

# 一种利用 LabVIEW 滤除衰减直流分量的改进算法

厉伟, 陈刚

(沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

**摘要:** 在线检测实现了对运行设备特征量数据的实时监测, 并对数据进行分析处理, 从而预测设备运行状况。但是, 电力系统发生故障时产生的谐波和衰减分量的影响会大大增加监测数据的误差。为了解决全波傅氏算法在处理含衰减直流分量信号时产生较大误差的弊端, 提出一种改进算法。首先, 通过增加两个采样点计算得到周期分量外的特征参数。然后, 进行两次傅立叶变换, 求取基波和谐波幅值和相位, 通过图形化编程语言 LabVIEW 仿真, 证明此方法具有较高的精度, 较快的计算速度, 优于传统算法, 特别是对基波分量效果更为突出。利用 LabVIEW 做上位机更利于工程实践中功能的扩展。

**关键词:** 在线检测; 谐波; 衰减直流分量; 全波傅氏算法; 改进算法; LabVIEW

## An improved algorithm to filter delaying DC component based on LabVIEW

LI Wei, CHEN Gang

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** Online testing not only realizes the real-time characteristic data, but also analyzes the data and forecasts operation status. But, in the power system, influence of harmonic and attenuation component will greatly increase error. In order to solve the greater error caused by decaying DC component in full-wave Fourier algorithm, an improved algorithm is proposed. First, characteristic parameters are calculated in addition to periodic component by adding two sampling points. Then, we use Fourier transform twice so that we can get the amplitudes and phases of fundamental and harmonic. Through a simulation by LabVIEW, it is proved that this method has higher accuracy, faster calculation speed and is superior to the traditional algorithm, especially to the fundamental component. Using LabVIEW is conducive to extended function.

**Key words:** online testing; harmonic; decaying DC component; full-wave Fourier algorithm; improved algorithm; LabVIEW

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)11-0007-06

## 0 引言

电气设备绝缘状况直接影响到电网运行的安全性, 随着电力生产的发展和电压等级的提高, 传统停电状态下的绝缘测试周期长, 具有一定的盲目性, 而且试验结果不可靠, 因而逐渐被在线检测所取代。

在线检测系统中, 继电保护装置通常结合全波傅氏算法滤除直流分量和基波整数倍谐波分量来提高测量精度, 但电力系统发生故障时产生的指数函数型直流衰减分量对于系统诊断报警的正确动作起着不可忽视的作用<sup>[1]</sup>。目前, 对于弥补衰减直流分量的影响已有一些有效的方法<sup>[2-9]</sup>, 半波傅氏变换因

只需半个周期的数据窗, 并且可以很好地提取奇次谐波的优点而得到广泛应用, 然而对于奇偶次谐波同时存在的情况, 就很难保证半波傅氏变换的精度<sup>[10]</sup>; 全波傅氏算法不仅可以完全滤除整次谐波分量和恒定直流分量, 而且具有稳定性好的特点。但是, 全波傅氏算法是以周期信号为基础推导出来的, 如采样信号中存在衰减直流分量, 计算精度仍然会受到很大的影响。因此, 提出对全波傅氏算法的改进以削弱衰减直流分量对测量精度的影响。

## 1 全波傅立叶算法及误差分析

假定被采样信号为

$$i(t) = I_d + I_0 e^{-t/\tau} + \sum_{n=1}^M I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (1)$$

式中:  $I_d$  为恒定直流分量;  $I_0$  为直流衰减分量初始

值;  $\tau$  为时间常数;  $I_n$  为  $n$  次谐波幅值;  $\varphi_n$  为  $n$  次谐波初相角。

则由式 (1) 可以得出各次谐波实部和虚部在时域上的关系表达式为

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \cos(n\omega t) dt \quad (2)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \sin(n\omega t) dt \quad (3)$$

