

# 高压线路双端测距新算法

杜召满, 赵 舫

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 提出了一种新颖的超高压输电线路故障双端测距精确算法。该算法采用相 - 模变换技术和分布参数线路模型, 考虑了双端数据的不同步问题, 运用拟牛顿法迭代求解非线性方程组。仿真计算其表明具有很高的精度。

关键词: 超高压输电线路; 故障测距; 相 - 模变换; 不同步数据; 拟牛顿法

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)07-0007-03

## 0 引言

随着电力系统的发展, 超高压输电线路的精确故障测距技术日益受到关注。快速、准确的故障定位不仅可以减轻人工巡线的负担, 还可以缩短线路停电的时间, 从而增强系统运行的安全性、经济性、可靠性。

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。利用单端信息测距方法不受通信技术条件的限制, 曾得到极大的关注与应用, 但在原理上很难克服对端系统运行方式变化和过渡电阻的影响。现代通信技术、计算机技术的发展, 使得双端测距算法得以实现。利用双端信息测距可以较好地克服上述因素的影响, 从而在原理上可以达到精确测距。采用双端信息测距所面临的主要问题是两端采样数据不同步。即使采用 GPS 同步采样技术, 考虑硬件延时、采样率差别等因素引入的误差, 也很难得到完全同步的数据。因此, 不同步双端测距技术具有极大的实用价值。文献[13]采用集中参数线路模型, 文献[3, 4]基于对称分量法。然而, 超高压输电线路结构上不换位, 导致三相参数不对称, 对称分量法不能使各序分量之间解耦; 大多数故障类型是经高阻接地的故障, 电容电流不能忽略。因此, 上述算法的原理与实际条件不完全相符, 测距的精度有待提高。

本文根据分布参数线路模型和相 - 模变换技术, 利用拟牛顿法实现超高压输电线路的双端不同步精确测距。

## 1 相 - 模变换原理<sup>[5]</sup>

架空多导线输电系统的解析以电报方程为基础, 其频域表达式的矩阵形式为:

$$\begin{cases} -\frac{dU}{dx} = ZI \\ -\frac{dI}{dx} = YU \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $U = [U_1, U_2, \dots, U_n]^T$  和  $I = [I_1, I_2, \dots, I_n]^T$  分别为  $n$  根导线上任一点  $x$  的电压、电流相量矩阵;  $Z$  和  $Y$  分别为纵向单位长度阻抗矩阵、横向单位长度导纳矩阵。由于  $Z$  和  $Y$  都是满阵, 直接求解式(1)比较复杂。

令  $S$  和  $Q$  分别为相量  $U$  和  $I$  的模变换矩阵, 则有

$$\begin{cases} U = SU_m \\ I = QI_m \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} U_m = S^{-1}U \\ I_m = Q^{-1}I \end{cases} \quad (3)$$

将式(2)、式(3)代入式(1)并整理得:

$$\begin{cases} -\frac{dU_m}{dx} = S^{-1}ZQI_m \\ -\frac{dI_m}{dx} = Q^{-1}YSU_m \end{cases} \quad (4)$$

由于  $Z$  和  $Y$  都是对称矩阵, 选取  $S^{-1} = Q^T$ , 则根据矩阵理论可将  $S^{-1}ZQ$  和  $Q^{-1}YS$  对角化。记模量阻抗矩阵  $Z_m = S^{-1}ZQ$ , 模量导纳矩阵  $Y_m = Q^{-1}YS$ , 则式(4)可改写为:

$$\begin{cases} -\frac{dU_m}{dx} = Z_m I_m \\ -\frac{dI_m}{dx} = Y_m U_m \end{cases} \quad (5)$$

由此可见, 对于  $n$  根导线的线路, 可以经过相 - 模变换转换成  $n$  根相互独立、无电磁联系的模量上的线路。

## 2 拟牛顿法简介<sup>[6]</sup>

牛顿法是求解非线性方程组的经典方法。拟牛顿法是一类重要改进算法,它避免了每步都重新计算雅可比矩阵的缺点,又保留了超线性收敛的优点。

考虑非线性方程组

$$F(x) = 0 \quad (6)$$

其中  $F: D \subset R^n \rightarrow R^n$ ,  $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ ,  $F(x) =$

