

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180856

# 基于 TDFT 非同步采样谐波测量的小电流接地故障 信号处理方法

张建东<sup>1</sup>, 冯小明<sup>2</sup>, 吴国平<sup>2</sup>, 施磊<sup>3</sup>, 薛蕙<sup>4</sup>

(1. 青岛港国际股份有限公司, 山东 青岛 266011; 2. 北京博利杰电气有限公司, 北京 100083;  
3. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085; 4. 中国农业大学, 北京 100083)

**摘要:** 为解决 10 kV 配网线路高阻故障较多、间歇性接地故障较多、电弧不稳定、配电网网架结构复杂、分支线复杂、负荷随机分布等现象造成的配电网系统接地故障判别、选线、定位监测困难, 采用基于 TDFT 非同步采样谐波测量算法的小电流接地判定算法进行故障判断、定位和隔离接地故障。站所终端 DTU 在硬件上采用 ADSP-BF607 作为主处理芯片, 其具备 DSP 和 ARM 双处理架构, 具有处理故障数据速度快、精度高、录波性能好等优势。基于 TDFT 非同步采样谐波测量算法, 得出首半波小电流接地判定方法。为有效判断开关合闸瞬间的涌流, DTU 采用离散傅立叶变换结果, 通过加权算法变换实现抑制频谱泄漏误差。对传统算法、加窗算法和 TDFT 非同步采样谐波测量算法进行了比较分析。实验结果表明, 基于 TDFT 非同步采样谐波测量的涌流和小电流接地故障算法设计在 10 kV 配网系统的小电流接地、隔离接地故障方面准确可靠。

**关键词:** 站所终端; TDFT 非同步采样; 涌流; 小电流接地故障; 谐波

## Signal processing method of small current grounding fault based on TDFT non synchronous sampling harmonic measurement

ZHANG Jiandong<sup>1</sup>, FENG Xiaoming<sup>2</sup>, WU Guoping<sup>2</sup>, SHI Lei<sup>3</sup>, XUE Hui<sup>4</sup>

(1. Qingdao Port International Co., Ltd., Qingdao 266011, China; 2. Beijing Bolijie Electric Co., Ltd., Beijing 100083, China;  
3. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China; 4. China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to solve the difficulties in identifying, selecting and locating grounding faults caused by the phenomena of high resistance faults, intermittent grounding faults, arc instability, complex structure of distribution network, complex branch lines and random load distribution, the non-synchronous sampling harmonic measurement algorithm based on TDFT is adopted. The algorithm of current grounding judgement is used to distinguish, locate, and isolate grounding faults. The terminal DTU of station adopts ADSP-BF607 as the main processing chip in hardware. It has dual processing architecture of DSP and ARM, and owns the advantages of fast processing fault data, high accuracy and good recording performance. Based on the TDFT non synchronous sampling harmonic measurement algorithm, the first half wave small current grounding decision method is obtained. In order to effectively judge the inrush current at the moment of switch closing, the DTU adopts the results of Discrete Fourier Transform (DFT) and restrains the spectrum leakage error by weighted algorithm transformation. The traditional algorithm, windowing algorithm and TDFT asynchronous sampling harmonic measurement algorithm are compared and analyzed. The experimental results show that the design of inrush current and small current grounding fault algorithm based on TDFT asynchronous sampling harmonic measurement is accurate and reliable in the aspects of small current grounding and isolation grounding fault of 10 kV distribution network system.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Beijing Electric Power Company (No. 52020116000F) and National Natural Science Foundation of China (No. 51477173).

**Key words:** substation terminal; TDFT asynchronous sampling; inrush current; small current grounding; harmonics

## 0 引言

10 kV 配网自动化现场的小电流接地和非有效

接地类型主要有中性点不接地、消弧线圈接地等形式。小电流接地系统的供电优势为减小供电中断次数, 提高配电网供电可靠性。由于有消弧线圈作为补偿, 发生的故障会自动熄弧, 实现配网的自愈处理。但小电流系统选线定位存在着以下困难: 接地电流较小, 监测和测量有困难; 硬件线路上存在着

基金项目: 国网北京市电力公司科技项目资助 (52020116000F); 国家自然科学基金项目资助 (51477173)

消弧线圈补偿；线路上高阻故障较多，监测困难；间歇性接地故障较多，电弧不稳定；我国配电网架结构复杂，分支线复杂，负荷随机分布，在许多地方和空间储存在架空和电缆混合排布共存的现象<sup>[1-2]</sup>。

针对上述故障特点和困难，小电流接地主要有主动式和被动式测量两种。主动式可通过利用专用设备改变一次系统运行状态，产生较大的工频附加电流用于定位故障信息。主动式还可以通过使用特殊的信号注入设备向系统中施加电流信号用于选线和定位<sup>[3]</sup>。本文为避免上述主动式需单独增加硬件设备，减少硬件投资，而采用被动式测量、定位和选线。

