

# 不同电压等级同杆并架多回线路的故障定位

余胜<sup>1</sup>, 许钢<sup>1</sup>, 余琼<sup>2</sup>, 许兵<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学四方研究所, 北京 102206; 2. 襄樊供电公司, 湖北 襄樊 441003)

**摘要:** 基于分布参数模型, 提出了一种不同电压等级的同杆并架多回线路故障测距方法: 利用两端同步的电压和电流的正序分量, 根据均匀传输线方程从线路两端分别推导出故障点处的正序电压, 进而得出故障测距公式。所提出的故障测距方法只需用到线路两端的电压电流的正序分量, 消除掉耦合线路之间零序互感对测距的影响。该算法原理上不受过渡电阻、系统阻抗、分布电容以及故障种类的影响, 解决了在不同电压等级的同杆线路中精确故障测距问题。PSCAD 仿真证明该方法定位精度高, 不受过渡电阻及故障类型的影响。

**关键词:** 不同电压等级; 同杆多回线; 故障定位; 传输线方程; 正序分量; 分布参数

## Fault location for multiple circuit overhead lines of different voltage grade on the same tower

YU Sheng<sup>1</sup>, XU Gang<sup>1</sup>, YU Qiong<sup>2</sup>, XU Bing<sup>1</sup>

(1. North China Electric Power University Sifang Institute, Beijing 102206, China;  
2. Xiangfan Electric Power Bureau, Xiangfan 441003, China)

**Abstract:** Based on distributed parameter model, an accurate fault location algorithm for multiple-circuit overhead lines of different voltage grade on same tower is described. By using the positive sequence component of voltage and current synchronously sampled at both terminals, the positive-sequence voltage of fault point can be deduced from both terminal based on uniform transmission line equations, then the fault location equation can be got. This principle can eliminate the effect of zero-sequence mutual inductance between coupling lines. Theoretically, the proposed algorithm is independent of source impedance, fault resistance, shunt capacitance and fault types. This method solves the problem of accurate fault location for multiple-circuit overhead lines of different voltage grade on the same tower. Simulations show that the proposed fault location method has a satisfactory precision and are free from the influence of resistance and fault types.

**Key words:** different voltage grade; multiple-circuit overhead lines; fault locating; transmission line equation; positive sequence component; distributed parameter

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)06-0044-04

## 0 引言

输电线路是电力系统最容易发生故障的元件, 准确的故障定位可大量节省巡线所花费的人力、物力和财力, 加速供电恢复, 减少因停电而造成的巨大的经济损失, 发现因瞬时故障而造成的设备隐患, 提高运行的可靠性。准确、快速的故障定位是提高电网安全运行的重要措施, 对于电力系统安全、可靠运行有重要的意义。因此, 输电线路故障定位方法的研究有着重要的理论意义和应用价值。

目前, 故障测距算法可分为行波法和故障分析法, 故障分析法又可分为单端法<sup>[1~5]</sup>和双端法<sup>[6,7]</sup>。单端法只利用线路一侧的电压和电流值进行测距, 算法受对端系统阻抗变化和过渡电阻的影响, 对此虽然也提出了一些假设和改进算法, 但较为复杂,

无法从根本上消除原理上的误差。随着技术的发展, 获取线路两端的信息变得容易, 运用双端电气量的双端测距算法, 原理上精度高, 不受故障类型和故障电阻的影响。

由于同杆架设的平行多回高压输电线路共用杆塔, 具有显著的经济效益, 在输电系统中越来越多地被采用。随着电力工业不断发展, 最开始同杆架设的线路只是相同电压等级均匀的双回线结构, 现在不同电压等级的多回线则不断被采用。目前已经提出的同杆线路的测距方法都是基于相同电压等级全程同杆条件下的, 由于不同电压等级下多回线的耦合关系更为复杂, 故障种类也更多, 包括同名相跨线故障和异名相跨线故障, 使得以前提出的测距方法用于不同电压等级多回线时将不再适用, 因此有必要对能够反应不同电压等级多回线自身特点的

