

利用测量电流互感器实现配电网故障电流检测的新方法

薛永端¹, 徐丙垠², 冯祖仁¹

(1. 西安交通大学系统工程研究所, 西安 710049; 2. 科汇电气有限公司, 山东淄博 255031)

摘要: 提出一种利用测量电流互感器(TA)进行过流故障、故障电流幅值及故障方向检测的新算法。故障检测利用了TA饱和时二次输出电流的间断角,而根据TA在上下半周饱和前的有效信息进行故障电流幅值和方向的计算。电流幅值的估算采用了最小二乘法,可以滤除衰减直流分量和谐波;方向的计算利用了电压、电流故障分量间的相位关系。同时介绍了以上算法基于采样值的实现方法。

关键词: 配电自动化; 故障检测; 故障信息; 测量电流互感器; 饱和

中图分类号: TM 727.2; TM 764

0 引言

故障定位、隔离及恢复健全线路供电是配电自动化^[1]的主要内容之一。采用远方智能终端时,由主站根据各个RTU、FTU上报的故障信息来实现^[2,3]。如果配电网处于开环运行状态,只需根据每个RTU或FTU是否检测到故障电流就可以确定故障区段^[2]。但在有些需要闭环运行的情况下,故障电流会从两端同时流向故障点,则必须借助故障电流方向(故障方向)才能确定故障区段。同时,为了更准确地分析故障特征,故障电流幅值也是必要的。因此,故障电流信息检测成为配电自动化故障管理功能的基础。

传统的故障电流检测主要利用保护电流互感器(TA),而测量功能使用测量TA。随着技术的发展,特别是针对配电系统网络分布较广、检测点较多,而投资又有限的情况,要求将故障检测和测量功能合二为一。为了兼顾故障电流检测,目前国内已有的系统基本都是使用保护TA,这必然会降低测量精度。本文提出的利用测量TA进行故障电流检测的方法有望为解决这一矛盾提供有效途径。

1 测量TA在饱和时的特性^[2~4]

影响电磁式TA饱和的因素有许多。一般而言,TA饱和时有以下特点:

a. TA在一次电流幅值达到一固定值后出现饱和现象,一次电流越大,饱和现象越严重。

b. 对一次电流的瞬时值而言,最小饱和电流

(称为饱和点)的大小不仅与TA结构有关,还与二次负荷的大小有关。饱和点在二次侧开路时最小,短路时最大。

c. 二次负荷相角对二次电流也有影响。当二次负荷接近于纯阻性时,达到饱和点后二次电流很快降为0,一次电流过零点后能很快跟随其变化。

d. 故障电流中衰减直流分量(又称非周期分量)越大,TA饱和的程度越深,且正、负半周越不对称。

e. 一次系统的时间常数越大,饱和程度越深。配电系统时间常数大多在10ms~20ms,一般认为在故障3个周期以后,直流分量基本衰减完毕。

f. 由于铁心剩磁的影响,一次电流瞬时值从饱和点以上降到以下时,二次电流并不能立即跟随其变化。

g. TA的饱和程度可以用半个周期内二次电流输出为0的时间所对应的电角度,即间断角来表示。

2 故障检测

由于负荷电流的变化不会使测量TA饱和,通过检测TA二次电流是否出现饱和现象可以判断线路是否出现过流故障^[2,3]。而通过检测TA二次电流间断角大小可以判断是否出现饱和现象。间断角 β 定义为:

$$\beta = \frac{T_0}{T/2} \times 180^\circ = \frac{T_0}{T} \times 360^\circ$$

其中 T 为工频周期; T_0 为半个周期内二次电流输出为0(对应TA饱和)的时间。

间断角的范围为 $0 \sim 180^\circ$; 随着一次电流的增

收稿日期: 2001-04-01; 修回日期: 2001-05-08

加而增大。理论上, 间断角大于 0 即可认为出现了饱和现象。

二次电流经 A/D 转换为离散数据, 具体的方法如下:

a. 找出半个周期内采样数据的最大绝对值, 根据该最大值确定零值门槛。

b. 考虑到各种干扰, 把半个周期内绝对值小于零值门槛的所有数据都认为是零值。根据零值的个数 n_0 即可求出二次电流的间断角: $\beta = 360 n_0 / N$, N 为每周期采样个数。

c. 当间断角大于预设的门槛时可认为 TA 出现了饱和现象。按照前 2 步方法, 即使在 TA 不饱和的情况下间断角也会大于 0, 因此预设门槛应考虑一定余度, 经过分析, 其影响可以忽略。