在判断接地故障方面，小电流接地故障判断，常用的方法为首半波法小电流故障判断算法，需对零序电压、零序电流、无功功率方向进行判断进而确定区内和区外故障<sup>[4]</sup>。首半波法软件算法中需对谐波进行计算和处理。为加快软件计算时间、提高精度以及解决快速傅里叶(FFT 变换)为软件带来的频谱泄露和栅栏效应影响谐波频率、幅值、相位误差，加窗 FFT 插值算法在终端小电流故障判断应用中大量使用<sup>[5-6]</sup>。配电网终端软件中经常使用的加窗处理如 Hanning 窗、Blackman 窗、Blackman-Harris 窗、Nuttall 窗、Rife-Vincent 窗和由上述衍生出来的数学组合窗函数处理。由于上述窗函数插值处理，需要软件中费时和运算量大的求模处理。为进一步提高软件可操作性和实现性，节省运算时间，并提高运算精度，本文推导出了基于离散傅立叶变换结果通过加权变换实现抑制频谱泄漏误差的 TDFT 非同步采样谐波算法。TDFT 插值方法在算法的实现过程中不需要考虑软件变量长度的限制，该插值方法比传统的加窗插值方法更具有软件可实现性和高精度特点<sup>[7]</sup>。10 kV 配网自动化现场存在由于雷击和开关操作会引起电压谐波和涌流，所以在软件中需要对模拟量采集电压和电流谐波进行测量和判断，以正确判定小电流接地故障<sup>[8]</sup>。

## 1 硬件设计

本文基于 TDFT 非同步采样谐波测量的站所终端 DTU 是基于 Blackfin 嵌入式操作系统、DSP 数字信号处理技术和网络技术的一种集遥测、遥信、遥控、故障检测、通信管理等功能于一体的新一代微型配网自动化远方终端。其适用于开闭站、分界室、配电室、箱变和开闭器等多回路集中监控应用场合。终端可通过光纤、GPRS 等信道与配网自动化系统的子站、主站配合实现对配电线路的运行状态监控、故障识别和隔离、自动恢复供电等自动

化功能。

图1为站所终端DTU硬件框图。站所终端采用ADSP-BF607作为计算和判断的CPU，微芯MCP3914作为处理计算测量核心<sup>[9]</sup>。主CPU采用ADI公司的ADSP-BF607作为主处理芯片，其采用DSP和ARM双处理架构，DSP负责数据和采样算法处理，ARM负责数据管理和通信处理功能。

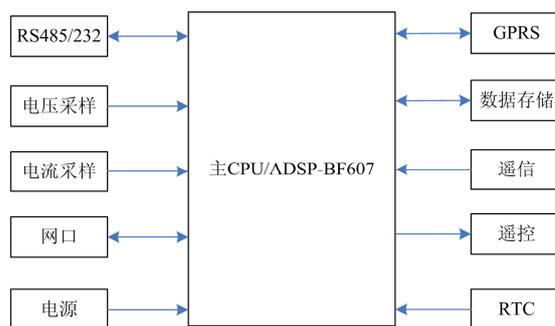


图1 站所终端 DTU 硬件组成图

Fig. 1 Hardware structure diagram of terminal DTU

配电站所终端DTU站所终端DTU采用19英寸标准机箱，结构设计紧凑、小巧，采用插拔式结构，便于安装与拆卸。装置运行状态有信号灯指示，可在装置外进行监视，并带有液晶显示屏，实时监控现场数据，方便现场调试。终端可配置开入量 $16 \times 4$ 组，共64个，可用于高压、低压开关的状态检测。开出量 $12 \times 2$ 组，共24个，可用于高压、低压开关的合分控制或电容器的投切控制。电压、电流模拟测量单元可配置4组中压测量单元模块。每组单元模块可以测4路母线的A、B、C、零序电压、4路开关的4相A、B、C、零序电流，即 $16 \times 4$ 组模拟量电流值。遥信、遥测、遥控功能模块独立配置、支持热拔插，能够根据需求方便、灵活地进行容量扩充。具有4个可复用的RS-232/485串口，2个以太网口，1个GPRS接口。支持后备电源接入，测试装置电源能同时接纳交流、蓄电池直流供电，并且能自动切换。装置同时对电源有监视功能，自维护管理功能。面板具有电源、运行、装置异常告警等指示灯。终端支持模块热插拔功能，遥信板、遥控板的热插拔不会引起误动。具有系统自诊断、掉电数据保存功能等。终端还可实现固有参数的当地和远方调阅和配置功能，包括零漂、变化阈值、重过载报警限值、短路及接地动作参数。

## 2 软件设计

基于 TDFT 的电力系统非同步采样算法中谐波测量是涌流和首半波小电流接地算法的基础。谐波

是电能质量监测的重要指标。随着电力系统的发展,一方面,大量电力电子装置的应用使得电力系统的谐波污染越来越严重。另一方面,站所终端、馈线终端的测量对谐波越来越敏感。因此谐波的监测和控制越来越引起电力产品研发者的注意<sup>[10]</sup>。

