

双端电流时域故障定位法

高淑萍, 宋国兵, 焦在滨, 索南加乐
(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 给出了一种仅利用两端暂态电流进行单回线故障定位的时域方法. 该故障定位方法采用分布参数模型, 在故障分量网络中, 利用双端电流计算得到的沿线电压分布在故障点处时时相等, 建立了故障定位方程. 利用最小二乘法分别求取不同距离下两侧系统等效阻抗, 并根据故障点处两侧系统等效阻抗值代入故障定位方程后所得的偏差值最小, 来实现故障定位. 定位算法所需数据窗短, 适用于快速跳闸的场合. 故障定位无须电压量, 定位精度不受电压和电流互感器传变特性差异的影响. 仿真验证结果表明, 该方法测距精度高, 可实现全线范围内的故障定位.

关键词: 故障定位; 双端电流; 时域方法; 分布参数模型

中图分类号: TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)04-0101-05

Novel Time-Domain Fault Location Algorithm by Two-Terminal Currents

GAO Shuping, SONG Guobing, JIAO Zaibing, SUONAN Jiale
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A novel time-domain algorithm for locating faults on single circuit transmission lines is presented. Based on the distributed model, in pure fault component network, the voltage distributions can be calculated by current of each terminal, and then the fault location equation can be established according to the equal voltage distribution from two terminals at fault point, and the least square method is used to obtain the system impedances in different fault distance. And the fault location can be realized by searching the minimum of fault location function with system impedances. The simulations show that the proposed algorithm has a perfect locating accuracy, and can locate the faults from local terminal to remote terminal. The location algorithm only needs a short data window, so it can be used in the case of high-speed tripping. No voltage is used in this novel algorithm, and its locating accuracy is free from the influence of the transfer characteristic difference of voltage-transformer and current-transformer.

Keywords: fault location; two-terminal current; time-domain algorithm; distributed parameter model

输电线路故障后能够及时、准确地找到故障点, 不仅对修复线路和保证供电可靠性, 而且对保证整个电力系统的安全稳定和经济运行都具有十分重要的意义^[1].

故障定位原理分为行波法和故障分析法^[1-2]. 根据采用电气量的不同, 故障分析法可分为单端法^[3]和双端法^[4-10]. 双端算法原理上不受过渡电阻和两

端系统阻抗的影响, 可实现准确的故障定位. 文献[5]最早提出双端故障定位算法, 文献[6]给出分布参数模型下的故障定位方法, 文献[7]利用单端电压两端电流实现故障定位.

基于分布参数模型的时域双端法^[8-10]具有所需数据窗短, 无须滤波算法介入, 暂态数据可以用来定位故障的特点. 其中, 文献[8]的故障定位用到电压

量,其精度将受电压和电流互感器传变特性差异的影响.考虑到电容式电压互感器传变暂态信号的能力远远低于电流互感器,只需电流的故障定位方法将不受互感器传变特性差异的影响.文献[9-10]给出的故障定位方法只需双端电流,且考虑了两端数据不同步和电压电流互感器传变特性等实用化问题,但该方法只能用于双回线.

综上,研究只需两端电流的单回线故障定位方法,具有理论意义和实用价值.

1 故障分量网络

本文给出的故障定位方法在故障分量网络中进行,因此首先需要讨论单回线的故障分量网络以及网络中的电气量计算问题.

具有双端电源的单回线可以等效为如图1所示的系统, f 为故障点,将K侧系统等效为电压源 E_K 和阻抗 Z_K ,M侧等效为电压源 E_M 和阻抗 Z_M .线路为分布参数模型,单位长度上的电阻、电感、电容分别为 $R/L/C$.对于图1所示的双电源系统, f 点故障后的故障分量网络如图2所示.

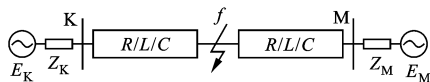


图1 双电源单相系统

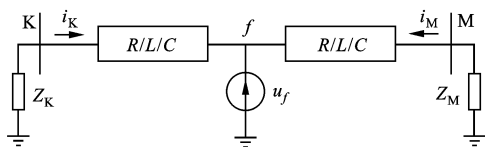


图2 单相系统故障分量网络

由图2可知,在故障分量网络中,可由两端电气量计算得到的电压在故障点处相等来实现故障定位.因此,在图2中两端电流已知的情况下,实现双端故障定位还需要已知K端和M端的电压量,或者可在已知K、M端系统等效阻抗 Z_K 、 Z_M 的情况下,由电流和系统阻抗来间接计算K端和M端的电压量.

