

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201243

消除非周期分量影响的改进傅里叶算法

黄少锋^{1,2}, 高琦¹, 周宇聪³, 熊军²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085;
3. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司广州局, 广东 广州 510000)

摘要: 傅里叶算法不仅具有滤除整数次谐波的能力, 也具有抑制非整数次谐波的能力, 在电力系统信号分析中得到了广泛使用, 但是传统傅里叶算法会受非周期分量的影响而产生较大的计算误差。在定量分析非周期分量可能造成的计算误差基础上, 提出了一种改进傅里叶算法。先通过对两个不同工频周期下的采样值进行积分, 计算出非周期分量参数, 再从传统傅里叶算法的计算结果中将误差剔除。将泰勒级数的误差计算方法进行了拓展推导, 并设置了应用条件以及优化措施, 使改进傅里叶算法能够较好地兼顾速度与精度。分别采用静态模型信号和 Matlab/Simulink 仿真信号进行验证。结果表明, 相比于传统傅里叶算法而言, 改进傅里叶算法有效消除了非周期分量的影响, 具有良好的计算精度和实用效果。

关键词: 傅里叶算法; 滤波; 非周期分量; 改进算法; 精度

An improved Fourier algorithm for eliminating the influence of an aperiodic component

HUANG Shaofeng^{1,2}, GAO Qi¹, ZHOU Yucong³, XIONG Jun²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China; 3. Guangzhou Bureau, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510000, China)

Abstract: The Fourier algorithm has the ability to filter the integral harmonic and inhibit non-integer harmonics, so it is widely used in electrical power systems for signal analysis. However, the traditional Fourier algorithm is affected by aperiodic components and produces considerable errors. Based on a quantitative analysis of calculation errors that may be caused by aperiodic components, an improved Fourier algorithm is proposed. First, the sampling values of two different power frequency periods are integrated to calculate the aperiodic component parameters, and then we eliminate the errors from the calculation results of the traditional Fourier algorithm. The error calculation method of Taylor series is extended and deduced. By setting the application conditions and optimization measures, the improved Fourier algorithm can ensure both speed and accuracy. Static model signals and Matlab/Simulink simulated signals are used for simulation verification. The results indicate that compared with the traditional Fourier algorithm, the improved Fourier algorithm can effectively eliminate the influence of aperiodic components, and so it has good calculation precision and practicability.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51777071).

Key words: Fourier algorithm; filtering; aperiodic component; improved algorithm; accuracy

0 引言

微机保护为电力系统的安全稳定运行提供了保障^[1-2]。傅里叶算法具有良好的滤波能力, 而且计算简单、稳定性好^[3-4], 在微机保护装置及数据处理过程中得到了广泛的使用。现有的继电保护原理大多

基于故障信号的基波相量, 傅里叶算法在基波相量的计算过程中能够消除直流分量和整数次谐波分量的影响, 并抑制非整数次谐波分量, 但当电力系统发生故障时, 故障信号中往往含有按指数规律衰减的非周期分量, 严重影响了傅里叶算法的计算精度, 甚至可能造成保护误动或拒动。

为了消除非周期分量对傅里叶算法计算精度的影响, 国内外学者针对滤波和信号提取做了大量研

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777071)

究。文献[5-7]提出先计算非周期分量对傅里叶算法造成的误差,然后修正傅里叶算法的计算结果,此类算法计算复杂、采样值的误差会影响计算结果,难以实际应用。文献[8-10]提出先计算非周期分量参数,然后对采样数据进行修正,从中去除非周期分量成分,此类算法对采样频率、采样精度等要求严格,应用范围受到限制;文献[11-12]提出先估计非周期分量的衰减时间常数,以此为预设值对采样数据进行修正,再用傅里叶算法进行计算,但预估值与实际值相差较大时,会出现较大偏差。

文献[13-15]提出利用小波变换进行去噪、提取衰减直流分量等,但是其计算精度依赖于小波基函数和分解尺度的选取,难以应用在对及时性 and 准确性要求较高的系统中,此外应用于计算工频相量时,会极大增加计算的复杂程度;文献[16-20]提出应用卡尔曼算法、经验模态分解算法以及最小二乘矩阵约束算法完成信号的分析及滤波,但是这些方法存在易发散、容易产生模态混叠效应等问题,计算精度和实际应用场景受限。

鉴于上述实际现状,本文首先分析了非周期分量对传统傅里叶算法的影响及最大误差,然后提出了一种新的实用算法对传统傅里叶算法进行改进,计算简单且精度较高,并通过充分的仿真计算验证了改进傅里叶算法的有效性。

1 非周期分量对传统傅里叶算法的影响

通过分析电力系统发生故障后的电磁暂态过程,可以得到较准确的故障信号,其表达式为

$$x(t) = X_0 e^{-\frac{t}{\tau_0}} + X_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} X_n e^{-\frac{t}{\tau_n}} \sin(n\omega_1 t + \varphi_n) \quad (1)$$