故障测距方法进行研究。

本文提出了一种基于分布参数模型的利用两端同步数据的故障测距方法。该方法针对不同电压等级的同杆并架多回线路利用同一回线两端同步采样的电气量进行故障定位。所用的模型表现了传输线路的分布参数特性, 无需再考虑线路分布电容电流的影响。由于该测距方法用的是两端的电气量的正序分量, 与平行线路之间的零序互感无关。本文提出的算法理论上不受负荷电流、故障类型、故障时的初始相位角、系统阻抗及过渡电阻的影响; 同时, 该方法与零序互感电流以及是否为跨线故障无关。PSCAD 仿真证明该测距方法精确度较高。

## 1 不同电压等级同杆并架多回线路故障特征分析

图 1 所示为一实际的不同电压等级同杆并架四回线路系统结构。对于同杆并架线路的故障测距, 多回线路之间的零序互感以及跨线故障是影响测距结果最主要的两个因素, 而对于不同电压等级的线路而言, 情况则更为复杂。图 1 中  $L_1$  的 A 相与  $L_2$  的 A 相有短路状况发生时, 由于电压等级相同, 此时该系统的运行状况与短路前一样, 将不会有短路电流产生。但当系统发生  $L_2$  和  $L_3$  之间的不同电压等级 A 相跨线故障时, 就会出现短路电流。此外, 对相同电压等级线路之间的跨线故障进行分析时, 与同一回线的相间故障的分析有着很大的类似之处, 序网结构也较为相似, 但不同电压等级之间的跨线故障则与其完全不同, 序网结构不是很容易就能得出。显然, 由于电压等级的不同,  $L_1$  对  $L_2$  与  $L_2$  对  $L_3$  的零序互感影响的大小也不尽相同。总之, 不同电压等级的同杆并架多回线的故障情况相较之相同电压等级有其自身特点, 分析起来也更为复杂。

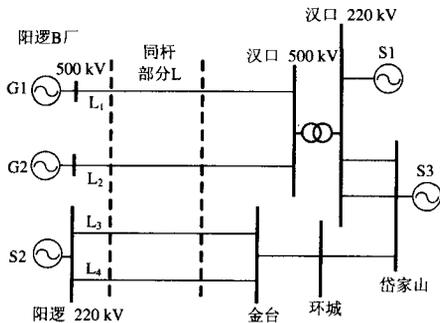


图 1 湖北地区一实际同杆线路拓扑结构

Fig.1 A practical topological structure of multiple-circuit overhead lines on the same tower in Hubei

## 2 故障测距原理

本文选用分布参数模型, 实用于工程计算的线路两端的电压和电流的流向如图 2 所示。

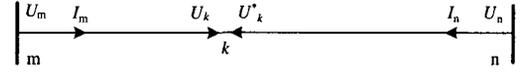


图 2 两端的电压和电流方向

Fig.2 Voltage and current vectors at two ends of line

均匀传输线的基本方程组为:

$$\begin{bmatrix} U_m \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{ch}(\gamma l_{nm}) & -Z_c \text{sh}(\gamma l_{nm}) \\ \text{sh}(\gamma l_{nm})/Z_c & -\text{ch}(\gamma l_{nm}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_n \\ I_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

这里的  $l_{nm}$  为 n 端到 m 端的距离。

方程式 (1) 也可以各自应用于电压和电流的正序、负序和零序分量中。在本文的叙述中, 各个参数的下标“1”表示各自对应的正序分量。

对于均匀传输线上的任意一点  $k$ , 从 m 端和 n 端为起点分别计算得出的正序电压  $U_{k1}$  和  $U'_{k1}$  为:

$$U_{k1} = U_{m1} \text{ch}(\gamma_1 l_{mk}) - I_{m1} Z_{c1} \text{sh}(\gamma_1 l_{mk}) \quad (2)$$

$$U'_{k1} = U_{n1} \text{ch}(\gamma_1 l_{nk}) - I_{n1} Z_{c1} \text{sh}(\gamma_1 l_{nk}) \quad (3)$$