## 2.1 基于 TDFT 电力系统非同步采样原理

谐波测量方法可以根据采样方式分为两大类:同步采样和非同步采样。同步采样方式是目前常用的谐波测量方法。同步采样利用硬件锁相环来确保整数倍周期采样。但是同步采样方法需要硬件锁相环节,从而增加了设备的体积和成本。另外如果采样信号含有间谐波,利用硬件锁相环也无法保证整数倍周期采样,从而给谐波测量带来误差<sup>[11]</sup>。

设定信号  $x(t) = A_m e^{j\omega_m t + \theta_m}$ , 设置采样时间间隔为  $T$ , 经过傅里叶代换变为

$$X_m(\omega) = 2\pi A_m \frac{\sin(\frac{\omega - \omega_m}{2} T)}{\omega - \omega_m} e^{j\theta_m - j\frac{\omega - \omega_m}{2} T} \quad (1)$$

离散变换后代式为

$$X(n) = X(n\Delta\omega) = A_m N \frac{\sin((n-k)\pi)}{(n-k)2\pi} e^{j\theta_m} e^{-j(n-k)\pi} \quad (2)$$

$(n = 1, 2, \dots, N/2)$

式中:  $\Delta\omega = \frac{2\pi}{T}$ ;  $k = \frac{2\pi\omega_m}{T}$ ,  $k$  取整数, 离散变换后整理得

$$\begin{cases} X(n) = \frac{A_m N \exp(j\theta_m)}{2} & n = k \\ X(n) = 0 & n \neq k \end{cases} \quad (3)$$

式(3)的离散结果为  $n = k$  的谱线。

设  $k = k_1 + r$ ,  $k_1$  取整,  $0 < r < 1$ , 离散变换后为

$$X(n) = A_m N \frac{\sin((n-k_1)\pi - r\pi)}{2((n-k_1)\pi - r\pi)} e^{j\theta_m - j\pi(n-k_1-r)} \quad (4)$$

即

$$X(n) = \frac{M}{L} e^{j(\theta_m + r\pi)} \quad (5)$$

式中:  $L = n - k_1 - r$ ;  $M = \frac{A_m N \sin(r\pi)}{2\pi}$ 。

从式(5)中可以看出,如果  $n$  不为整数,其频谱会产生泄露,结果相互影响,使得频谱泄露误差相互影响<sup>[12]</sup>。可通过变换傅立叶(Transformed Discrete Fourier Transform, TDFT)来防止频谱泄露的产生。

将变换结果做调整,对每 3 个周波做变换产生一个新的序列,即

$$X_1(n) = X(n) - \frac{X(n-1) + X(n+1)}{2} \quad (6)$$

将式(5)和式(6)变换迭代,得到

$$X_1(n) = \frac{M}{L} e^{j(\theta_m + r\pi)} - \frac{1}{2} \left( \frac{M}{L-1} e^{j(\theta_m + r\pi)} + \frac{M}{L+1} e^{j(\theta_m + r\pi)} \right) = -\frac{M}{L(L^2-1)} e^{j(\theta_m + r\pi)} \quad (7)$$

从式(5)和式(7)中可以看出在频谱频域内衰减速度是  $\frac{1}{|L(L^2-1)|}$ , 其比  $X_1(n)$  的衰减速度  $\frac{1}{L}$  更快。

从上述来看其防止频谱泄露效果更好。

离散变换结果的幅值、频率、相角可由上述变换结果计算得出,也可得出相应的两条谱线  $X_1(K_1)$  和  $X_1(K_1+1)$  的比值  $\alpha$ 。

$$a = \left| \frac{X_1(k_1)}{X_1(k_1+1)} \right| = \left| \frac{M/(-r)(r^2-1)}{M/(1-r)((1-r)^2-1)} \right| = \frac{2-r}{1+r} \quad (8)$$

$$r = \frac{2-a}{1+a} \quad (9)$$

经上述迭代计算后频率、幅值、相角分别为

$$f_m = \frac{(k_1-1)+r}{T} \quad (10)$$

$$A_m = \left| \frac{2\pi M}{N \sin(r\pi)} \right| = \left| \frac{2\pi X_1(k_1) r (1-r^2)}{N \sin(r\pi)} \right| \quad (11)$$

$$\theta_m = \text{phase}(X_1(k_1)) - \pi r \quad (12)$$

本文提出基于 TDFT 的非同步采样谐波测量方法由于利用 TDFT 插值来限制非同步采样误差,从而实现谐波参数的精确测量。由于是从软件方面采取对的措施,从硬件投资上节约了成本投资,减少了硬件锁相环的设计和添加,还可相应地提高谐波的高分辨率测量,为后续的小电流接地故障判别提供软件算法支持。TDFT 插值方法还可在算法的实现过程中不需要考虑软件变量长度的限制,相较而言,TDFT 插值方法比传统的加窗插值方法更具有软件实现性和高精度<sup>[13-15]</sup>。

