

基于改进半波傅氏算法的故障电流相控开断零点预测研究

罗楚军¹, 袁 召¹, 尹小根¹, 何俊佳¹, 陈轩恕², 潘 垣¹

(1. 华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉 430074; 2. 国网电力科学研究院, 武汉 430074)

摘要: 准确、快速地提取出故障电流的特征参数, 预测出短路电流的零点, 是实现相控开断需要首先解决的核心问题。笔者采用改进的半波傅氏算法, 利用半个周波加上2个采样点的数据, 通过2次数据处理窗口的移动, 提取出短路故障电流衰减直流分量的初值、时间常数、基波及三次谐波的幅值和相位, 实现故障电流的零点预测。计算及MATLAB仿真均表明, 算法能够快速准确地实现电流零点预测, 预测零点与实际过零点之间的误差在 ± 1 ms以内。

关键词: 故障电流; 相控开断; 零点预测; 改进半波傅氏算法

中图分类号: TM835

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2012)06-0001-06

Zero-cross Point Prediction of Short Circuit Current for Phase Controlled Interruption Based on Improved Half-wave Fourier Algorithm

LUO Chu-jun¹, YUAN Zhao¹, YIN Xiao-gen¹, HE Jun-jia¹, CHEN Xuan-shu², PAN Yuan¹

(1. College of Electric and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Rapid extraction of fault current parameters for predicting the zero-cross point of the fault current is a premise in phase controlled interruption of fault current. In this paper, an improved half-wave Fourier algorithm is presented. By adding two extra sampling points and shifting data processing window twice, the algorithm can extract the initial value and time constant of the decaying DC component, and can also extract the amplitudes and phases of the fundamental wave and three-order wave to implement prediction of zero-cross point of fault current. Calculation and MATLAB simulation show that the improved half-wave Fourier algorithm can quickly realize zero-cross point prediction of fault current with errors less than ± 1 ms.

Key words: fault current; phase controlled interruption; zero-cross point prediction; improved half-wave Fourier algorithm

0 引言

随着电力系统朝着高压、大容量的方向发展, 人们对作为电力系统控制和保护设备的断路器提出了更高的要求, 其开断能力、可靠性和使用寿命对系统的安全、可靠运行至关重要^[1]。

对于定型的断路器灭弧室, 其极限开断电流 I_b 和使用寿命主要受输入触头间隙电弧能量和触头电磨损的影响, 燃弧期间, 电弧消耗能量的表达式为^[2]

$$W = \int_{t_s}^{t_e} u_{arc}(t) \cdot i(t) dt \quad (1)$$

式(1)中, t_s 为触头分离, 电弧开始燃烧的时刻; t_e 为电弧熄灭的时刻; $u_{arc}(t)$ 为弧压; $i(t)$ 为电弧电流。

式(1)可看出, 采用故障电流相控开断技术^[3-5], 通过控制断路器燃弧时间 $t_e - t_s$, 使电弧经过最小燃弧时间熄灭^[6], 可以有效地提高断路器的极限开断电流 I_b 和使用寿命。故障电流相控开断和非相控开断的原理见图 1。

相控开断过程中, 根据预测的电流零点确定开

收稿日期: 2011-12-04; 修回日期: 2011-12-26

基金项目: 国家电网公司重点科研项目(SG0846); 国家科技部支撑计划(2009BAA19B00)。

Project Supported by Research Foundation of State Grid(SG0846), Ministry of Science and Technology of the PRC(2009BAA19B00).

