

基于电流突变量曲线拟合的故障时刻检测算法

董金金¹,高厚磊¹,李娟²,刘星³

(1. 山东大学 电网智能化调度与控制教育部重点实验室,山东 济南 250061;

2. 国网江苏省电力公司电力科学研究院,江苏 南京 210103;3. 许继集团有限公司,河南 许昌 461000)

摘要:传统基于相电流突变量的故障时刻检测方法虽然简单,但因受暂态分量的影响而存在较大的检测误差。利用现有保护装置采集的电流信息,对相电流突变量进行曲线拟合,并经逆向推导出故障时刻。对电力系统的短路暂态过程进行分析,探究相电流突变量的变化规律并推导其广义表达式。利用 Prony 算法对离散的相电流突变量值进行函数拟合,得到表征其函数曲线的特征参数;通过改进现有的波形相似算法,进一步从拟合函数的过零点中筛选出故障时刻。结合 PSCAD 仿真测试,探究故障时刻的检测精度及其影响因素,仿真结果验证了所提算法的可行性和准确性。

关键词:故障时刻;相电流突变量;Prony 算法;曲线拟合;检测误差;电力系统;继电保护

中图分类号:TM 77

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.04.011

0 引言

继电保护装置是从故障启动环节开始对故障进行处理和判定的,而故障启动的主要依据是故障发生时刻。因此,快速、准确的故障时刻检测对于继电保护的快速反应和正确判定具有重要意义。对于某些基于两端电气量的纵联保护原理和故障测距原理而言,其要求两端的采样数据或相量数据必须同步,所采用的同步方法主要依赖于专用通信通道或卫星同步时钟,技术成本较高,可靠性易受外部因素的影响。若以故障时刻作为参考基准,则可获得较好的数据同步效果,且不依赖卫星同步时钟及信道处理,可大幅节约数据同步处理的技术成本;但同时也对故障时刻的检测精度也提出了更高的要求。基于现有继电保护装置采集的故障信息提高故障时刻检测精度是推广应用基于故障时刻的数据同步方法的关键。

文献[1-3]采用小波变换检测故障电压、电流信号的奇异点,由小波分解的模极大值确定故障时刻,但小波分析冗余度大,在正常电压、电流信号的峰值点,小波分解也存在模极大值,导致无法提取正确的故障时刻。文献[4]通过分段频移的方法对电气传输特性引入的相移进行补偿,定量提高故障时刻精度,但对子站之间相位差计算模型的准确性要求很高,需提高故障时刻前后的采样频率,带来一定的技术困难。文献[5-6]根据配电网的结构特点提出了以保护启动时刻代替故障发生时刻的电流相量同步计算方法,该算法精度易受故障初始角及直流分量的影响。文献[7]针对相电流突变量故障时刻检测

方法的主要影响因素及检测误差进行了分析,为自同步电流差动保护的应用提供了参考依据。

为克服保护元件启动延时、暂态分量等因素对故障时刻检测带来的误差,本文提出一种基于电流突变量曲线拟合的故障时刻检测方法。首先,从电力系统的短路暂态过程入手,探究相电流中暂、稳态故障分量的产生条件与变化规律,并得到相电流突变量的解析表达式;然后,引入 Prony 算法对实测相电流突变量的离散值进行曲线拟合,并利用改进波形相似算法提取故障时刻;最后,利用 PSCAD 仿真模型对所提算法的精度进行评估,分析了数据窗长、采样频率、故障初始角、噪声干扰等因素对算法精度的影响。

1 基于相电流突变量的故障检测原理

1.1 相电流突变量启动算法

故障检测的快速性、准确性与微机保护装置所采用的启动算法有关。基于相电流突变量的故障识别利用瞬时值信息进行判别,不受负荷电流影响,有利于启动元件的快速、灵敏启动。

相电流突变量故障检测算法的判别式为:

$$\Delta i_{\phi} = \| i_{\phi k} - i_{\phi k-N} \| - \| i_{\phi k-N} - i_{\phi k-2N} \| > I_{set} \quad (1)$$

其中, N 为每周周期采样点数; $\phi=A, B, C$; $i_{\phi k}$ 为当前时刻相电流采样值; $i_{\phi k-N}$ 为1个周期前相电流采样值; $i_{\phi k-2N}$ 为2个周期前相电流采样值; I_{set} 为启动门槛。

1.2 相电流突变量表达式推导

当实际系统可近似为无限大容量电源供电的系统时,假定 $t=0$ 时刻发生三相短路故障,故障后相电流突变量表达式^[7]为:

$$\Delta i_{\phi} = i_{\phi k} - i_{\phi 10l} = I_{\phi 1} \sin(\omega_1 t + \theta_1) + I_d e^{-\lambda T} \quad (2)$$