设定系统额定频率为 50 Hz, 每秒采样点数为 50N, 这里的  $N$  代表每周期的采样点数。被测信号为  $x(n)(n = 1, 2, \dots, 2N)$ , 基于 TDFT 的非同步采样谐波测量方法的实现步骤如下。

$$X(1): X(n) = \text{FFT}(x(n)), n = 1, 2, \dots, 2N$$

利用式(6)得到  $X_1(n)$ 。

计算谐波的幅值、频率和相角。

For  $n = 2:1:N$

① 确定  $X_1(n)$  是否为噪声含量, 设置阈值  $C = m |X_1(3)|$ , 这里  $m$  的取值根据实际需要调整。这里

选取  $m = 3\%$ 。

If  $|X_1(n)| < C$ ，则这是噪声分量， $n = n + 1$ ，回到①，否则②。

② 确定  $X_1(n)$  是否为谐波分量，如  $|X_1(n)| > |X_1(n-1)|$  并且  $|X_1(n)| > |X_1(n+1)|$ ，则  $X_1(n)$  为谐波分量，到③，否则  $n = n + 1$ ，到①。

③ 确定  $k_1$  的值

If  $|X_1(n-1)| < |X_1(n+1)|$

$k_1 = n$

else

$k_1 = n - 1$

end

④ 利用式(8)一式(12)计算谐波分量的幅值、频率和相角。

## 2.2 基于 TDFT 电力系统非同步采样谐波误差分析

基于 TDFT 电力系统非同步采样谐波误差分析采用的仿真软件是 Matlab2016，采样频率是 3 200 Hz，额定频率是 50 Hz。该部分包含 4 个实验。第一部分：非同步采样情况下谐波测量实验。第二部分：非同步采样情况下谐波和间谐波测量实验。第三部分：在频率动态变化时谐波测量实验。第四部分：噪声环境中的谐波测量实验。

1) 非同步采样情况下谐波测量实验

被测信号为

$$s = A_1 \cos(\omega_0 t + 60^\circ) + A_2 \cos(3\omega_0 t + 45^\circ) + A_3 \cos(5\omega_0 t + 50^\circ) + A_4 \cos(7\omega_0 t + 20^\circ)$$

式中： $\omega_0 = 2\pi f$ ， $f = 50.2 \text{ Hz}$ ； $A_1 = 1.00$ ； $A_2 = 0.10$ ； $A_3 = 0.05$ ； $A_4 = 0.05$ 。

传统 DFT 插值方法，加窗 DFT 插值方法(Hanning 窗)和 TDFT 插值方法的测量结果如表 1 所示。

表 1 谐波测量结果比较

Table 1 Comparison of harmonic measurement results

谐波次数	1	3	5	7
幅值	1.000	0.100	0.050	0.050
DFT1	0.008	0.099	0.049	0.049
DFT2	1.008	0.100	0.050	0.050
TDFT	1.000	0.100	0.050	0.050
相角	60°	45°	50°	20°
DFT1	217.9°	41.7°	44.3°	15.1°
DFT2	61.4°	44.9°	49.9°	20.9°
TDFT	60.0°	45.1°	49.8°	20.2°
频率	50.2/Hz	$f/f_1$	$f/f_1$	$f/f_1$
DFT1	49.80	3.03	5.05	7.07
DFT2	50.00	3.01	5.02	7.02
TDFT	50.20	3.00	5.00	7.00

由表 1 可以看出，在非同步采样情况下，传统 DFT 方法(DFT1)的误差比较大，加窗 DFT 方法(DFT2)的精度比传统 DFT 方法要高，而 TDFT 方法的精度最高。其幅值误差小于 0.1%，相角误差小于 0.2°，而频率测量误差小于 0.01 Hz。

2) 非同步采样情况下谐波和间谐波测量实验  
被测信号同时含有谐波和间谐波，其模型为

$$s = A_1 \cos(\omega_0 t + 60^\circ) + A_2 \cos(3\omega_0 t + 45^\circ) + A_3 \cos(5.4\omega_0 t + 50^\circ) + A_4 \cos(7.3\omega_0 t + 20^\circ)$$

式中： $\omega_0 = 2\pi f$ ， $f = 50.2 \text{ Hz}$ ； $A_1 = 1.00$ ； $A_2 = 0.10$ ； $A_3 = 0.05$ ； $A_4 = 0.05$ 。

传统 DFT 插值方法，加窗 DFT 插值方法(Hanning 窗)和 TDFT 插值方法的测量结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出，在非同步采样情况下，传统 DFT 方法的误差比较大，加窗 DFT 方法的精度比传统 DFT 方法要高，而 TDFT 方法的精度最高。其幅值误差小于 0.1%，相角误差小于 0.2°，而频率测量误差小于 0.01 Hz。

表 2 谐波测量结果比较

Table 2 Comparison of harmonic measurement results

谐波次数	1	3	5.4	7.3
幅值	1.000	0.100	0.050	0.050
DFT1	0.008	0.099	0.049	0.049
DFT2	1.008	0.100	0.050	0.050
TDFT	1.000	0.100	0.050	0.050
相角	60°	45°	50°	20°
DFT1	217.9°	41.7°	44.3°	15.1°
DFT2	61.4°	44.9°	49.9°	20.9°
TDFT	60.0°	45.1°	49.8°	20.2°
频率	50.2/Hz	$f/f_1$	$f/f_1$	$f/f_1$
DFT1	49.80	3.03	5.05	7.07
DFT2	50.00	3.01	5.02	7.02
TDFT	50.20	3.00	5.00	7.00