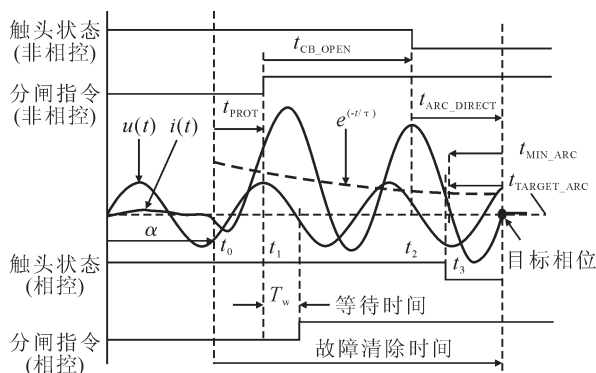


图1 故障电流相控开断原理图

Fig. 1 The principle of controlled fault interruption

断的目标相位,在获得继电保护装置命令后,断路器经 T_w 延时后开始分闸,触头在 t_3 时刻分离,经最佳燃弧时间 $t_{\text{TARGET_ARC}}$ (略大于断路器固有最小燃弧时间 $t_{\text{MIN_ARC}}$) 之后,电流过零熄灭。阴影部分可看成相控开断相对于直接开断情况下电弧消耗能量的减少。在已知断路器的固有分闸时间和分闸速度特性后,相控开断的延时 T_w 由电流零点预测结果决定。

为了保证电力系统的安全,必须尽快切除短路故障,这就要求控制系统必须在继电保护系统响应时间内完成故障电流特征参数的提取和零点预测,尽量缩短采样和数据处理的时间,但是由于故障电流中衰减直流分量的存在,故障电流非周期性过零,增加了相控开断过程中零点预测的难度。因此,如何基于有限的信息,尽可能快速、准确地提取出故障电流参数,实现短路电流零点的预测,是故障电流相控开断需要首先解决的核心问题。

目前,国内外提出的几种零点预测算法都具有一定的局限性^[6-9]。文[6-7]提出了一种自适应、自检测算法,利用加权最小均方算法来进行数据处理,该算法对谐波很敏感,在实际系统中适用性较差。文[8]提出了一种“安全点算法”,用“安全点”——故障电流基波分量的过零点来代替实际波形的过零点,降低了故障电流相控开断的有效性。

电力系统中的稳态谐波多存在于信号的低频部分,非稳态谐波多存在于信号的高频部分^[10],谐波主要来源于非线性负载,谐波成分以奇次谐波为主^[11]。针对故障电流信号含有衰减直流分量和谐波的特点,傅氏算法因为其原理简单、可靠性好、滤波能力强而显现出较好的应用前景。相对于全波傅氏算法而言,半波傅氏算法响应速度快,只需要半个周期的采样数据,对含有基波和奇次谐波的故障信号,具有很好的处理效果,但当含有衰减直流分量时,处理效果较差。

基于现有的研究成果^[12-14],笔者采用改进半波傅氏算法,对含有衰减直流分量和奇次谐波的故障电流,进行特征参数提取和零点预测。文中利用半个周期加上2个采样点的数据,通过2次窗口移动,从故障信号中提取出衰减直流分量初值、时间常数、基波分量及三次谐波分量的幅值和相位,实现故障电流的波形恢复和零点预测,对其有效性进行验证。同时,利用 MATLAB/Simulink 搭建短路故障仿真模型,进一步验证算法的有效性。文中的分析结果,可为故障电流的相控开断提供理论基础。

1 改进半波傅氏算法计算过程及误差分析

在众多的滤波算法中,傅氏滤波算法以其良好的性能和相对简单的原理,在电力系统控制和保护中获得广泛的应用^[15-16]。笔者对半波傅氏算法进行改进,使其在故障电流相控开断零点预测中能够得以应用。

1.1 半波傅氏算法

电力系统短路故障电流主要由衰减直流分量、基波和谐波组成。故可设输入到采样系统的故障电流的模型为

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-t/\tau} + \sum_{n=1}^M I_m(n) \cdot \cos(n\omega t + \varphi_n) = I_0 \cdot e^{-t/\tau} + \sum_{n=1}^M [I_m(n) \cdot \cos n\omega t \cdot \cos \varphi_n - I_m(n) \cdot \sin n\omega t \cdot \sin \varphi_n] \quad (2)$$

式(2)中: I_0 为衰减直流分量初值; τ 为直流分量的衰减时间常数; $I_m(n)$ 为 n 次谐波的幅值, φ_n 为 n 次谐波的相位。

当信号中不含有衰减直流分量($I_0=0$),谐波成分为奇次谐波($n=3, 5, 7, \dots$)时,根据三角函数的正交性^[16],第 n 次谐波分量的实部为

$$a_n = \frac{4}{T} \cdot \int_0^{T/2} \left[\sum_{n=1}^M I_m(n) \cdot \cos(n\omega t + \varphi_n) \right] \cdot \cos n\omega t dt = I_m(n) \cdot \cos \varphi_n \quad (3)$$

