

# 超高压电缆故障测寻实用方法研究

吴承恩<sup>1</sup>, 邵能灵<sup>1</sup>, 郁惟镛<sup>1</sup>, 钱锐<sup>1</sup>, 高潮<sup>1</sup>, 施伟国<sup>2</sup>, 周韫杰<sup>3</sup>

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200030; 2 上海电力公司, 上海 200002; 3 上海电缆公司, 上海 200070)

**摘要:** 提出了一种利用超高压电缆两端的故障录波数据进行故障测距的新方法, 该方法比较充分地考虑了超高压电缆线路分布电容大的特点, 利用递推法在算法上模拟实际线路的电压、电流分布, 以提高定位精度。该方法不要求双端数据同步, 不受线路两端系统阻抗和过渡电阻的影响, 不存在伪根判别问题, 易于实现。仿真结果显示这种算法具有较高的测距精度和实用价值。

**关键词:** 超高压电缆线路; 故障测距; 双端不同步

**中图分类号:** TM77 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)10-0021-04

## 0 引言

超高压电缆线路有许多优点, 它能完成架空线路不易甚至无法完成的任务, 例如跨越大水道、海峡的输电以及直接向大城市和工业区中心供电等。但是由于制造上的瑕疵或经过一段时间的使用, 电缆的绝缘水平下降, 从而引起超高压电缆发生接地故障。因此加速线路故障排除, 尽快恢复供电具有十分重要的现实意义。

国内外对于高压电缆故障定位方法的研究已经进行了几十年, 提出许多故障定位的原理和方法。直闪法、冲闪法和二次脉冲法是目前应用较多的方法。但是它们需要将故障电缆与系统分开, 另行安装故障定位装置。这样需要花费较多的时间和人力, 不利于迅速定位故障。另外, 行波脉冲特别是反射脉冲在经过较长的电缆传播后, 波头幅值衰减较大, 现场还会受到其它杂乱信号的干扰, 致使故障定位精度下降。日本学者提出利用故障时发生电弧放电, 故障点温度升高的特点进行故障定位; 在高压电缆护套中加装光纤温度传感器, 分析故障时电缆线路温度变化就可确定故障点位置。与传统方法比较, 其定位速度和精度都有明显的提高。但是这种电缆国内还没有能力制造, 而且造价昂贵, 不利于大量的使用。

目前在高压电缆线路两端加装故障录波装置比较普及, 所以直接利用故障录波器在故障前后记录的电压、电流数据, 采用有效的故障测距算法进行故障定位, 是一种有效而经济的定位方法。

## 1 基本原理

超高压电缆由于其机械结构和现场敷设的特

点, 线路分布电容非常大。如采用集中参数补偿的测距方法会产生一定的误差。由于线路各点对地存在分布电容, 当线路电压比较高时, 由此产生的对地漏电流不可忽略。因此线路对地电容较大或是线路较长时, 需要考虑其对测距精度带来的影响。

图 1 为一个两端电源系统, 当线路在  $f$  点发生接地故障时, 可根据对称分量法和线性叠加原理, 将故障网络分解为故障前正常网络和故障后附加正、负和零序网。

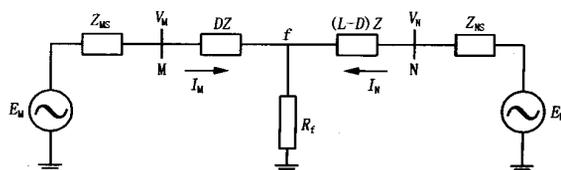


图 1 两端电源等效网络

Fig 1 Equivalent network of double sources

其中:  $E_M$ 、 $E_N$  为双端系统等值电源;  $Z_{MS}$ 、 $Z_{NS}$  为双端系统等值阻抗;  $Z$  为线路阻抗;  $f$  为故障点;  $R_f$  为故障点的过渡电阻;  $V_M$ 、 $V_N$  为线路首末端电压;  $I_M$ 、 $I_N$  为线路首末端电流。

