

一种双端同步采样的时域故障测距算法

杨涛

(浙江省电力试验研究院, 浙江 杭州 310004)

摘要: 输电线路快速准确的故障定位是保证电力系统安全稳定运行的有效途径之一, 对电力系统有重要意义。传统的单端故障测距算法易受过渡电阻及对侧助增电流影响, 而双端故障测距算法一般基于频域的相量计算。提出一种基于模式理论和双端同步采样的时域故障测距算法。该算法所需传送数据量少, 并且不受过渡电阻、运行方式、故障类型等因素的影响, 并且可以将其推广到同杆并架双回线。EMTP 仿真结果显示该算法有较高精度, 测距快速简便。

关键词: 输电线路; 故障测距; 同步采样; 模变换; 时域

A time-domain fault location algorithm using synchronized sampling at two ends

YANG Tao

(Zhejiang Province Electric Power Test & Research Institute, Hangzhou 310004, China)

Abstract: Fast and accurate fault location for transmission lines plays an important role in safe and steady run of power system. The conventional single-terminal method of fault location can not eliminate the influence of the fault resistance and remote in-feed, two-terminal methods commonly based on phase calculation in frequency-domain. This paper presents a time-domain fault location algorithm based on modal theory and synchronized sampling at two ends. The algorithm needs less data from another end and is not influenced by the following factors, such as fault resistance, operation state, fault type, etc. The algorithm can also be used in fault location for double-circuit line. Lots of simulation results using EMTP have proved the high accuracy of the method.

Key words: transmission line; fault location; synchronized sampling; modal transform; time-domain

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)23-0005-04

0 引言

输电线路精确的故障定位可以极大地缩短检修人员的巡线时间, 对电力系统的安全稳定和经济运行有十分重要的意义。现有的测距方法——无论是单端测距还是双端测距, 大部分都是在频域中以单端或双端的电压和电流的基波相量为计算基础。这意味着首先要从电流电压的采样值中滤除谐波分量和非周期分量。但现有的滤波方法都不能完全消除谐波分量和非周期分量的影响, 并且需要故障切除前的几个周波的采样数据。现在故障发现和切除的时间越来越短, 有可能得不到足够的采样数据从而不能准确的提取基波相量。

本文提出了一种基于双端同步采样的时域故障测距算法, 并且利用 Karranbauer 变换使两端传输数据量减少。它采用集中参数模型, 直接利用跳闸前的原始采样数据, 无需滤波, 而在时域直接计算故障距离, 从而实现快速准确的故障定位。现在全

球定位系统 (GPS) 的应用使双端数据的同步采集成为可能, 从而保证了双端同步采样的故障定位的实现。

1 故障定位算法

考虑经过完全换位的较短距离输电线路, 由于线路长度较短, 分布电容对线路的影响几乎可以忽略, 故采用集中参数模型。一个以集中参数模型表示的 A 相发生故障的三相系统如图 1 所示。

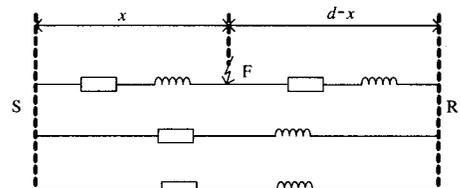


图 1 故障三相系统

Fig.1 Three-phase fault line

对于 S 端, 故障点 F 的各相电压可表示为:

$$\begin{bmatrix} u_{aF}(t) \\ u_{bF}(t) \\ u_{cF}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{aS}(t) \\ u_{bS}(t) \\ u_{cS}(t) \end{bmatrix} - x \begin{bmatrix} r_s & r_m & r_m \\ r_m & r_s & r_m \\ r_m & r_m & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{aS}(t) \\ i_{bS}(t) \\ i_{cS}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_s & l_m & l_m \\ l_m & l_s & l_m \\ l_m & l_m & l_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{aS}(t)}{dt} \\ \frac{di_{bS}(t)}{dt} \\ \frac{di_{cS}(t)}{dt} \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于 R 端, 故障点 F 的各相电压可表示为:

$$\begin{bmatrix} u_{aF}(t) \\ u_{bF}(t) \\ u_{cF}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{aR}(t) \\ u_{bR}(t) \\ u_{cR}(t) \end{bmatrix} - (d-x) \begin{bmatrix} r_s & r_m & r_m \\ r_m & r_s & r_m \\ r_m & r_m & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{aR}(t) \\ i_{bR}(t) \\ i_{cR}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_s & l_m & l_m \\ l_m & l_s & l_m \\ l_m & l_m & l_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{aR}(t)}{dt} \\ \frac{di_{bR}(t)}{dt} \\ \frac{di_{cR}(t)}{dt} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: $u_{aS}(t)$, $u_{bS}(t)$, $u_{cS}(t)$, $u_{aR}(t)$, $u_{bR}(t)$, $u_{cR}(t)$ 为 S 端和 R 端各相电压瞬时值; $i_{aS}(t)$, $i_{bS}(t)$, $i_{cS}(t)$, $i_{aR}(t)$, $i_{bR}(t)$, $i_{cR}(t)$ 为 S 端和 R 端各相电流瞬时值; r_s , r_m 为自阻和互阻, Ω /单位长度; l_s , l_m 为自感和互感, H/单位长度。

由式 (1)、(2) 联立就可以解出 x , 但是这需要将一端的三相电压与电流的采样值都送到测距装置的安装端, 这样传输的数值量就非常大。这是因为导线间存在耦合电阻和电感。可以通过解耦将以上两式分解为多个独立方程来求解, 这可以通过模变换来实现。通过模变换将相空间转化为模空间, 选取其中的模量进行计算。这样所需传送的数据就会大大减少。

1.1 模变换

将三相或多相耦合方程分解为多个线性方程来求解, 实际上就是寻求一种线性变换, 将线路的阻抗矩阵和导纳矩阵 Z 和 Y 阵对角化。常用的对称分量法就是其中之一。对于本算法来说, 只需将线路的电阻矩阵和电抗矩阵对角化。可以选择对称分量法, 但是对称分量法的变换矩阵是一个复数矩阵, 这会增加算法求解的复杂程度。在这里选择一个更

为简单的模变换——Karranbauer 变换, 其变化矩阵为:

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[M]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

和对称分量法相比, 此变换矩阵具有零元素多, 所有元素均为实数, 物理意义明确等优点。通过 Karranbauer 变换, 则有:

$$[r_m] = [M]^{-1}[r][M] \quad (5)$$

$$[l_m] = [M]^{-1}[l][M] \quad (6)$$

$$[u(t)_m] = [M]^{-1}[u(t)] \quad (7)$$

$$[i(t)_m] = [M]^{-1}[i(t)] \quad (8)$$

这样三相系统可以变换为三个独立的分量来求解, 式 (1)、(2) 可以变换为:

$$u_{Fm}(t) = u_{Sm}(t) - x[r_m i_{Sm}(t) + l_m \frac{di_{Sm}(t)}{dt}] \quad (9)$$

$$u_{Fm}(t) = u_{Rm}(t) - x[r_m i_{Rm}(t) + l_m \frac{di_{Rm}(t)}{dt}] \quad (10)$$

其中: $m=0, \alpha, \beta$ 。

α, β 分量是以架空线为回路, 称为线模量。而 0 模量以大地为回路, 称为地模量。当 0, α, β 分量都存在时, 线模分量对参数、同步误差等因素要比地模分量敏感, 所以应该尽量采用地模分量进行计算。

1.2 故障测距算法

选取合适的分量, 则有:

$$u_F(t) = u_S(t) - x[ri_S(t) + l \frac{di_S(t)}{dt}] \quad (11)$$

$$u_F(t) = u_R(t) - (d-x)[ri_R(t) + l \frac{di_R(t)}{dt}] \quad (12)$$

两式相减整理得:

$$u_R(t) - u_S(t) - d[ri_R(t) + l \frac{di_R(t)}{dt}] + x[ri_R(t) + ri_S(t) + l \frac{di_R(t)}{dt} + l \frac{di_S(t)}{dt}] = 0 \quad (13)$$

根据梯形定理 $\frac{di}{dt} = \frac{i(k) - i(k-1)}{\Delta t}$ 可以将式

(13) 进行离散化为:

$$u_R(k) - u_S(k) - d[ri_R(k) + l \frac{i_R(k) - i_R(k-1)}{\Delta t}] + x[ri_R(k) + ri_S(k) + l \frac{i_R(k) - i_R(k-1)}{\Delta t} + l \frac{i_S(k) - i_S(k-1)}{\Delta t}] = 0 \quad (14)$$