式中: X_0 为非周期分量的初始值; τ_0 为非周期分量的衰减时间常数; n 为谐波次数; X_1 、 X_n 为基波和各次谐波的幅值; ω_1 为基波角频率; φ_1 、 φ_n 为基波和各次谐波相角; τ_n 为各次谐波的衰减时间常数。

式(1)中包含非周期分量、工频分量和振荡衰减的各次谐波分量,更准确的故障信号中甚至还包含非整次谐波分量。经典的全周傅里叶算法的分析基础是将故障信号近似等效为直流分量和周期性分量的叠加,即不考虑式(1)中的非周期分量和各次谐波分量的衰减,对应的表达式为

$$x(t) = X_0 + \sum_{n=1}^{\infty} X_n \sin(n\omega_1 t + \varphi_n) \quad (2)$$

式中: $n=1$ 对应于基波分量, $n>1$ 对应于谐波分量;

X_n 为基波和各次谐波的幅值; φ_n 为基波和各次谐波相角。

虽然对故障信号表达式的近似处理会造成一定误差,但是全周傅里叶算法仍然成为继电保护的主要算法。结合上述分析,本文近似认为微机保护装置中的采样信号介于式(1)和式(2)之间,即

$$x(t) = X_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + \sum_{n=1}^{\infty} X_n \sin(n\omega_1 t + \varphi_n) = X_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \sin n\omega_1 t + b_n \cdot \cos n\omega_1 t] \quad (3)$$

式中: τ 为非周期分量的衰减时间常数; a_n 、 b_n 分别为基波和各次谐波的正弦项、余弦项幅值,其中, $a_n = X_n \cos \varphi_n$ 、 $b_n = X_n \sin \varphi_n$ 。

可以预计,在采用式(3)作为分析和计算的基础时,精度肯定优于式(2)。根据傅里叶级数原理,可以计算出基波正弦项幅值 a_1 和余弦项幅值 b_1 为

$$a_1 = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(\omega_1 t) dt \quad (4)$$

$$b_1 = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(\omega_1 t) dt \quad (5)$$

根据三角函数的正交性,式(4)和式(5)的积分计算能够消除式(3)中的各整次谐波影响,于是,将式(4)和式(5)的积分形式转化为

$$a_1 = \frac{2}{T} \int_0^T X_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega_1 t) dt + \frac{2}{T} \int_0^T X_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \sin(\omega_1 t) dt = \Delta a_1 + a_1' \quad (6)$$

$$b_1 = \frac{2}{T} \int_0^T X_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \cos(\omega_1 t) dt + \frac{2}{T} \int_0^T X_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \cos(\omega_1 t) dt = \Delta b_1 + b_1' \quad (7)$$

式中: a_1' 、 b_1' 分别为基波正弦项、余弦项幅值的准确值; Δa_1 、 Δb_1 分别为非周期分量引起的正弦、余弦项幅值的计算误差, $\Delta a_1 = \frac{2}{T} \int_0^T X_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega_1 t) dt$,

$$\Delta b_1 = \frac{2}{T} \int_0^T X_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \cos(\omega_1 t) dt。$$

下面定量地求解由非周期分量造成的计算误差大小,并作为后文精度比较的基础。

由式(6)和式(7)可得

$$\Delta a_1 = \frac{2X_0}{T} \cdot \frac{\tau^2 \omega_1}{\tau^2 \omega_1^2 + 1} \cdot (1 - e^{-\frac{T}{\tau}}) \quad (8)$$

$$\Delta b_1 = \frac{2X_0}{T} \cdot \frac{\tau}{\tau^2 \omega_1^2 + 1} \cdot (1 - e^{-\frac{\tau}{T}}) \quad (9)$$

误差项 Δa_1 、 Δb_1 越大, 则非周期分量对传统傅里叶算法的影响越大。当系统频率不变时, 基波角频率 ω_1 和周期 T 为定值, 由式(8)和式(9)可知, 误差项的大小由 X_0 和 τ 决定。

由 Δa_1 、 Δb_1 所造成的基波幅值误差 $\Delta X_1\%$ 和相角误差 $\Delta\varphi_1$ 可表示为

$$\Delta X_1\% = \frac{X_1 - X_1'}{X_1'} \times 100\% \quad (10)$$

$$\Delta\varphi_1 = \varphi_1 - \varphi_1' \quad (11)$$

式中: $X_1' = \sqrt{a_1'^2 + b_1'^2}$ 为基波幅值准确值;
 $\varphi_1' = \arctan \frac{b_1'}{a_1'}$ 为基波相角准确值; $X_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}$ 为基波幅值计算值; $\varphi_1 = \arctan \frac{b_1}{a_1}$ 为基波相角计算值。