以线路首端  $M$  点为例, 设  $U_{MA}$ 、 $U_{MB}$ 、 $U_{MC}$ 、 $I_{MA}$ 、 $I_{MB}$  和  $I_{MC}$  是故障前的三相电压、电流向量,  $U_{MA}$ 、 $U_{MB}$ 、 $U_{MC}$ 、 $I_{MA}$ 、 $I_{MB}$  和  $I_{MC}$  为故障后三相电压、电流向量。由此可求出  $M$  端的电压、电流突变量:

$$dU_{MA,B,C} = U_{MA,B,C} - U_{MA,B,C} \quad (1)$$

$$dI_{MA,B,C} = I_{MA,B,C} - I_{MA,B,C} \quad (2)$$

然后利用对称分量法将三相突变量  $dU_{MA,B,C}$  和  $dI_{MA,B,C}$  变换成  $U_{M1,2,0}$  和  $I_{M1,2,0}$ :

$$\begin{bmatrix} U_{M0} \\ U_{M1} \\ U_{M2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dU_{MA} \\ dU_{MB} \\ dU_{MC} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} I_{M0} \\ I_{M1} \\ I_{M2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d I_{MA} \\ d I_{MB} \\ d I_{MC} \end{bmatrix} \quad (4)$$

同理可以计算出 N 端的故障前后电压、电流突变量及  $U_{N1,2,0}$  和  $I_{N1,2,0}$ 。

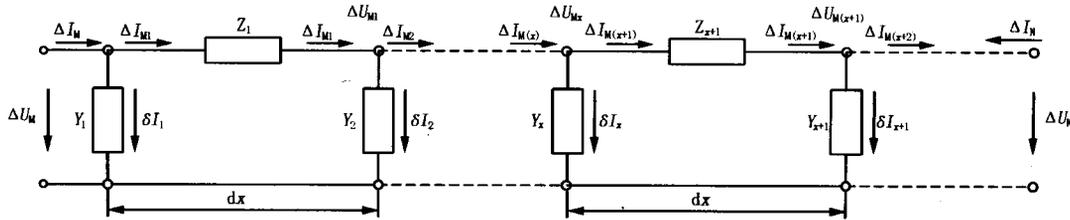


图 2 均匀参数模型

Fig 2 Equivalent parameter model

利用各序网始端电压、电流向量的突变量  $U_M$  和  $I_M$ ，递推求解故障点的电压  $U_{fi}$  和  $I_{fi}$ ，其中  $Y_1 = \frac{1}{2} Y_x$ 。递推公式如下：

$$I_{M1} = I_M - Y_1 U_M \quad (5)$$

$$U_{M1} = U_M - Z_1 I_{M1} \quad (6)$$

$$I_{M(x+1)} = I_{Mx} - Y_x U_{Mx} \quad (7)$$

$$U_{M(x+1)} = U_{Mx} - Z_{x+1} I_{M(x+1)} \quad (8)$$

经过  $D$  次迭代可以求出故障点  $U_f$  和  $I_f$  的值，

$$I_{f(D)} = I_{M(D-1)} - Y_{(D-1)} U_{M(D-1)} \quad (9)$$

$$U_{f(D)} = U_{M(D-1)} - Z_{(D)} I_{f(D)} \quad (10)$$

同理也可以利用各序网线路末端电压、电流向量的突变量  $U_N$  和  $I_N$ ，计算出故障点  $U_f$  和  $I_f$  的值，

$$I_{f(L-D)} = I_{N(L-D-1)} - Y_{(L-D-1)} U_{N(L-D-1)} \quad (11)$$

$$U_{f(L-D)} = U_{N(L-D-1)} - Z_{(L-D)} I_{f(L-D)} \quad (12)$$

$U$  和  $U_f$  分别为由 M 端和 N 端的电气量计算得到的故障点电压向量，当系统两端数据同步时有：

$$U_{fi} = U_{fi} \quad (13)$$

其中： $U_{fi}$  中的  $i$  表示序分量。

由于负序网和零序网各有其相应的应用场合，如果仅仅基于单个序网计算故障点，可能导致测距结果出现一定的偏差。因此为了提高测距精度，对于单相接地故障将采用综合负序电量和零序电量的方法来构造判据。这是因为：

