEEE Transaction on Magnetics, 1993, 29(11): 3183-3185.
- [3] 李春来, 汤晓宇, 黄业安. 高精度微磁通电流互感器的研究[J]. 电测与仪表, 2010, 47(11) 51-54.
- [4] 李培艳. 基于零磁通的无源单匝穿心式小电流互感器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [5] KANG Y, PARK J, KANG S. An Algorithm for Compensating Secondary Currents of Current Transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(1): 116-124.

### 作者简介:

吕建虎(1987), 男, 江苏盐城人, 研究生, 从事电力系统自动控制研究工作;

胡忠林(1981), 男, 湖北武汉人, 工程师, 从事电力系统自动化设备研发工作。

## Digital Compensation Algorithm for Measuring Current Transformer

LV Jian-hu, HU Zhong-lin

(State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** In order to improve the measurement accuracy of current transformer (CT), the magnetic material with high permeability and core with large cross-sectional area are usually used to minimize the exciter current. However, the practice will increase CT manufacturing cost. In the paper, a digital compensation algorithm to improve the CT measurement accuracy is proposed. And the exciter current can be calculated and compensated according to the secondary measured current value and the magnetization characteristic of iron core. The effective of the algorithm is verified through simulation and experiment results.

**Key words:** measure; current transformer; exciter current; digital compensation

(上接第 26 页)

张玉琼(1979), 女, 黑龙江密山人, 工程师, 从事电力系统安全

稳定控制系统的研究和工程应用工作。

## Applications of Islanding Detection Based on Combined Decision in Microgrid

JIANG Yan<sup>1</sup>, ZHANG Yan<sup>2</sup>, ZHANG Zu-li<sup>2</sup>, ZHANG Ji-hong<sup>3</sup>, ZHANG Yu-qiong<sup>4</sup>

(1. Chongqing Power College, Chongqing 410053, China; 2. Haixi Electric Power Supply Company, Geermu 816000, China;

3. Chongqing Electric Power Dispatching and Communication Center, Chongqing 400053, China;

4. Nanjing NARI-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** The principles and properties of the three islanding detection methods, including abrupt voltage phase change, frequency change rate and capacitor initiative switch are analyzed. Then a combined decision islanding detection method is presented with passive detection as the main part and active detection as the auxiliary part. Simulation results show that the comprehensive method can eliminate the dead detection zone of single islanding detection method and realize islanding detection in different microgrid running state and load cases.

**Key words:** microgrid; islanding detection; abrupt phase change; frequency change rate; capacitor initiative switch; combined decision