3) 在频率动态变化时谐波测量实验

该实验仿真了电力系统频率动态变化时的谐波和间谐波测量。采样时间长度是 0.8 s，被测信号的模型为

$$s = A_1 \cos(\omega_0 t + 60^\circ) + A_2 \cos(3\omega_0 t + 45^\circ) + A_3 \cos(5\omega_0 t + 50^\circ) + A_4 \cos(7\omega_0 t + 20^\circ)$$

其中： $\omega_0 = 2\pi f$ ， $f$  以指数衰减从 50.09 Hz 变化到 49.99 Hz，如图 2 所示； $A_1 = 1.00$ ； $A_2 = 0.10$ ； $A_3 = 0.05$ ； $A_4 = 0.05$ 。

图 3 和图 4 分别比较了利用传统 DFT 方法，加窗 DFT 方法和 TDFT 方法的测量结果。图 3 和图 4 显示 TDFT 方法的精度最高<sup>[16]</sup>。

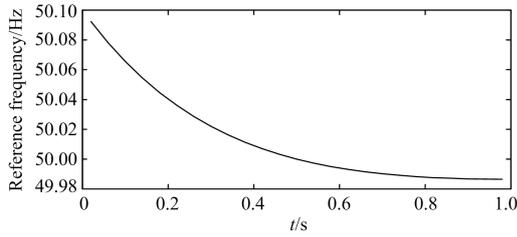
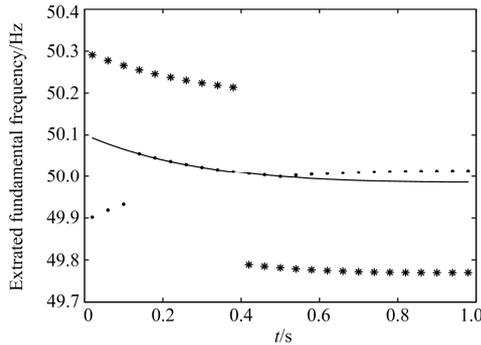


图 2 频率变化波形

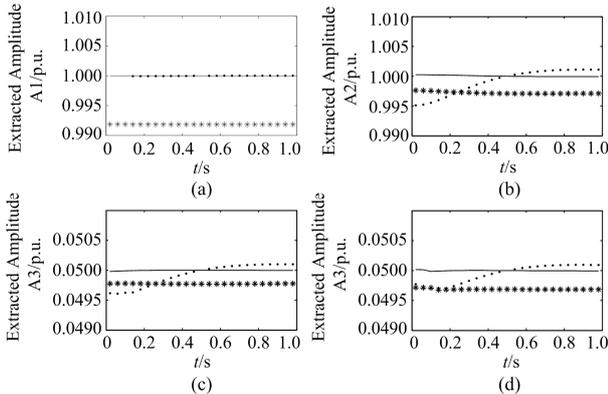
Fig. 2 Frequency change waveform



注：“•”传统 DFT 方法，“\*”加窗 DFT 方法，“—”TDFT 方法

图 3 基频检测结果

Fig. 3 Basic frequency detection results



注：“•”传统 DFT 方法，“\*”加窗 DFT 方法，“—”TDFT 方法

图 4 幅值检测结果

Fig. 4 Amplitude detection results

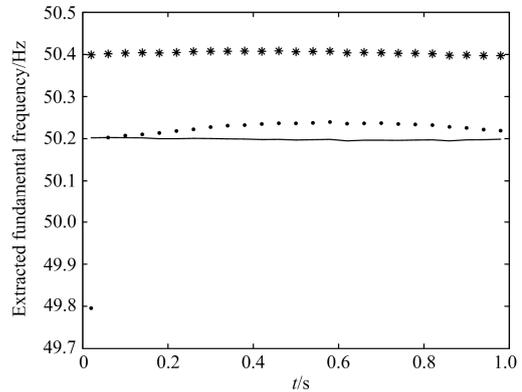
4) 噪声环境中的检测结果

采样时间长度为 0.8 s, 信号模型为

$$s = A_1 \cos(\omega_0 t + 60^\circ) + A_2 \cos(3\omega_0 t + 45^\circ) + A_3 \cos(5.4\omega_0 t + 50^\circ) + A_4 \cos(7.3\omega_0 t + 20^\circ) + w(t)$$

式中:  $\omega_0 = 2\pi f, f = 50.2 \text{ Hz}$ ;  $w(t)$  为高斯白噪声;  $SNR = 70 \text{ dB}$ ;  $A_1 = 1.00; A_2 = 0.10; A_3 = 0.05; A_4 = 0.05$ 。