1) 由于中性点直接接地的电网中发生单相接地短路时，将出现很大的负序和零序电流，而在正常运行情况下它们是不存在的，因此将负序和零序网同时引入测距判据，灵敏度和精度更高。

2) 线路零序阻抗比正、负序阻抗大 2~3 倍，在线路首末端发生短路时，线路分布的零序电压变化

由于实际中的超高压电缆线路阻抗、导纳参数均匀分布，如果考虑精确的线路参数模型将有利于减少测距误差。

单相输电线分布参数模型的等值电路示意图如图 2 所示。

显著，易于判定故障点。

3) 发生接地故障时，零序电流经大地流回母线，由于大地电阻率的未知性，当仅使用零序电量计算故障点时，将会出现原理性误差。而负序电流不通过大地构成回路，因此不会出现这种误差。

考虑附加负序和零序电量在  $f$  点，有下式成立：

$$\frac{U_{f2}}{U_{f0}} = \frac{U_{f0}}{U_{f0}} \quad (14)$$

由于两端数据不同步采样将使等式两边产生相位差，但等式两边幅值之比依然相等，即：

$$\left| \frac{U_{f2}}{U_{f2}} \right| = \left| \frac{U_{f0}}{U_{f0}} \right| \quad (15)$$

为计算故障点的位置，构造测距判据如下：

$$f_s = \left| 1 - \frac{U_{f2} U_{f0}}{U_{f2} U_{f0}} \right| \quad (16)$$

实际计算时可使  $D$  从 0~L 范围内进行全局一维搜索，由于从线路 M 到 N 端的分布电压  $|U_{f2} U_{f0}|$  随着  $D$  的增大单调递增，而  $|U_{f2} U_{f0}|$  单调递减，因此方程将只有一个解，不会出现伪根。搜索的过程中可以更新  $f_s$  的值， $f_s$  最小点即为故障点。为提高测距精度，在递推计算前，可以预先设置适当的步长。步长越小计算精度越高。但相应的计算量会增大，现在，由于现代电子计算机性能和速度的提高，使得这一矛盾得以有效缓解。

## 2 算法的实现

### 2.1 仿真模型

采用基于分布参数模型的超高压电缆线路仿真模型，更接近实际中线路的真实情况，有利于检验本算法的实用性。ATP 仿真模型如图 3 所示：

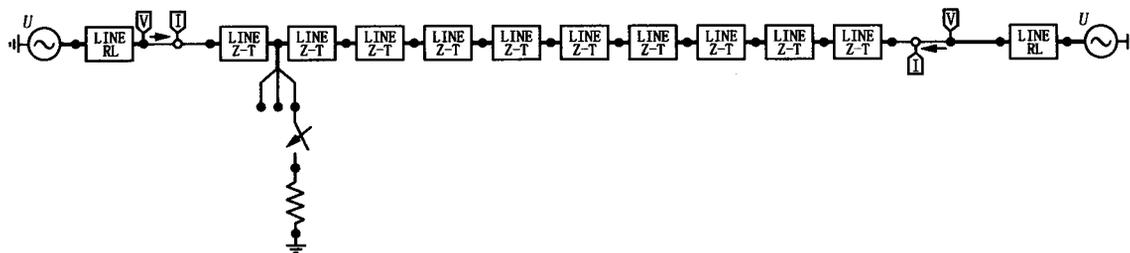


图 3 ATP仿真模型

Fig 3 ATP simulation model

故障发生后,故障录波器记录的暂态电压、电流中除了工频分量,还存在衰减直流分量和各次谐波分量、高频分量。因此需要使用合适的数字滤波算法。本文在比较三角窗、汉明窗、汉恩窗和布莱克曼窗的仿真结果后,采用加三角窗的全傅氏算法,效果理想。同时为了使各非周期分量得到最大的衰减,使用故障后第 2 个周期的采样数据。