这里的  $l_{mk}$  和  $l_{nk}$  表示故障点  $k$  到 m 端和 n 端相对应的距离。上述计算过程中已经考虑到沿线路的分布电容电流的影响。

当在  $k$  点发生各种类型的故障 (包括不同电压等级之间的跨线故障) 时,  $k$  处从两端计算所得的正序电压应该相等, 即有:

$$U'_{k1} = U_{k1} \quad (4)$$

将式 (2)、(3) 代入式 (4), 整理可得:

$$U_{n1} \text{ch}(\gamma_1 l_{nk}) - I_{n1} Z_{c1} \text{sh}(\gamma_1 l_{nk}) = U_{m1} \text{ch}(\gamma_1 l_{mk}) - I_{m1} Z_{c1} \text{sh}(\gamma_1 l_{mk}) \quad (5)$$

由上述方程可解得测得故障距离  $x$  为:

$$x = \frac{1}{2\gamma_1} \ln \frac{(I_{n1} Z_{c1} + U_{n1}) + (I_{m1} Z_{c1} - U_{m1}) e^{\gamma_1 l}}{(I_{n1} Z_{c1} - U_{n1}) + (I_{m1} Z_{c1} + U_{m1}) e^{\gamma_1 l}} \quad (6)$$

由于各种故障中都存在电压和电流的正序分量, 因此可以仅用正序分量对线路进行故障定位。

对于同杆线路的故障测距, 相邻线路间耦合互感和跨线故障是影响其测距精度的最主要因素。一般说来长距离输电线路都经过充分换位, 耦合线路之间的正序和负序互感的影响经过换位后可以忽略

掉。虽然零序互感仍然存在，但从上述测距方程我们可以看出，测距公式中仅利用了电压电流的正序分量，并未引入零序电压或零序电流，从原理上使得故障测距不受零序互感的影响。而且本方法是由均匀传输线方程推导获得，与故障边界条件没有什么必然联系，也不受故障类型跨线与否的影响。因此，该故障定位方法能够应用于不同电压等级的同杆多回线路的精确测距。

### 3 PSCAD 仿真验证

#### 3.1 理论仿真

为了对上述的不同电压等级同杆并架双回线的故障定位方法进行验证，用 PSCAD 对图 3 所示

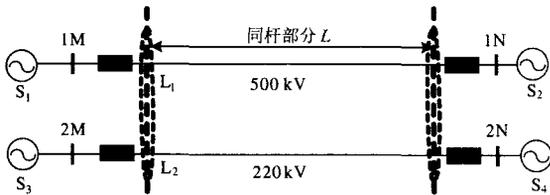


图 3 仿真系统图

Fig.3 Simulation system

的不同电压等级的同杆双回线系统进行了研究，对该系统在不同故障状况下（跨线故障和单线故障、不同的过渡电阻）进行了仿真。线路两端等效电源相角差为随机变化。

系统以及线路参数为：

$$L_1=L_2=L=300 \text{ km}$$

$$\text{正负序参数: } R=0.546 \text{ 8e-4[ohm/m]}$$

$$XL=0.322 \text{ 3e-3[ohm/m]} \quad XC=290.841 \times 10^3 \text{ [ohm*m]}$$

$$\text{零序参数: } R=0.2931 \text{ e-3[ohm/m]}$$

$$XL=0.123 \text{ 71e-2[ohm/m]} \quad XC=581.895 \times 10^3 \text{ [ohm*m]}$$

$$\text{零序互感参数: } R=0.238 \text{ 5e-3[ohm/m]}$$

$$XL=0.082 \text{ 5e-2[ohm/m]} \quad XC=1 \text{ 224.890} \times 10^3 \text{ [ohm*m]}$$