$[f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]^T$ , 式(6)的拟牛顿解法为:

$$x^{k+1} = x^k - A_k^{-1} F(x^k), \quad k=0, 1, \dots \quad (7)$$

$$A_{k+1}(x^{k+1} - x^k) = F(x^{k+1}) - F(x^k), \\ k=0, 1, \dots \quad (8)$$

$$A_{k+1} = A_k + A_k, \quad \text{rank}(A_k) = m - 1 \quad (9)$$

式中:  $A_k \in R^{n \times n}$  取决于  $F(x^k)$  和  $F'(x^k)$  ( $F'(x^k)$  的雅可比矩阵);  $A_k$  是秩为  $m$  的修正矩阵。通过给出的初始近似  $x^0$  及  $A_0$ , 由这 3 式可逐次计算得到  $\{x^k\}_0$  及  $\{A_k\}_0$ 。由于式(9)中的  $A_k$  有不同的取法, 因此可得到多种解法。本文采用 Broyden 秩 1 算法, 其计算公式:

$$\begin{cases} x^{k+1} = x^k - A_k^{-1} F(x^k) \\ A_{k+1} = A_k + (y^k - A_k s^k) \frac{(s^k)^T}{(s^k)^T s^k} \end{cases} \quad k=0, 1, \dots \quad (10)$$

式中:  $s^k = x^{k+1} - x^k$ ,  $y^k = F(x^{k+1}) - F(x^k)$ 。

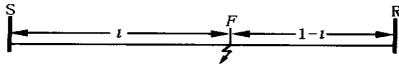


图 1 故障线路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fault line

## 3 算法推导

故障线路如图 1 所示。故障点  $F$  与  $S$  端的距离占线路全长的百分比为  $l$ , 故障后在  $S$  和  $R$  端获得三相电压、电流采样值, 由于不同步采样而产生的相位差为  $\theta$ 。利用  $S$  端的电压、电流作为边界条件求解式(5), 可得故障点电压:

$$U_{Fm}(l) = U_{Sm} \text{ch}_{-m} l - I_{Sm} Z_{Cm} \text{sh}_{-m} l \quad (11)$$

同理, 利用  $R$  端的电压、电流作为边界条件, 可得:

$$Z = \begin{bmatrix} 0.1964 + j0.9566 & 0.1722 + j0.3833 & 0.1712 + j0.2976 \\ 0.1722 + j0.3833 & 0.2038 + j0.9447 & 0.1769 + j0.3749 \\ 0.1712 + j0.2976 & 0.1769 + j0.3749 & 0.2062 + j0.9397 \end{bmatrix} \quad (\Omega/\text{km})$$

$$U_{Fm}(1-l) = U_{Rm} \text{ch}_{-m}(1-l) - I_{Rm} Z_{Cm} \text{sh}_{-m}(1-l) \quad (12)$$

假设  $R$  端延迟角  $\theta$ , 必有:

$$U_{sm} \text{ch}_{-m} l - I_{sm} Z_{Cm} \text{sh}_{-m} l = [U_{Rm} \text{ch}_{-m}(1-l) -$$

$$I_{Rm} Z_{Cm} \text{sh}_{-m}(1-l)] e^{j\theta} \quad (13)$$

式(13)是一个非线性复数矩阵方程。对于单相三相输电线路, 含有 0 模(地模)、1 模和 2 模(线模)三个模量。由于地模波速不易确定, 因此舍去地模。在某些故障类型和故障相别条件下, 某些模量接近零<sup>[5]</sup>, 因此不采用单一的模量计算。将单模量复数方程进行虚实分解, 可得如下 4 个非线性方程:

$$\begin{cases} f_{\text{Re}1}(l, \theta) = 0 \\ f_{\text{Im}1}(l, \theta) = 0 \\ f_{\text{Re}2}(l, \theta) = 0 \\ f_{\text{Im}2}(l, \theta) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

式(14)为超定方程, 解此方程可提高解的精度。记  $F(x) = [f_{\text{Re}1}(l, \theta), f_{\text{Im}1}(l, \theta), f_{\text{Re}2}(l, \theta), f_{\text{Im}2}(l, \theta)]^T$  (15)

其中:  $x = [l, \theta]^T$ 。

式(15)的 Broyden 秩 1 算法步骤为:

赋初值  $x^0 = [0.5, 0]^T$ ,  $A_0 = F'(x^0)^T F(x^0)$ ;

计算  $x^{k+1} = x^k - A_k^{-1} F(x^k)^T F(x^k)$ ;

计算  $s^k = x^{k+1} - x^k$ ,  $y^k = F(x^{k+1})^T F(x^{k+1}) - F(x^k)^T F(x^k)$ ;

计算  $A_{k+1} = A_k + (y^k - A_k s^k) \frac{(s^k)^T}{(s^k)^T s^k}$ ;

检查收敛判据  $\|x^{k+1} - x^k\| < \epsilon$ 。如果满足, 则停止迭代; 如果不满足, 则返回 继续迭代, 直到达到满足要求的精度为止。

