

# 基于分布参数模型的混合线路故障测距和重合闸的研究

陈 宾, 陈 皓, 刘 伟

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘 要:**在混合线路特定参数特性的基础上, 提出了一种基于分布参数模型的混合线路故障测距的新方法。首先利用有效的判据确定故障发生在架空线侧或电缆侧, 然后利用故障区域的两端电气量和输电线路参数确定故障点。EMTP 仿真结果和 Matlab 数据处理表明, 该算法具有很好的准确性, 不要求双端的数据同步, 而且受过渡电阻、故障类型、故障位置的影响很小, 根据精确测距结果, 可确定保护跳闸后重合闸动作策略, 具有较高的实用价值。

**关键词:**故障测距; 混合输电线路; 分布参数; 重合闸

**Abstract:** In view of the structures and features of transmission lines consisting of overhead lines and power cables, a new accurate fault location scheme based on distribution parameter model of combined transmission lines is presented. The method can discriminate the fault whether happened in overhead lines or power cables, then the fault location can be determined by using the transmission lines parameter and post-fault voltages and currents from the two terminals. The simulation results of EMTP and the data processing of Matlab show that this algorithm is of high accuracy and does not require the synchronized data of two terminals, and it isn't affected by fault resistance, fault type and fault location. The strategy of circuit breaker operation can be decided based on the results of the precise location. The test result shows that it is valid and efficient.

**Key words:** fault location; combined transmission lines; distribution parameter; reclosing

中图分类号: TM726 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2010)02-0042-03

## 0 引 言

在现代电力系统中, 随着电缆—架空线的广泛应用, 其精确故障定位, 具有越来越重要的意义。故障测距算法<sup>[1-8]</sup>按数据采集的位置分为: 单端法和双端法。根据对两端数据采样是否同步, 双端测距又分为同步测距和非同步测距。事实上即使利用最先进的全球定位系统 (GPS), 但现场中电压互感器 (TV)、电流互感器 (TA)、电缆以及保护装置对电压、电流的传输仍有一定的时延, 使得两端很难做到真正意义上的数据同步, 因此, 不需要两端同步采样的非同步测距方法应用更加广泛。在此基础上, 考虑了混合线路参数的分布特性, 提出了一种基于分布参数模型和双端电气量不同步的混合输电线路故障测距算法。EMTP 仿真结果和 Matlab 数据处理表明它有很高的精度, 并以此测距结果为依据, 确定断路器断开后重合闸动作策略, 在判定故障位于架空线路段时实现自动重合闸, 从而提高供电可靠性。

## 1 基本原理

对于一条实际的输电线路, 其参数是分布的, 尤其对于长线路来说, 若不考虑这种分布特性将会造成较大的误差。单相输电线路的分布参数模型如图 1。

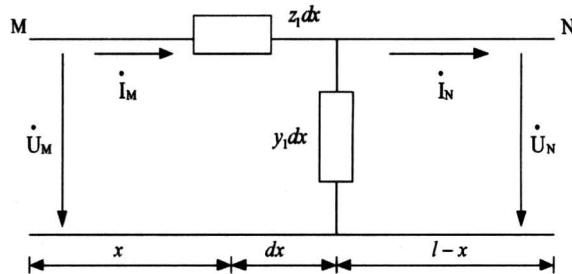


图 1 单相线路分布参数模型

其中,  $\dot{U}_M$ 、 $\dot{I}_M$ 、 $\dot{U}_N$ 、 $\dot{I}_N$  分别为 M 侧、N 侧的电压、电流相量; 线路总长为  $l$ ,  $z_1$  为线路单位长度的复阻抗;  $y_1$  为线路单位长度的复导纳。