系统 S<sub>1</sub> 参数: 500 kV

$$X_1=X_2=60 \Omega \quad X_0=70 \Omega$$

系统 S<sub>2</sub> 参数: 500 kV

$$X_1=X_2=200 \Omega \quad X_0=309 \Omega$$

系统 S<sub>3</sub> 参数: 220 kV

$$X_1=X_2=350 \Omega \quad X_0=400 \Omega$$

系统 S<sub>4</sub> 参数: 220 kV

$$X_1=X_2=40 \Omega \quad X_0=63 \Omega$$

这里给出的输电线路参数正、负、零序分量，考虑到线路完全充分换位，即线路完全解耦所得。

表 1 故障测距结果

Tab.1 Fault location result

故障类型	故障时的过渡电阻/Ω	40/km		150/km		260/km	
		测距值/km	误差/(%)	测距值/km	误差/(%)	测距值/km	误差/(%)
I A-g	$R_g=0$	39.907	0.031	149.812	0.063	259.752	0.083
	$R_g=10$	39.909	0.030	149.815	0.062	259.773	0.076
	$R_g=300$	39.857	0.048	149.735	0.088	259.640	0.120
I A II B	$R=0$	39.777	0.074	149.739	0.087	259.753	0.082
	$R=5$	39.781	0.073	149.725	0.092	259.772	0.076
	$R=10$	39.805	0.065	149.733	0.089	259.771	0.076
I AB	$R=0$	39.973	0.009	149.922	0.026	259.897	0.034
	$R=10$	39.964	0.012	149.924	0.025	259.896	0.035
I A II BC	$R=0$	39.849	0.050	149.768	0.077	259.732	0.089
	$R=10$	39.863	0.046	149.782	0.073	259.778	0.074
I A II B-g	$R_g=0$	39.906	0.031	149.809	0.064	259.773	0.076
	$R_g=10$	39.905	0.032	149.794	0.069	259.760	0.080
I A II A	$R=0$	39.918	0.027	149.921	0.026	259.937	0.021
	$R=10$	40.039	0.013	149.892	0.036	259.870	0.043
I AB-g	$R_g=100$	39.964	0.012	149.923	0.026	259.907	0.031
I ABC	$R=0$	40.004	0.001	149.971	0.010	259.930	0.023

取 1M 为测距端，故障点设在 1M 至 1N 之间的一段同杆双回线路上。表 1 所示为不同电压等级同杆双回线上离 1M 端 40 km、150 km 和 260 km 处分

别设置各种故障类型时的测距结果。表中 I 表示线路 L<sub>1</sub>，II 表示线路 L<sub>2</sub>。故障类型中的 I A-g 表示线路 L<sub>1</sub> 发生 A 相接地故障，I A II B 表示线路 L<sub>1</sub> 的 A

将与  $L_2$  的 B 相发生跨线故障,  $I_{AB}$  表示  $L_1$  的 A 相与 B 相发生相间短路故障,  $I_{AB-g}$  表示  $L_1$  的 A 相与 B 相发生相间短路接地故障,  $I_{ABC}$  表示  $L_1$  发生相间三相短路故障。

从表 1 的仿真测距结果可以看出, 该方法应用于不同电压等级的同杆多回线上时的测距精度非常高, 由于测距过程中没有涉及到电压电流的零序分量, 故原理上不受相邻线路零序互感的影响, 因而在各种条件下都能进行准确的故障定位。至于故障类型是单线还是跨线、故障时接地还是不接地、以及接地阻抗的大或小对于最终的测距结果影响都非常小。测量误差最大的情况在单相接地过渡电阻为  $300\ \Omega$  时出现, 达到 0.12%, 相对来说误差也是非常小的, 其他条件下误差都在 0.10% 以下, 能够满足超高压长线路下对故障测距精度的要求。

### 3.2 误差分析

上述理论仿真过程中均是在输电线路充分换位的理想条件下得到正序分量代入测距方程中进行的验证, 而在电力系统中输电线路很难做到完全的充分换位, 实际的序阻抗大小取决于导线的几何参数, 正序分量由于几何结构的不完全对称会对测距结果产生影响, 因而有必要根据换位情况对上述测距方法作进一步探讨。把线路几何结构对称情况分为理想的完全换位和完全不换位两种, 分别对其进行仿真研究, 图 4 (a) 所示为发生单相接地故障时得到的测距误差轨迹, 图 4 (b) 所示为发生跨线故障时得到的测距误差轨迹。