## 4 仿真计算

仿真是用 ATP 程序根据线路参数、模型及各种故障情况生成电压、电流数据, 然后由上述算法计算结果。仿真针对不同的故障类型、故障位置、过渡电阻等故障参数进行验证。在仿真计算中, 人工设置不同步角为  $30^\circ$ 。某 500 kV 仿真系统的接线图如图 2 所示, 仿真线路模型的参数如下:

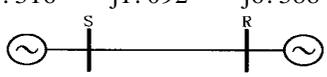
$$Y = \begin{bmatrix} j6.318 & -j1.092 & -j0.316 \\ -j1.902 & j6.522 & -j1.092 \\ -j0.316 & -j1.092 & j6.388 \end{bmatrix} \text{ (s/km)}$$


图2 仿真系统接线图

Fig. 2 Connection of simulation model of power system

表1给出单相接地、两相短路、两相短路接地和三相短路4种简单故障类型的仿真计算结果。表中略去了不同同步角的计算结果。

表1 仿真结果

Tab. 1 Simulation results

故障类型	过渡电阻/	故障距离/ %	计算结果/ %
单相接地	$R_g = 0$	0.25	0.249 8
	$R_g = 300$	0.25	0.250 6
	$R_g = 0$	0.75	0.750 3
	$R_g = 300$	0.75	0.750 6
两相短路	$R_f = 0$	0.25	0.25
	$R_f = 100$	0.25	0.249 2
	$R_f = 0$	0.75	0.750 1
两相短 路接地	$R_f = 100$	0.75	0.750 2
	$R_f = 0, R_g = 100$	0.25	0.249 9
	$R_f = 100, R_g = 100$	0.25	0.250 5
三相短路	$R_f = 0, R_g = 100$	0.75	0.750 1
	$R_f = 100, R_g = 100$	0.75	0.750 5
	$R_f = 0$	0.25	0.25
	$R_f = 100$	0.25	0.250 9
	$R_f = 0$	0.75	0.75
	$R_f = 100$	0.75	0.750 4

从表1给出的测距结果可以看出,上述算法对任意简单故障类型和大过渡电阻存在的情况都具有很高的测距精度。

## 5 结语

本文利用双端不同步的电压、电流数据,考虑了超高压输电线路的实际结构特点,采用了相-模变换和分布参数模型。测距算法运用了拟牛顿法,克服了传统牛顿法计算量大的缺点。仿真结果表明,

算法不受过渡电阻的影响;不需判别故障类型,适用于任何简单故障;测距精度与对称分量法和集中参数模型的算法相比有明显提高。

## 参考文献:

- [1] Grgis A A, Hart D G, et al. A New Fault Location Technique for Two and Three-terminal Lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(1): 98-107.
- [2] Novosel D, Hart D G, et al. Unsynchronized Two-terminal Fault Location Estimation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(1): 130-138.
- [3] 崔静安, 王安定 (CUI Jing-an, WANG An-ding). 一种采用双端电气量的新型故障测距算法 (A New Fault Location Algorithm Adopting Two-terminal Electrical Components) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 1996, 20(12): 17-27.
- [4] 梁军, 孟昭勇, 等 (LIANG Jun, MENG Zhao-yong, et al). 精确双端故障测距新算法 (A New Algorithm for Two-terminal Transmission Line Accurate Fault Location) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(9): 24-27.
- [5] 贺家李, 葛耀中 (HE Jia-li, GE Yao-zhong). 超高压输电线路故障分析与继电保护 (Fault Analysis and Protective Relaying for Ultra High Voltage Transmission Line) [M]. 北京: 科学出版社 (Beijing: Science Press), 1987.
- [6] 李庆扬, 关治, 白峰杉 (LI Qing-yang, GUAN Zhi, BAI Feng-shan). 数值计算原理 (Fundamentals of Numerical Computations) [M]. 北京: 清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press), 2000.

收稿日期: 2003-07-17

作者简介:

杜召满(1972-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护与故障信息系统;

赵 舫(1962-), 男, 副教授, 从事继电保护与变电站自动化教学与科研工作。

## A new fault location algorithm using asynchronized two terminal data

DU Zhao-man, ZHAO Fang

(School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** This paper presents a novel accurate fault location algorithm for UHV transmission line. Based on phase-modal transformation technique and distributed parameter transmission line model, the algorithm utilizes quasi-Newton method to resolve nonlinear equation sets allowing for data sampling asynchronization at both terminals. The simulation results of EMTP show that it has high accuracy.

**Key words:** UHV transmission line; fault location; phase-modal transformation; asynchronized data; quasi-Newton method