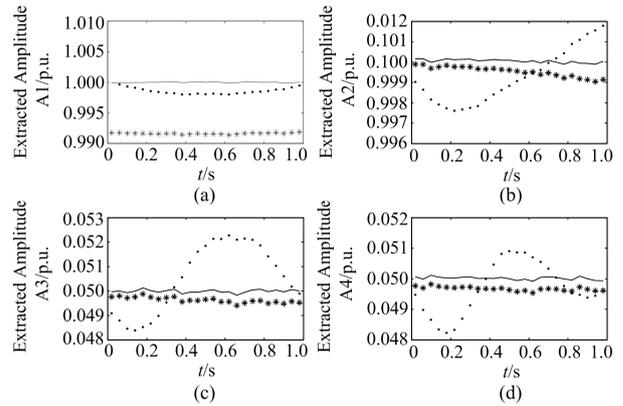
图 5 和图 6 分别比较了利用传统 DFT 方法, 加窗 DFT 方法和 TDFT 方法的测量结果。图 5 和图 6 显示 TDFT 方法的精度最高。



注：“•”传统 DFT 插值，“\*”加窗 DFT 插值，“—”TDFT 方法

图 5 基波频率测量

Fig. 5 Fundamental frequency measurement



注：“•”传统 DFT 插值，“\*”加窗 DFT 插值，“—”TDFT 方法

图 6 幅值测量

Fig. 6 Amplitude measurement

对上述软件进行仿真和软件误差仿真测试后, 对站所终端 DTU 的算法进行软件编程, 对终端进行模拟量谐波误差测试。从表 3 可以看出, 终端电压、电流分别施加 5 次和 7 次谐波时, 电压误差实测值最大为 0.28%, 电流误差实测值最大为 0.28%, 均小于允许值  $\pm 1\%$ 。

表 3 站所终端 DTU 模拟量谐波误差测试

Table 3 Result for the testing of harmonic error of the terminal DTU

谐波	允许误差/%	实测值/%		
		电压	电流	
5 次	0° 施加 20%谐波	±1	0.13%	0.18%
	90° 施加 20%谐波	±1	0.14%	0.20%
7 次	0° 施加 20%谐波	±1	0.27%	0.28%
	90° 施加 20%谐波	±1	0.28%	0.28%

### 2.3 基于 TDFT 电力系统非同步采样的小电流接地故障软件设计

故障时暂态电流为稳态电容电流的几倍到十几倍，远大于稳态电容电流。暂态电流最大瞬时值与故障时电压相角有关，一般故障发生在电压最大值附近。暂态电流不受消弧线圈影响设置。发生故障时，故障线路的电流幅值最大，故障相的电流极性、方向与非故障相线路相反。故障点前后的电流方向不同，波形差别很大。

从软件算法考量，暂态的零序电流幅值故障相最大。暂态电流的极性与其它非故障相相差 180°。所有出线电流极性相同为母线接地故障。暂态故障定位和选线，非故障相功率为负，故障相线路为正。故障点上游功率方向为正，故障点下游功率为负。对故障相相邻开关暂态零模电流而言，故障点同侧零模电流方向相同，波形差异较小，故障点两侧零模电流方向不同，波形差异较大<sup>[17]</sup>。

图 7 为站所终端 DTU 小电流接地流程图。软件算法判断零序电压和零序电流的大小和方向，如为接地故障站所终端 DTU 录波存储，并上传主站遥信和选择动作出口，本地动作隔离故障。涌流算法中处理涌流主要考虑两个方面：一是没有达到故障延时时间，谐波限值达到同时谐波延时也达到。

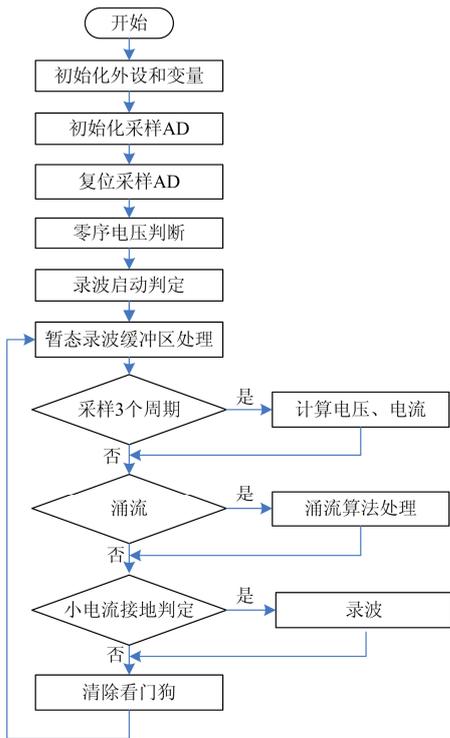


图 7 站所终端 DTU 故障暂态选线与定位软件流程图  
Fig. 7 Software flow chart of transient fault location and location for terminal DTU fault

在谐波延时时间内需要谐波限值始终达到定值才可，此时不报故障，故障灯不亮。二是没有达到故障延时时间，谐波限值达到同时谐波延时没有达到，此时开始判断故障。如果故障定值和延时均已达到则上报故障，故障灯亮。站所终端 DTU 根据故障电流的起始点实现故障数据的自同步<sup>[18-20]</sup>。