第 n 次谐波分量的虚部为

$$b_n = \frac{4}{T} \cdot \int_0^{T/2} \left[\sum_{n=1}^M I_m(n) \cdot \cos(n\omega t + \varphi_n) \right] \cdot \sin n\omega t dt = -I_m(n) \cdot \sin \varphi_n \quad (4)$$

通过使用梯形求和代替积分,可得其离散表达式为

$$a_n = \frac{4}{T} \cdot \left[\sum_{k=1}^{\frac{N}{2}-1} I_{(k)} \cdot \sin\left(n \cdot \frac{2k\pi}{N}\right) \right] \quad (5)$$

$$b_n = \frac{4}{N} \cdot \left[\frac{I_0}{2} + \sum_{k=1}^{\frac{N}{2}-1} I_{(k)} \cdot \cos\left(n \cdot \frac{2k\pi}{N}\right) + \frac{I_{(N/2)}}{2} \right] \quad (6)$$

当信号中不含衰减直流分量时,基波和各次谐波幅值和相位的理论误差为零,离散化后,误差与采样频率有关。

例如,设输入信号

$$I(t) = 42\cos(\omega t + 30^\circ) + 15\cos(3\omega t + 60^\circ) + 5\cos(5\omega t + 20^\circ)$$

表 1 中给出了当一周波采样点数分别为 10^6 、200、24 时,半波傅氏算法的计算误差。

表 1 无直流分量时半波傅氏算法误差

Tab. 1 Errors without DC component of half-wave Fourier algorithm

波形	理论值	半波傅氏算法误差/%		
		$f_s=50$ MHz	$f_s=10$ kHz	$f_s=1.2$ kHz
基波幅值	42	-0.000 4	-1.996 2	-16.136 6
基波相位	30	0.000 4	2.253 7	21.995 8
三次幅值	15	-0.000 7	-3.075 7	-13.306 6
三次相位	60	0.001 1	5.528 8	54.372 7

从表 1 中可以看出,半波傅氏算法对不含直流分量的信号具有很强的处理能力,当采样数据点很多时(50 MHz),待求幅值和相位误差很小,可以忽略不计。随着采样频率的降低,由于梯形求和代替积分产生的误差不断增大,幅值和相位与实际值的差别越来越大。

而当信号中含有衰减直流分量时,半波傅氏算法理论计算的误差就会变得很大。例如,设输入信号中,直流分量初值为 20,衰减时间常数为 30 ms,则当一周波采样点数分别为 10^6 、200、24 时,半波傅氏算法的计算误差见表 2。

表 2 存在直流分量时半波傅氏算法误差

Tab. 2 Errors with DC component of half-wave Fourier algorithm

波形	理论值	半波傅氏算法误差/%		
		$f_s=50$ MHz	$f_s=10$ kHz	$f_s=1.2$ kHz
基波幅值	42	-7.926 4	-9.556 0	-21.485 1
基波相位	30	-103.023 9	-103.069 3	-102.822 2
三次幅值	15	-35.768 7	-39.359 7	-57.114 3
三次相位	60	-39.371 7	-35.062 6	18.806 2

从表 2 中可看出,当波形中含有较大直流分量时,傅氏算法会产生较大误差,从故障信号中无法有效地提取出基波分量的幅值和相位,也无法求得直流分量的初值和时间常数。

1.2 半波傅氏算法的改进

针对半波傅氏算法固有的缺陷,为了能利用有

限的采样信息,准确预测出故障电流的实际过零点,笔者对半波傅氏算法进行改进。通过波形恢复得到的直流、基波和三次谐波的参数,来预测短路电流的实际过零点。

采样时,故障信号先通过前置低通滤波器,将谐波次数高于 M 的高次谐波和高频噪声信号滤除,根据奈奎斯特采样定理可知,当采样频率高于 $2M \times f$ (f 为基波频率)时,采样值可以准确地表示出原始信号。设经过滤波之后的完整信号为

