

# 基于双端不同步采样数据的高压输电线路故障测距

卫志农, 张颖, 周红军

(河海大学电气工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 提出了一种基于双端不同步采样数据的高压输电线路故障测距算法。该算法考虑了线路的分布参数特性, 利用线路两端电压和电流量进行故障测距, 从而保证测距不受过渡电阻的影响。对于不换位三相线路, 采用模分量法, 使相互耦合的相空间三相线路解耦为相互独立的模量。为了避免求解导数的复杂性, 该文采用 Powell 方向加速法进行求解。仿真计算表明, 算法对整个线路长度区间内的任何故障点都能精确测距。

**关键词:** 高压输电线路; 故障测距; 双端线路; 分布参数; 不同步采样; 相模变换; Powell 方向加速法

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)23-0005-04

## 0 引言

高压输电线路是电力系统的重要组成部分, 随着电力系统规模的日益扩大, 高压远距离输电线路日益增多, 高压输电线路故障对电力系统、工农业生产和人们日常生活的影响面也更广。高压输电线路的准确故障测距是从技术上保证电网安全、稳定和经济运行的重要措施之一, 具有巨大的社会和经济效益<sup>[1]</sup>。

输电线路故障测距算法可分为利用单端信息和双端信息两种方法。单端测距法不受通信条件的限制, 但难以克服对端系统运行方式变化和过渡电阻的影响<sup>[2,3]</sup>。而双端测距算法在原理上完全消除了故障过渡电阻和两端系统阻抗的影响。目前大部分双端测距算法都采用基于 GPS 同步采样的双端测距算法, 虽然算法简单, 易于实现, 但需要增加 GPS 接收装置等硬件设备, 造价高, 同时测距还要依赖于 GPS 的可靠运行。而利用双端不同步数据的测距方法更应当得到关注。正如文献 [4] 指出的那样, 即使采样同步或采样同步化处理, 考虑硬件等引入的误差, 亦不应忽视长输电线两侧测量坐标间客观的不同步相差。因此虽然 GPS 的应用给双端数据同步算法提供了良机, 但要指出的是, 不需要两端数据同步的测距算法较之更优越, 具有较大的工程实用价值。

本文在以上工作的基础上, 基于输电线分布参数模型和相模变换技术, 将不对称的三相线路解耦为完全独立的模量, 继而选择合适模量, 采用 Powell 方向加速法实现不同步采样的双端故障定位。本文采用的故障测距算法基于稳态工况, 暂态值对本文并无影响。数字仿真表明, 该算法不受过渡电阻的

影响, 有较高的测距精度。

## 1 故障测距原理

双端测距方法是利用双端电压和电流量, 取消关于故障过渡电阻 (阻抗) 纯阻性的假设, 列出从两端至故障点的电压方程, 从原理上保证了不受过渡电阻 (阻抗) 的影响。

对于一条实际的输电线路, 应考虑线路的分布参数特性, 尤其对于长线, 若不考虑这种特性将会造成较大误差<sup>[2,3,5,6]</sup>。假设输电线路为参数均匀分布的线路,  $L_0$ ,  $C_0$ ,  $R_0$ ,  $G_0$  分别为输电线路单位长度的单相电感、电容、导线电阻、导线对地泄漏电导, 系统的角频率为  $\omega$ , 输电线路的传播系数为  $\gamma = \alpha + j\beta =$

$$\sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)}, \text{输电线路的特征阻抗为}$$
$$Z_c = \frac{\sqrt{R_0 + j\omega L_0}}{\sqrt{G_0 + j\omega C_0}}$$