以三相空载短路为例, 根据上述推导过程, 可得传统傅里叶算法的 $\Delta X_1\%$ 和 $\Delta\varphi_1$ 随合闸角 α 和衰减时间常数 τ 的变化规律如图 1 所示。

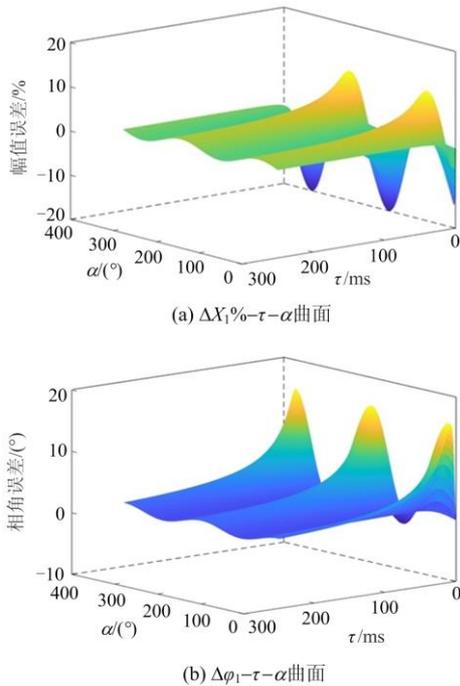
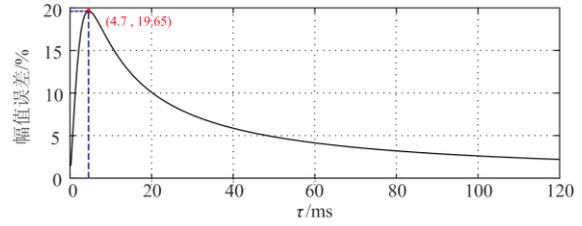


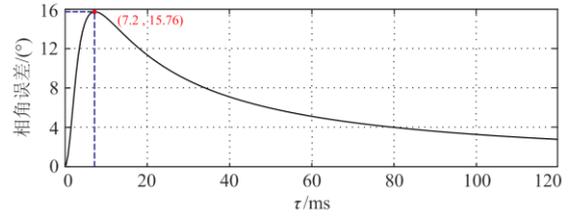
图 1 传统傅里叶算法计算误差曲面

Fig. 1 Calculation error surfaces of traditional Fourier algorithm

分析图 1(a)和图 1(b)可知幅值误差的最大绝对值 $|\Delta X_1\%|$ 和相角误差的最大绝对值 $|\Delta\varphi_1|$ 所对应的合闸角 α , 由此确定在对应的 α 下 $|\Delta X_1\%|$ 和 $|\Delta\varphi_1|$ 随衰减时间常数 τ 变化的曲线关系, 如图 2 所示。



(a) $|\Delta X_1\%|$ - τ 曲线



(b) $|\Delta\varphi_1|$ - τ 曲线

图 2 传统傅里叶算法计算误差曲线

Fig. 2 Calculation error lines of traditional Fourier algorithm

由图 2 可知, 非周期分量造成的最大幅值误差为 19.65%, 最大相角误差为 15.76°。本文以三相短路为例, 对于不对称短路来说, $|\Delta X_1\%|$ 和 $|\Delta\varphi_1|$ 的变化规律具有与图 2 相类似的特征。

2 消除非周期分量影响的改进傅里叶算法

在继电保护的标准中, 要求距离 I 段在 0~0.7 倍整定值范围内快速动作, 动作时间 ≤ 30 ms, 在整定值附近无具体的动作速度要求, 但强调的是“暂态误差在 $\pm 5\%$ 以内”, 以防止暂态超越^[21]。兼顾速度和精度要求, 并考虑到实际应用时, 傅里叶算法可能还受测量精度、求和代替积分、次要衰减成分等因素影响而产生一定的误差, 故在暂态超越 $\pm 5\%$ 规定的基础上留有计算裕度, 以 $\pm 3\%$ 作为门槛值。确定: 1) 当传统傅里叶算法计算的幅值误差不超过 $\pm 3\%$ 时, 精度较高, 不需要对计算结果进行修正; 2) 当传统傅里叶算法计算的幅值误差可能超过 $\pm 3\%$ 时, 采用本文的方法进行修正, 以消除非周期分量的影响。

于是, 考虑 $|\Delta X_1\%| > 3\%$ 时需要进行修正, 代入式(10), 可计算出需要修正的非周期分量衰减时间常数范围为

$$0.5 \text{ ms} < \tau < 202 \text{ ms} \quad (12)$$

当衰减时间常数在式(12)范围内时, 传统傅里叶算法计算结果的幅值误差有可能不超过 $\pm 3\%$, 但涵盖了幅值误差超过 $\pm 3\%$ 的所有情况。此外, 还可以增加其他条件, 实现只修正误差超过 $\pm 3\%$ 的情况, 限于篇幅, 不再赘述。