其中, $i_{\phi 10l}$ 、 $i_{\phi k}$ 分别为故障前、后相电流的采样; $I_{\phi 1}$ 为工频故障分量幅值; ω_1 为工频角频率; θ_1 为工频故

收稿日期:2017-03-01;修回日期:2018-01-16

基金项目:许继集团有限公司科研项目(SGTYHT/14-JS-190)
Project supported by the Science and Technology Program of Xuji Group Corporation(SGTYHT/14-JS-190)

分量初始相角; I_d 、 T 分别为直流分量的初始幅值和衰减时间常数。

故障电流中的暂态分量是相电流突变量的重要组成部分^[8-10]。以超高压远距离输电线路为例, 高频或低频分量^[20-21]可描述如下:

$$i'(t) = I'e^{-\beta t} \cos(\omega't + \theta') \quad (3)$$

其中, I' 、 θ' 、 ω' 分别为低频(或高频)分量的初始值、初始相角、振荡角频率; β' 为衰减参数, 其值与衰减时间常数互为倒数。

综上所述, 相电流突变量由工频故障分量及衰减暂态分量组成, 且暂态分量形如 $F e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \theta)$ 。取故障时刻为 0, 则相电流突变量的解析表达式为:

$$\Delta i_\phi = I_d e^{-t/T} + I_1 \sin(\omega_1 t + \theta_1) + \sum_{i=2,3,4,\dots;t \geq 0} I_i e^{-t/T_i} \sin(\omega_i t + \theta_i) \quad (4)$$

其中, I_i 、 ω_i 、 θ_i 、 T_i 分别为各暂态分量的初始幅值、角频率、初始相角和衰减时间常数。

1.3 相电流突变量表达式求解

对相电流突变量表达式(4)中的各参数进行计算的方法主要有解析法、数值法及 Prony 算法。其中, 解析法、数值法需已知确定的系统结构和网络参数, 且计算过程复杂。Prony 算法^[11-13]可将等间隔采样的时域信号表示为一组指数函数的线性组合, 提取信号的幅值、相角、频率和衰减时间常数, 无需系统结构、网络参数等信息。

本文引入 Prony 算法计算相电流突变量的参数, 假定实测值为 $x(n)$, 其拟合值可表示为:

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^p b_i z_i^n \quad n = 1, 2, \dots, N_0 - 1 \quad (5)$$

其中, p 为模态阶数; $b_i = A_i \exp(j\theta_i)$; $z_i = \exp[(\alpha_i + j2\pi f_i)\Delta t]$; A_i 、 f_i 、 θ_i 、 α_i 分别为相电流突变量中各分量的初始值、频率、初始相角和衰减因子; N_0 为原始信号采样数。

根据最小二乘估计求解式(5)中的各参数, 使拟合值与实测值的误差平方和最小, 由此得相电流突变量的拟合函数。

值得注意的是, Prony 算法的有效性和稳定性受模态阶数的影响较大。阶数过低, 可能导致原始信号的有效模态分量丢失; 阶数过高, 将会增加高次方程的求解难度, 且因信息冗余而引入误差。已知在 Prony 算法的计算过程中, 法方程系数矩阵的秩与原始信号中有效模态分量的数量有关^[15], 可将其用于模态阶数的计算和选取, 方法如下。

a. 取模态阶数初值为: $p_0 = N_0/2$ 。

b. 由离散采样值构造法方程系数矩阵如下:

$$R_{i,j} = \sum_{m=k}^{N_0-1} x(m-i)x(m-j) \quad i, j = 1, 2, \dots, p_0 \quad (6)$$

c. 对矩阵 R 求秩, $p = \text{rank}(R)$ 。

2 故障时刻检测算法

2.1 故障时刻检测原理

图 1 为故障前后相电流突变量波形, 图中, t_0 时刻发生故障, t_1 时刻启动元件启动, 两者的时间差称为启动延时, 易知启动延时不可避免。传统基于相电流突变量的故障时刻检测算法忽略了启动延时的影响^[7], 导致最大检测误差可达 6.22 ms。

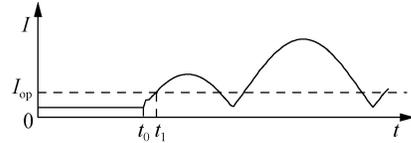


图 1 故障前后相电流突变量波形

Fig.1 Waveform of phase current increment before and after fault

根据故障时刻电感电流不能突变的特点, 本文提出故障时刻检测思路: 检测到故障时, 以启动时刻为起点获取一定时间窗口的采样数据, 由 Prony 算法得相电流突变量的拟合函数, 根据该函数的过零点可筛选出故障时刻。