2.2 仿真实现

仿真数据采用上海电缆公司提供的 220 kV、CYZQ203 - 220型电缆线路的实际参数,电缆截面为 1 000mm<sup>2</sup>;线路长度 L = 30 km;线路正序阻抗 Z<sub>1</sub> = (0.024 146 3 + j0.162 2) /km;线路零序阻抗 Z<sub>0</sub> = (0.196 463 4 + j0.124 878) /km;线路对地电容 C = 0.317 073 17 μF/km;M 端系统阻抗 Z<sub>MS1</sub> = (0.54 + j18.25); Z<sub>MS0</sub> = (1.85 + j54); N 端系统阻抗 Z<sub>NS1</sub> = j90; Z<sub>NS0</sub> = j133。

超高压电缆线路通常采用三根单芯电缆分开敷设,单相接地故障最容易发生,所以仿真试验只模拟单相接地故障。将线路 10 等分设置短路点。为验证过渡电阻对测距算法的影响,设置不同的过渡电阻进行比较。步长为 0.01 km,仿真结果如表 1。

从表 1 可见,超高压电缆线路发生单相接地故障时,不同故障点的定位误差在很小的范围内波动,说明过渡电阻的变化对测距精度不产生影响,符合理论研究和公式的推导。测距误差较小,也证明使用综合附加负序和零序电量构造的测距算法可以获得更高的定位精度。由于递推过程对线路分布电容进行了比较精确的考虑,避免了超高压电缆大分布电容对定位精度产生较大的影响。

2.3 不同测距算法精度比较

表 2 比较了综合负序和零序网算法、单独使用负序网算法、文献 [4] 利用长线波动方程计算故障点电压相等的算法和文献 [5] 使用型等效线路,将线路全部电容补偿到线路首末两端的故障测距算法的定位精度。故障过渡电阻取 300。

表 1 仿真结果 (两端数据同步时)

Tab 1 Simulation results when data synchronized at two terminals

故障类型	实际故障距离 /km	过渡电阻 /	测距结果 /km	相对误差 / (%)
3		100	3.04	0.13
		300	2.99	-0.03
		500	2.94	-0.20
6		100	6.08	0.27
		300	6.11	0.37
		500	6.10	0.33
9		100	9.06	0.20
		300	9.04	0.13
		500	9.02	0.07
12		100	12.07	0.23
		300	12.05	0.17
		500	12.03	0.10
15		100	15.09	0.30
		300	15.07	0.23
		500	15.04	0.13
18		100	18.09	0.30
		300	18.08	0.27
		500	18.05	0.17
21		100	21.10	0.33
		300	21.09	0.30
		500	21.06	0.20
24		100	24.09	0.30
		300	24.03	0.10
		500	23.98	-0.07
27		100	27.13	0.43
		300	27.14	0.47
		500	27.14	0.47

表 2 不同算法的比较

Tab 2 Comparison of different algorithms

故障点位置	负、零序综合网	误差 / (%)	负序网	误差 / (%)	文献 [4]	误差 / (%)	文献 [5]	误差 / (%)
3	2.99	-0.03	3.07	0.23	3.01	0.03	3.55	1.83
6	6.11	0.37	6.23	0.77	6.17	0.57	6.58	1.93
9	9.04	0.13	9.16	0.53	9.11	0.37	9.39	1.30
12	12.05	0.17	12.18	0.60	12.13	0.43	12.27	0.90
15	15.07	0.23	15.20	0.67	15.17	0.57	15.17	0.57
18	18.08	0.27	18.19	0.63	18.20	0.67	18.06	0.20
21	21.09	0.30	21.23	0.77	21.21	0.70	20.93	-0.23
24	24.03	0.10	24.12	0.40	24.14	0.47	23.72	-0.93
27	27.14	0.47	27.30	1.00	27.29	0.97	26.72	-0.93