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-t/\tau} + \sum_{n=1}^M I_m(n) \cdot \cos(n\omega t + \varphi_n) \quad (7)$$

将信号拆分为直流分量部分和基波加整数次谐波 2 部分,则

$$\frac{4}{T} \cdot \int_0^{T/2} I(t) \cdot \cos n\omega t dt = I_m(n) \cdot \cos \varphi_n + \frac{4}{T} \cdot \int_0^{T/2} I_0 \cdot e^{-t/\tau} \cdot \cos n\omega t dt \quad (8)$$

$$\frac{4}{T} \cdot \int_0^{T/2} I(t) \cdot \sin n\omega t dt = -I_m(n) \cdot \sin \varphi_n + \frac{4}{T} \cdot \int_0^{T/2} I_0 \cdot e^{-t/\tau} \cdot \sin n\omega t dt \quad (9)$$

为便于计算,令 $a_n = \frac{4}{T} \cdot \int_0^{T/2} I(t) \cdot \cos n\omega t dt$,

$$b_n = \frac{4}{T} \cdot \int_0^{T/2} I(t) \cdot \sin n\omega t dt, A = I_m(n) \cdot \cos \varphi_n,$$

$$B = I_m(n) \cdot \sin \varphi_n, \delta_a = \frac{4}{T} \cdot \int_0^{T/2} I_0 \cdot e^{-t/\tau} \cdot \cos n\omega t dt,$$

$$\delta_b = \frac{4}{T} \cdot \int_0^{T/2} I_0 \cdot e^{-t/\tau} \cdot \sin n\omega t dt.$$

a_n, b_n 的值可以根据采样的信号计算得到。则 (8)、(9) 两式便化简为

$$\begin{aligned} a_n &= A + \delta_a \\ b_n &= A + \delta_b \end{aligned} \quad (10)$$

可知,当含有衰减直流分量时,半波傅氏算法提取基波波形时,将不可避免的引入误差 δ_a, δ_b ,且无法得出故障分量中的衰减直流分量。这也是表 2 中误差的根本来源。

针对这一问题,笔者采用增加 2 个额外的采样点和数据处理窗口移动的方法,对半波傅氏算法进行改进。

式(10)为第 1 个数据窗处理的结果, a_n, b_n 可以根据采样的数据与正弦、余弦函数相乘后再求和的方法得出, A, B 为基波和整数次谐波的积分计算结果, δ_a, δ_b 为衰减直流分量的影响。

将处理窗口向后移动 ΔT 。为便于计算,将 ΔT 取为采样周期 T_s ,则第 2 个数据处理窗口的时间区

间为 $[\Delta T, \Delta T+T/2]$ 。

$$\frac{4}{T} \cdot \int_{\Delta T}^{\Delta T+T/2} I(t) \cdot \cos n\omega t dt = \frac{4}{T} \times \int_{\Delta T}^{\Delta T+T/2} [I_0 \cdot e^{-t/\tau} + \sum_{n=1}^M I_n \cos(n\omega t + \varphi_n)] \cos n\omega t dt \quad (11)$$

当波形中只含有奇次谐波时, 令 $E=e^{-t/\tau}$, $k_a=$

$$\cos n\omega \Delta T, a'_n = \frac{4}{T} \cdot \int_{\Delta T}^{\Delta T+T/2} I(t) \cdot \cos n\omega t dt, k_b = \sin n\omega \Delta T, b'_n = \frac{4}{T} \cdot \int_{\Delta T}^{\Delta T+T/2} I(t) \cdot \sin n\omega t dt \text{ 可得}$$

$$a'_n = A + \delta'_a = A + (k_a \delta_a - k_b \delta_b) \cdot E \quad (12)$$

同理, 可求得

$$b'_n = B + \delta'_b = B + (k_a \delta_a + k_b \delta_b) \cdot E \quad (13)$$

再次将数据窗向后移动 ΔT , 则数据采集和处理区间为 $[2\Delta T, 2\Delta T+T/2]$, 采用类似于第2个数据窗口的处理过程, 可得

$$a''_n = A + (k'_a \delta'_a - k'_b \delta'_b) \cdot E^2 = A + [(k_a^2 - k_b^2) \cdot \delta_a - 2k_a k_b \cdot \delta_b] \cdot E^2$$

$$b''_n = B + (k'_a \delta'_a + k'_b \delta'_b) \cdot E^2 = B + [(k_a^2 - k_b^2) \cdot \delta_b + 2k_a k_b \cdot \delta_a] \cdot E^2 \quad (14)$$