设启动时刻为 t_1 , 则相电流突变量表达式为:

$$\Delta i(t) = I'_d e^{-(t-t_1)/T} + \sum I_i e^{-(t-t_1)/T_i} \sin[\omega_i(t-t_1) + \theta'_i] + I_1 \sin[\omega(t-t_1) + \theta'_1] \quad t \geq t_1 \quad (7)$$

设故障时刻为 t_0 , 易知当 $t_0 \leq t \leq t_1$ 时, 式(7)仍成立, 取 $t = t_0$ 代入, 有:

$$\Delta i(t_0) = I'_d e^{-(t_0-t_1)/T} + \sum I_i e^{-(t_0-t_1)/T_i} \sin[\omega_i(t_0-t_1) + \theta'_i] + I_1 \sin[\omega(t_0-t_1) + \theta'_1] = 0 \quad t_1 - 6.22 \leq t_0 \leq t_1 \quad (8)$$

式(8)仅含未知量 t_0 , 考虑启动延时、互感器误差、计算误差及一定误差允许裕度, 求解区间取为 $[t_1 - 7.50, t_1]$ ms。本文采用寻根法求解, 求解步长 $h = 0.02/N$, 方法如下。

a. 若 $\Delta i(t_n) = 0$, 则 t_n 即为方程的解。

b. 若 $\Delta i(t_n) \Delta i(t_{n+1}) > 0$, 则 $[t_n, t_{n+1}]$ 为无解区间。

c. 当 $\Delta i(t_n) \Delta i(t_{n+1}) < 0$, 则 $[t_n, t_{n+1}]$ 为有解区间: 若 $\Delta i[(t_n + t_{n+1})/2] = 0$, 则 $(t_n + t_{n+1})/2$ 为方程解; 若 $\Delta i[(t_n + t_{n+1})/2] \Delta i(t_n) < 0$, 则 t_{n+1} 为方程解; 否则 t_n 为方程解。

2.2 故障时刻判别方法

在求根区间内, 若式(8)仅有 1 个解, 则该解为故障时刻; 若存在多个解(至多 2 个, 设为 g_0 、 g'_0), 需进一步判别。

a. 设 g_0 表示故障时刻, g'_0 表示非故障时刻。

当 $g_0 > g'_0$ 时, 以 g_0 为起点的一段时间内, 相电

流突变量的实测值与拟合值基本相等,相似性较高;以 g'_0 为起点的一段时间内,实测值含有一段接近为0的数据,而拟合值则按一定规律变化,相似性较低。

b. 当 $g_0 < g'_0$ 时,分别以 g_0 、 g'_0 为起点的一段时间内,实测值与拟合值基本相等,相似性均较高。

根据传统波形相似理论,相似系数计算如下:

$$\lambda = \frac{\min \left(\sum_{k=1}^{N_1} i_{sk}^2(k), \sum_{k=1}^{N_1} i_s^2(k) \right)}{\max \left(\sum_{k=1}^{N_1} i_{sk}^2(k), \sum_{k=1}^{N_1} i_s^2(k) \right)} \quad (9)$$

其中, $i_{sk}(k)$ 为拟合的相电流突变量采样值; $i_s(k)$ 为实测的相电流突变量采样值; N_1 为相似性计算数据窗长,考虑准确性及计算量,取 $N_1 = 5$ ms。

故障时刻的检测精度主要取决于故障点附近相电流突变量实测值与拟合值的相似度,而故障时刻附近相电流突变量接近为0,对相似度的贡献比非常低,根据式(9)判别故障时刻可能出现误判。为克服这一缺陷,本文引入权重系数 $\zeta(k)$,若相电流突变量在0附近(此处指小于1/100的最大值),选取大权重系数(取值为5~10);反之选取小权重系数(取值为0.8~1)。改进的波形相似系数计算式为:

$$\lambda = \frac{\min \left(\sum_{k=1}^{N_1} \zeta(k) i_{sk}^2(k), \sum_{k=1}^{N_1} \zeta(k) i_s^2(k) \right)}{\max \left(\sum_{k=1}^{N_1} \zeta(k) i_{sk}^2(k), \sum_{k=1}^{N_1} \zeta(k) i_s^2(k) \right)} \quad (10)$$

假设以 g_0 、 g'_0 为起点的相似系数分别为 λ_0 、 λ'_0 ,结合大量仿真测试,本文取相似度阈值为0.8。如果 $\min(\lambda_0, \lambda'_0) > 0.8$,则判定数值较小的过零点为故障时刻;反之判定数值较大的过零点为故障时刻。