表 2 显示综合负序和零序网算法定位精度比其它方法更有提高,与公式推导和理论分析的结论一致。

#### 2.4 不同步采样数据验证

为验证双端数据不同步对测距结果的影响,人为地设置了线路两端不同步角,以 3 km 处 A 相经 100  $\Omega$  过渡电阻接地为例,双端不同步情况下的测距结果如表 3 所示。

表 3 双端数据不同步时的仿真结果

Tab 3 Simulation results when data non-synchronized at two terminals

不同步角 / (°)	测距结果 / km	相对误差 / (%)
0	3.04	0.13
18	2.94	-0.20
36	2.93	-0.23
54	3.03	0.10
72	3.15	0.50
90	3.20	0.67
-18	3.13	0.43
-36	3.14	0.47
-54	3.03	0.10
-72	2.89	-0.37
-90	2.83	-0.57

从表 3 可见,双端数据不同步情况下测距仍能达到较高的测距精度。由于算法巧妙的利用了线路两端电压、电流的突变量递推计算出故障点电压幅值,避开了由于数据传输或采样仪器误差造成的相位误差的影响。因此,新算法不需要两端数据同步。

### 3 结论

超高压电缆线路由于机械结构和敷设的原因,其对地分布电容较大,大约是超高压架空线的 10~20 倍,而普通的故障测距算法由于没有精确补偿线路的分布电容,致使测距精度达不到理想的要求。本文利用已有的故障录波数据,提出新的测距方法,精确考虑超高压电缆线路分布对测距精度的影响。仿真试验表明,这种算法精度较高,且不受过渡电阻的影响,不存在伪根判别问题,具有一定的实用价值。

#### 参考文献:

- [1] 史传卿. 电力电缆安装运行技术问答 [M]. 北京:中国电力出版社, 2002

SHI Chuan-qing Power Cable Installation and Application Technology Instruction [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002

- [2] 李明华, 闫春江, 严璋. 高压电缆故障测距及定位方法 [J]. 高压设备, 2002, 38 (6): 38-41.  
LI Ming-hua, YAN Chun-jiang, YAN Zhang Fault Location and Positioning for Cables [J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38 (6): 38-41.
- [3] 陈德树. 计算机继电保护原理与技术 [M]. 北京:中国电力出版社, 1991.  
CHEN De-shu Computer Relay Protection Principle and Technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1991.
- [4] 梁军, 孟浩勇, 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.  
LIANG Jun, MENG Hao-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.
- [5] 蔡华嵘, 范春菊, 郁惟镛. 一种实用的高压输电线双端电气量故障测距新算法 [J]. 中国电力, 2003, 36 (7): 31-34.  
CAI Hua-rong, FAN Chun-ju, YU Wei-yong A New Practical Algorithm of Fault Location for EHV Transmission Line Based on Two-terminal Electrical Measurements [J]. Electric Power, 2003, 36 (7): 31-34.
- [6] Kawai T, Takinami N. A New Approach to Cable Fault Location Using Fiber Optic Technology [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10 (1): 85-91.
- [7] Inoue N, Tsunekage T, Sakai S. Fault Section Detection System for 275kV XLPE-insulated Cables with Optical Sensing Technique [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10 (3): 1148-1155.