实现故障定位,首先需要计算沿线电压分布.由文献[9]可知,在分布参数线路模型中,由两侧电压、电流计算沿线电压分布的表达式为

$$u(x, t) = \frac{1}{2} \left(\frac{Z_C + rx/4}{Z_C} \right)^2 \cdot$$

$$[u_K(t + (l-x)/v) - i_K(t + x/v)(Z_C + rx/4)] + \frac{1}{2} \left(\frac{Z_C - rx/4}{Z_C} \right)^2 [u_K(t - x/v) + i_K(t - x/v) \cdot$$

$$(Z_C - rx/4)] - \left(\frac{rx}{4Z_C} \right)^2 u_K(t) - \frac{rx}{4} \left(\frac{Z_C + rx/4}{Z_C} \right) \left(\frac{Z_C - rx/4}{Z_C} \right) i_K(t) \quad (1)$$

$$u(x, t) = \frac{1}{2} \left(\frac{Z_C + r(l-x)/4}{Z_C} \right)^2 \cdot$$

$$[u_M(t + (l-x)/v) - i_M(t + (l-x)/v) \cdot (Z_C + r(l-x)/4)] + \frac{1}{2} \left(\frac{Z_C - r(l-x)/4}{Z_C} \right)^2 \cdot$$

$$[u_M(t - (l-x)/v) + i_M(t - (l-x)/v) \cdot$$

$$(Z_C - r(l-x)/4)] - \left[\frac{r(t-x)}{4Z_C} \right]^2 u_M(t) -$$

$$\frac{r(l-x)}{4} \left(\frac{Z_C + r(l-x)/4}{Z_C} \right) \left(\frac{Z_C - r(l-x)/4}{Z_C} \right) i_M(t) \quad (2)$$

式中: l 为线路全长; x 为沿线任意一点到K端的距离; r 为线路单位长度电阻; v 为线路的波速度; Z_C 为线路的特征阻抗; $u(x, t)$ 为 t 时刻距离K端距离为 x 处的电压.

2 故障定位原理

本文的故障定位原理以两端系统背侧的阻抗为未知量,在故障分量网络中,利用由两端电流计算得到的沿线电压分布在故障点处时时相等来建立故障定位方程,并根据故障点处解得的两侧系统背侧阻抗代入故障定位方程后的偏差最小来实现故障定位.

根据式(1)、式(2),由两端电气量计算得到的电压分布在故障点处时时相等,则得

$$\begin{aligned} & (Z_C + rx/4)^2 u_K(t + x/v) - (Z_C + r(l-x)/4)^2 u_M(t + (l-x)/v) + (Z_C - rx/4)^2 u_K(t - x/v) - \\ & (Z_C - r(l-x)/4)^2 u_M(t - (l-x)/v) - 2(rx/4)^2 u_K(t) + 2(r(l-x)/4)^2 u_M(t) = \\ & - (Z_C + r(l-x)/4)^3 i_M(t + (l-x)/v) + (Z_C + rx/4)^3 i_K(t + x/v) + \\ & (Z_C - r(l-x)/4)^3 i_M(t - (l-x)/v) - (Z_C - rx/4)^3 i_K(t - x/v) - \\ & \frac{r(l-x)}{2} (Z_C + r(l-x)/4) (Z_C - r(l-x)/4) i_M(t) + \frac{rx}{2} (Z_C + \\ & \frac{rx}{4}) (Z_C - rx/4) i_K(t) \end{aligned} \quad (3)$$

根据图2,令式(3)中

$$\left. \begin{aligned} u_K(t) &= R_K i_K(t) + L_K di_K(t)/dt \\ u_M(t) &= R_M i_M(t) + L_M di_M(t)/dt \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