综上所述,故障时刻检测步骤如下:

a. 基于相电流突变量启动算法进行故障检测,得到启动元件的启动时刻;

b. 从启动时刻起,获取1个工频周期内相电流突变量实测值;

c. 由Prony算法计算相电流突变量的参数;

d. 计算相电流突变量拟合函数的过零点,并确认真实的故障时刻。

3 PSCAD 仿真算例

采用PSCAD仿真软件搭建500 kV、200 km的输电线路系统模型,如图2所示。

a. 系统参数为: M 侧系统正序阻抗 $Z_{M1} = 1.09 + j42.03 \Omega$, M 侧系统零序阻抗 $Z_{M0} = j30.21 \Omega$; N 侧系统正序阻抗 $Z_{N1} = 1.05 + j42.21 \Omega$, N 侧系统零序阻抗 $Z_{N0} = j39.53 \Omega$ 。



图2 500 kV输电线路PSCAD仿真模型

Fig.2 PSCAD simulation model of 500 kV power system

b. 电源参数: $E_M = 408$ kV, $E_N = 408$ kV, $\delta = 10^\circ$ 。

c. 线路参数为: $r_1 = 0.027 \Omega/\text{km}$, $\omega l_1 = 0.3028 \Omega/\text{km}$, $1/(\omega c_1) = 0.01419 \Omega/\text{km}$; $r_0 = 0.1957 \Omega/\text{km}$, $\omega l_0 = 0.6945 \Omega/\text{km}$, $1/(\omega c_0) = 0.02005 \Omega/\text{km}$ 。

采用图2所示模型,在距 M 端25 km处设置A相接地故障,采样频率为4 kHz。发生故障时电压相角分别设置为 0° 、 60° 、 90° 、 120° ,获取电流互感器 TA_1 的采样数据,分别采用所提算法检测故障时刻,并绘制相电流突变量故障前10 ms、故障后20 ms的实测曲线与拟合曲线,如图3所示。

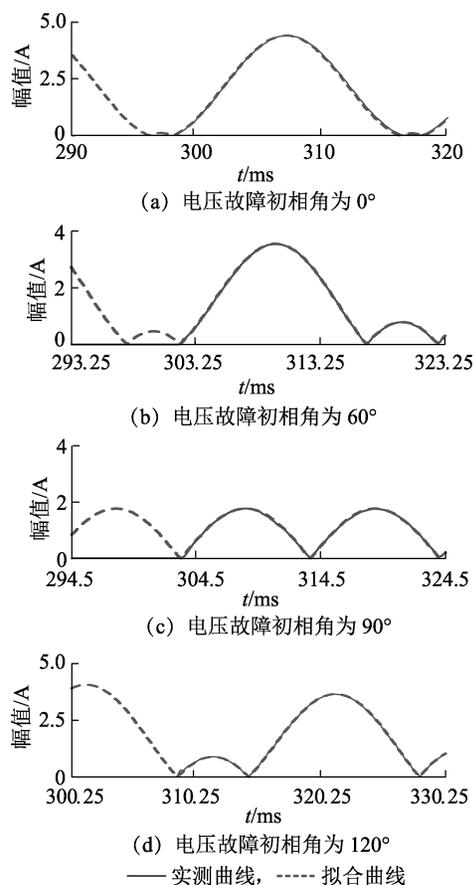


图3 不同电压故障初始角下的相电流突变量拟合曲线和实测曲线的对比

Fig.3 Comparison between fitting and measuring curves of phase current increments under different initial fault phase

由图3可看出,暂态分量的含量及启动元件的启动延时受故障初始角的影响较大;采用Prony算法可对相电流突变量进行较准确的拟合。

不同电压故障角下,故障时刻检测结果如表1所示,表中, x_1 、 x_2 分别为求根区间的2个解, λ_1 、 λ_2 分别为 x_1 、 x_2 的相似度,后同。由表1可知,当拟合

函数在求根区间有 2 个过零点时,根据改进的波形相似算法可准确筛选故障时刻。

表 1 故障时刻检测结果

Table 1 Results of fault instant detections

故障角/ (°)	启动时 刻/ms	x_1	λ_1	x_2	λ_2	检测结 果/ms
0	300.00	296.25	0.198 3	298.75	0.980 3	298.75
60	303.25	297.00	0.000 0	302.00	0.958 6	302.00
90	304.50	303.75	0.962 5	—	—	303.75
120	310.25	305.50	0.997 8	309.75	0.980 5	305.50

为进一步分析改进前、后波形相似算法对故障时刻检测精度的影响,设故障时刻为 299.43 ms,获取 TA₁ 的采样数据,保护启动时刻为 302.50 ms,分别采用传统、改进波形相似原理计算相似系数,结果如表 2 所示。