在式中, Δt 表示采样时间间隔。 $k = 1, 2, \dots, N$ 。 N 为总采样点数。将式 (14) 简化表示为:

$$A(k) + xB(k) = 0 \quad (15)$$

由于信息量是冗余的, 所以可以利用最小二乘估计来计算 x 的值:

$$x = - \frac{\sum_{k=1}^N A(k)B(k)}{\sum_{k=1}^N B^2(k)} \quad (16)$$

1.3 测距算法对双回线的推广

对于同杆并架的双回输电线路, 其电阻矩阵和电抗矩阵分别为:

$$[r'] = \begin{bmatrix} r_s & r_m & r_m & r'_m & r'_m & r'_m \\ r_m & r_s & r_m & r'_m & r'_m & r'_m \\ r_m & r_m & r_s & r'_m & r'_m & r'_m \\ r'_m & r'_m & r'_m & r_s & r_m & r_m \\ r'_m & r'_m & r'_m & r_m & r_s & r_m \\ r'_m & r'_m & r'_m & r_m & r_m & r_s \end{bmatrix}$$

$$[l'] = \begin{bmatrix} l_s & l_m & l_m & l'_m & l'_m & l'_m \\ l_m & l_s & l_m & l'_m & l'_m & l'_m \\ l_m & l_m & l_s & l'_m & l'_m & l'_m \\ l'_m & l'_m & l'_m & l_s & l_m & l_m \\ l'_m & l'_m & l'_m & l_m & l_s & l_m \\ l'_m & l'_m & l'_m & l_m & l_m & l_s \end{bmatrix}$$

其中: r_s, r_m, r'_m 分别为线路自阻、同回线路互阻和两回线路互阻; l_s, l_m, l'_m 分别为线路自感、同回线路互感和两回线路互感。

可以通过扩展的 Karranbauer 变换矩阵进行模变换, 其变换矩阵为:

$$[S] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -2 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & -2 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -2 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & -2 \end{bmatrix}$$

$$[S]^{-1} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 2 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & -2 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & -2 \end{bmatrix}$$

通过 Karranbauer 变换并且选取合适的分量就可以得到式 (13), 这样可以实现同杆并架双回线的故障测距。

2 仿真计算

为检验测距算法结果的正确性, 利用 EMTF 程序对单回线与同杆并架双回线的各种故障进行了仿真计算。线路长度为 100 km, 正序参数: $Z_1 = 0.027 + j0.386 \Omega/\text{km}$, $C_1 = 0.0136 \mu\text{F}/\text{km}$; 零序参数: $Z_0 = 0.264 + j0.946 \Omega/\text{km}$, $C_0 = 0.0091 \mu\text{F}/\text{km}$; 双回线间互感 $Z_{m0} = j0.460 \Omega/\text{km}$ 。假设故障发生在距装置安装端 30 km 处。数据窗的长度为 20 ms。在不同的采样频率下, 单回线与同杆并架双回线的测距结果分别如表 1 与表 2 所示。

表 1 不同采样频率下的单回线故障测距结果

| 故障类型 | 过渡电阻 / Ω | 单回线测距结果 / km | | |
|------|-----------------|--------------|----------|----------|
| | | 每周期 40 点 | 每周期 20 点 | 每周期 10 点 |
| 单相接地 | 0 | 39.803 | 40.021 | 40.394 |
| | 50 | 40.733 | 40.904 | 41.294 |
| | 100 | 40.284 | 40.718 | 41.593 |
| 两相接地 | 0 | 40.455 | 40.328 | 40.767 |
| | 50 | 40.780 | 40.777 | 41.312 |
| | 100 | 41.054 | 41.084 | 41.399 |
| 两相相间 | 0 | 38.818 | 39.470 | 38.098 |
| | 50 | 38.819 | 39.344 | 37.854 |
| | 100 | 38.921 | 39.520 | 37.256 |
| 三相短路 | 0 | 39.117 | 39.392 | 38.923 |