式中:  $T$  为基波周期;  $\omega$  为基波角频率。

式 (2)、式 (3) 经离散化可得

$$A_n = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N i(k) \cos(2\pi nk / N) \quad (4)$$

$$B_n = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N i(k) \sin(2\pi nk / N) \quad (5)$$

式中,  $N$  为基波周期采样点数。

$$n\omega t = n \cdot 2\pi f \cdot \frac{T}{N} k = 2\pi nk / N$$

最终可以求得  $n$  次谐波的幅值和初相角为

$$I_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (6)$$

$$\varphi_n = \arctan(B_n / A_n) \quad (7)$$

式 (2) ~ 式 (7) 即为全波傅氏算法的过程, 由于直流衰减分量的存在, 再用此法会产生误差, 如下说明:

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T I_d \cos(n\omega t) dt + \frac{2}{T} \int_0^T I_0 e^{-t/\tau} \cos(n\omega t) dt +$$

$$\frac{2}{T} \int_0^T \sum_{n=1}^M [I_n \sin(n\omega t + \varphi_n)] \cos(n\omega t) dt$$

可见

$$\frac{2}{T} \int_0^T I_d \cos(n\omega t) dt + \frac{2}{T} \int_0^T I_0 e^{-t/\tau} \cos(n\omega t) dt, \text{ 即为}$$

$$\text{误差来源, 记为 } \lambda_a; \frac{2}{T} \int_0^T \sum_{n=1}^M [I_n \sin(n\omega t + \varphi_n)] \cdot$$

$\cos(n\omega t) dt$ , 即为理想谐波实部, 记为  $A$ 。同理可

$$\text{得虚部误差, } \lambda_b = \frac{2}{T} \int_0^T I_d \sin(n\omega t) dt + \frac{2}{T} \int_0^T I_0 e^{-t/\tau} \cdot$$

$\sin(n\omega t) dt$ ;

理想虚部

$$B = \frac{2}{T} \int_0^T \sum_{n=1}^M [I_n \sin(n\omega t + \varphi_n)] \sin(n\omega t) dt。$$

并且有

$$A_n = A + \lambda_a \quad (8)$$

$$B_n = B + \lambda_b \quad (9)$$

由式 (8)、式 (9) 看出: 当采样信号存在直流衰减分量时,  $A_n$  和  $B_n$  包含衰减直流分量产生的  $n$  次谐波实部和虚部的幅值分量  $\lambda_a$  和  $\lambda_b$ , 从而导致全波傅氏算法测量产生较大误差。而且  $I_0$  越大, 引起的测量误差越大, 为了保证测量精度, 必须消除  $\lambda_a$  和  $\lambda_b$  的影响。

## 2 快速算法

### 2.1 非周期分量的求取

模拟量的采样信号转换成离散序列, 计算机才可以处理<sup>[11]</sup>。将式 (1) 离散化后可以得到一个采样序列, 如式 (10) 所示。

$$i(k) = I_d + I_0 e^{-\frac{k\Delta t}{\tau}} + \sum_{n=1}^M I_n \sin\left(\frac{2\pi nk}{N} + \varphi_n\right) \quad (10)$$

式中,  $\Delta t$  为采样时间间隔。令  $R = e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}$ , 在一个周期内求和:

$$\sum_{k=1}^N i(k) = NI_d + I_0 \sum_{k=1}^N R^k \quad (11)$$

然后将采样起始点后移一个采样间隔, 采样点数不变, 求得

$$\sum_{k=2}^{N+1} i(k) = NI_d + I_0 R \sum_{k=1}^N R^k \quad (12)$$

同理引入  $N+2$  个采样点求得

$$\sum_{k=3}^{N+2} i(k) = NI_d + I_0 R^2 \sum_{k=1}^N R^k \quad (13)$$

由式 (11) ~ 式 (13) 可以得到

$$R = \frac{\sum_{k=2}^{N+1} i(k) - \sum_{k=3}^{N+2} i(k)}{\sum_{k=1}^N i(k) - \sum_{k=2}^{N+1} i(k)} \quad (14)$$