以上3个数据处理窗口的方程可整理为

$$\begin{aligned} a_n &= A + \delta_a & b_n &= B + \delta_b \\ a'_n &= A + \delta'_a & b'_n &= B + \delta'_b \\ a''_n &= A + \delta''_a & b''_n &= B + \delta''_b \\ \delta'_a &= (k_a \delta_a - k_b \delta_b) \cdot E \\ \delta'_b &= (k_a \delta_b + k_b \delta_a) \cdot E \\ \delta''_a &= (k_a \delta'_a - k_b \delta'_b) \cdot E \\ \delta''_b &= (k_a \delta'_b + k_b \delta'_a) \cdot E \end{aligned} \quad (15)$$

结合以上各式, 可解出

$$E = \frac{a'_n - a'_n}{k_a(a'_n - a'_n) - k_b(b'_n - b'_n)} = \frac{b'_n - b'_n}{k_a(b'_n - b'_n) + k_b(a'_n - a'_n)} \quad (16)$$

$$\delta'_a = \frac{(k_a E - 1)(a'_n - a'_n) + k_b E(b'_n - b'_n)}{E^2 - 2k_a E + 1}$$

$$\delta'_b = \frac{(k_a E - 1)(b'_n - b'_n) - k_b E(a'_n - a'_n)}{E^2 - 2k_a E + 1} \quad (17)$$

$$I_0 = \frac{n\pi \cdot (\delta_a^2 + \delta_b^2)}{2\delta_b [1 - (-1)^n \cdot E^{N/2}]} \quad (18)$$

根据以上的计算过程, 可对改进半波傅氏算法的有效性进行验证。计算过程中, 根据滤波后得到的采样数据, 可计算出 a_n 、 b_n 。 $a'_n - a_n$ 、 $b'_n - b_n$ 的值只需要数据窗首端和末端各2个采样点的数据便可计算出。计算结果见表3。

根据表3中的波形恢复结果, 可对故障信号进行零点预测, 与故障起始时刻相距最近的3个零点的预测误差见表4。

通过表3、4中的仿真计算可以看出, 改进半波傅氏算法能够很好地提取出衰减直流分量、基波、三次谐波的波形, 计算误差很小, 即便在采样频率

表3 改进半波傅氏算法误差

Tab. 3 Errors of improved half-wave Fourier algorithm

波形	理论值	改进半波傅氏算法误差/%		
		$f_s=50$ MHz	$f_s=10$ kHz	$f_s=1.2$ kHz
直流分量	20	-1.62×10^{-9}	-7.95×10^{-3}	-5.52×10^{-1}
衰减常数	0.03	9.35×10^{-9}	1.53×10^{-11}	2.29×10^{-12}
基波幅值	42	-2.86×10^{-4}	-1.41×10^0	-1.15×10^1
基波相位	30	2.95×10^{-4}	1.58×10^0	1.47×10^1
三次幅值	15	-4.59×10^{-4}	-2.20×10^0	-1.26×10^1
三次相位	60	7.54×10^{-4}	3.86×10^0	3.69×10^1

表4 改进半波傅氏算法零点预测误差

Tab. 4 Errors of improved half-wave Fourier algorithm for zero-crossing prediction

零点	理论值/s	零点预测误差/ms		
		$f_s=50$ MHz	$f_s=10$ kHz	$f_s=1.2$ kHz
零点1	0.005 5	0.37	0.35	0.19
零点2	0.011 2	0.15	0.11	-0.25
零点3	0.024 9	0.22	0.21	0.16

较低时, 误差也在允许的范围之类。同时, 恢复到三次谐波的波形, 与实际波形相比, 与故障时刻相距最近的3个零点的计算误差都在1 ms以内, 满足了故障电流选相开断对零点预测误差的要求。图2给出了当采样频率为10 kHz时, 恢复波形与原始波形之间的零点预测误差。