表 2 传统、改进后的波形相似原理对比

Table 2 Comparison between traditional and improved waveform similarity algorithms

方法	x_1	λ_1	x_2	λ_2	检测结 果/ms	检测误 差/ms
传统	298.50	0.800 2	299.50	0.963 2	298.50	0.93
改进	298.50	0.503 7	299.50	0.960 5	299.50	0.07

由表 2 可以看出,根据传统波形相似理论计算时,数值接近零的值对相似系数的影响远小于数值较大的值,使计算结果偏大,引起故障时刻的误判;引入权重系数对波形相似理论进行改进后,可更准确地反映故障点附近实测信号与拟合信号的相似度并正确识别故障时刻。

4 检测精度及影响因素分析

4.1 评估指标

为进一步分析所提算法的精度,除相似系数之外,引入以下参数进行评估。

a. 检测误差。

$$\xi = t_c - t_z \quad (11)$$

其中, t_c 为故障时刻检测值; t_z 为故障时刻真值。

b. 均方根差。

$$\varepsilon_{\text{mse}} = \sqrt{E \left(\frac{i_{sk}(k) - i_s(k)}{\max |i_s(k)|} \right)^2} \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (12)$$

其中, K 为计算数据窗对应的采样点个数; $E(\cdot)$ 为期望公式。

c. 最大残差。

$$\varepsilon_{\text{max}} = \frac{\max |i_{sk}(k) - i_s(k)|}{\max |i_s(k)|} \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (13)$$

式(11)—(13)所示参数从不同角度描述了 Prony 算法的拟合效果:本文拟合波形的本质是对一段实测波形求恢复像,并外推得扩展像,相似系数表征了恢复像及扩展像对实测波形的还原度,其值越

大,还原度越高;均方根差表征了拟合值与实测值的平均偏离程度,其值越小,整体拟合效果越好;最大残差表征了拟合值与实际值的最大偏离情况,具有局部特征,其值越大,局部拟合误差越大。

4.2 影响因素分析

4.2.1 数据窗长度

采用 Prony 算法对相电流突变量进行拟合,需从启动时刻起收集一定时间段的采样数据。若数据窗较长,则包含的信息更完整,结果也更准确,但所需时间也更长;若数据窗较短,则可缩短计算时间,但信息完整度降低,导致误差增大。寻求合适的的数据窗长度是快速、准确检测故障时刻的关键。

在距 M 端 100 km 处设置 BC 两相接地故障,采样频率为 4 kHz,选取 TA₁ 的采样数据检测故障时刻。在 1 个周期内设置每隔 1 ms 故障时刻进行仿真,并根据式(11)—(13)计算误差,各仿真结果平均值如表 3 所示。

表 3 不同数据窗下所提算法的检测误差

Table 3 Errors of proposed algorithm in different data windows

数据窗长/ms	$\varepsilon_{\text{max}}/\%$	$\varepsilon_{\text{mse}}/\%$	相似度/%	检测误差/ms
20	3.61	1.85	95.53	0.18
18	4.30	2.07	95.47	0.21
15	10.43	8.31	87.96	0.89
10	28.66	23.77	70.85	1.82

由表 3 可知,算法的精度随数据窗的缩短而降低。当数据窗选为 1 个工频周期或接近 1 个工频周期时,可较准确地拟合相电流突变量,故障时刻的检测误差不超过 0.21 ms;当数据窗为 3/4 或 1/2 的工频周期,对相电流突变量的拟合效果明显下降,故障时刻的检测误差较大。

易知,本文算法的计算时间主要取决于数据窗的长度。目前绝大部分情况下,电流差动保护仍基于工频稳态量进行判定,应用本文算法可在 1 个工频周期内实现故障时刻的检测及故障数据的自同步处理,满足电流差动保护的要求。考虑算法的检测精度和一定的时间裕度,本文取数据窗长为 18 ms。

4.2.2 采样频率

系统的采样频率决定有限数据窗内采样值的数量,下面探究采样频率对故障时刻检测的影响。

在距 M 端 200 km 处设置 C 相接地故障,采样频率分别设置为 1.2 kHz、1.6 kHz、3.2 kHz、4 kHz,获取 TA₁ 的采样数据,应用所提算法检测故障时刻。在一周期内每隔 1 ms 进行一次仿真,各仿真结果的平均误差如表 4 所示。

由表 4 可知,随采样频率的提高,相电流突变量的拟合误差逐渐减小,故障时刻的检测精度逐渐提高。当每周期采样点为 24 时, Prony 算法对相电流突变量的拟合误差很大,计算故障时刻时可能存在

