

# 一种提高消除衰减非周期分量响应速度的交流采样数据修正法

方刚, 高仕斌, 林国松, 杜晟

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 利用交流采样数据修正法处理含有衰减非周期分量的故障信号, 并结合 DFT 对修正后的数据进行滤波, 对滤波的结果进行了仿真分析, 验证了交流采样数据修正法处理衰减非周期分量的有效性。最后对交流采样数据修正法处理数据的响应速度作了分析, 提出了改进方法并对改进后的算法进行仿真, 仿真结果证明了改进后算法的可行性。

**关键词:** 非周期分量; 交流采样; DFT

## An approach to raise the response speed on eliminating non-period AC sampling components

FANG Gang, GAO Shi-bin, LIN Guo-song, DU Sheng

(College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** An approach based on modifying the AC sampling data is used to deal with the fault signal with decaying DC components. Using DFT to filter the revised data, the algorithm is proved effectively by the result of simulation. Finally, on the basis of analyzing response speed of the approach, a new method is proposed which is proved feasibly by the result of simulation.

**Key words:** aperiodic component; AC sampling; DFT

中图分类号: TM744 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)20-0061-04

## 0 引言

电力系统发生故障时, 故障信号除了含有丰富的谐波以外, 往往附带衰减非周期分量, 根据 DFT 直接处理畸变的周期故障信号, 会产生较大的误差。目前, 消除非周期分量主要采用两类算法。一是对傅氏算法进行校正; 二是采用不受非周期分量影响或者影响比较小的算法, 如最小二乘法、卡尔曼滤波算法<sup>[1]</sup>。本文采用了交流采样数据修正法处理含有衰减非周期分量的故障信号, 并对修正后的采样数据进行 DFT 滤波, 仿真结果验证了修正算法的有效性。在文献[2, 3]的基础上, 运用改进后的交流采样修正算法, 将修正算法的响应速度从原来的一个工频周期提高到半个工频周期, 提高了数据处理的实时性。最后对改进算法进行仿真, 证明了改进后的交流采样数据修正算法可以提高数据处理的响应速度, 同时较好地保持了原有的精度要求。

## 1 交流采样数据修正法

### 1.1 DFT

任意周期为  $T$  的周期信号  $f(t)$ , 在  $(t_0, t_0 + T)$  区间的三角傅里叶级数展开式<sup>[4]</sup>

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_1 t) + b_n \sin(n\omega_1 t)] \quad (1)$$

式中:  $n$  为自然数, 代表谐波次数;  $a_n$ 、 $b_n$  分别代表各次谐波的余弦项和正弦项的振幅;  $\omega_1$  代表基波角频率。

为了方便计算机处理, 由于  $f(t)$  进行离散化处理, 每周波采样点数为  $N$  ( $N$  为偶数)。在任意采样周期  $(k - N + i, k + i)$ , 式 (2) 离散化处理<sup>[5]</sup>

$$\begin{cases} a_n(k) = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f(k - N + i) \cos\left(\frac{2\pi n(k+i)}{N}\right) \\ b_n(k) = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f(k - N + i) \sin\left(\frac{2\pi n(k+i)}{N}\right) \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $k \geq 0$ 。

### 1.2 交流采样数据修正法

设含有衰减直流非周期分量的故障电流信号

$$i(t) = I_0 e^{-\alpha t} + \sum_{n=1}^M I_n \cos(n\omega_1 t + \psi_n) = \quad (3)$$

$$i_d(t) + i_a(t)$$

其中:  $i_d(t) = I_0 e^{-\alpha t}$  为非周期衰减分量;  $i_a(t) = \sum_{n=1}^M I_n \cos(n\omega_1 t + \psi_n)$  为基波及各次谐波分量的总和, 是周期为  $T = \frac{2\pi}{\omega_1}$  的周期交流分量<sup>[2]</sup>。

离散化处理可以得到在第一个工频周期内<sup>[2]</sup>:

$$i_d(k) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i(k) + \frac{N-1}{2N} \cdot [i(0) - i(N)] - \frac{i(0) - i(N)}{N} \cdot k \quad (4)$$

将该算法推广到任意周期, 设第  $n$  个工频周期内任意非周期衰减分量可以表示为<sup>[2]</sup>

$$i_d(k) = i_d(k-N+1) - \frac{i(k-N+1) - i(k+1)}{N} \cdot (N-1) \quad (5)$$

其中:  $k \geq N$ 。

消除衰减直流分量的新的采样值为<sup>[2]</sup>

$$i'(k) = i_a(k) = i(k) - i_d(k) \quad (6)$$

当非周期分量衰减时间常数  $\tau$  较大时, 误差不能忽视, 当  $\tau = T$  时, 则计算误差最大<sup>[3]</sup>。当  $i(0) - i(N)$  差值较大时, 为了减小交流采样校正法产生的误差, 可以根据文献[3]中的递推修正算法对  $i_d(k)$  进行修正。