在非周期分量的影响下, 饱和波形并不对称, 其中半个周期较另半个周期严重得多, 相应的间断角也不相同。因此, 当检测到任意半个周期出现饱和现象后都可确认系统发生了故障。

3 故障电流幅值的估算

TA 饱和后, 只有在一次电流过零到饱和点之间的时间内, 二次电流能够正确反映一次电流, 称该段数据为有效数据。以下计算中所采用的都是指有效数据。同时, 由于只要求 FTU, RTU 检测故障信息, 不要求输出跳闸指令, 因此有充足的时间利用所有故障数据进行计算。对于配电系统, 至少有 3 个周期以上的故障波形。

TA 饱和后不能再使用傅里叶积分的方法求电流幅值。文献[5, 6]中提出的直接最小二乘法, 要求连续采样点数大于状态变量个数, 严重饱和时该条件难以满足。且该算法将非周期分量展开为二级泰勒级数, 会带来理论上的误差。本文提出利用多个故障周期有效数据先滤除非周期分量再估算故障电流的方法, 可以有效解决该问题。

3.1 滤除非周期分量

随着直流量衰减, TA 饱和程度不断下降, 可以找到时刻 t 使得 $t, t+T, t+2T$ 都位于有效数据段内。

由于故障电流主要包含基频(工频)、各次谐波、非周期分量和干扰信号, 对于 A/D 转换之后的离散数据, 设其具有如下形式:

$$i(n) = I_d e^{-\frac{nT}{\tau}} + \sqrt{2} \sum_{m=1}^M I_m \sin(nm\omega T_s + \varphi_m) + e(n) \quad (1)$$

其中 I_d 为非周期分量初始幅值; τ 为一次系统时间常数; I_m, φ_m 为 m 次谐波 ($m=1$ 为工频) 的有效值和初相角; ω 为工频角频率; M 为最高谐波次数; T_s 为采样间隔; $e(n)$ 为平稳随机干扰信号。

设 $N = T/T_s$ 为每周期采样个数。又设共有 L 组数据满足 $i(n_j), i(n_j+N), i(n_j+2N)$ 均在有效区间内, $j=1, 2, \dots, L$ 。令:

$$\Delta i_1(n_j) = i(n_j) - i(n_j+N) = I_d e^{-\frac{n_j T}{\tau}} \left(1 - e^{-\frac{N T}{\tau}} \right) \quad (2)$$

$$\Delta i_2(n_j) = i(n_j) - i(n_j+2N) = I_d e^{-\frac{n_j T}{\tau}} \left(1 - e^{-\frac{N T}{\tau}} \right) \left(1 + e^{-\frac{N T}{\tau}} \right) \quad (3)$$

从式(2)和式(3)可以得出:

$$\frac{\Delta i_2(n_j)}{\Delta i_1(n_j)} = 1 + e^{-\frac{N T}{\tau}} \quad (4)$$

再令 $\Delta(n_j) = (\Delta i_1(n_j))^2 / (2\Delta i_1(n_j) - \Delta i_2(n_j))$, 可得:

$$\ln(\Delta(n_j)) = -\frac{n_j T_s}{\tau} + \ln I_d \quad (5)$$

当满足 $L \geq 2$ 时, 利用最小二乘法可以求得:

$$\frac{T_s}{\tau} = \frac{\sum_{j=0}^{L-1} n_j \ln(\Delta(n_j)) - \frac{1}{L} \sum_{j=0}^{L-1} n_j \sum_{j=0}^{L-1} \ln(\Delta(n_j))}{\sum_{j=0}^{L-1} n_j^2 - \frac{1}{L} \left(\sum_{j=0}^{L-1} n_j \right)^2} \quad (6)$$

$$\ln \hat{I}_d = \frac{1}{L} \sum_{j=0}^{L-1} \ln(\Delta(n_j)) + \frac{T_s}{L \tau} \sum_{j=0}^{L-1} n_j \quad (7)$$