$$I_d = \frac{R \sum_{k=1}^N i(k) - \sum_{k=2}^{N+1} i(k)}{N(R-1)} \quad (15)$$

$$I_0 = \frac{[\sum_{k=2}^{N+1} i(k) - NI_d](1-R)}{R(1-R^N)} \quad (16)$$

$$\tau = -\Delta t / \ln R \quad (17)$$

由式 (14) ~ 式 (17) 可以看出, 通过离散序列采样点的后移, 可以得到采样信号的恒定直流分量, 直流衰减分量初始值以及时间常数。

## 2.2 谐波幅值及初相角的求取

将第一个采样点剔除, 在最后补采一个点, 取  $t \in [\Delta t, \Delta t + T]$ , 此时采样序列从 2 到  $N + 2$ , 再对  $i(t)$  进行全周傅立叶变换。可得

$$A'_n = \frac{2}{T} \int_0^T I_d \cos n\omega(t + \Delta t) dt + \frac{2}{T} \int_0^T I_0 e^{-\frac{t+\Delta t}{\tau}} \cos n\omega(t + \Delta t) dt + \frac{2}{T} \int_0^T \left[ \sum_{n=1}^M I_n \sin(n\omega t + n\omega\Delta t + \varphi_n) \right] \cos n\omega(t + \Delta t) dt$$

记

$$\lambda'_a = \frac{2}{T} \int_0^T I_d \cos n\omega(t + \Delta t) dt + \frac{2}{T} \int_0^T I_0 e^{-\frac{t+\Delta t}{\tau}} \cos n\omega(t + \Delta t) dt$$

$$A'_n = A + \lambda'_a \quad (18)$$

同理可得

$$\lambda'_b = \frac{2}{T} \int_0^T I_d \sin n\omega(t + \Delta t) dt + \frac{2}{T} \int_0^T I_0 e^{-\frac{t+\Delta t}{\tau}} \sin n\omega(t + \Delta t) dt$$

$$B'_n = B + \lambda'_b \quad (19)$$

对于信号中的周期分量, 恒定直流分量对其特征参数的提取没有任何影响。在  $[0, T]$  和  $[\Delta t, T + \Delta t]$  内的全周傅立叶变换相同。则

$$\lambda'_a = e^{-\Delta t/\tau} (k_1 \lambda_a - k_2 \lambda_b) \quad (20)$$

$$\lambda'_b = e^{-\Delta t/\tau} (k_2 \lambda_a + k_1 \lambda_b) \quad (21)$$

$$\lambda'_a = (A'_n - A_n) + \lambda_a \quad (22)$$

$$\lambda'_b = (B'_n - B_n) + \lambda_b \quad (23)$$

式 (20)、式 (21) 中:  $k_1 = \cos(n\omega\Delta t)$ ;  $k_2 = \sin(n\omega\Delta t)$ 。

由  $\lambda_a$  和  $\lambda_b$  关系, 经过分部积分, 可得

$$\lambda_b = n\omega\tau\lambda_a \quad (24)$$

$$\lambda_a = \frac{A'_n - A_n}{(k_1 - n\omega\tau k_2)e^{-\Delta t/\tau} - 1} \quad (25)$$

综上所述:  $A = A_n - \lambda_a$ ,  $B = B_n - \lambda_b$ 。

通过分析可以发现, 这种算法仅仅增加了两个采样点, 就完成了对信号特征参数的提取, 增加了两个采样点, 既保留了全波傅氏算法的滤波功能, 又增加了对衰减直流分量的过滤, 消除了  $\lambda_a$  和  $\lambda_b$  的影响。

## 3 LabVIEW 仿真及结果分析

### 3.1 故障信号的产生

假设采集的信号参数如表 1 所示。

表 1 信号参数  
Table 1 Signal parameter

直流 幅值	衰减分量 初始 值	谐波 次数	基 波 幅值	二 次 幅值	三 次 幅值	五 次 幅值
10	30	幅值/ 相位/ (°)	80	150	40	200
	时间 常数/ ms		30	40	36	65