## 2 仿真分析

设有含有衰减非周期分量故障电流为

$$i(t) = 50e^{-\alpha t} + 50\sin(\omega t + \varphi) + 15\sin(3\omega t) + 10\sin(5\omega t) \quad (7)$$

式中:  $\alpha = 33$ ;  $\omega = 100\pi$ ;  $\varphi = 30^\circ$ 。

利用 DFT 处理含有非周期分量故障信号如式(7), 得到的基波电流分量, 如图 1 所示。

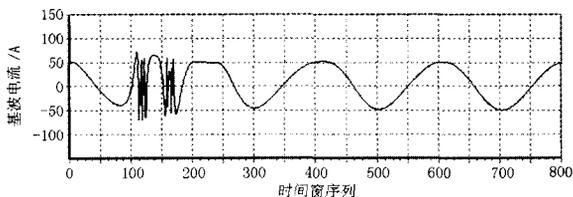


图 1 (未修正)滤波后的基波电流

Fig.1 Fundamental current after filtering before modified

根据图 1, 说明利用 DFT 直接处理含有衰减非周期分量的故障信号时, 存在很大的误差, 无法满足精度要求, 在第一个工频周期内尤其明显。

利用交流采样数据修正法<sup>[2]</sup>处理采样数据, 进

行 DFT 处理含有衰减非周期分量的故障电流如式(7), 提取基波电流分量, 如图 2 所示。

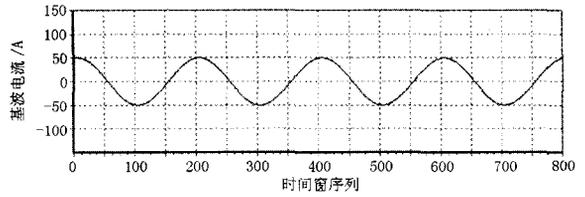


图 2 (修正后)滤波后的基波电流

Fig.2 The (modified) fundamental current after filtering

比较图 1 和图 2, 说明经过交流数据修正法处理后的数据可以很好地消除了非周期分量对 DFT 算法的干扰。

应用文献[2, 3]所提出的交流采样修正法可以较好地消除衰减非周期分量。如果利用文献[2]结合文献[3]对数据进行进一步修正, 仿真得到的基波电流幅值误差如图 3 所示。

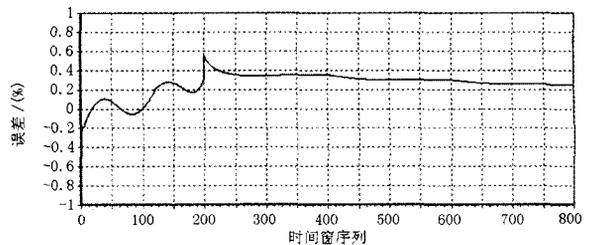


图 3 基波电流幅值误差

Fig.3 The error of the fundamental current amplitude

利用文献[2,3]对数据进行修正后基波电流的总体幅值误差水平保持在  $-0.2\% \sim 0.6\%$  以内, 从第二个工频周期开始持续平缓减小, 到第四个工频周期趋于稳定, 误差大小接近  $0.2\%$ 。

但是, 根据文献[2, 3]的算法原理基于函数的周期性推导衰减非周期分量的故障电流表达式, 因此在衰减非周期分量出现的第一周期内无法进行数据修正。事实上第一个周期内衰减分量幅值最大, 为了提高数据修正算法的响应速度, 提出了基于周期函数的对称性来推导衰减非周期分量的故障电流表达式, 修正算法的响应时间由一个工频周期缩减到半个工频周期。

## 3 改进方案

根据式(3), 离散化处理可得

$$i(0) + i\left(\frac{N}{2}\right) = [i_d(0) + i_a(0)] + [i_d\left(\frac{N}{2}\right) + i_a\left(\frac{N}{2}\right)] \quad (8)$$