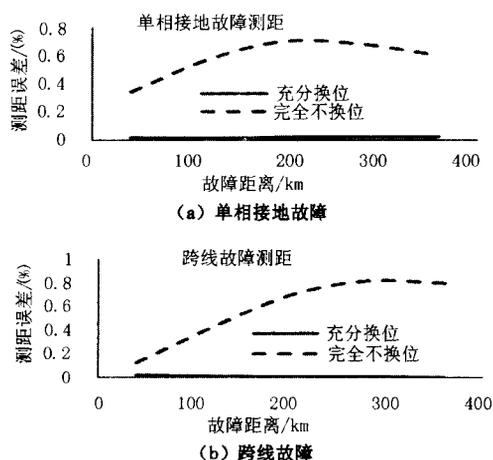


图 4 测距误差轨迹

Fig.4 Lotus of measured error

从图 3、图 4 中可以看出, 在完全不换位的极端条件下, 利用上述方法得到的测距结果最大误差也只在 0.8% 左右, 可见输电线路的换位情况对测距

精度的影响并不大, 应用在实际的工况中应仍能满足要求。

## 4 结论

本文针对不同电压等级的同杆并架多回架空线路提出了一种基于分布参数的新的故障测距方法。该法利用了两端同步采样的电压和电流的正序分量, 考虑了输电线路的分布电容电流, 测距结果不受零序互感、负荷电流、系统阻抗、故障时的初始相位角的影响。对于各类单线或跨线故障该测距方法都能适用, 特别是该法与地网无关, 因此能去除多回线之间零序互感的影响。

本文提出的故障测距方法用 PSCAD 在不同电压等级的同杆并架线路上进行了仿真, 验证了该方法的合理性和有效性, 仿真分析表明在各种情况下该测距方法的误差均小于 0.12%。

## 参考文献

- [1] 粟小华. 基于平行双回线单端实时数据的准确故障测距实用新方法[J]. 继电器, 2001, 29(5): 5-12.  
SU Xiao-hua. A New and Practical Method for Fault Location Based on Single End Real Time Data in Paralleled Double Circuit Line[J]. Relay, 2001, 29(5): 5-12.
- [2] 索南加乐, 王树刚, 张超, 等. 利用单端电流的同杆双回线准确故障定位研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(23): 25-30.  
SUONAN Jia-le, WANG Shu-gang, ZHANG Chao, et al. An Accurate Fault Location Algorithm for Parallel Transmission Line Using One-terminal Current[J]. Proceedings of the CSSE, 2005, 25(23): 25-30.
- [3] 索南加乐, 吴亚萍, 宋国兵, 等. 基于分布参数的同杆双回线单线故障准确测距原理[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 39-43.  
SUONAN Jia-le, WU Ya-ping, SONG Guo-bing, et al. New Accurate Faultlocation Algorithm for Parallel Lines on the Same Tower Based on Distribute Arameter[J]. Proceedings of the CSSE, 2003, 23(5): 39-43.
- [4] 宋国兵, 索南加乐, 许庆强, 等. 基于单端电流量的同杆双回线故障定位方法[J]. 继电器, 2004, 32(7): 1-6.  
SONG Guo-bing, SUONAN Jia-le, XU Qing-qiang, et al. Fault Location Forparallel Transmission Lines on the Same Tower Based on One-terminal Current[J]. Relay, 2004, 32(7): 1-6.

(下转第 68 页 continued on page 68)

统研制[J]. 高压电器,2004,40(2) : 104-106.

DAI Huai-zhi, Lü Yi-hang, JIA Shen-li, et al. Design of On-line Monitoring System for Circuit Breaker[J]. High Voltage Apparatus,2004,40(2) : 104-106.

[4] 吕一航, 李静, 戴怀志, 等. 高压断路器综合在线监测系统的研制[J]. 中国电力,2004,37(3) : 68-71.

Lü Yi-hang, LI Jing, DAI Huai-zhi, et al. Research and Development of the On-line Synthetic Monitoring System of High Voltage Circuit Breakers[J]. Electric Power,2004,37(3): 68-71.