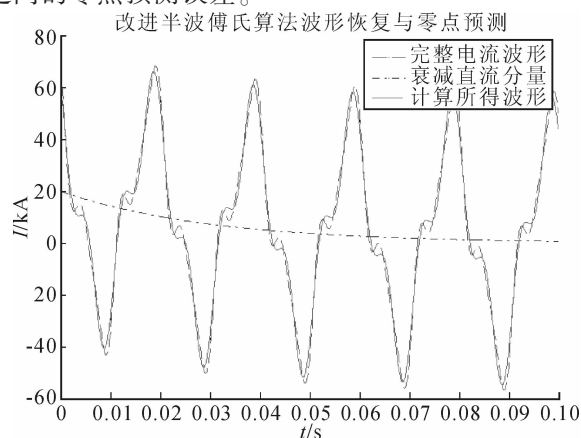


图2 改进傅氏算法波形恢复

Fig. 2 Waveform recovery based on improved half-wave Fourier algorithm

2 基于 MATLAB/Simulink 的仿真实验

笔者通过在 MATLAB/Simulink^[17-18]中搭建无限大功率电源供电网络的三相短路故障模型, 来验证改进半波傅氏算法零点预测的有效性。

公用电网谐波的主要来源, 是那些能成为谐波电流源的非线性负荷^[19-21], 也有少量谐波来源于系统的发电机和变压器等设备。电网中的非线性负荷主

要包括大功率整流设备、电力机车、电弧炉、变频设备等。文中通过引入可编程谐波电压源模块和整流桥回路,来模拟系统中的谐波情况。

仿真电路图见图3,无穷大电源通过LC滤波电路给三相整流桥供电,电源电压为110 kV,相位差为 120° 。3、5次谐波在0.4 s时刻注入系统,整流桥接 $2\ \Omega$ 电阻性负载,其导通角由同步六脉冲发生器控制,设为 30° 。同时,无穷大电源通过均匀传输线向负载供电,变压器容量为 $20\ \text{MV}\cdot\text{A}$,变比为110/38.5 kV,负载的有功功率为15 MW。