若以线路 M 端的电压、电流作为边界条件, 可以推出以此端表示的线路任一点  $x$  的电压和电流方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_x \\ \dot{I}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma x) & -Z_c \sinh(\gamma x) \\ -\sinh(\gamma x)/Z_c & \cosh(\gamma x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_M \\ \dot{I}_M \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $Z_c = \sqrt{(r+j\omega l)/(g+j\omega c)}$  为线路的波阻抗,  $\gamma = \sqrt{(r+j\omega l) \cdot (g+j\omega c)}$  为传播常数;  $r$  为线路单位长度电阻;  $g$  为线路单位长度电导;  $L$  为线路单位长度电感;  $c$  为线路单位长度电容。

假设距 M 端  $x$  km 处 D 点发生故障。此时输电线路被分成了 MD 和 DN 两段, M 和 D 之间的任一点的电压和电流可以用 M 端的电压电流来表示。同理, D 和 N 之间的任一点电压和电流可以用 N 端的电压电流来表示。考虑两端采样数据不同步时, 设不同步角为  $\delta$  对于 D 点有

$$\dot{U}_D = [\cosh(\gamma x)\dot{U}_M - Z_c \sinh(\gamma x)\dot{I}_M] e^{j\delta} \quad (2)$$

$$\dot{U}_D = \cosh\gamma[(1-x)\dot{U}_N] - Z_c \sinh[\gamma(1-x)]\dot{I}_N \quad (3)$$

根据对称分量法和线性叠加原理, 将故障后的网络等效为正常状态网络和故障分量网络, 选取全电量和故障分量建立 4 个类似式 (2)、(3) 的方程, 由文献 [9] 得出测距结果为 D 以及伪根的识别。

$$D = \frac{1}{2\beta} \arctan(B/A) \quad (4)$$

该方法虽然是在单相系统下推导出来的, 对于三相系统同样成立。在三相系统中, 对于所有的故障类型均存在正序网络, 因此可以采用正序分量和正序故障分量代替单相系统的全电量和故障分量。

## 2 判 据

A 型混合输电线路的一种模型<sup>[10]</sup>如图 2 所示, 其中架空线段为 MJ 电缆段为 JN, J 是架空线和电缆的结合点 (junction)。

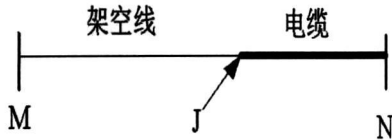


图 2 A 型混合输电线路

(1) 由图 2 可知, 设在 J 处由 M 端算出的电压为  $\dot{U}_{m-j}$ , 由 N 端算出的电压为  $\dot{U}_{n-j}$ , 则存在如下关系: 故障发生在架空线段时有  $|\dot{U}_{m-j}| > |\dot{U}_{n-j}|$ , 故障发生在电缆段时有  $|\dot{U}_{m-j}| < |\dot{U}_{n-j}|$ , 故障发生在 J 点时有  $|\dot{U}_{m-j}| = |\dot{U}_{n-j}|$ 。

(2) 当故障发生在架空线上。电缆段是完整的, 可以根据方程 (1) 算出架空线末端 (J 端) 的电压, 电流。然后通过式 (4) 得出故障点的距离。

(3) 当故障发生在电缆上。架空线段是完整的, 可以根据方程 (1) 算出电缆首端 (J 端) 的电压、电流, 然后通过式 (4) 得出故障点的距离。

## 3 电缆—架空线混合线路重合闸策略

为确保线路故障时尽可能地减小停电范围, 并迅速恢复供电, 在 1 kV 及其以上的电缆—架空线混合线路, 在具有断路器的条件下, 如用电设备允许且无备用电源自动投入时, 一般都应装设有自动重合闸的装置。根据测距结果决定重合闸策略, 在判定故障位于架空线路段时实现自动重合闸, 在提高供电可靠性和稳定性方面具有重要意义。