将式(4)带入式(3),并整理得

$$\begin{aligned} R_K(x)A_1(x) + L_K(x)A_2(x) - \\ R_M(x)A_3(x) - L_M(x)A_4(x) = Y(x) \end{aligned} \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} A_1(x) &= (Z_C + rx/4)^2 i_K(t + x/v) + \\ & (Z_C - rx/4)^2 i_K(t - x/v) - 2(rx/4)^2 i_K(t) \\ A_2(x) &= (Z_C + rx/4)^2 (di_K(t + x/v)/dt) + \\ & (Z_C - rx/4)^2 (di_K(t - x/v)/dt) - \\ & 2(rx/4)^2 (di_K(t)/dt) \\ A_3(x) &= (Z_C + r(l-x)/4)^2 i_M(t + (l-x)/v) + \\ & (Z_C - r(l-x)/4)^2 i_M(t - (l-x)/v) - \\ & 2(r(l-x)/4)^2 i_M(t) \\ A_4(x) &= (Z_C + r(l-x)/4)^2 \cdot \\ & (di_M(t + (l-x)/v)/dt) + (Z_C - r(l-x)/4)^2 \cdot \\ & (di_M(t - (l-x)/v)/dt) - \\ & 2(r(l-x)/4)^2 (di_M(t)/dt) \\ Y(x) &= -(Z_C + r(l-x)/4)^3 i_M(t + (l-x)/v) + \\ & (Z_C + rx/4)^3 i_K(t + x/v) + (Z_C - \\ & r(l-x)/4)^3 i_M(t - (l-x)/v) - \\ & (Z_C - rx/4)^3 i_K(t - x/v) - r(l-x)/2 \cdot \\ & (Z_C + r(l-x)/4)(Z_C - r(l-x)/4) i_M(t) + \\ & \frac{rx}{2} (Z_C + rx/4)(Z_C - rx/4) i_K(t) \end{aligned}$$

式(5)是故障距离的函数,在全线范围内,用最小二乘法求取不同距离 x 下系统背侧的阻抗 $R_K(x)$ 、 $L_K(x)$ 、 $R_M(x)$ 、 $L_M(x)$ 。令故障定位判据函数为

$$F(x) = \sum_{k_1}^{k_2} (R_K(x)A_1(x) + L_K(x)A_2(x) - R_M(x)A_3(x) - L_M(x)A_4(x) - Y(x))^2 \quad (6)$$

式中: k_1 与 k_2 为故障定位判据函数所选取的数据窗长度。

测距判据式(6)为0处所对应的 x 就是故障距离,而在非故障点处都有式(6)大于0成立。在实际应用中,考虑到舍入误差和计算精度等因素,式(6)取最小值时所对应的 x 就是故障距离,即

$$F(x_f) = \min\{F(x); x \in (0, l)\} \quad (7)$$

式中: x_f 为故障距离。

由式(1)可以看出,求得一组沿线分布电压,需要2倍的传输线传播时间。考虑到式(6)选取的数据窗,该测距算法所需要的数据窗长度为

$$t_w = 2l/v + (k_2 - k_1)T_s \quad (8)$$

式中: T_s 为数据的采样间隔。

式(6)所需的数据窗实际上是用于最小二乘法求解,其长度可长可短,如该数据窗取3 ms,则由式(8)可知,对于一条300 km的线路,只要数据窗 $t_w > 5$ ms 即可实现精确测距。

需要强调的是,前面给出的是单相系统的故障定位过程,其用于三相系统的故障定位时,需要将电气量分解为不同模量,并在不同模量网络中进行故障定位。

3 仿真分析

本算法是建立在常参数分布参数模型(Bergeron线路模型)的基础上,为了充分验证本算法的性能,在仿真分析中,输电线采用了更精确的频变参数模型。

某500 kV输电线路导线排列如图3所示,导线选用LGJQ-300×4,直径为23.7 mm,4分裂,裂相距离为45 cm,直流电阻为0.108 Ω/km。地线选用2×LHGJJ-90,直径为14.84 mm,直流电阻为0.374 Ω/km,土壤电阻率 $\rho = 100 \Omega \cdot m$ 。