下面具体说明改进傅里叶算法的实现步骤。

2.1 基本思路

分析式(8)和式(9)可知,若能够得到非周期分量的参数 X_0 和 τ ,即可求出误差项 Δa_1 、 Δb_1 的大小^[22]。为此,对故障后第一个工频周期($t \in [0, T]$)上的采样值进行积分,有

$$S_1 = \int_0^T x(t) dt = X_0 \cdot \tau (1 - e^{-\frac{T}{\tau}}) \quad (13)$$

对时间间隔 Δt 之后的另一个工频周期 ($t \in [\Delta t, T + \Delta t]$) 上的采样值进行积分,有

$$S_2 = \int_{\Delta t}^{T+\Delta t} x(t) dt = X_0 \cdot \tau (1 - e^{-\frac{T}{\tau}}) \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \quad (14)$$

由以上两式可得

$$\frac{S_2}{S_1} = e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \quad (15)$$

解得 τ 为

$$\tau = -\frac{\Delta t}{\ln(\frac{S_2}{S_1})} \quad (16)$$

当衰减时间常数 τ 过大使得 S_2/S_1 近似为 1、而 $\ln(S_2/S_1)$ 接近于 0 时,会使式(16)中的分式不稳定,产生较大的计算误差。而式(12)中的条件对使用改进傅里叶算法时非周期分量的衰减时间常数有所限制,能够避免计算结果的不稳定。这也进一步说明了设置式(12)作为改进傅里叶算法应用条件的必要性。

\ln 函数计算量大,不适宜于实际系统的实现^[8],故将 \ln 函数展开为泰勒级数,并取前有限 k 项进行近似,即可将式(16)写为

$$\tau = -\frac{\Delta t}{\sum_{n=1}^k \frac{(-1)^{n+1}}{n} (\frac{S_2}{S_1} - 1)^n} \quad (17)$$

又由式(15)得 $e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} = (\frac{S_2}{S_1})^{\frac{T}{\Delta t}}$, 代入式(13), 得到

X_0 为

$$X_0 = \frac{S_1}{\tau [1 - (\frac{S_2}{S_1})^{\frac{T}{\Delta t}}]} \quad (18)$$

将求得的非周期分量的参数 τ 、 X_0 代入式(8)和式(9),可求得误差项 Δa_1 、 Δb_1 的数值,将其从计算值 a_1 、 b_1 中剔除,即可得到基波正弦、余弦项幅值的准确值 a_1' 、 b_1' ,进而可求出基波幅值和相角的准确值 X_1' 和 φ_1' 。

在上述推导过程中,两个工频周期的间隔 Δt 的取值以及 \ln 函数展开为泰勒级数所取的项数将

直接影响算法的精度、速度和稳定性。对 Δt 而言,若取值太小,可能由于 S_1 和 S_2 数值过于接近而造成其比值误差较大;若取值太大,则会增加计算时间。此外,对泰勒级数展开式而言,所取项数越多, τ 的计算精度就越高,但也会增加计算量。微机中对时间采取离散化的处理方式,即 Δt 的时间间隔对应于 $\Delta N = \Delta t / T_s$ 个采样点间隔(其中, T_s 为采样间隔, $T_s = T/N$, N 为每周期的采样点)。

根据式(3)的故障信号模型,考虑最严重的短路情况($X_0/X_1=1$),通过分析 ΔN 取不同值时比值 S_2/S_1 的相对误差,最终确定取 $\Delta t = \Delta N \cdot T_s = T/4$, 于是, τ 、 X_0 的计算公式可由式(17)和式(18)写为

$$\tau = -\frac{T}{4 \sum_{n=1}^k \frac{(-1)^{n+1}}{n} (\frac{S_2}{S_1} - 1)^n} \quad (19)$$

$$X_0 = \frac{S_1}{\tau [1 - (\frac{S_2}{S_1})^4]} \quad (20)$$

通过分析对泰勒级数取不同项数时 τ 和基波最大幅值的计算误差,为了满足幅值误差不大于 $\pm 3\%$ 的要求,同时兼顾算法的速度,确定改进傅里叶算法中所取泰勒级数项数的方法为^[22]: 当 τ 约大于 10 ms 时,取前 3 项即 $k=3$; 当 τ 约小于 10 ms 时,取前 6 项即 $k=6$ 。由式(15)可见, S_2/S_1 是 τ 的单调增函数,故可通过 S_2/S_1 的大小来预估 τ 的范围。

2.2 优化措施

考虑到用泰勒级数前有限项代替 \ln 函数的方法在简化计算的同时会产生一定的计算误差(尤其是在 τ 较小时),故采取一些措施对误差项进行补偿。设 $x = S_2/S_1 - 1$, 在满足式(12)条件时,有 $-1 < x < 0$, 则

$$\ln(\frac{S_2}{S_1}) = \ln(1+x) = -\sum_{n=1}^k \frac{|x|^n}{n} + \Delta \quad (21)$$