通过式 (4) 可以准确计算出混合输电线路故障点位置。如果故障发生在电缆线路, 考虑到电缆线路接地故障一般是永久性故障, 重合闸不仅不可能成功, 而且电力系统还将再次受到短路电流的冲击而引起系统震荡, 因而故障线路不应进行重合闸; 如果故障发生在架空线路段, 由于架空线路发生瞬时故障的可能性很大, 在故障线路跳闸后, 故障点的电弧即可熄灭, 绝缘强度重新恢复, 此时重合闸动作往往能恢复供电。

## 4 算法的验证

仿真模型如图 3, 对输电线路采用分布参数建模, 用 EMTP 进行电力系统仿真用 Matlab 处理数据。220 kV 架空线—电缆混合线路的电气参数为: 电缆线路长度为 100 km,  $R_1 = 0.024 \Omega/\text{km}$ ,  $L_1 = 0.4278 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $C_1 = 0.2811 \text{ uF}/\text{km}$ ,  $R_0 = 0.412 \Omega/\text{km}$ ,  $L_0 = 1.5338 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $C_0 = 0.1529 \text{ uF}/\text{km}$ 。架空线路长度为 250 km,  $R_1 = 0.3317 \Omega/\text{km}$ ,  $L_1 = 1.326 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $C_1 = 8.688 \text{ nF}/\text{km}$ ;  $R_0 = 0.4817 \Omega/\text{km}$ ,  $L_0 = 4.595 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $C_0 = 4.762 \text{ nF}/\text{km}$ 。

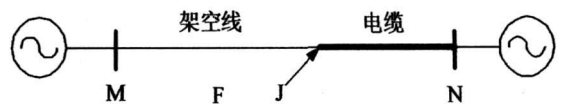


图 3 EMTP 混合输电线路仿真模型

两侧数据的采样频率为 5 kHz 滤波算法是改进的全波傅氏滤波<sup>[11]</sup>, 采用故障后第二周期仿真数据进行处理。

(1) 为验证  $\delta (\in [-180^\circ, 180^\circ])$  和故障距离对

表 1 架空线上的不同步相角差时各种故障距离的测距结果

$\delta/(\circ)$	不同故障位置的测距结果 /km (相对于 M 端的距离)								
	5	30	75	100	115	150	185	220	240
-180	5.015	29.859	75.203	99.867	114.862	149.792	185.228	220.213	240.236
-120	5.048	30.087	75.079	100.125	115.068	150.120	185.152	220.144	240.164
-60	4.891	29.836	74.845	99.949	114.812	149.865	184.918	220.065	239.884
0	4.973	30.045	75.124	99.878	114.966	150.020	184.936	219.917	239.947
60	5.129	30.171	75.226	100.112	115.154	150.184	185.094	220.088	240.076
120	5.230	30.150	75.217	100.161	115.177	150.139	185.137	220.190	240.135
180	5.182	30.231	75.146	100.143	115.214	150.193	185.186	220.224	240.209

表 2 电缆上的不同步相角差时各种故障距离的测距结果

$\delta/(\circ)$	不同故障位置的测距结果 /km (相对于 J 端的距离)								
	2	9.5	30	45	50	60	78.5	85	98
-180	2.188	9.728	30.213	45.216	50.180	59.927	78.743	85.228	98.218
-120	1.931	9.586	30.176	45.161	50.131	59.941	78.669	85.145	98.166
-60	1.919	9.624	30.086	45.081	50.074	60.056	78.564	85.124	98.094
0	1.967	9.562	29.957	44.953	49.867	60.011	78.427	84.936	97.912
60	2.082	9.610	29.865	44.908	50.0648	60.096	78.588	85.112	98.120
120	2.257	9.676	30.150	45.147	50.117	60.160	78.672	85.193	98.223
180	2.112	9.733	30.172	45.235	50.191	60.234	78.733	85.215	98.248