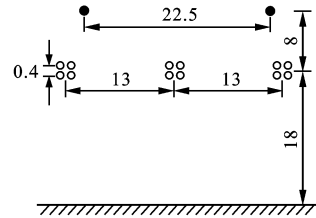


图3 某500 kV输电线路导线排列(单位:m)

本文采用如图1所示的仿真模型,具有500 kV双电源系统,线路全长为300 km,其K端的系统等效参数为 $Z_{K1} = j60.00 \Omega$, $Z_{K0} = j46.80 \Omega$, M端的系统等效参数为 $Z_{M1} = j45.20 \Omega$, $Z_{M0} = j22.01 \Omega$ 。用ATP得到仿真数据,并用MATLAB进行测距算法的仿真。在ATP仿真时,采样频率为500 kHz,所有仿真的数据窗长度取 $t_w = 5$ ms,两端数据采用GPS同步,所给出的故障距离以K侧为起点。

在距离K端200 km处发生单相金属性接地的故障定位如图4所示。故障定位采用的电气量为两端的 α 模电流,相模变换采用克拉克变换。需要强调的是,克拉克变换得到的 α 模量不能反映所有故障类型,因此该方法要基于选相结果确定基准相,或者寻求能够反映所有故障类型的相模变换矩阵来进行相模变换。

从图4可以看出,利用故障后5 ms内的采样数据可实现线路故障点的准确定位。从故障定位图可

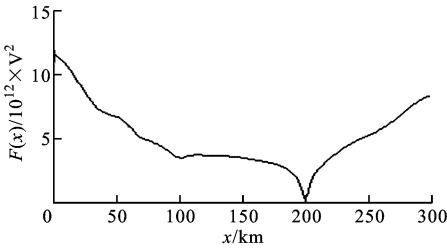


图 4 故障定位图(200 km 处 A 相接地)

以看出,在故障点处测距函数的幅值为 0。

鉴于篇幅所限,表 1 给出了不同故障距离、不同过渡电阻、利用故障暂态数据的单相故障测距结果。仿真条件是:K 端电源初相角 θ_0 超前 M 端 30° ,故障发生时刻 K 侧电源故障相的相角 θ 为 45° 。表 1 的定位结果显示,在线路全长范围内,该故障定位方法都能够实现准确定位,定位误差小于 1 km,且定位精度不受过渡电阻的影响。

表 2 给出了不同故障类型、故障距离为 100 km、过渡电阻为 50 Ω 、利用故障暂态数据的故障定位结果。仿真条件是:K 端电源初相角 θ_0 超前 M 端 30° ,故障发生时刻 K 侧电源故障相的相角 θ 为 45° 。

表 1 单相故障的测距结果

实际故障距离 /km	过渡电阻 / Ω	α 模测距结果 /km	α 模误差/%
10.0	0	10.48	-0.16
	100	10.48	-0.16
	200	10.48	-0.16
	500	10.48	-0.16
50.0	0	50.67	-0.22
	100	50.09	-0.03
	200	50.09	-0.03
	500	50.67	-0.22
100.0	0	100.18	-0.06
	100	100.18	-0.06
	200	100.18	-0.06
	500	100.18	-0.06
150.0	0	150.26	-0.09
	100	150.26	-0.09
	200	150.26	-0.09
	500	150.26	-0.09
200.0	0	199.77	0.08
	100	199.77	0.08
	200	199.77	0.08
	500	199.77	0.08
250.0	0	249.27	0.24
	100	249.27	0.24
	200	249.27	0.24
	500	249.27	0.24
290.0	0	289.46	0.18
	100	289.46	0.18
	200	289.46	0.18
	500	289.46	0.18

从表 2 的定位结果可以看出,对于所有故障类型,该故障定位方法都能够实现准确定位。

为了验证不同电源相角差和不同故障初始角对测距算法的影响,表 3 给出了相应的仿真结果。因为表 1 和表 2 的仿真已经表明故障距离、过渡电阻、故障类型等因素对测距精度没有影响,所以这里只给出单一故障距离、单相金属性接地情况下的仿真结果。从表 3 的定位结果可以看出,故障初始角度和两端电源相角差对该故障定位算法的测距精度没有影响。