实际应用中结合 NI 数据采集卡完成对信号的采集, 仿真实验中借助 LabVIEW 公式波形模拟信号采集<sup>[12]</sup>。设定采样频率为 5 000 Hz, 基波周期采样点数为 100, 采集 2 个基波周期信号。通过恒定直流分量、衰减直流分量和各次谐波分量波形的叠加得到采集信号。程序框图及信号分别如图 1 (a)、图 1(b)所示。

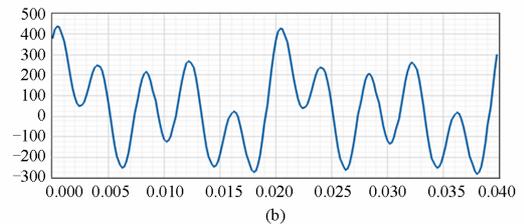
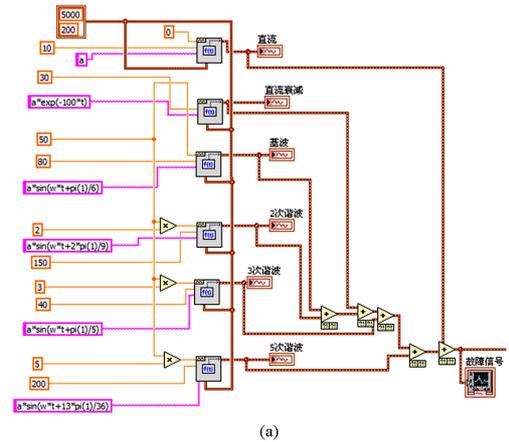


图 1 仿真程序框图及故障信号波形

Fig. 1 Simulation diagram and signal waveform

### 3.2 时间常数及直流衰减初始值的求取

可以把波形看成由多个点组成，根据采样频率的设定，间隔  $\Delta t = 0.0002\text{s}$  采一个点。利用 LabVIEW 中获取波形成分节点和数组子集节点得到  $\Delta t$  整数倍对应的波形幅值（波形离散化），从而

得到  $i(k)$ ，取数组第 1 个点开始，长度为 100 的数据求和。同理分别后移一个和两个采样点求和，依据式 (14) ~ 式 (17) 求得非周期分量参数，程序框图如图 2 所示。

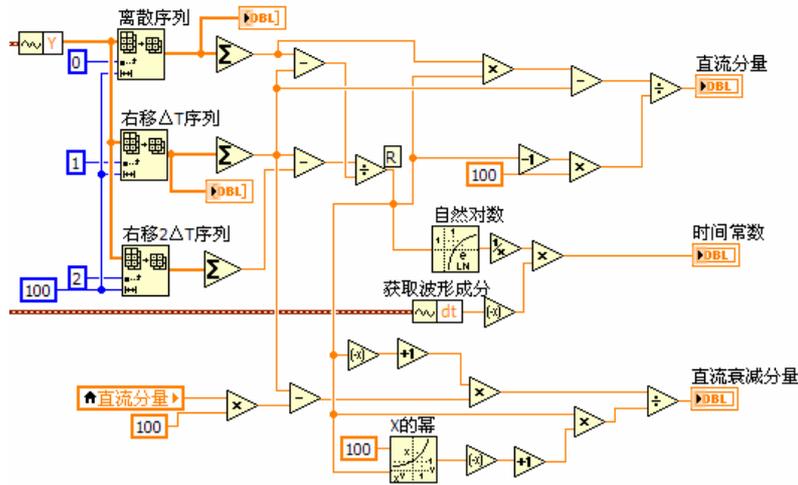


图 2 求取非周期分量参数程序框图

Fig. 2 Program to calculate the aperiodic component

### 3.3 基波和谐波特征参数求取

利用 LabVIEW 中 for 循环结构和公式节点<sup>[11]</sup>，依据式 (4) 和式 (5) 得到  $A_n$ 、 $B_n$ 。将采样时刻