测距结果的影响,对过渡电阻为  $80\ \Omega$ , A 相接地故障进行了仿真,仿真结果如表 1 和表 2 所示。表 1 表示架空线上的  $\delta$  和故障距离对测距结果的影响,表 2 表示电缆上的  $\delta$  和故障距离对测距结果的影响。由表 1 可知,最大绝对测距误差为  $0.231\ \text{km}$ ,可得最大相对测距误差为  $0.066\%$ ;由表 2 可知,最大绝对测距误差为  $0.248\ \text{km}$ ,可得最大相对测距误差为  $0.071\%$ 。分析表明该方法不受和故障距离的影响。

(2)相角不同步时故障类型对测距结果的影响。表 3 列出了在架空线上距 M 端的故障距离为  $140\ \text{km}$  或电缆上距 J 端的故障距离为  $35\ \text{km}$ 、 $\delta=60^\circ$ 、过渡电阻等于  $200\ \Omega$  时发生 10 种故障类型的测距结果。由表 3 可得最大绝对测距误差为  $0.274\ \text{km}$ ,最大相对测距误差为  $0.078\%$ ,分析表明该方法不受故障类型的影响。

表 3 各种故障类型的测距结果

故障类型	故障发生在架空线	故障发生在电缆
	测量的距离 /km	测量的距离 /km
AG	140.156	35.169
BG	140.085	35.072
CG	140.117	35.130
ABG	140.162	35.095
ACG	140.210	35.274
BCG	140.133	35.135
AB	139.939	34.953
AC	139.982	34.966
BC	139.928	34.914
ABCG	140.067	35.083

(3)相角不同步时过渡电阻对测距结果的影响。表 4 列出了在架空线上距 M 端故障距离等于  $125\ \text{km}$  或在电缆上距 J 端故障距离等于  $45\ \text{km}$ ,发生 A 相接地故障时的测距结果。由表 4 知,最大绝对测距误差为  $0.312\ \text{km}$ ,可得最大相对测距误差为  $0.089\%$ ,这表明过渡电阻对测距结果不产生影响。

表 4 非同步数据下不同过渡电阻的测距结果

$\delta/(\circ)$	故障发生在架空线			故障发生在电缆		
	过渡电阻 $\Omega$			过渡电阻 $\Omega$		
	50	100	500	50	100	500
90	125.113	125.086	125.259	45.123	45.094	45.312
45	125.092	125.062	125.198	45.070	45.076	45.185
0	125.066	125.031	125.047	45.049	45.022	45.064
-45	124.835	124.954	124.983	44.915	44.963	44.936
-90	125.157	124.874	124.835	44.862	44.940	44.789

## 5 结 论

由于架空线—电缆混合输电线路的架空线路和电缆段段阻抗不匹配,不能直接用已有的架空输电线路的故障测距方法来测距,因此首先利用有效判据确定故障发生在架空线侧或电缆侧,利用正序分量和故障正序分量得出故障距离解析表达式,无需迭代搜索,计算量小,工程实用性强。根据故障测线路段,在故障线路跳闸后,重合闸动作;当故障位于电缆线路段,则不进行重合闸。仿真结果表明,该方法适用于

(下转第 63 页)

L 为接地网导体总长度,  $L=1\ 460+150=1\ 610\text{ m}$ ;

P 为接地网周边总长度,  $P=280\text{ m}$

$\alpha$ 、 $\beta$  为与深埋有关的系数,  $\alpha=0.53$ ,  $\beta=0.61$

d 为接地网导体的等效直径,  $d=0.025$ 。

$$K_s = \frac{1\ 610 - 280}{1\ 610} \frac{0.53}{5\ 270^{0.25}} + \frac{280}{1\ 610} \frac{0.61}{\ln \frac{9.02 \times \sqrt{5\ 270}}{0.025}}$$