[5] 马强, 李琨, 荣命哲. 开关设备在线监测系统级专用芯片的设计[J]. 电力系统自动化,2005,29(3) : 73-76.

MA Qiang, LI Kun, RONG Ming-zhe. Design of System on Chip for Switchgear On-line Monitoring [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3) : 73-76.

[6] Estrin D. Connecting the Physical World with Pervasive Network [J]. IEEE Pervasives Computer, 2002,1(1) : 56-59.

[7] 孟永鹏, 贾申利, 荣命哲. 真空断路器机械特性的在线监测方法[J]. 高压电器,2006,42(1) : 31-34.

MENG Yong-peng, JIA Shen-li, RONG Ming-zhe. On-line Monitoring Method for Mechanical Characteristics of Vacuum Circuit Breakers [J]. High Voltage Apparatus, 2006,42(1) : 31-34.

[8] 徐建源, 朗福成, 林萃. 高压断路器机械特性在线监测技术的现状与发展趋势[J]. 华通技术,2005,(2): 17-20.

[9] Samsung Semiconductor Corporation. S3C2440 Data Sheet Rev.D. <http://www.samsungsemi.com>[EB/OL]

[10] TMS320C6713 Data Sheet. Texas Instrument Co.Ltd, 2004.

[11] TMS320C6000 DSP/ BIOS User's Guide[Z]. Texas Instrument Co.Ltd, 2003.

[12] TMS320C6000 Chip Support Library API Reference Guide[Z]. Texas Instrument Co.Ltd, 2004.

[13] TMS320C6000 DSP EDMA Controller Reference Guide[Z]. Texas Instrument Co.Ltd, 2004.

[14] TMS320 DSP Algorithm Standard Developer's Guide[Z]. Texas Instrument Co.Ltd, 2007.

[15] TMS320C6000 DSP Cache User's Guide[Z]. Texas Instrument Co.Ltd, 2004.

[16] 马骏骁, 田地, 杨智君, 等. 支持 HTTP 代理的分布式监测终端的设计与实现[J]. 吉林大学学报,2007,37(1) : 160-163.

MA Jun-xiao, TIAN Di, YANG Zhi-jun, et al. Design and Implementation of Distributed Monitoring Device Supporting HTTP Proxy [J]. Journal of Jilin University Engineering and Technology,2007,37(1) : 160-163.

收稿日期: 2008-05-13; 修回日期: 2008-06-24

作者简介:

熊小伏(1962-), 男, 博士, 教授, 长期从事电力系统保护与监控的科研、教学工作;

孙鑫(1980-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统保护研究; E-mail: syncsun@126.com

蔡伟贤(1982-), 男, 硕士, 从事电力系统保护研究。

(上接第 47 页 continued from page 47)

[5] 李红巍. 一种实用的双回线测距方法[J]. 电力系统自动化,1995,19(9):30-33.

LI Hong-wei. A Useful Algorithm for Fault Location of Parallel Transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995,19(9):30-33.

[6] 周大敏, 冯璞乔, 易良廷. 一种使用两端电气量的高压输电线路故障测距的新算法[J]. 电网技术,1997,21(7): 47-51.

ZHOU Da-min, FENG Pu-qiao, YI Liang-ting. A New Algorithm to Estimate Fault Location on a high Voltage Transmission line Using Two Terminal's Voltage and Currents[J]. Power System Technology, 1997,21(7):47-51.

[7] 赵永娴, 曹小拐, 刘万顺. 同杆并架双回线准确参数未知时的故障测距新算法[J]. 电力系统自动化,2005,29(4):72-76.

知时的故障测距新算法[J]. 电力系统自动化,2005,29(4):72-76.

ZHAO Yong-xian, CAO Xiao-guai, LIU Wan-shun. New Fault Location Algorithm for Double Transmission Lines on a Sametower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4):72-76.

收稿日期: 2008-05-09; 修回日期: 2008-08-24

作者简介:

余胜(1983-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护与故障定位; E-mail: yushdada@sina.com

许钢(1982-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护与故障定位。