后移  $\Delta t$  时刻，即将采样点后移一个，同理得到  $A'_n$ 、 $B'_n$ ，程序框图如图 3 所示。根据式 (20) ~ 式 (25)，得到  $\lambda_a$  和  $\lambda_b$ ，程序框图如图 4 所示。

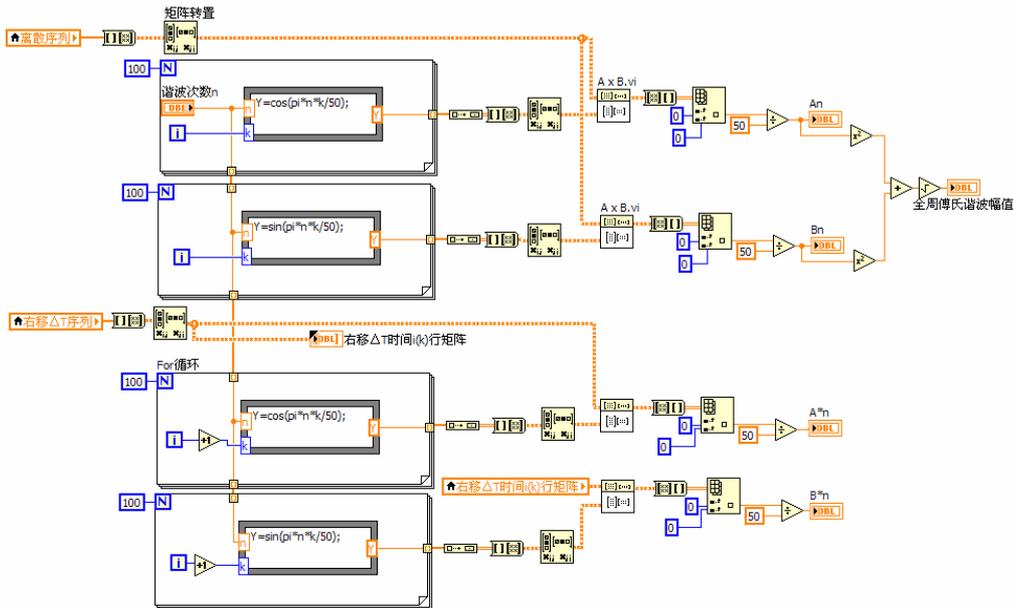


图 3  $A'_n$  和  $B'_n$  参数求取

Fig. 3  $A'_n$  and  $B'_n$  parameters calculating

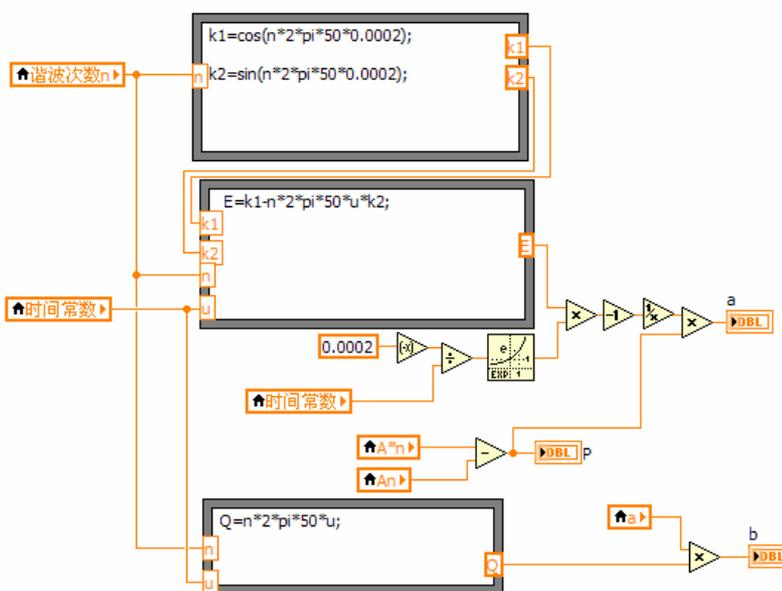


图 4  $\lambda_a$  和  $\lambda_b$  参数求取

Fig. 4  $\lambda_a$  and  $\lambda_b$  parameters calculating

3.4 仿真结果及误差分析

(2)  $\tau = 50$  ms 时仿真结果如表 3 所示。

(1)  $\tau = 10$  ms 时仿真结果如表 2 所示；

表 2  $\tau = 10$  ms 时的仿真结果

Table 2 Simulation result when  $\tau = 10$  ms

算法	基波				二次谐波			
	幅值	误差/%	相位/(°)	误差/%	幅值	误差/%	相位/(°)	误差/%
全波傅立叶	87.825 9	9.78	29.050 6	3.165	153.671	2.447	39.293 7	1.766
改进算法	80.046	0.058	30.175 2	0.584	150.119	0.079	40.087 6	0.219
设定值	80.000	0.00	30.000	0.00	150.000	0.00	40.000	0.00

算法	三次谐波				五次谐波			
	幅值	误差/%	相位/(°)	误差/%	幅值	误差/%	相位/(°)	误差/%
全波傅立叶	42.533 6	6.334	34.449 6	4.31	201.024	0.512	64.622 6	0.581
改进算法	40.109 1	0.273	36.338 9	0.94	200.209	0.105	65.046 1	0.071
设定值	40.000	0.00	36.000	0.00	200.000	0.00	65.000	0.00

表 3  $\tau = 50$  ms 时的仿真结果