$$= 0.051 + 0.01 = 0.061 \quad (9)$$

最大跨步电势为

$$E_{sm} = K_s E_w = 0.061 \times 7\ 207.2 = 439.6(\text{V})$$

允许的跨步电势为

$$E_s = (250 + \rho_s) \sqrt{t} = (250 + 600) / \sqrt{0.6}$$

$$= 1\ 097(\text{V})$$

由于  $E_{sm} < E_s$ , 所以跨步电势满足规程要求。

### 2.3.3 接地体的热稳定校验

接地体的最小允许截面积

$$A_i = I \sqrt{t} / 70 = 8\ 580 \times \sqrt{0.6} / 70 = 94.9 (\text{mm}^2)$$

接地体的实际截面为  $50 \times 6 = 300\text{ mm}^2$  大于  $A_i$ ,

满足安全要求。

## 3 结 论

现有各种降阻措施在降阻效应、抗腐蚀性和经济性等方面仍不能完全令人满意, 优化设计、综合治理以及开发降阻效率高、抗腐蚀性好、成分稳定、价格低

廉的新型降阻材料将成为接地网降阻研究的主流。

根据某 110 kV 变电站目前的接地网建设情况和实测的接地电阻 ( $R=0.84\ \Omega$ ), 用厚度为 7 cm 的沥青路面结构层, 敷设在接地网内电气设备周围 1.5 m 宽处, 经此处理后, 通过核算, 可以看出该 110 kV 变电站的均压带根数、最大接触电势、跨步电压、接地体热稳定均满足规程及设计要求。

### 参考文献

- [1] 李润先. 中压电网系统接地实用技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [2] 杨曼. 变电站降低接地电阻方案 [J]. 湖北电力, 2006 (30): 53-55.
- [3] 王周安, 曾永林. 立体地网的建立和应用. 高电压技术, 1999, 22(4): 26-29.
- [4] 孙旭, 王琦. 变电站接地网优化设计 [J]. 广东电力, 1999, 12(3): 16-18.
- [5] 弋东方. 电气工程电气设计手册 (电气一次部分) [S]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- [6] 阳宏声. 雷电防护技术培训教材 [K]. 南宁: 广西壮族自治区气象局政策法规处, 2002.
- [7] 王常余. 接地技术 220 问 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2004.

### 作者简介:

李 彬 (1975-), 男, 学士, 研究方向为电力系统及自动化。

(收稿日期: 2009-10-22)

(上接第 44 页)

各种故障类型, 不受非同步时间、故障距离和过渡电阻的影响, 能够达到测距精度的要求。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 梁军, 孟昭勇, 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.
- [3] 崔静安, 王安定. 一种采用双端电气量的新型故障测距算法 [J]. 电网技术, 1996, 20(12): 17-19.
- [4] 牛敏, 赵舫. 一种改进的双端测距算法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 1998, 10(1): 17-21.
- [5] 卫志农, 张颖, 周红军. 基于双端不同步采样数据的高压输电线路故障测距 [J]. 继电器, 2005, 33(23): 5-8.
- [6] 于玉泽, 覃剑, 李功新, 等. 电缆-架空线混合线路故障测距方法综述 [J]. 电网技术, 2006, 30(17): 64-69.
- [7] 吴承恩, 邵能灵, 等. 超高压电缆-架空线混合线路故障

测距方法 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 26-29.

- [8] 蔡华嵘, 范春菊, 等. 一种实用的高压输电线路双端电气量故障测距新算法 [J]. 中国电力, 2003, 36(7): 31-34.
- [9] 施世鸿, 何奔腾. 基于分布参数模型的双端非同步故障测距算法 [J]. 电网技术, 2008, 32(9): 84-88.
- [10] Lee J B, Ha C W, Jung C H. Development of Digital Distance Relaying Algorithm in Combined Transmission Lines with Underground Power cables [C]. In: Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference Vancouver 2001(1): 611-616.
- [11] 陈皓. 微机保护原理及算法仿真 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

### 作者简介:

陈 宾 (1983-), 男, 四川成都, 硕士研究生, 研究方向: 电力系统微机保护及控制。

陈 皓 (1962-), 男, 四川成都, 副教授, 博士, 研究方向: 电力系统微机保护及控制。

(收稿日期: 2010-01-10)