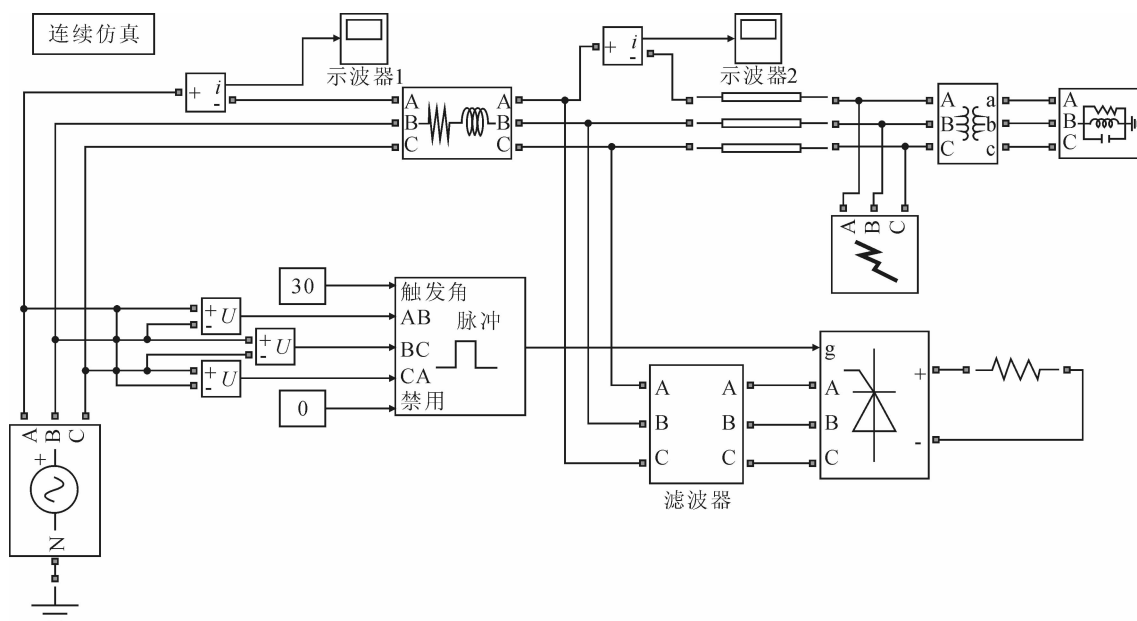


图3 三相短路故障仿真电路

Fig. 3 Simulation circuit of three phase short circuit

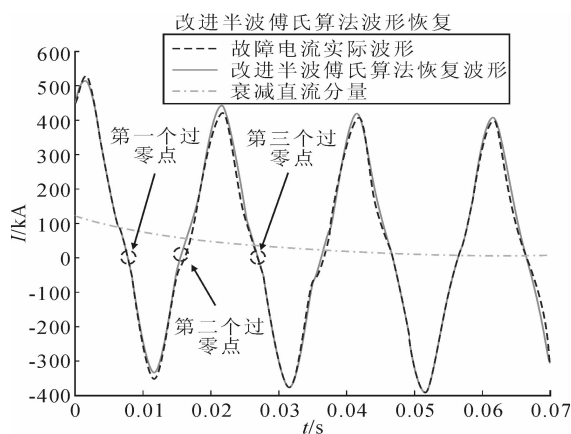


图4 仿真电路的波形恢复

Fig. 4 Waveform recovery of simulation circuit

离故障点最近的3个过零点的误差为0.074、0.163、-0.093 ms。当发生不同类型的故障时,离故障点最近的3个过零点中,故障相零点预测的误差见表5。

从图4及表5中可以看出,当发生各种类型的故障时,零点预测的误差都在1 ms以内。因此改进半

未发生短路故障时,通过FFT分析,可知系统中主要含有奇数次谐波,同时含有少量的次谐波和间谐波,0.4 s之前传输线支路的总谐波畸变率为46.62%,0.4 s之后的总谐波畸变率为68.05%,波形畸变较严重。

当系统在0.97 s发生三相接地短路故障时,主回路电流总谐波畸变率为3.15%,均匀传输线支路中,总谐波畸变率为15.58%。采集故障电流,以故障起始点为新的计时起点,用半波傅氏算法进行波形恢复,波形恢复图见图4。

表5 不同故障类型时零点预测误差

Tab. 5 Errors of different fault type for zero-crossing prediction

故障类型	零点预测误差/ms		
	零电 1	零点 2	零点 3
单相接地	0.126	-0.052	-0.116
两相短路	0.089	-0.078	-0.777
两相接地	0.291	-0.781	0.029
三相短路	0.074	0.163	-0.093

波傅氏算法能够较好地预测出故障电流的过零点。

3 结语

针对故障电流选相开断中的零点预测问题,笔者提出了基于改进半波傅氏算法的零点预测方法,利用半个周波加上额外的2个采样点,通过两次数据处理窗口的移动,提取出故障电流的特征参数。该方法原理简单、计算量小、计算及仿真表明,改进半波傅氏算法能够利用略多于半个周波的采样数

据对故障电流进行波形恢复和零点预测,零点预测的误差在1 ms以内。对于发展性故障和信号中含有较高成分偶次谐波的情况,需要进一步深入研究,以提高故障电流相控开断的可靠性。

参考文献:

- [1] 方春恩,林 蔓,李 伟,等.基于WLMS算法的高压断路器可控开断故障电流研究[J]. 高压电器,2009,45(6): 40-43.
FANG Chun-en, LIN Man, LI Wei, et al. Investigation on controlled fault current interruption of high voltage circuit breaker based on WLMS algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 40-43.
- [2] LEUSENKAMP M B J. Vacuum interrupter model based on breaking tests[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1999, 27(4): 969-976.
- [3] 方春恩.同步真空开关的相关理论及其应用研究[D]. 大连:大连理工大学,2004.
FANG Chun-en. Research on controlled vacuum switches and their applications[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004.
- [4] CIGRE WG 13.07. Controlled switching: non-conventional applications[C]/SC A3. Paris: CIGRE, 2004: 214.
- [5] 段雄英,廖敏夫,丁富华.相控开关在电网中的应用及关键技术分析[J]. 高压电器,2007,43(2): 113-117.
DUAN Xiong-ying, LIAO Min-fu, DING Fu-hua. Application and key technology analysis of controlled switching[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(2): 113-117.
- [6] THOMAS R, DAALDER J, SOLVER C E. An adaptive self-check -ing algorithm for controlled fault interruption [C]/18th International Conference on Electricity Distribution. Turin, Italy: IEEE, 2005: 1-5.
- [7] THOMAS R, SOLVER C E. A method for controlled fault interruption for use with HV SF₆ circuit breakers[C]/IEEE Power Tech. Lausanne, Switzerland: IEEE, 2007: 365-369.
- [8] POLTLA FROHLICH K A. A new algorithm enabling controlled short circuit interruption[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2003, 18(3): 802-808.
- [9] 方春恩,周承鸣,邹积岩.同步断路器的统计特性分析及自适应控制[J]. 高压电器,2006,42(3): 183-185.
FANG Chun-en, ZHOU Cheng-ming, ZOU Ji-yan. Statistical characteristic analysis and self-adaptation control of synchronous circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(3): 183-185.
- [10] 龚黎明,公茂法,李 琦.基于傅里叶和小波变换的电力系统谐波分析[J]. 电子质量,2010(10): 6-7.
GONG Li-ming, GONG Mao-fa, LI qi. The power system harmonic analysis based on fourier and wavelet transform[J]. Electronics Quality, 2010(10): 6-7.
- [11] 何庭全,李 冰.电网谐波分析及其对策[J]. 宁夏电力, 2004(3): 40-42.
HE Ting-quan, LI Bing. The analysis & countermeasure of resonance wave in electric power network[J]. Ningxia Electric Power, 2004(3): 40-42.
- [12] 诸佳云.傅氏算法在电力系统继电保护中的应用[J]. 电工电气,2009(12): 28-30.
ZHU Jia-yun. Application of Fourier algorithm in power system relay protection[J]. Electrotechnics Electric, 2009(12): 28-30.
- [13] 丁书文,张承学,龚庆武,等.半波傅氏算法的改进[J]. 电力系统自动化,1999,23(5): 18-19.
DING Shu-wen, ZHANG Cheng-xue, GONG Qing-wu, et al. An improved half-wave Fourier algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(5): 18-19.
- [14] 赵新红,苏文辉.一种能滤除衰减直流分量的改进半波傅氏算法[J]. 水力发电,2003,29(6): 43-44.
ZHAO Xin-hong, SU Wen-hui. An improved half-wave Fourier algorithm for filtering the decaying DC component [J]. Water Power, 2003, 29(6): 43-44.
- [15] 高 亮.电力系统微机继电保护[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [16] 周美兰,王一磊,王 健.改进傅氏算法在输电线路微机保护中的应用研究[J]. 黑龙江大学自然科学学报,2010, 27(6): 783-787.
ZHOU Mei-lan, WANG Yi-lei, WANG Jian. Research on the algorithm of the improved Fourier in transmission line computer-based protection relay[J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2010, 27(6): 783-787.
- [17] 李 颖. Simulink 动态系统建模与仿真(第二版)[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2009.
- [18] 吴天明,赵新力,刘建存. MATLAB 电力系统设计与分析[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
- [19] 林海雪.电力系统谐波水平的主要控制方法[J]. 电网技术,2010,34(12): 68-73.
LIN Hai-xue. Principal control methods of harmonic level in power system[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 68-73.
- [20] 宋文南,刘宝仁.电力系统谐波分析[M]. 北京:水利电力出版社,1995.
- [21] 吕润餘.电力系统高次谐波[M]. 北京:中国电力出版社,1998.

罗楚军(1988—),男,硕士,研究方向为智能化开关电器。

袁 召(1985—),男,博士,研究方向为高压断路器及其并联技术。

尹小根(1965—),男,讲师,主要从事高压电器和高电压技术的教学与科研工作。

何俊佳(1968—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电弧电接触、高电压与绝缘技术、脉冲功率技术、电气设备状态监测与诊断。