Table 3 Simulation result when  $\tau = 50$  ms

算法	基波				二次谐波			
	幅值	误差/%	相位/(°)	误差/%	幅值	误差/%	相位/(°)	误差/%
全波傅立叶	82.874 2	3.592	29.095 2	3.016	151.301	0.867	39.661	0.848
改进算法	80.041 1	0.051	30.064 4	0.215	150.056	0.037	40.031 2	0.078
设定值	80.000	0.00	30.000	0.00	150.000	0.00	40.000	0.00

算法	三次谐波				五次谐波			
	幅值	误差/%	相位/(°)	误差/%	幅值	误差/%	相位/(°)	误差/%
全波傅立叶	40.920 6	2.3	35.276 6	2.01	200.362	0.181	64.851 1	0.229
改进算法	40.048 9	0.122	36.124	0.344	200.082	0.041	65.016 4	0.025
设定值	40.000	0.00	36.000	0.00	200.000	0.00	65.000	0.00

通过  $\tau = 10 \text{ ms}$  和  $\tau = 50 \text{ ms}$  时各特征参量数据及误差分析表明,改进算法可以大大提高各周期分量的提取精度,削弱了衰减直流分量的影响,尤其对于基波分量效果更为突出。此外,利用 LabVIEW 将此算法做成子 VI 更易于工程中在线检测测量模块的扩展,可扩展的模块如:绝缘介质损耗和泄漏电流在线监测,电能质量在线监测等。

#### 4 结论

本文从数学基础上分析了整周期采样下全波傅氏算法中衰减直流分量产生误差的主要原因,验证了恒定直流分量对特征参数的提取没有任何影响。并在此基础上进行了改进,增加了两个采样点,进行了两次全波傅立叶变换,这两次变换是相辅相成的,增加采样点后的变换可以利用原始变换结果,运用级数、积分和等比数列等性质,推导出精确的计算公式,大大减少了数据处理时间。仿真结果表明改进算法具有较高的精度且具有一定的理论意义和工程价值。电压、电流信号中除了故障信号中本身固有的衰减直流分量,还可能包括互感器产生的衰减直流分量。因此,递推公式的思想亦可用于多个衰减直流分量的求取,即根据衰减直流分量个数,结合方程求取原则增加相邻采样点。利用 LabVIEW 编程,缩短了编程时间,便于后期对算法的增添,提高了工作效率。