式中, $\Delta = -\sum_{n=k+1}^{\infty} \frac{|x|^n}{n}$ 难以准确计算,但观察可知,

随着 n 的增加, Δ 中各项的分子成等比数列、分母依次增加 1, 若将各项的分母放大为与第一项的相同,即可进行求和计算。因此,近似处理为

$$\Delta = -\sum_{n=k+1}^{\infty} \frac{|x|^n}{n} < -\sum_{n=k+1}^{\infty} \frac{|x|^n}{k+1} = -\frac{1}{k+1} \cdot \frac{|x|^{k+1}}{1-|x|} \quad (22)$$

把近似处理 Δ 项后的式(22)代入式(21),再将式(21)代入式(16),即可得到新的 τ 值计算公式。根据误差分析可知^[22], 采取补偿措施后的效果比仅仅增加泰勒级数项数的效果更好。经过充分分析后确定: 当 $1.9 \text{ ms} \leq \tau < 202 \text{ ms}$ 时, τ 的计算误差均在 1% 以内; 而当 $0.5 \text{ ms} < \tau < 1.9 \text{ ms}$ 时, 即使经过上述优化

措施, τ 的计算结果仍难以达到理想精度, 但是, 由于衰减时间常数较小, 非周期分量衰减较快, 在故障发生后 $T/4$ 时刻(约为 3τ), 非周期分量幅值与基波幅值之比小于 0.072, 此时用传统傅里叶算法计算基波相量已能够满足 $\pm 3\%$ 的精度要求, 故可以直接输出 $\tau \geq T/4$ 时传统傅里叶算法的计算结果, 即仅采用延时躲过非周期分量对传统傅里叶算法的影响。

上述方法通过把“暂态超越的精度要求”转化为明确的“确定求几项泰勒级数”, 并利用函数的固有特征进行误差的修正, 既保证了精度, 又减小了计算量; 通过设置式(12)作为应用条件、确定两个工频周期的间隔 Δt 以及 \ln 函数展开为泰勒级数所取项数 k 的取值, 并采取优化措施对泰勒级数展开产生的误差项进行补偿, 能够提高非周期分量参数的计算精度, 从而比现有的同类方法更好地消除非周期分量的影响, 保证并提高了距离保护 I 段的速度和精度, 更能满足实际工程需求。

3 仿真验证

根据本文提出的改进傅里叶算法, 分别采用预设故障信号(静态算例)和 Matlab/Simulink 模拟各种短路故障进行仿真计算, 并与传统傅里叶算法的计

算结果进行比较, 以验证改进傅里叶算法的性能。

3.1 对静态算例的分析验证

根据实际故障电流信号的特征, 设经过低通滤波后故障信号包含非周期分量、基波和若干次谐波分量, 其表达式为

$$i(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + I_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + I_2 \sin(2\omega_1 t + \varphi_2) + I_3 \sin(3\omega_1 t + \varphi_3) + I_5 \sin(5\omega_1 t + \varphi_5) \quad (23)$$

设每个工频周期采样 24 个点, 基波角频率 $\omega_1 = 100\pi$ 。电磁暂态过程分析和继电保护计算的近似条件一样, 通常不考虑工频交流分量幅值的衰减。考虑到电力系统故障可能受诸多因素影响, 故对式(23)中各分量的幅值与基波幅值之比、各分量相角和非周期分量衰减时间常数取不同值的组合情况分别进行了验证。例如: 各次谐波分量幅值与基波幅值之比为 $I_2/I_1=0.5$ 、 $I_3/I_1=0.3$ 、 $I_5/I_1=0.2$, 各分量相角为 $\varphi_1=60^\circ$ 、 $\varphi_2=0^\circ$ 、 $\varphi_3=30^\circ$ 、 $\varphi_5=45^\circ$; 再根据电流不突变的原则, 由式(21)确定 I_0 的数值, 并分别取 $\tau=0.5\sim 120$ ms 进行了验证。分别用传统傅里叶算法、继电保护中常用来消除直流分量的“差分滤波+传统傅里叶算法”^[23]和本文的改进算法进行计算。表 1 列出了部分的仿真验证结果。

表 1 静态仿真结果

Table 1 Static simulation results

I_0/I_1	算法	$\tau=2.0$ ms		$\tau=4.7$ ms		$\tau=7.2$ ms		$\tau=20$ ms		$\tau=60$ ms	
		$\Delta X_1/\%$	$\Delta \varphi_1/(^\circ)$								
0.2	传统算法	1.20	1.82	3.74	2.01	4.54	1.74	3.77	0.77	1.77	0.25
	差分+传统	-3.98	1.21	-1.99	1.47	-1.07	1.16	0.46	0.35	0.08	0.05
	改进算法	-0.44	0.51	-0.15	0.07	0.10	0.01	0.07	0.002	0.01	-0.001
0.5	传统算法	1.97	4.87	7.61	6.32	9.93	5.83	8.98	3.32	4.35	1.35
	差分+传统	-11.03	1.08	-6.66	2.69	-4.06	2.33	1.07	0.76	0.19	0.12
	改进算法	-1.75	1.01	-0.16	0.15	-0.15	0.02	0.06	0.00	0.02	-0.01
0.9	传统算法	-7.48	8.00	9.19	13.43	13.79	13.64	14.70	9.21	7.57	4.12
	差分+传统	-17.66	-6.04	-14.52	-0.21	-10.11	1.04	-2.57	0.66	-0.38	0.12
	改进算法	-1.46	0.48	-0.51	0.13	-0.17	-0.02	-0.06	-0.02	0.04	-0.02