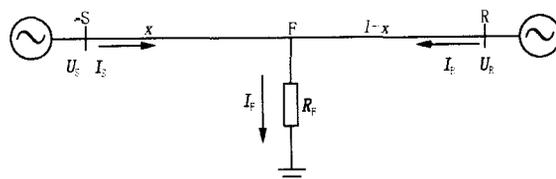


图 1 输电线路故障示意图

Fig 1 Schematic diagram of fault transmission line

图 1 为故障线路示意图, 线路的两端分别标记为 S 和 R, 线路全长为  $l$ , 假定在距离 S 端  $x$  处的 F 点发生故障。此时输电线分成了 S 至 F, R 至 F 两部分。S 和 F 之间的任一点的电压和电流可以用点 S 的电压电流来表示。同样, R 和 F 之间的任一点电压和电流可以用 R 点的电压和电流来表示, 因此

故障点 F 是唯一的一个可以用两端电压电流值表示的点。\$U\_S, U\_R\$ 为线路两侧母线 S 端、R 端的电压相量；\$I\_S, I\_R\$ 为两侧电流相量。由输电线路传输方程可得：

$$U_F = U_S \operatorname{ch} x - I_S Z_c \operatorname{sh} x \quad (1)$$

$$U_F = U_R \operatorname{ch} (l-x) - I_R Z_c \operatorname{sh} (l-x) \quad (2)$$

由于输电线路电压的连续性，当考虑两端采样数据不同步时，设不同步角为：

$$(U_S \operatorname{ch} x - I_S Z_c \operatorname{sh} x) e^{j\theta} = U_R \operatorname{ch} (l-x) - I_R Z_c \operatorname{sh} (l-x) \quad (3)$$

此为基于双端不同步采样数据的高压输电线路故障测距的基本公式。

## 2 相模变换

对于均匀换位三相线路，用对称分量法可直接将三相解耦。而对于不换位三相线路，其三相参数不对称，使用对称分量法解得到的各序分量之间仍存在耦合。文献 [7] 提出采用模分量法。利用模式分析模分量，相互耦合的相空间三相线路去耦为模量上相互独立的。相模变换可将相域中的电压、电流相量 \$[U\_{abc}]\$，\$[I\_{abc}]\$，转化为模域系统中的模量 \$[U\_{123}]\$，\$[I\_{123}]\$，且三个模量相互独立，从而简化计算。设电压变换矩阵为 \$[S]\$，电流变换矩阵为 \$[Q]\$，则：

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = [S]^{-1} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = [Q]^{-1} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

若线路串联阻抗阵为 \$[Z]\$ ( \$\Omega/\text{km}\$ )，并联导纳矩阵为 \$[Y]\$ ( \$\text{S}/\text{km}\$ )；则 \$[S]\$ 为 \$[Z][Y]\$ 的特征向量矩阵，\$[Q]\$ 为 \$[Y][Z]\$ 的特征向量矩阵，\$[Z][Y]\$ 和 \$[Y][Z]\$ 互为转置矩阵，具有相同的特征值。由矩阵理论知，\$[S]^T = [Q]^{-1}\$。相应的模参数矩阵为：

$$[Z_m] = [S]^{-1} [Z] [Q], \quad [Y_m] = [Q]^{-1} [Y] [S] \quad (5)$$

显然 \$[Z\_m]\$，\$[Y\_m]\$ 均为对角阵。对任一模量 \$i\$ 其模传播常数 \$\alpha\_i = \sqrt{Z\_{mi} \cdot Y\_{mi}}\$，模特征阻抗 \$Z\_{ci} = \sqrt{Z\_{mi} / Y\_{mi}}\$。

## 3 Powell 方向加速法设计

对式 (3) 相模变换并两边取模可以得到

$$\left| (U_{Sm} \operatorname{ch}_m x - I_{Sm} Z_{cm} \operatorname{sh}_m x) \right| = \left| U_{Rm} \operatorname{ch}_m (l-x) - I_{Rm} Z_{cm} \operatorname{sh}_m (l-x) \right| \quad (6)$$