收稿日期: 2004-09-07; 修回日期: 2004-10-10

作者简介:

吴承恩 (1980 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护及综合自动化; E-mail: nyfzsjh@126.com

邵能灵 (1972 -), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护与电力市场;

郁惟镛 (1940 -), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事人工智能在继电保护及综合自动化中的研究及教学工作。

### Study of practical method for fault detection and location of EHV cables

WU Cheng-en<sup>1</sup>, TAINeng-ling<sup>1</sup>, YU Wei-yong<sup>1</sup>, QIAN Rui<sup>1</sup>, GAO Chao<sup>1</sup>, SHI Wei-guo<sup>2</sup>, ZHOU Yun-jie<sup>3</sup>

(1. Dept of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200002, China;

(下转第 40 页 continued on page 40)

- quipment for 10 kV Power System in Substation[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 72-74.
- [7] 赵登福, 司喆, 杨靖, 等. 新型变电站电压无功综合控制装置的研制[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 14-17.  
ZHAO Deng-fu, SI Zhe, YANG Jing, et al Research of a New Integrated Control Set for Voltage and Reactive Power in Substation [J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 14-17.
- [8] 苏建元, 王柏林, 洪佩孙. 变电站电压无功优化控制器[J]. 河海大学学报, 1998, 26(4): 107-110.  
SU Jian-yuan, WANG Bo-lin, HONG Pei-sun Substation s V-Q Optimal Control Equipment[J]. Journal of Ho-

hai University, 1998, 26(4): 107-110.

收稿日期: 2004-09-15; 修回日期: 2004-10-31

作者简介:

阎振坤(1979-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统电压无功优化和无功补偿; E-mail: yanzhenkun@yahoo.com.cn

厉吉文(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事电力系统电压无功优化和无功补偿的研究;

李晓华(1974-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统电压无功优化和无功补偿。

### Study of voltage and reactive power integrative control strategy based on fuzzy boundary and double nine-area control method

YAN Zhen-kun, LI Ji-wen, LI Xiao-hua

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** The basic principle of system voltage and reactive power integrative control is introduced. To improve the control capability of substation when high voltage is normal, the fuzzy boundary criterion of reactive power is adopted, and the control strategy based on the established mathematical model is obtained. By comparing with nine-subdivision criterion, the paper analyzes the characteristics of control strategy based on fuzzy boundary criterion of reactive power. When high voltage is abnormal, the strategy of double nine-area control can enhance stability of system voltage and safety of substation. The proposed integrative control strategy can reduce the time of tap-change control and voltage ripple. Compared with the result of traditional nine-area control, this integrative control strategy can increase the service life of tap changer, without reducing the efficiency of voltage and reactive power control.

**Key words:** high-voltage substation; voltage and reactive power integrative control; fuzzy boundary; nine-subdivision control method; double nine-area control method

(上接第 11 页 continued from page 11)

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Extra-high Voltage Corporation of Hebei Province, Shijiazhuang 050500, China)

**Abstract:** Traditional power network planning is to minimize the cost of the power network based on certain reliability. The purpose of the planning is to ensure power system reliability, so the benefit derived from the expansion of power network is ignored, thus the optimized social benefit can not be acquired. Through the introduction of outage cost combining the reliability and economy, a new mathematical model and cost-benefit analysis method of power network planning is presented in this paper. The method takes the outage cost as a part of the total cost and quantifies the reliability benefits by the outage cost, and the costs and benefits about power network reliability planning can be evaluated based on a consistence of economy. Through the analysis and evaluation of a planning for a concrete power system, the application of cost-benefit analysis in power network planning is further improved. The efficiency of this method is validated in some test examples.

**Key words:** power network planning; outage cost; reliability; economy

(上接第 24 页 continued from page 24)

3. Shanghai Cable Co., Shanghai 200070, China)

**Abstract:** A new method for accurate fault location is introduced, which uses fault record data from both terminals of the EHV cable line. Based on the characteristics of big distributed capacity at EHV cable line, the voltage and current distributions of EHV cable line are simulated with iterative calculation to improve the precision. Simulation results show that the method does not require data to be synchronized at both terminals of the line, or affect by system resistance or transient resistance and has no false-root identification problem, so it is easily to be realized. The simulation results show that this method has a higher precision and practical value.

**Key words:** EHV cable line; fault location; non-synchronization of two terminals