注: 传统算法为传统傅里叶算法; 差分+传统算法为差分滤波+传统傅里叶算法; 改进算法为本文的改进傅里叶算法。

分析表 1 可知, 在非周期分量的初始值和时间常数取不同值的各种仿真条件下, 改进傅里叶算法均能够使基波幅值计算误差不超过 $\pm 3\%$, 且基波相角计算误差不超过 1° 。而使用传统傅里叶算法和“差分滤波+传统傅里叶算法”时误差较大, 如表 1 中所示, 当 $\tau=2$ ms 时, “差分滤波+传统傅里叶算法”误差高达 -17.66%。

此外, 还验证了故障信号中含有非整次谐波的情况, 结果表明非整次谐波对本文算法影响不大。

3.2 模拟各种短路的仿真验证

为了验证改进傅里叶算法在实际系统中的应用效果, 基于 Matlab/Simulink 仿真平台, 根据某地区 500 kV 系统的参数^[24]搭建了一个线路长度为 200 km 的分布参数输电线路模型, 如图 3 所示。图中, M、N 侧等值系统阻抗及线路正序、零序参数为: $Z_M = 0.66 + j16.51 \Omega$ 、 $Z_N = 0.85 + j38.5 \Omega$ 、 $C_{l1} = 0.01274 \mu\text{F}/\text{km}$ 、 $C_{l0} = 0.07751 \mu\text{F}/\text{km}$ 、 $Z_{l1} = 0.01273 + j0.2932 \Omega/\text{km}$ 、 $Z_{l0} = 0.3864 + j1.2957 \Omega/\text{km}$ 。

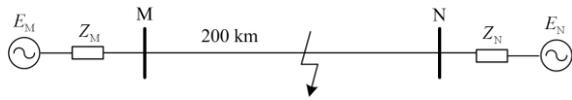


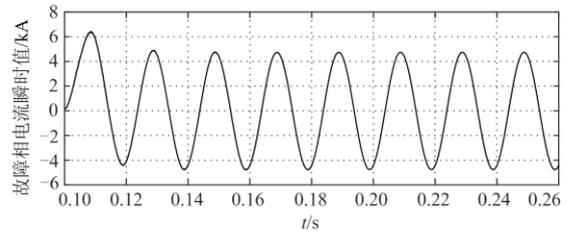
图 3 仿真模型

Fig. 3 Simulation model

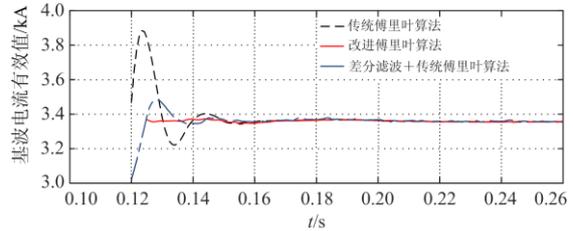
为了分析改进傅里叶算法在不同故障情况下的计算效果,分别设置系统在线路 MN 的 10%、50%、90% 处发生单相接地故障,并且对于每个短路点,分别取过渡电阻为 0.01Ω、10 Ω、50 Ω、100 Ω、300 Ω 等不同数值。故障发生在 0.1 s 时刻,持续时间为 0.4 s。

以线路 MN 的 50% 处经一定的过渡电阻接地为例,用传统傅里叶算法、“差分滤波+传统傅里叶算法”和本文的算法分别对 M 侧故障相电流进行处理,故障电流波形和各方法的基波电流有效值计算结果如图 4 所示。

由图 4 可知,在故障发生后的一段时间内,故障相电流中的非周期分量幅值较大,传统傅里叶算法的计算结果波动明显,误差较大,最大相对误差达 15.45%;“差分滤波+传统傅里叶算法”的最大相对误差为-9.88%;相比于前两者而言,改进傅里叶算法的计算结果比较稳定,误差最小,相对误差在



(a) 故障相电流波形



(b) 基波电流有效值计算结果

图 4 线路 MN 的 50% 处发生单相接地故障的仿真结果

Fig. 4 Simulation result of single-phase ground fault occurred at 50% of line MN

1% 范围内。

其他情况下的仿真结果与图 4 类似。对于在不同故障点处经不同过渡电阻发生各种类型的故障情况进行了充分的仿真验证,故障相基波电流有效值计算结果的最大误差百分比如表 2 所示。