表 2 不同故障类型的测距结果

故障类型	故障距离 /km	α 模测距结果 /km	α 模误差/%
AG	100.00	100.18	-0.06
AB	100.00	99.59	0.14
ABG	100.00	100.18	-0.06
ABC	100.00	99.59	0.14

注:故障类型的含义见文献[9]。

表 3 不同电源相角差和故障初始角下的测距结果

故障时刻故障相左 右侧电源相角/ $^\circ$	实际故障 距离/km	α 模测距 结果/km	α 模误差 /%
0-30	100	100.18	-0.06
45-75	100	100.18	-0.06
90-120	100	100.18	-0.06
30-0	100	100.18	-0.06
75-45	100	100.18	-0.06
120-90	100	100.18	-0.06
0-0	100	100.18	-0.06
45-45	100	100.18	-0.06
90-90	100	100.18	-0.06

以上仿真验证表明,该故障定位方法的测距精确度高,过渡电阻、故障类型、两端电源夹角、短路初相角等因素对提出的故障定位方法的测距精度没有影响。

由文献[9-10]可知,对于分布参数模型的时域故障定位方法而言,提高采样频率即可提高定位精度。另外,在采样频率不变的情况下,对原始采样点或者故障定位函数进行插值,也可提高定位的精确度。因此,为了进一步提高定位精度,在采样频率不变的情况下,可采用插值法。

4 结 论

本文提出了一种只需双端电流的故障定位算法。该算法避免了使用电压量,故定位结果不受电容式电压互感器的暂态传变能力差的影响。与行波测距相比,该算法能够用故障后任意一段数据实现测距,且不受出口短路、故障初始角的限制,可靠性高。

与频域测距算法相比,算法定位所需的数据窗短.算法采用分布参数模型,定位精度高.用频变参数线路模型产生的故障数据对算法进行验证的结果表明,其性能和适用范围都优于现有的双端测距算法.

参考文献:

- [1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安:西安交通大学出版社,1996:127-315.
- [2] 葛耀中,徐丙垠,陈平. 利用暂态行波测距的研究[J]. 西安交通大学学报,1995,29(3):70-75.
GE Yaozhong, XU Bingyin, CHEN Ping. Study of fault location based on traveling waves[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1995, 29(3): 70-75.
- [3] 索南加乐,王树刚,吴亚萍,等. 基于反序网的同杆双回线跨线故障准确测距原理[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(6): 611-615.
SUONAN Jiale, WANG Shugang, WU Yaping. New accurate fault location algorithm for faults between two lines of double-circuit transmission line based on differential network[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(6): 611-615.
- [4] 商立群,施围. 基于分布参数模型的同杆双回输电线路故障测距[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(12): 1380-1383.
SHANG Liqun, SHI Wei. Fault location algorithm for double-circuit transmission lines based on distributed parameter model[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(12): 1380-1383.
- [5] SACHDEV M S, AGARWAL R K. A technique for estimating transmission fault locations from digital impedance relay measurement[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(1): 121-129.
- [6] JOHNS A T, JAMAL S. Accurate fault location technique for transmission lines [J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 1990, 137(6): 395-402.
- [7] 董新洲,葛耀中. 一种使用两端电气量的高压输电线路故障测距算法[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(8): 47-53.
DONG Xinzhou, GE Yaozhong. Algorithm for high voltage transmission line fault location using one terminal voltage and two terminal current[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(8): 47-53.
- [8] 苏进喜,罗承沐,解子凤,等. 利用双端电气量的高压长线故障测距算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(7): 27-30.
SU Jinxi, LUO Chengmu, XIE Zifeng, et al. Fault location algorithm for long distance transmission lines using samples at both ends[J]. Journal of Tsinghua Univ (Sci & Tech), 2000, 40(7): 27-30.
- [9] 宋国兵,索南加乐,许庆强,等. 基于双回线环流的时域法故障定位[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 24-29.
SONG Guobing, SUONAN Jiale, XU Qingqiang, et al. A novel time-domain algorithm for locating faults on parallel transmission lines by circulating current [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 24-29.
- [10] SONG Guobing, SUONAN Jiale, XU Qingqiang, et al. Parallel transmission lines fault location algorithm based on differential component net[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(4): 2396-3406.

(编辑 杜秀杰)