下标 \$m\$ 为经过相模变换后的值，对于三相对称线路，\$m = 1, 2, 0\$，代表正序、负序和零序；对于三相

不对称线路，\$m = 1, 2, 3\$，代表 1 模（地模）、2 模和 3 模（线模）。由于地模传播损耗大且参数随着频率变化严重，其波速不易确定，因此舍去地模，而采用传播速度接近于光速的 2 模和 3 模计算。

令：

$$f(x) = \left| (U_{Sm} \operatorname{ch}_m x - I_{Sm} Z_{cm} \operatorname{sh}_m x) \right| - \left| U_{Rm} \operatorname{ch}_m (l-x) - I_{Rm} Z_{cm} \operatorname{sh}_m (l-x) \right| \quad (7)$$

求解方程 (6) 的根 \$x\$ 就可化为求解 \$\min f(x)\$ 问题，此为经典的最优化问题。对此求解时，一般有两类方法<sup>[8]</sup>：一类称为解析法，有最速下降法、共轭梯度法和拟牛顿法等，它们都需要使用目标函数的导数；一类称为直接法，如 Powell 方向加速法，不需要使用导数。鉴于式 (7) 中有复数运算，求解导数比较复杂，考虑用 Powell 方向加速法<sup>[8]</sup>进行求解。

用 Powell 方向加速法求解具体过程如下：

给定控制误差 \$\epsilon > 0\$，初始点 \$x\_0\$，设 \$e\_1, e\_2, \dots, e\_n\$ 为 \$n\$ 个坐标轴上的单位向量。令 \$k = 1\$。

Step1: 计算 \$f\_0 = f(x\_0)\$，令 \$p\_i = e\_i, i = 1, 2, \dots, n\_0\$。

Step2: 作一维搜索 \$f(x\_{k-1} + p\_k) = \min\_0^1 f(x\_{k-1} + p\_k)\$，令 \$x\_k = x\_{k-1} + p\_k, f\_k = f(x\_k)\$。

Step3: 若 \$k = n\$，转 Step4；若 \$k < n\$，令 \$k = k + 1\$，转 Step2。

Step4: 若 \$|x\_n - x\_0| < \epsilon\$，则 \$x^\* = x\_n\$，停，否则转 Step5。

Step5: 令 \$f\_n = \max\_{0 \leq k \leq n-1} (f\_k - f\_{k+1}) = f\_n - f\_{n+1}, f^\* = f(2x\_n - x\_0)\$。

Step6: 若 \$f^\* \leq \epsilon\$，或 \$(f\_0 - 2f\_n + f^\*) / (f\_0 - f\_n - f^\*) > \frac{1}{2}\$，则搜索方向 \$p\_1, p\_2, \dots, p\_n\$ 不变，令 \$f\_0 = f(x\_n), x\_0 = x\_n, k = 1\$，转 Step2；否则转 Step7。

Step7: 令 \$p\_k = p\_k, k = 1, 2, \dots, m; p\_k = p\_{k+1}, k = m + 1, \dots, n - 1\$，而令 \$p\_n = (x\_n - x\_0) / |x\_n - x\_0|\$。

Step8: 作一维搜索 \$f(x\_n + p\_n) = \min\_0^1 f(x\_n + p\_n)\$，令 \$x\_0 = x\_n + p\_n, f\_0 = f(x\_0), k = 1\$，转 Step2。

\$n\$ 为相量的范数，一般取 2 范数。对于本文，\$n = 1\$。

## 4 仿真计算

### 1) 仿真算例

电压等级 500 kV，线路长度为 300 km；

S 端系统参数为：\$Z\_{S1} = 1.057 \angle 7 + j44.92 \Omega\$，

\$Z\_{S0} = j37.47 \Omega\$。

R端系统参数为:  $Z_{R1} = 1.515 + j43.176$  ,  $Z_{R0} = j29.0925$  。

线路参数为不对称参数:

$$[Z]_{/km} = \begin{bmatrix} 0.0885 + j0.402438 & 0.0595 + j0.137602 & 0.0568 + j0.098646 \\ 0.0595 + j0.137602 & 0.0869 + j0.403066 & 0.0595 + j0.137602 \\ 0.0568 + j0.098646 & 0.0595 + j0.137602 & 0.0885 + j0.402438 \end{bmatrix}$$

$$[Y]_{S/km} = \begin{bmatrix} 3.69589 & -0.57243 & -0.14593 \\ -0.57243 & 3.73515 & -0.57243 \\ -0.14593 & -0.57243 & 3.69589 \end{bmatrix} \times 10^{-6}$$

故障实际距离是指故障点距 S端的距离,测距误差按下式计算:

$$\text{误差 } e(\%) = \frac{|\text{估算距离} - \text{实际长度}|}{\text{线路长度}} \times 100\% \quad (8)$$

## 2) 故障测距结果

表 1 左边为同一故障点不同过渡电阻时的测距结果;右边为同一过渡电阻不同故障点时的测距结果。

表 1 同一故障点不同过渡电阻时故障测距结果、同一过渡电阻不同故障点时故障测距结果

Tab 1 Locating results based on different fault resistances or different fault points

故障类型	过渡电阻	实际距离	估算距离	误差	过渡电阻	实际距离	估算距离	误差
	/	/km	/km	/(%)	/	/km	/km	/(%)
单相接地	20	100	100.1324	0.044	50	50	49.9039	0.032
	50	100	100.2316	0.0772	50	150	149.9954	0.0015
	100	100	100.2269	0.0756	50	250	249.6122	0.1293
两相接地	$R_f = 10, R_g = 20$	100	99.9703	0.0099	$R_f = 10, R_g = 20$	50	49.4794	0.1735
	$R_f = 10, R_g = 50$	100	99.9216	0.0244	$R_f = 10, R_g = 20$	150	149.9923	0.0026
	$R_f = 10, R_g = 100$	100	99.7080	0.0973	$R_f = 10, R_g = 20$	250	250.1400	0.0467
两相相间短路	20	100	99.8474	0.0509	50	50	50.1423	0.0474
	50	100	100.0691	0.023	50	150	150.0287	0.0096
	100	100	100.0735	0.0245	50	250	249.8595	0.0468
三相短路	20	100	101.5857	0.5286	50	50	50.8382	0.2794
	50	100	101.2439	0.4146	50	150	150.2100	0.07
	100	100	101.4452	0.4817	50	250	248.9385	0.3538

从表 1 的仿真结果可以看出,基于 Powell 方向加速法的不同步采样的双端故障定位算法对于三相不对称线路能比较准确地给出测距结果,其测距相对误差最大不超过 1%,绝对误差不超过 2 km,且测距精度不受过渡电阻、系统阻抗和故障类型的影响。经过大量的数据仿真发现,该算法在整个线路长度范围内基于任何故障点,都能精确测距。

## 5 小结

本文提出了基于 Powell 方向加速法的不同步采样的双端故障测距方法,该方法利用双端不同步的电压、电流数据,考虑了线路的分布参数特性,运用相模变换使不对称三相线路去耦。仿真计算结果表明该方法不受过渡电阻的影响,计算简单,无须求解导数,易于编程实现,测距精度较高,无须识别伪根。