表 2 不同故障点、不同故障类型、不同过渡电阻仿真结果

Table 2 Simulation results on different fault location, fault types and transition resistance

故障点	算法	单相接地短路			两相接地短路		两相短路		三相短路	
		0.01 Ω	100 Ω	300 Ω	金属性 短路	弧光压降 0.05U _N	金属性 短路	弧光压降 0.05U _N	金属性 短路	弧光压降 0.05U _N
10%	传统算法	14.34%	0.69%	0.61%	11.67%	13.36%	8.98%	11.93%	7.31%	12.68%
	差分+传统	-1.79%	-5.89%	2.02%	7.90%	12.66%	-2.45%	-2.84%	-0.51%	1.95%
	改进算法	0.25%	0.39%	-0.54%	2.35%	1.95%	1.57%	0.28%	0.31%	-0.47%
50%	传统算法	16.63%	-1.50%	1.36%	8.14%	8.32%	6.30%	11.11%	7.34%	14.01%
	差分+传统	-3.39%	-11.31%	-5.68%	-1.71%	-1.95%	2.04%	-2.55%	-0.79%	-1.59%
	改进算法	-0.36%	-1.02%	1.25%	-0.91%	-0.95%	0.49%	-1.43%	0.76%	-0.78%
90%	传统算法	12.73%	1.77%	-1.68%	8.49%	8.61%	6.19%	14.37%	7.28%	15.79%
	差分+传统	-1.87%	-8.93%	-3.33%	-1.48%	1.66%	1.03%	-4.26%	0.55%	-2.78%
	改进算法	1.75%	1.49%	1.27%	-0.18%	0.84%	0.33%	1.50%	0.24%	0.70%

注:传统算法为传统傅里叶算法;差分+传统算法为差分滤波+传统傅里叶算法;改进算法为本文的改进傅里叶算法。

通过对模拟短路的仿真验证可知,在各种故障场景下,改进傅里叶算法都能够有效消除非周期分量的影响,达到理想的效果。此外,还验证了不对称负荷等其他情况,仿真结果表明,本文所提的改进算法均具有良好的适用性。

分析可知,当非周期分量的衰减时间常数较小时,传统傅里叶算法和“差分滤波+传统傅里叶算法”的计算误差较大,但是计算结果波动时间较短,

能较快趋于准确值;当非周期分量的衰减时间常数较大时,传统傅里叶算法和“差分滤波+传统傅里叶算法”的计算误差有所减小,但是需要较长的时间趋于准确值。在非周期分量的衰减时间常数较小到较大的范围内,改进傅里叶算法的计算结果都较稳定,且误差很小。

通过 3.1 节和 3.2 节的仿真验证可以知道,本文所提出的改进傅里叶算法能够将误差由图 1 中的高

达 19.65%限制到各种情况下均在 $\pm 3\%$ 以内。

改进傅里叶算法能够消除整数次谐波的影响, 并抑制非整数次谐波分量。充分的仿真验证表明, 对于多个时间常数和转换性故障的情况, 改进傅里叶算法也能起到很好的效果, 性能优于已有的方法。改进傅里叶算法也与 FFT 作了对比, 结果表明改进傅里叶算法效果更好。此外, 还验证了改进傅里叶算法与传统傅里叶算法在电流互感器饱和时的误差, 二者的误差基本一致。限于篇幅, 不再赘述。

4 结论

本文分析了非周期分量对传统傅里叶算法的影响, 提出了一种消除非周期分量影响的改进傅里叶算法, 通过计算非周期分量参数来消除该分量对传统傅里叶算法带来的影响, 并拓展了泰勒级数的误差计算方法, 进而求得基波的较准确值。将本文方法应用于继电保护 I 段时, 能够满足对速度和精度的双重要求, 十分有利于防止暂态超越。

经静态算例和模拟短路的仿真分析表明, 本文的改进算法实现简单, 能够兼顾速度与精度, 具有良好的实用效果。此外, 在计算整数次谐波分量时, 本文所提算法也同样适用。