无解情况。当每周期采样点为32及以上时,可较准确地对相电流突变量进行拟合,故障时刻平均检测误差不超过0.8 ms。

表4 不同采样频率下算法检测误差

Table 4 Errors in different sampling frequencies

采样频率/kHz	$\varepsilon_{\max}/\%$	$\varepsilon_{\text{rmse}}/\%$	相似度/%	检测误差/ms
1.2	33.28	21.53	60.50	—
1.6	11.02	7.65	89.59	0.76
3.2	5.23	2.57	94.03	0.30
4.0	4.30	2.07	95.47	0.21
10.0	4.02	1.96	95.89	0.20

经大量测试表明,当每周期采样点不少于30时,Prony算法对时域信号的拟合效果比较好。

4.2.3 故障初始角

在M端线路出口处设置A相短路故障,采样频率为4 kHz。设置不同故障时刻代表不同故障初相角,获取TA₁的采样值,分别采用传统基于相电流突变量的故障时刻检测法(简称传统算法)和本文算法对故障时刻进行检测,结果如表5所示。

表5 2种算法的故障时刻检测结果

Table 5 Results of fault instant detection of two algorithms

故障时刻/ ms	检测时刻/ms		检测误差/(°)	
	传统算法	本文算法	传统算法	本文算法
300.15	302.00	300.25	33.30	1.80
303.05	304.00	303.00	17.10	-0.90
306.26	312.25	306.50	107.82	4.32
309.57	311.75	309.75	39.24	3.24
312.00	313.25	312.00	22.50	0

由表5可知,受保护启动延时的影响,传统算法的检测误差角较大,且随故障时刻变化剧烈;本文算法的检测误差角较小,当启动延时较大时也可获得较准确的检测结果。

图4为传统算法、本文算法的误差曲线。由图4可看出,由于启动延时的存在,传统算法的误差总大于0,其大小随故障初相角发生周期性变化,且存在突变,在突变点附近,相位角即使发生微小变化,故障时刻的检测误差就可能增大几毫秒。应用本文算法检测故障时刻,误差有正有负,但基本接近0,最大误差不超过0.25 ms,受故障初始角、直流分量及启动延时的影响较小,不存在突变情况,验证了所提算法的可行性和准确性。

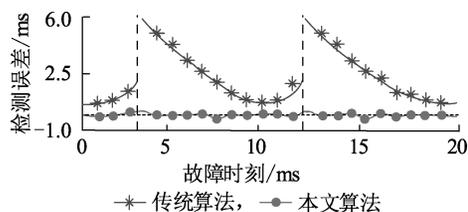


图4 2种算法的误差曲线

Fig.4 Error curves of two algorithms

4.2.4 非理想量测

实际量测时,受负荷波动及电流互感器传变误差等因素的影响,采样值往往与理想值存在一定的偏差。Prony算法的实质是对等间隔的采样值求拟合函数,若采样值存在误差,将影响算法的参数辨识度,甚至可能因法方程病态而无法获得计算结果,因此有必要对所提算法的耐量测误差能力进行探究。

a. 噪声干扰。

电力系统由于负荷投切、电磁耦合等随机的小扰动,存在类似噪声信号的小幅波动,这类干扰对数据的量测和分析有一定的影响^[14-15]。

在M端线路出口处设置A相短路故障,采样频率为4 kHz,取故障时刻为316.20 ms,获取TA₁的采样值,在仿真数据中分别嵌入信噪比不同的高斯白噪声,探究Prony算法的抗噪声能力及故障时刻的检测精度,结果如表6所示。

表6 不同信噪比下故障时刻检测误差及故障分量参数

Table 6 Error of fault instant detection and parameters of fault components under different SNR values

信噪比/ dB	直流分量		工频故障分量			检测误差/ms
	幅值/A	衰减常数/s ⁻¹	幅值/A	相位/(°)	衰减常数/s ⁻¹	
无噪声	1.886 9	-11.462 6	2.366 4	148.17	0.002 1	0.05
50	1.889 1	-11.407 0	2.370 5	148.35	-0.079 3	0.05
40	1.884 3	-11.532 4	2.368 6	148.91	-0.100 3	-0.20
35	1.862 9	-10.302 8	2.347 6	145.73	-0.693 5	0.55
30	1.932 7	-9.867 3	2.219 9	146.31	-1.302 8	0.80
20	2.023 2	-8.867 3	2.301 6	143.11	-1.875 3	1.30

从表6可看出,随着噪声信号的增强,Prony算法对各分量相关参数的计算误差增大,导致故障时刻的检测误差逐渐增大。当信噪比大于40 dB时,Prony算法的参数辨识度较高,故障时刻的检测结果较为准确,误差不超过1个采样间隔,表明Prony算法具备一定的抗噪声能力。

b. 传变误差。

电流互感器的正确传变,是获取有效采样值的基础,也是准确检测故障时刻的前提。故障时一次电流迅速增大,可能造成电流互感器饱和、传变误差增大^[16-18],通过调节电流互感器变比、二次负载及剩磁可改变电流互感器本身的耐饱和能力及传变误差^[19]。