从式(6)、式(7)中求出 I_d 和 τ 的估计值 \hat{I}_d 和 $\hat{\tau}$ (也可直接根据式(4)、式(5)利用最小二乘法求出), 并进一步滤除有效数据中的非周期分量: $i_s(n) = i(n) - \hat{I}_d \exp(-nT_s/\hat{\tau})$, 则 $i_s(n)$ 中只包含有工频及谐波成分。

由于本方法中没有对 $I_d e^{-nT_s/\tau}$ 进行简化, 因此可以完全滤除非周期分量。

3.2 估算故障电流幅值

再利用最小二乘法估计故障电流幅值。信号 $i_s(n)$ 可以写为:

$$i_s(n) = \sqrt{2} \sum_{m=1}^M (I_{ma} \sin(nm\omega T_s) + I_{mb} \cos(nm\omega T_s)) + e(n)$$

其中 $I_{ma} = I_m \cos \varphi_m$; $I_{mb} = I_m \sin \varphi_m$ 。

设共有 K 个数据 $i_s(n_j), j=1, 2, \dots, K$ 。要求 $K \geq 2M$, 但不要求来自连续采样的数据。令:

$$\mathbf{I}_s = [i_s(n_1), i_s(n_2), \dots, i_s(n_K)]^T$$

$$\mathbf{X} = [I_{1a}, I_{1b}, I_{2a}, \dots, I_{Ma}, I_{Mb}]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} \sqrt{2} \sin(n_1 \omega T_s) & \sqrt{2} \cos(n_1 \omega T_s) & \sqrt{2} \sin(2n_1 \omega T_s) & \dots & \sqrt{2} \cos(n_1 M \omega T_s) \\ \sqrt{2} \sin(n_2 \omega T_s) & \sqrt{2} \cos(n_2 \omega T_s) & \sqrt{2} \sin(2n_2 \omega T_s) & \dots & \sqrt{2} \cos(n_2 M \omega T_s) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sqrt{2} \sin(n_K \omega T_s) & \sqrt{2} \cos(n_K \omega T_s) & \sqrt{2} \sin(2n_K \omega T_s) & \dots & \sqrt{2} \cos(n_K M \omega T_s) \end{bmatrix}$$

则待求量 \hat{X} 的最小二乘估计为:

$$\hat{X} = [I_{1a}, I_{1b}, I_{2a}, \dots, I_{Ma}, I_{Mb}]^T = [A^T, A]^{-1} A^T I_s$$

可得到故障电流幅值的估计为:

$$I = \hat{I}_1 = \sqrt{\hat{I}_{1a}^2 + \hat{I}_{1b}^2}$$

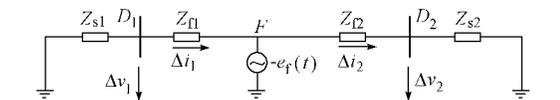
如果故障波形较长,也可以根据第 3 个周期以后的有效数据,不滤除非周期分量而直接求取故障电流。

4 故障方向的计算

根据故障分析原理,系统在故障后的电压、电流等于非故障量和故障量的叠加,利用电压、电流故障分量间的相位关系可以确定故障点方向。传统方法是基于故障分量中工频稳态信息。对于 TA 饱和的情况,可以利用与计算故障电流幅值相同的方法先估算出电流故障分量基波的实部和虚部,再求出其相位并与电压相位比较。具体过程不再详述。