定位主站接收选线终端故障信息，根据故障波形相似性和极性关系完成故障定位，在此基础上实现故障隔离和恢复供电<sup>[21]</sup>。终端保存故障信息记录，提供故障查询和统计、事故故障预演、重演等故障管理功能<sup>[22]</sup>。

### 3 实验结果与分析

为验证上述软件算法暂态定位故障准确性，对站所终端进行挂网运行。图 8 所示为 8 条线路故障时录波数据。可以看出 611 湖内线为故障相，由于配电网内所辖线路的零序电压相同，从零序电流看湖内为界内故障，应动作出口。发生故障时刻零序电压与零序电流的无功功率方向为负，其余 7 条线路无功功率方向为正，动作出口正确。

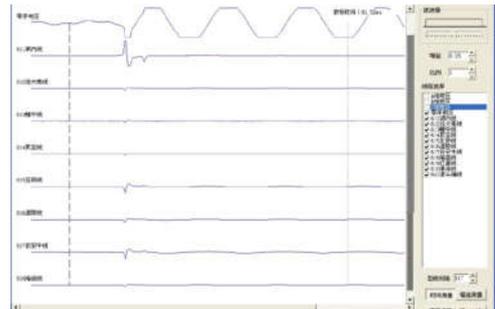


图 8 故障线路与非故障线路站所终端 DTU 录波图  
Fig. 8 DTU chart of fault terminal and non fault line station terminal

图 9 为站所终端 DTU 现场动作处理录波波形，其所在配网系统为消弧线圈接地类型。从图中可以看出零序电流在前 1/4 周波峰值一次值为 38.698 A，现场配置零序 CT 变比为 20:1。其动作条件满足站所终端软件暂态定位故障动作条件，动作出口保护正确。

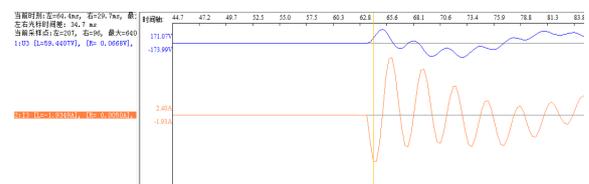


图 9 系统消弧线圈区内故障时站所终端 DTU 录波图  
Fig. 9 Oscillograph of the Petersen coil internal fault for the terminal DTU

## 4 结论

由上述分析可得出以下两个结论:

1) 站所终端 DTU 采用的 TDFT 非同步采样谐波测量方法相较于窗 DFT 方法和 TDFT 方法而言不需要考虑加窗算法带来的工程软件中的实现困难, 软件实现简单、快速, 其测量结果符合终端检测标准, 测试精度高。

2) 配电网 10 kV 站所终端 DTU 实验结果表明, 采用基于 TDFT 非同步采样谐波计算的小电流接地故障判断所得结果, 能准确判断涌流和区间内故障、区外故障, 实现了小电流接地故障的准确判断和故障隔离。

## 参考文献

- [1] 庞浩, 李东霞, 俎云霄, 等. 应用 FFT 进行电力系统谐波分析的改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 49-54.  
PANG Hao, LI Dongxia, ZU Yunxiao, et al. An improved algorithm for harmonic analysis of power system using FFT technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 49-54.
- [2] RAJARAMAN P, SUNDARAVARADAN N A, MALLIKARJUNA B, et al. Robust fault analysis in transmission lines using synchrophasor measurements[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 108-110. DOI: 10.1186/s41601-018-0082-4.
- [3] 周俊, 王小海, 祈才君. 基于 Blackman 窗函数的插值 FFT 在电网谐波信号分析中的应用[J]. 浙江大学学报(理学版), 2006, 33(6): 650-653.  
ZHOU Jun, WANG Xiaohai, QI Caijun. Estimation of electrical harmonic parameters by using the interpolated FFT algorithm based on Blackman window[J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2006, 33(6): 650-653.
- [4] 许珉, 张鸿博. 基于 Blackman-harris 窗的加窗 FFT 插值修正算法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2005, 26(4): 99-101.  
XU Min, ZHANG Hongbo. The correction algorithm based on the Blackman-harris windows and interpolated FFT[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2005, 26(4): 99-101.
- [5] 曾博, 唐求, 卿柏元, 等. 基于 Nuttall 自卷积窗的改进 FFT 谱分析方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(7): 59-65.  
ZENG Bo, TANG Qiu, QING Baiyuan, et al. Spectral analysis method based on improved FFT by Nuttall self-convolution window[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7): 59-65.
- [6] 翟瑞森, 英超, 任国臣, 等. 基于 Nuttall 窗的三峰插值谐波算法分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 38-43.  
ZHAI Ruimiao, YING Chao, REN Guochen, et al. An approach for harmonic analysis based on Nuttall window and triple-spectral-line interpolation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 38-43.
- [7] 汪立, 刘翠琳. 一种高精度加窗插值 FFT 谐波分析方法[J]. 陕西电力, 2013, 41(5): 1-4.  
WANG Li, LIU Cuilin. An accurate method for interpolated FFT harmonic analysis based on a new window[J]. Shaanxi Electric Power, 2013, 41(5): 1-4.
- [8] 王玲, 徐柏榆, 盛超, 等. 一种新的余弦组合窗插值 FFT 谐波分析算法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, 47(2): 250-254.  
WANG Ling, XU Baiyu, SHENG Chao, et al. An approach for harmonic analysis based on a new type of cosine combination window interpolation FFT[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2014, 47(2): 250-254.
- [9] 徐柏榆, 王玲, 汪立, 等. 多项 Rife-Vincent 窗插值谐波分析方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, 47(5): 636-641.  
XU Baiyu, WANG Ling, WANG Li, et al. An approach for harmonic analysis based on multi-term Rife-Vincent window interpolation FFT[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2014, 47(5): 636-641.
- [10] 叶景清, 邓辉, 年俊华, 等. 基于矩形卷积窗算法的电子式电流互感器在线校验系统[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(11): 26-30, 35.  
YE Jingqing, DENG Hui, NIAN Junhua, et al. The on-site calibration system for electronic current transformers based on rectangular convolution window algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(11): 26-30, 35.
- [11] 孙鑫, 熊小伏, 杨洋. 基于故障录波信息的输电线路继电保护内部故障在线检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 6-10.  
SUN Xin, XIONG Xiaofu, YANG Yang. On-line detection of internal faults in transmission line relay protection based on fault recording information[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38 (3): 6-10.
- [12] 杨俊伟, 史旺旺. 交流电流直接控制的单相 PWM 整流器非线性控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 114-118.  
YANG Junwei, SHI Wangwang. Nonlinear control strategy for direct AC current control in single-phase PWM rectifier[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 114-118.
- [13] 曹晖, 袁世英, 易珺, 等. 准同步采样法在配电综合测