## 参考文献:

- [1] 曾祥君,尹项根,陈浩,等. 新型输电线路故障综合定位系统研究 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(22): 39-44.  
ZENG Xiang-jun, YN Xiang-gen, CHEN Hao, et al Study on a New Type of Integrative Fault Location System for Transmission Line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(22): 39-44.
- [2] 苏进喜,解子凤,秦荃华,等. 基于 GPS 的新型输电线路故障定位装置的研制 [J]. 电网技术, 1999, 23(6): 19-21.  
SU Jin-xi, XIE Zi-feng, QN Quan-hua, et al A New Device for Fault Location of Transmission Line Based on GPS [J]. Power System Technology, 1999, 23(6): 19-21.
- [3] 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 Xin-zhou, GE Yao-zhong 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.
- [4] Girgis A A, Hart D G, Peterson W L. A New Fault Location Technique for Two-and-Three Terminal Lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(1): 98-107.
- [5] 卢继平,叶一麟. 适用于任何具体结构的输电线路精确故障定位[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(11): 40-43.
- LU Jiping, YE Yi-lin An Accurate Fault Location Method Suitable for EHV Transmission Line with Any Line Construction[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(11): 40-43.
- [6] 梁军,孟昭勇,车仁飞,等. 精确双端故障测距新算法[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(9): 24-27.
- LANG Jun, MENG Zhao-yong, CHE Ren-fei, et al A New Accurate Fault Location Algorithm for Two-terminal Lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(9): 24-27.
- [7] 贺家李,葛耀中. 超高压输电线路故障分析与继电保护[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- HE Jia-li, GE Yao-zhong The Faults Analysis and Relay Protection of EHV Transmission Lines[J]. Beijing: Science Press, 1987.
- [8] 解可新,韩立兴,林友联. 最优化方法[M]. 天津: 天津大学出版社, 2001.
- XIE Ke-xin, HAN Li-xing, LIN You-lian Optimization Method[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2001.

收稿日期: 2005-04-08; 修回日期: 2005-06-25

作者简介:

卫志农(1962-),男,博士,教授,博士生导师,从事电力系统运行分析与控制的教学与科研工作; E-mail: wzn\_nj@263.net

张颖(1982-),女,研究生,研究方向为电力系统运行分析与控制。

### A fault location algorithm for HV transmission line based on two-terminal asynchronous data

WEI Zhi-nong, ZHANG Ying, ZHOU Hong-jun

(School of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** This paper presents a fault location algorithm for HV transmission line based on two-terminal asynchronous data. The distributed parameter line model is used for the proposed algorithm. It is applicable for long distance lines since shunt capacitance is taken into account. Considering the effect of fault resistance, the technique utilizes asynchronous samples from both terminals. To eliminate the effect of untransposed line, phase components are transformed to modal components. Then the coupled three-phase components are transferred to the decoupled modal components. Powell's direction acceleration method is used in this paper to avoid the complexity of derivation. The simulation results show that the fault location is feasible at any point on the whole line.

**Key words:** HV transmission line; fault location; double line terminals; distributed parameters line; data sampling asynchronous; phase-modal transformation; Powell's direction acceleration method

(上接第4页 continued from page 4)

作者简介:

迟福建(1979-),男,从事电力系统调度运行工作; E-mail: chifj@etang.com

李铁(1979-),男,从事电力系统调度运行工作;

朱永利(1963-),男,教授,博士生导师,研究方向为人工智能技术在电力系统中的应用、电网调度自动化。

### Intelligent analysis system of setting verification in power network protection based on multi-Agent cooperation

CHI Fu-jian<sup>1</sup>, LI Tie<sup>2</sup>, ZHU Yong-li<sup>3</sup>

(1. Binhai District Supply Company, Tianjin 300450, China; 2. The Dispatch and Communication Center of Electric Power Corporation of Liaoning Province, Shenyang 110001, China; 3. North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** The setting and check of the fixed value of protective relaying equipment is inalienable. It is a hot point whether regulated fixed value is adaptive to the change of power network operation modes and meet the demand of sensitivity, selectivity and rapidity. In the paper, multi-Agent is introduced to the check of electric network fixed value and the solutions to multi-Agent cooperation are presented. Based on the real-time switch condition and the variation of electric network parameters are sent by checking SCADA system, this design can rapidly check whether the protection fixed value of power network is proper and provide decisive support for engineers.

**Key words:** protective relaying; fixed value checking; intelligent analysis; Agent