当测量 TA 饱和后,利用电压、电流在有效数据区段内的故障分量瞬时值,同样可以定性地确定电压、电流间的相位关系,即确定故障方向。

以双侧电源单相系统为例,线路发生故障后故障分量等效电路如图 1 所示。



$e_f(t)$ 为虚拟电源,等于故障前故障点的电压; F, D 为故障点和检测点; Z_s, Z_f 分别为电源侧、故障点与检测点之间的等效阻抗; $\Delta v, \Delta i$ 分别为电压、电流的故障分量;下标 1, 2 分别表示针对检测点 1 和 2。

图 1 双电源单相系统故障分量等效电路图

Fig 1 Equivalent circuit of superimposed components in single-phase system

设 $Z_{s1} = R_{s1} + jL_{s1}, Z_{s2} = R_{s2} + jL_{s2}; R_s, L_s$ 分别为等效阻抗、感抗。从图 1 中可以得出:

$$\Delta v_1(t) = -R_{s1} \Delta i_1(t) - \frac{L_{s1} d\Delta i_1(t)}{dt}$$

$$\Delta v_2(t) = R_{s2} \Delta i_2(t) + \frac{L_{s2} d\Delta i_2(t)}{dt}$$

可见,故障点位于检测点不同方向时,电压、电流故障分量间的关系符号正好相反。

因此,如果每一个检测点都统一利用公式: $\Delta v(t) = R \Delta i(t) + L d\Delta i(t)/dt$ 来计算电感 L 。则当 $L > 0$ 时,故障点位于反方向,而当 $L < 0$ 时,故障点位于正方向。

由于在上述模型中采用的是电压、电流故障分量的瞬时值,不需要滤除非周期分量。

对于 A/D 转换之后的离散值,可以用差分方程代替微分方程进行计算,相应地要求连续采样点在 3 个以上。电压、电流的故障分量可以通过故障后的值减去存储的故障前的相应值来得到:

$$\Delta v(n) = v(n) - v(n - mN)$$

$$\Delta i(n) = i(n) - i(n - mN)$$

其中 $v(n), i(n)$ 为采样值; n 的时刻对应故障后; N 为每周期采样个数; m 为使时刻 $n - mN$ 对应故障前的最小正整数。

为了防止干扰引起误判断,可以计算多个结果。如果连续几个结果相同便可确定故障方向。或者采用举手表决方式,门槛可选为 2/3 多数或简单多数。

在三相系统中,当发生两相或三相短路故障时,可以使用与上述单相系统同样的方法。而当大电流系统发生单相接地故障时,模型需做适当修改。为了简化计算,可以继续使用上述模型,虽然会给计算 L 值带来一定误差,但不会改变 L 的符号,对于检测故障方向影响不大。

5 测试方法及结果

测试方法如图 2 所示。

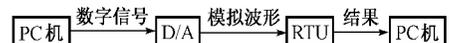


图 2 测试方法示意图

Fig 2 Block diagram of testing setup

根据前述故障检测、故障电流幅值及故障方向计算方法编制的软件下载于 RTU 的 DSP 芯片中,测试用的故障波形由一个 D/A 转换设备产生。产生故障波形的数据记录于美国 S & C 公司位于芝加哥实验室的配电系统动模试验中。该试验中使用的 TA 是 S & C 公司专为配电自动化设计的饱和性 TA,它的特性与测量 TA 基本相同^[7]。使用的电容分压式电压互感器(TV)会引起一固定的相移^[7],需要在 RTU 中进行补偿。图 3 是记录的一组典型故障波形。