- 控仪中的应用[J]. 继电器, 2005, 33(17): 45-48.
- CAO Hui, YUAN Shiyong, YI Jun, et al. Quasi-simultaneous sampling method in the distribution of the application of integrated monitor[J]. Relay, 2005, 33(17): 45-48.
- [14] 冷华, 董莹, 李欣然, 等. 配电网运行状态综合评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 53-59.
- LENG Hua, TONG Ying, LI Xinran, et al. Comprehensive evaluation method research of the operation state in distributed network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 53-59.
- [15] 齐郑, 乔丰, 黄哲洙, 等. 基于暂态分量遗传算法的小电流接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 34-39.
- QI Zheng, QIAO Feng, HUANG Zhezhu, et al. Genetic algorithm fault location based on transient component for neutral point non-effective grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 34-39.
- [16] 郑涛, 潘玉美, 郭昆亚, 等. 基于免疫算法的配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 77-83.
- ZHENG Tao, PAN Yumei, GUO Kunya, et al. Fault location of distribution network based on immune algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 77-83.
- [17] 朱国防, 高厚磊, 徐丙垠, 等. 配电网电源侧故障下大范围负荷转移优化策略及实现方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 73-77.
- ZHU Guofang, GAO Houlei, XU Bingyin, et al. Wide range of load transfer optimization strategy and its implementation method for the busbar voltage loss in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 73-77.
- [18] ZHANG Junmin, LIU Kaipei, WANG Li, et al. A rapid algorithm for harmonic analysis based on four-spectrum-line interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 139-145.
- [19] 李会新, 王兴国, 谢俊, 等. 一种基于虚拟电流制动量的电流差动保护[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 75-79.
- LI Huixin, WANG Xingguo, XIE Jun, et al. A transmission line current differential protection based on virtual brake current[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 75-79.
- [20] 齐郑, 高玉华, 孙海新, 等. 基于电压-时间型重合器的配电网单相接地故障自动隔离技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 32-36.
- QI Zheng, GAO Yuhua, SUN Haixin, et al. Research on automatic isolation technology of single-phase grounding fault in distribution network based on voltage time reclose[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 32-36.
- [21] 唐永红, 郑晓雨, 马进. 基于 RTDS 的负荷模型验证及分类研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 37-41.
- TANG Yonghong, ZHENG Xiaoyu, MA Jin. Verification and classification of load models based on RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 37-41.
- [22] 李鹏, 钟著辉, 陈力, 等. 具备故障定位功能防反充电 PT 并列装置的研制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 117-121.
- LI Peng, ZHONG Zhuhui, CHEN Li, et al. Development of a PT parallel device with fault location function used to prevent reverse charge[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 117-121.

收稿日期: 2018-07-11; 修回日期: 2018-11-19

作者简介:

张建东(1962—), 男, 硕士, 经济师, 主要从事配电网自动化等研究;

冯小明(1975—), 男, 博士, 主要从事电力系统自动化、电能质量分析和检测、电力系统配电自动化的应用研究;

吴国平(1979—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统自动化、电能质量、电力系统配电自动化等研究。E-mail: 279445767@qq.com

(编辑 张爱琴)