由周期函数的对称性可得:

$$i_a(0) + i_a\left(\frac{N}{2}\right) = 0 \quad (9)$$

根据式(4)、(5)可得

$$i(0) + i\left(\frac{N}{2}\right) = i_d(0) + i_d\left(\frac{N}{2}\right) \quad (10)$$

$$\text{同理 } i(1) + i\left(\frac{N}{2} + 1\right) = i_d(1) + i_d\left(\frac{N}{2} + 1\right) \quad (11)$$

将式(10)减式(11)得

$$\begin{aligned} [i(0) - i(1)] + [i\left(\frac{N}{2}\right) - i\left(\frac{N}{2} + 1\right)] &= \\ [i_d(0) - i_d(1)] + [i_d\left(\frac{N}{2}\right) - i_d\left(\frac{N}{2} + 1\right)] &= \\ \Delta i_{d1} + \Delta i_{d\frac{N}{2}} \end{aligned} \quad (12)$$

根据文献[2]可知

$$i_d(k) = i_d(0) - \Delta i_d \times k \quad (13)$$

在要求的精度范围内,令 $\Delta i_d$ 近似为

$$\Delta i_d = \frac{\left(\Delta i_{d1} + \Delta i_{d\frac{N}{2}}\right)}{2} \quad (14)$$

根据式(3),假设 $i_d(t) = I_0 e^{-\alpha t}$ 可得

$$\begin{cases} I_0 + I_0 e^{-\alpha \frac{N}{2} T_s} = i(0) + i\left(\frac{N}{2}\right) \\ I_0 e^{-\alpha T_s} + I_0 e^{-\alpha \left(\frac{N}{2} + 1\right) T_s} = i(1) + i\left(\frac{N}{2} + 1\right) \end{cases} \quad (15)$$

为了简化计算,将上式利用泰勒级数展开求解

$$\begin{aligned} i_d(0) = I_0 = & \\ \frac{[T_s + \left(\frac{N}{2} + 1\right) T_s] \times [i(0) + i\left(\frac{N}{2}\right)] - \frac{N}{2} T_s \times [i(1) + i\left(\frac{N}{2} + 1\right)]}{2 \times [T_s + \left(\frac{N}{2} + 1\right) T_s - \frac{N}{2} T_s]} = & \\ \frac{\left(\frac{N}{2} + 2\right) \times [i(0) + i\left(\frac{N}{2}\right)] - \frac{N}{2} \times [i(1) + i\left(\frac{N}{2} + 1\right)]}{4} \end{aligned} \quad (16)$$

将式(13)、(14)、(16)代入式(9),即根据 $0, 1, \dots, \frac{N}{2} + 1$ 的采样值即可以求出前 $\frac{N}{2}$ 个点的非周期衰减分量的近似值 $i_d(k)$ ,消除衰减非周期分量后新的采样值为<sup>[2]</sup>

$$i'(k) = i_a(k) = i(k) - i_d(k) \quad (17)$$

当 $k \geq \frac{N}{2} + 2$ 时,根据以上理论,进行逐点采样求取前一个采样点的衰减非周期分量值。如 $k = \frac{N}{2} + 2$ 时

$$i_d\left(\frac{N}{2} + 1\right) = i_d(1) - \Delta i_d' \times \frac{N}{2} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \Delta i_d' = \frac{[i(1) - i(2)] + [i\left(\frac{N}{2} + 1\right) - i\left(\frac{N}{2} + 2\right)]}{2} = & \\ \frac{[i_d(1) - i_d(2)] + [i_d\left(\frac{N}{2} + 1\right) - i_d\left(\frac{N}{2} + 2\right)]}{2} = & \\ \frac{\Delta i_{d1}' + \Delta i_{d\frac{N}{2}}'}{2} \end{aligned} \quad (19)$$

$$i_d(1) = \frac{\left(\frac{N}{2} + 2\right) \times [i(1) + i\left(\frac{N}{2} + 1\right)] - \frac{N}{2} \times [i(2) + i\left(\frac{N}{2} + 2\right)]}{4} \quad (20)$$