当然, 傅里叶算法本身还受频率波动影响, 如果需要, 还可以采用测频方法消除其影响。

参考文献

- [1] 金晨, 张保华. 一种改进的微机保护装置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 155-161.
JIN Chen, ZHANG Baohua. Study on an improved microcomputer protective device[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 155-161.
- [2] TELUKUNTA V, PRADHAN J, AGRAWAL A, et al. Protection challenges under bulk penetration of renewable energy resources in power systems: a review[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(4): 365-379.
- [3] 杨奇逊, 黄少锋. 微型机继电保护基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [4] 高伟聪, 刘益青, 陈国斌, 等. 正交滤波相量算法的故障暂态响应及校正方法[J]. 智慧电力, 2020, 48(1): 1-8.
GAO Weicong, LIU Yiqing, CHEN Guobin, et al. Fault transient response and correction of orthogonal filter-based phasor algorithm[J]. Smart Power, 2020, 48(1): 1-8.
- [5] 苏文辉, 李钢. 一种能滤去衰减直流分量的改进全波傅氏算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(23): 42-44.
SU Wenhui, LI Gang. An improved full-wave Fourier algorithm for filtering decaying DC component[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(23): 42-44.
- [6] JAFARPISHEH B, MADANI S M, SHAHRTASH S M. A new DFT-based phasor estimation algorithm using high-frequency modulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(6): 2416-2423.
- [7] 陈德树. 计算机继电保护原理与技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [8] ABDOOS A A, GHOLAMIAN S A, FARZINFAR M. Accurate and fast DC offset removal method for digital relaying schemes[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(8):1769-1777.
- [9] 吴继维, 童晓阳, 廖小君, 等. 一种滤除衰减直流分量的全波傅氏改进算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 9-17.
WU Jiwei, TONG Xiaoyang, LIAO Xiaojun, et al. A full-wave Fourier improved algorithm of filtering decaying DC component[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 9-17.
- [10] MAHARI A, SANAYE-PASAND M, HASHEMI S M. Adaptive phasor estimation algorithm to enhance numerical distance protection[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(5): 1170-1178.
- [11] 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 Shinian, TONG Weiming, GUO Zhizhong, et al. A fast filtering algorithm for extracting fundamental instantaneous value[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 44-49.
- [12] 翁文婷. 减小非周期分量影响的电气量计算方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
WENG Wenting. Study on electrical calculation method of reducing aperiodic component[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [13] 王帅, 毕天姝, 贾科. 基于小波时间熵的 MMC-HVDC 架空线路单极接地故障检测方法[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2179-2185.
WANG Shuai, BI Tianshu, JIA Ke. Wavelet entropy based single pole grounding fault detection approach for MMC-HVDC overhead lines[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2179-2185.
- [14] 唐天天. 电力系统暂态信号小波熵检测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
TANG Tiantian. Research of wavelet entropy detection methods on power system transient signals[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [15] 刘柱揆, 丁心志, 陈福明, 等. 小波去噪方法在开关柜故

- 障检测中的应用[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 3090-3094.
- LIU Zhukui, DING Xinzhi, CHEN Fuming, et al. Application of wavelet de-Noiseing in fault detection of MV switchgear[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 3090-3094.
- [16] 崔永林, 席燕辉, 张小东. 基于自适应卡尔曼滤波残差分析的谐波检测[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 92-100.
- CUI Yonglin, XI Yanhui, ZHANG Xiaodong. Detection of harmonic based on residual analysis using adaptive Kalman filter[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 92-100.
- [17] KHODAPARAST J, KHEDERZADEH M. Least square and Kalman based methods for dynamic phasor estimation: a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 1-18. DOI: 10.1186/s41601-016-0032-y.
- [18] 刘素贞, 魏建, 张闯, 等. 基于 FPGA 的超声信号自适应滤波与特征提取[J]. 电工技术学报, 2020, 35(13): 2870-2878.
- LIU Suzhen, WEI Jian, ZHANG Chuang, et al. Adaptive filtering and feature extraction of ultrasonic signal based on FPGA[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(13): 2870-2878.
- [19] 徐岩, 周霏霏. 基于幅值特征的变压器励磁涌流和故障电流的识别[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 205-209.
- XU Yan, ZHOU Feifei. A method to distinguish inrush current of power transformer from fault current based on amplitude characteristics[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 205-209.
- [20] 康小宁, 屈亚军, 焦在滨, 等. 基于最小二乘矩阵束算法的工频分量提取方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(21): 66-70.
- KANG Xiaoning, QU Yajun, JIAO Zaibin, et al. Power-frequency phasor extraction based on least-square matrix pencil algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(21): 66-70.
- [21] 侯俊杰, 樊艳芳. 基于分布参数模型的风电系统长距离送出线时域距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 26-33.
- HOU Junjie, FAN Yanfang. Time domain distance protection for long distance outgoing line of wind power system based on distributed parameter model[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 26-33.
- [22] 周宇聪. 提高距离保护测量精度和耐受过渡电阻能力的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- ZHOU Yucong. Researching on improving measurement accuracy and ability to endure transition resistance in distance protection[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [23] 盛小伟. 基于 DSP 的并联电容器保护研究与实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- SHENG Xiaowei. Study on shunt capacitors protection relay and its realization based on DSP[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.
- [24] 陈皓. 微机保护原理及算法仿真[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

收稿日期: 2020-10-15; 修回日期: 2021-01-22

作者简介:

黄少锋(1958—), 男, 硕士, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: huangsf@sf-auto.com

高琦(1995—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: gqncepu@163.com

周宇聪(1992—), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: zhoyucong1992@126.com

(编辑 周金梅)