表 2 不同采样频率下的双回线故障测距结果

Tab.2 Double-circuit line fault location on different samples

| 故障类型 | 过渡电阻 / Ω | 单回线测距结果 / km | | |
|------|--------------------|--------------|----------|----------|
| | | 每周期 40 点 | 每周期 20 点 | 每周期 10 点 |
| 单相接地 | 0 | 39.240 | 40.321 | 40.834 |
| | 50 | 40.550 | 40.690 | 41.291 |
| | 100 | 40.284 | 40.630 | 41.550 |
| 两相接地 | 0 | 40.345 | 40.558 | 40.743 |
| | 50 | 40.589 | 40.770 | 41.310 |
| | 100 | 40.900 | 40.102 | 41.175 |
| 两相相间 | 0 | 39.308 | 39.012 | 38.093 |
| | 50 | 39.801 | 39.344 | 37.453 |
| | 100 | 38.941 | 39.015 | 36.756 |
| 三相短路 | 0 | 39.007 | 39.470 | 38.932 |

从上表可以看出:采用此种故障测距算法后,在一定的采样频率下,对于单回线和同杆并架双回线各种故障类型,无论是高阻接地还是短路都能得到比较满意的测量结果。在此仿真模型中考虑了分布电容的影响,但从仿真结果可以看出,由于线路长度较短,电容对测距结果的影响很小,几乎可以忽略。同时可见:采样频率越高,测量结果越精确。

3 影响算法精度的因素

从 EMTP 程序的仿真结果来看,算法的测距结果是令人满意的。但其测量精度仍有可能受到以下因素的影响:

- 1) 采样频率:由上表可以看出,采样的频率越高,测距精度越高。
- 2) 线路参数的准确性:如果测距算法中所用线路参数和实际线路参数不相匹配,就会产生测量误差。
- 3) 现场设备(CT, PT 等)影响:CT, PT 等设备会引入同步误差,使两侧的数据不再同步,影响测量精度。

(上接第 4 页 continued from page 4)

参考文献

- [1] 朱声石. 高压电网继电保护原理及技术(第二版)[M]. 北京:中国电力出版社,1995.
ZHU Sheng-shi. Relay Protect Principle and Technology for High Tension Networks, Second Edition[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.
- [2] 王梅义. 电网继电保护应用[M]. 北京:中国电力出版社, 1999.
WANG Mei-yi. Applying of Power System Protection Relays[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.

4 结语

本文提出了一种基于双端同步采样技术的微分方程算法,并利用相模变换减少了数据传送量。该算法不受过渡电阻、系统负荷电流等的影响,不依赖于故障类型。仿真结果表明本算法具有很好的精度。

参考文献

- [1] 何奔腾,胡为进.同杆并架双回线路模变化分析[J].电网技术, 1998, 22(1): 25-27.
HE Ben-teng, HU Wei-jin. Mode Transformation of Double-circuit Line Tower[J]. Power System Technology, 1998, 22(1): 25-27.
- [2] 何奔腾,徐习东. $n \times t$ 相系统的模变化[J]. 电力系统及其自动化学报, 1997, 9(4): 19-26.
HE Ben-teng, XU Xi-dong. Mode Transformation of $n \times t$ -dimensional System[J]. Proceedings of the EPSA, 1997, 9(4): 19-26.
- [3] 腾林,刘万顺.一种实用的新型高压输电线路故障双端测距精确算法[J].电力系统自动化, 2001, 25(18): 24-27.
TENG Lin, LIU Wan-sun. A Novel Practical Accurate Fault Location Algorithm for HV Transmission Line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(18): 24-27.
- [4] Mladen Kezunovic, Branislava Perunicic. Synchronized Sampling Improves Fault Location.
- [5] CHEN Yun-ping, GONG Qing-wu. An Accurate Fault Location and Its Data Processing by Least Square Method[J].

收稿日期: 2007-05-28;

修回日期: 2007-09-05

作者简介:

杨涛(1978-),男,硕士,工程师,从事电力系统继电保护及自动化研究与试验工作。E-mail: power_forward@sina.com

收稿日期: 2007-07-30;

修回日期: 2007-09-05

作者简介:

王锐(1957-),女,高级工程师,从事继电保护研究与管理工作; E-mail: hndlw@tom.com
李瑞生(1966-),男,教授级工程师,从事继电保护方面的研究;
李文霞(1968-),女,高级工程师,长期从事电气设备研究与管理工作。