算法流程图如图4所示。

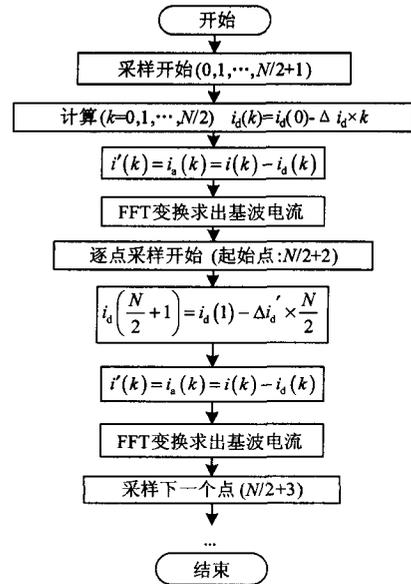


图4 改进后消除衰减非周期分量框图

Fig.4 Diagram of eliminating decaying aperiodic component

#### 4 仿真实验

为了进一步验证算法的可行性,对含有衰减非周期分量如式(7)进行仿真,采用改进后修正算法处理采样数据后DFT滤波,基波电流波形如图5所示。

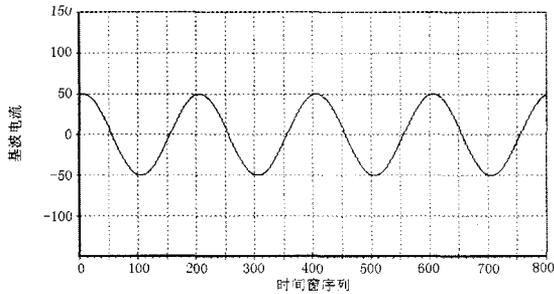


图5 (改进修正后) 滤波后的基波电流  
Fig.5 Fundamental current after DFT filtering

比较图 2 与图 5, 改进后的修正算法不但提高了修正算法的响应速度, 而且保持了较好的消除非周期分量的效果。

为了进一步分析算法改进前后的精度, 对改进后的修正算法的基波电流幅值误差进行了仿真, 如图 6 所示。

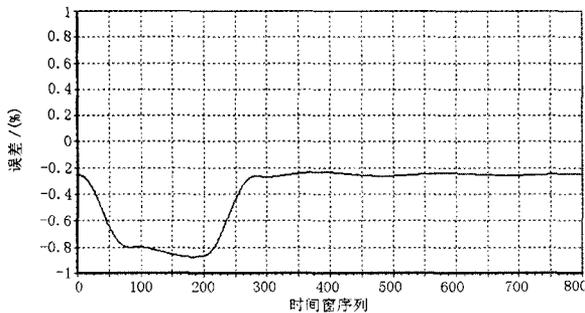


图6 改进后基波电流幅值误差  
Fig.6 The error of the improved fundamental current amplitude

修正算法改进后基波电流的幅值误差保持在-0.8%以内, 从第二个工频周期开始持续平缓减小, 趋于稳定, 误差大小保持在-0.2%。

比较图 3 与图 6, 采用改进后的修正算法在提高响应速度的同时, 得到的基波电流幅值误差在第一工频周期内略有增加, 从第二个工频周期开始迅速衰减接近-0.2%, 并且保持稳定, 证明了改进后修正算法的精确程度满足要求。

为了简化仿真计算, 第一个工频周期误差较大的原因主要有两个:

(1) 在求解式(15)、(16)、(20)采用了泰勒级数展

开求解, 并且考虑到时间常数<sup>[3]</sup>, 只考虑了一次项, 省略了高次项。

(2) 在求解式(14)、(19), 采用了近似处理。

## 5 结论

交流采样数据修正算法处理含有非周期衰减分量的故障信号时, 可以有效地消除非周期衰减分量对滤波算法的影响。改进后的交流采样数据修正法处理含有非周期衰减分量的故障信号, 保持了原有的有效性, 消除衰减非周期分量的修正响应速度缩减为半个工频周期, 对有源滤波和微机保护的数据实时性起了很大的作用。

## 参考文献

- [1] 杨奇逊. 微型计算机保护继电保护基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [2] 黄纯, 潘华, 江亚群, 等. 一种消除非周期分量的交流采样数据修正法[J]. 继电器, 2001, 29(8):10-12.  
HUANG Chun, PAN Hua, JIANG Ya-qun, et al. A New Approach to Eliminate Non-period Components from Sampling Data[J]. Relay, 2001,29(8):10-12.
- [3] 乐全明, 杜俊红, 吕飞鹏. 一种改进的消除非周期分量的交流采样数据修正法[J]. 继电器, 2003, 31(2): 9-11.  
YUE Quan-ming, DU Jun-hong, Lü Fei-peng. An Improved Approach to Eliminate Non-periodic AC Sampling Component[J].Relay, 2003,31(2):9-11.
- [4] 陈生潭, 郭宝龙, 李学武, 等. 信号与系统[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000. 92-93.
- [5] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005. 96-98.

收稿日期: 2008-10-29; 修回日期: 2009-01-06

### 作者简介:

方刚 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail:fg272003@126.com

高仕斌 (1963-), 男, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力系统及其自动化。

林国松 (1974-), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化。