对不同系统参数以及包括单相、两相、三相在内的各种类型的故障数据进行测试,RTU 报告的故障标志、故障方向结果正确,故障电流幅值也在允许的误差范围之内。

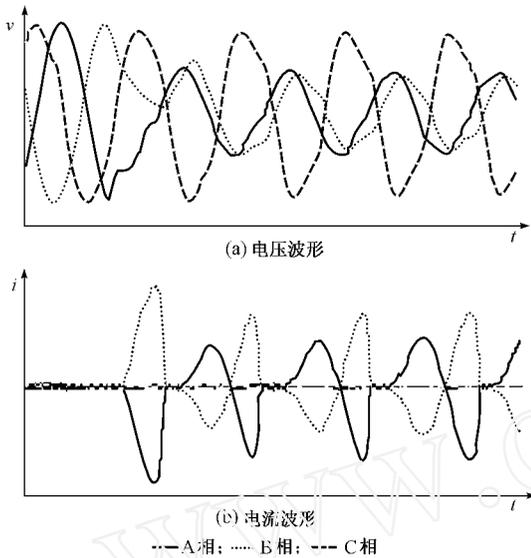


图3 A、B相短路时TV、TA二次侧电压、电流故障波形
Fig 3 Secondary voltage and current of voltage transformer and current transformer for a phase A to B fault

6 结论

采用本技术的配电系统已应用于美国圣迭戈供电公司。理论分析和试验表明,通过检测TA二次输出电流的间断角可以确定是否发生了过流故障,利用TA饱和时每半周期从过零点到饱和点间的有效数据可以计算故障方向及故障电流幅值。这使得只需要安装测量TA就可以实现故障检测,在保证测量精度的前提下大大降低了投资,对配电自动化特别是馈线自动化有着重要的意义。虽然本文提出的算法计算量较大,但国内外大多数RTU、FTU已使用了DSP技术,且故障检测对实时性的要求不像保护那么严格,因此具有实用性。

FAULT CURRENT DETECTION METHOD USING MEASUREMENT CURRENT TRANSFORMER FOR DISTRIBUTION AUTOMATION

Xue Yongduan¹, Xu Bingyin², Feng Zuren¹

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(2. Kehui Electric Co Ltd, Zibo 255031, China)

Abstract: Fault detection and isolation are key functions in distribution automation. A new fault detection and calculation algorithm using output data got from measurement current transformer is presented. The fault is detected by measuring the interruption angle of secondary output waveform of current transformer. The fault current amplitude and direction are determined using waveform samples before current transformer saturation in each half cycle. The fault current amplitude is calculated using least square error method, and its direction is calculated according to the relationship between superimposed components of voltage and current. Test results of a prototype device proved the proposed algorithm.

Keywords: distribution automation; fault detection; fault information; measurement current transformer; saturation

参考文献

- 1 Distribution Automation IEEE Tutorial Course, 1988
- 2 徐丙垠 (Xu Bingyin). 配电自动化远方终端技术 (Distribution Automation RTU). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1999, 23(5): 41~44
- 3 徐丙垠, 薛永端, 赵健民 (Xu Bingyin, Xue Yongduan, Zhao Jianmin). 配电网馈线自动化系统远方终端的故障检测 (Fault Detection of Distribution FTU). 供用电 (Distribution & Utilization), 1999, 16(3): 9~12
- 4 罗姗姗, 贺家李, 王荣琴 (Luo Shanshan, He Jiali, Wang Rongqin). 母线保护中电流互感器饱和和检测新判据 (A New Criterion of Detection CT Saturation). 电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the CSU-EPSSA), 1996, 8(3): 29~35
- 5 王毅非 (Wang Yifei). 最小二乘算法的研究与改进 (Study and Improvement of Least Squares Algorithm). 继电器 (Relay), 2000, 18(3): 5~8
- 6 周大敏, 龙燕 (Zhou Dam in, Long Yan). 一种不受衰减非周期分量影响的最小二乘滤波算法 (An Efficient Method to Eliminate the Effects of Decaying DC Component on the Least Square Algorithm). 电网技术 (Power System Technology), 1999, 23(3): 31~33
- 7 Distribution Automation Handbook USA: S & C Corporation, 1996

薛永端, 男, 博士研究生, 研究方向为智能技术在电力系统中的应用及电力系统故障检测。

徐丙垠, 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统故障检测、配电网自动化。

冯祖仁, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为控制理论、智能技术在电力系统中的应用。