#### 参考文献

- [1] 陈德树. 计算机继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1992.  
CHEN De-shu. Theory and technology of computer relay protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1992.
- [2] 张秋丽, 黄纯, 贺建辉, 等. 一种消除衰减直流分量影响的改进 DFT 递推算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 1-5.  
ZHANG Qiu-li, HUANG Chun, HE Jian-hui, et al. An improved recursive discrete Fourier transform algorithm for eliminating decaying DC component[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 1-5.
- [3] 刘俊, 马志瀛, 闫静, 等. 基于改进梯度校正法的短路电流在线实时计算[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 65-70.  
LIU Jun, MA Zhi-ying, YAN Jing, et al. Online real time calculation of short-circuit based on improved gradient estimation algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10): 65-70.
- [4] 潘文, 钱俞寿, 周鄂. 基于加窗插值 FFT 的电力谐波测量理论(II)双插值 FFT 理论[J]. 电工技术学报, 1994, 9(2): 53-56.  
PAN Wen, QIAN Yu-shou, ZHOU E. Power harmonics measurement based on windows and interpolated FFT(II) dual interpolated FFT algorithms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1994, 9(2): 53-56.
- [5] 焦彦军, 于江涛. 衰减直流分量对傅立叶变换快速算法的影响及其消除办法[J]. 华北电力大学学报, 2006, 33(2): 37-39.  
JIAO Yan-jun, YU Jiang-tao. Influence of decaying DC component on FFT fast algorithm and its solution[J]. Journal of North China Electric Power University, 2006, 32(2): 37-39.
- [6] 张小鸣, 费雨胜. 一种滤除衰减直流分量的电流估计新算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 90-95.  
ZHANG Xiao-ming, FEI Yu-sheng. A new current estimation algorithm to filter decaying DC component[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 90-95.
- [7] 杨力森, 汪芳宗, 孙水发. 一种混合递推的 DFT 相量测量算法[J]. 继电器, 2008, 36(5): 23-27.  
YANG Li-sen, WANG Fang-zong, SUN Shui-fa. A mixed recurrence DFT algorithm for phasor measurements[J]. Relay, 2008, 36(5): 23-27.
- [8] 李永丽, 贺家李, 陈英超. 一种在线计算衰减直流分量的继电保护快速算法[J]. 电工技术学报, 1997, 12(3): 63-64.  
LI Yong-li, HE Jia-li, CHEN Chao-ying. An on-line fast algorithm of protective relays to calculate the decaying DC component[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1997, 12(3): 63-64.
- [9] 黄世年, 佟为明, 郭志忠, 等. 直接提取基频分量瞬态值的快速滤波算法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 44-49.  
HUANG Shi-nian, TONG Wei-ming, GUO Zhi-zhong, et al. A fast filtering algorithm for extracting fundamental instantaneous value[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 44-49.
- [10] 李永丽, 陈超英, 贺家李. 一种基于半波傅氏算法的继电保护快速算[J]. 电网技术, 1996, 20(1): 52-55.  
LI Yong-li, CHEN Chao-ying, HE Jia-li. A fast algorithm based on half-cycle Fourier algorithm for protective relaying[J]. Power System Technology, 1996, 20(1): 52-55.
- [11] 胡广书. 数字信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.  
HU Guang-shu. Digital signal processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [12] 杨乐平. LabVIEW 高级程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.  
YANG Le-ping. Professional LabVIEW[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

收稿日期: 2013-09-01; 修回日期: 2013-11-21

作者简介:

陈刚(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压试验方法; E-mail: liu\_and\_chen@126.com

厉伟(1962-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要从事现代高电压试验技术, 高电压绝缘, 绝缘在线检测, 智能电器及测试技术。