设置不同故障初相角、故障类型及故障位置进行多次仿真,表7为不同电流互感器复合误差下本文算法对故障时刻的检测结果。由表7可看出,当电流互感器复合误差不超过8%时,检测结果比较准确,几乎不受复合误差的影响;当电流互感器复合误差大于10%时,检测误差明显增大。

表 7 不同电流互感器复合误差下本文算法的检测结果及误差
Table 7 Results and errors of fault instant detection under different CT errors

复合误差/%	$\varepsilon_{\max}/\%$	$\varepsilon_{\text{rmse}}/\%$	相似度/%	检测误差/ms
0	3.95	1.62	95.24	-0.12
2	4.62	2.82	94.31	0.13
5	6.75	3.96	92.85	0.20
8	7.05	4.52	91.39	0.21
10	10.51	6.96	86.04	0.45
15	15.14	9.61	82.53	0.88

结合仿真进行分析可知,故障电流对电流互感器的起始饱和时间及传变误差将产生影响^[19];故障电流较小时,电流互感器的传变误差往往不大,饱和一般发生在故障后第 2—5 个周期,这类情况对本文算法影响较小;当故障电流较大时,电流互感器饱和严重、传变误差增大,饱和可能出现在故障后第 1 个周期,采样值将存在较大偏差,造成故障时刻的检测误差增大。

综上所述,在一定误差范围内,电流互感器的非线性传变对故障时刻的检测影响较小,本文算法具有一定的实用性和准确性。

5 结语

本文结合故障信号本身的特征,提出了故障时刻的检测方法,针对检测过程中出现的多解问题,对传统的波形相似计算方法进行改进,实现了故障时刻的准确提取。PSCAD 仿真结果表明,当数据窗为 18 ms、采样频率为 4 kHz 时,本文算法的最大检测误差不超过 0.25 ms,且受暂态分量、故障初相角、保护启动延时等因素的影响较小,具有一定的耐互感器误差的能力,计算快速,鲁棒性较强。

本文算法为故障数据自同步方案的实现提供了条件。以故障时刻作为同步基准,实现被保护区段两端或多端故障数据的自同步处理,不需增加额外装置,有利于克服现有同步技术过于依赖卫星同步源、硬件技术要求高、造价昂贵等缺点。

参考文献:

- [1] 吴军基,吴秋伟,杨伟. 电力系统故障时刻提取的小波分析[J]. 继电器,2000,28(12):1-3.
WU Junji, WU Qiuwei, YANG Wei. Wavelet analysis of the extraction at fault time in power system[J]. Relay, 2000, 28(12): 1-3.
- [2] 郑华珍,乐全明,郁惟镛,等. 基于小波理论的超高压电网故障时刻提取[J]. 电网技术,2005,29(19):33-38.
ZHENG Huazhen, YUE Quanming, YU Weiyong, et al. Location of fault moment by wavelet in ultra-high-voltage network based on fault record data[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 33-38.
- [3] 董新洲,耿中行,葛耀中,等. 小波变换应用于电力系统故障信号分析初探[J]. 中国电机工程学报,1997,17(6):62-65.
DONG Xinzhou, GENG Zhonghang, GE Yaozhong, et al. The application of wavelet transform to power system fault signal analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(6): 62-65.
- [4] 邢浩江,张东来. 电力采集系统故障时刻精度的提高方法[J]. 中国电机工程学报,2011,31(16):88-95.
XING Haojiang, ZHANG Donglai. Improvement on fault time accuracy of power sampling system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(16): 88-95.
- [5] 由伟翰. 基于故障信号同步的配网差动保护技术[D]. 济南:山东大学,2009.
YOU Weihuan. Differential protection of distribution network based on fault signal synchronization[D]. Ji'nan: Shandong University, 2009.
- [6] 高厚磊,李娟,朱国防,等. 有源配电网电流差动保护应用技术探讨[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(5):40-44.
GAO Houlei, LI Juan, ZHU Guofang, et al. Study on application technology of current differential protection in active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 40-44.
- [7] 李娟,高厚磊,武志刚,等. 有源配电网差动保护自同步原理及误差分析[J]. 电力系统自动化,2016,40(9):78-85.
LI Juan, GAO Houlei, WU Zhigang, et al. Data self-synchronization method and error analysis of differential protection in active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(9): 78-85.
- [8] 符玲,何正友,钱清泉. 超高压输电线路的故障暂态特征提取及故障类型判断[J]. 中国电机工程学报,2010,30(22):100-106.
FU Ling, HE Zhengyou, QIAN Qingquan. Feature extraction of fault transient and fault type determination for EHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 100-106.
- [9] 宋丽群,徐波,韩笑. 考虑串补电容的超高压输电线路暂态保护判据研究[J]. 电力自动化设备,2005,25(1):37-39.
SONG Liqun, XU Bo, HAN Xiao. Research of protection criterion for EHV transmission line with compensating series capacitor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(1): 37-39.
- [10] 罗四倍,张保会,曹瑞峰,等. 基于中值滤波的超高速暂态量方向元件[J]. 中国电机工程学报,2007,27(34):64-69.
LUO Sibe, ZHANG Baohui, CAO Ruifeng, et al. Ultra-high-speed transient directional unit based on median filtering[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(34): 64-69.
- [11] 董航,刘涤尘,邹江峰. 基于 Prony 算法的电力系统低频振荡分析[J]. 高电压技术,2006,32(6):97-100.
DONG Hang, LIU Dichen, ZOU Jiangfeng. Analysis of power system low frequency oscillation based on Prony algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(6): 97-100.
- [12] FAN Lingling. Data fusion-based distributed Prony analysis[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 143: 634-642.
- [13] JARAMILLO R, LENTINI M. Stability analysis of a variant of the Prony method[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2012(2012):1-21.
- [14] 吴超,陆超,韩英铎,等. 计及模型定阶的低频振荡模式噪声信号辨识[J]. 电力系统自动化,2009,33(21):1-6.
WU Chao, LU Chao, HAN Yingduo, et al. Power system oscillation modes estimation based on ambient signals considering model order selection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(21): 1-6.
- [15] 郝正航,李少波. 白噪声激励下的低频振荡模态参数辨识方法[J]. 电力系统自动化,2007,31(15):26-29.
HAO Zhenghang, LI Shaobo. A white noise excitation based identification method for low-frequency oscillation modal parameters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(15): 26-29.
- [16] 曹团结,张剑,尹项根,等. 电流互感器的误差分析与工程计算

- [J]. 电力自动化设备,2007,27(1):53-56.
CAO Tuanjie,ZHANG Jian,YIN Xianggen,et al. Error analysis and engineering calculation of current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(1):53-56.
- [17] 李秉宇,郝晓光. 保护用电流互感器励磁特性测试及误差校核[J]. 电力自动化设备,2011,31(1):146-149.
LI Bingyu,HAO Xiaoguang. Excitation characteristics test and error checkout for protective CT[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(1):146-149.
- [18] 郭一飞,高厚磊. 直流偏磁对电流互感器暂态传变特性的影响[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):126-131.
GUO Yifei,GAO Houlei. Effect of DC bias on transient transferring characteristics of current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(12):126-131.
- [19] 袁季修. 电流互感器和电压互感器[M]. 北京:中国电力出版社,2010:9-30.
- [20] 张保会,尹项根. 电力系统继电保护[M]. 2版. 北京:中国电力出版社,2010:136-147.

- [21] 刘万顺,黄少锋. 电力系统故障分析[M]. 3版. 北京:中国电力出版社,2010:28-30,308-314.

作者简介:



董金金

董金金(1993—),女,山东菏泽人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail:dongjinjin228@163.com);

高厚磊(1963—),男,山东滕州人,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为电网继电保护、有源配电网保护和控制等(E-mail:houleig@sdu.edu.cn);

李娟(1987—),女,江苏徐州人,博士,主要研究方向为配电网故障检测;

刘星(1972—),男,山东济宁人,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统继电保护与控制(E-mail:13938918099@139.com)。

Fault instant detection algorithm based on curve fitting of phase current increments

DONG Jinjin¹,GAO Houlei¹,LI Juan²,LIU Xing³

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210103, China; 3. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: The traditional fault instant detection method based on the phase current increment is simple, but may exist a large detection error due to the influence of transient components. So with the current information collected by existing protection devices, the phase current increment is fitted and then the fault instant is obtained by inverse derivation. The transient process of short circuit in power system is analyzed, the variation law of phase current increment is explored and its generalized expression is deduced. The function curve of discrete phase current increment values is fitted by Prony algorithm and its characteristic parameters are obtained. The fault instant is further selected from the zero-crossing points of the fitting curve by improved waveform similarity algorithm. Simulation test is carried out in PSCAD/EMTDC to investigate the accuracy and influence factors of the fault instant detection, and the simulative results verify the feasibility and accuracy of the proposed algorithm.

Key words: fault instant; phase current increment; Prony algorithm; curve fitting; detection error; electric power systems; relay protection