

# 基于功率平衡的电力电缆故障测距方法

熊小伏, 林金洪

(重庆大学电气工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 提出了一种电力电缆故障测距方法, 该方法采用电缆线路的分布参数线路模型, 根据功率平衡原理推导出故障测距方程, 并通过搜索迭代方法解之。该方法仅采用线路的单端数据, 不受过渡电阻的影响, 无需解复杂的长线方程, 易于实现。仿真计算表明, 该方法具有很高的准确性。

**关键词:** 电力电缆; 分布参数线路模型; 故障测距; 功率平衡

**中图分类号:** TM247 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003 - 4897(2002) 12-0021-03

## 1 引言

电力电缆供电以其安全可靠、隐蔽耐用、受气候影响小、有利于美化城市布局等优点, 特别是随着电缆成本的下降, 获得了越来越广泛的应用。地下电缆一旦发生故障, 寻找起来十分困难, 不仅要浪费大量的人力物力, 而且还将带来难以估量的停电损失。如何准确、迅速、经济地查寻电缆故障近年来便成为供电部门日益关注的问题。

国内外对电力电缆的故障定位问题一直是比较关注的, 并开发出了一些方法, 这些方法可以分为两类, 即阻抗法和行波法。较经典的阻抗法是直流电桥法, 其优点是简单、方便, 其缺点是只能用于低阻故障测距, 而不能用于高阻故障和闪络性故障。电桥法在现场已很少使用。行波故障测距的研究可追溯到 50 年代, 人们根据电压和电流行波在线路上有固定的传播速度(电缆中波速约为 160 ~ 220 m/μs) 这一特点, 提出了行波故障测距方法。行波法测距利用行波从测量点到故障点往返一次的时间, 乘以波速即可得到距离。行波法的离线测量方法有低压脉冲反射法、脉冲电压法、脉冲电流法等, 这也是目前在现场普遍采用的方法, 但是这些方法在整体上还存在以下方面的问题: (1) 反射波的识别问题, 而且在近区还存在无法识别反射波的死区, 特别是对于高阻或闪络性故障, 行波在故障点不会发生明显的反射, 因此, 无法利用行波在测量端与故障点之间往返的时间定位<sup>[1]</sup>; (2) 行波的波速不确定性也是一个影响行波测距精度的重要因素; (3) 现场非线性元件的动态时延也会对行波测距精度产生影响(比如广泛用于提取电流行波信号的电流互感器和光纤电流互感器等)<sup>[1][4]</sup>。相对于架空线路而言, 电力电缆线路具有分布参数特性明显、线路短等特性, 许多适

用于架空线路故障测距方法并不适用于电缆线路, 因此, 有必要寻找适合电缆线路特点并具有工程实用价值的故障测距方法。

本文根据线路功率平衡原理提出了一种电力电缆故障单端测距方法, 该方法采用电缆的分布参数线路模型, 根据线路功率平衡原理推导出故障测距方程, 并以搜索迭代方法求解故障定位方程。该方法原理清晰, 实现方法简明, 在原理上避免了过渡电阻的影响, 不必知道电缆线路的总长度, 不用对计算条件作任何假设, 且易于实现, 具有较高的工程实用价值。最后的仿真计算结果表明该方法具有很高的测距精度。

## 2 基于功率平衡的电力电缆故障测距原理

### 2.1 接地故障

以 A 相接地故障为例, 其原理示意图见图 1。

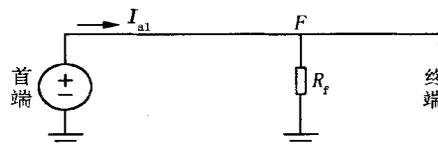


图 1 接地故障

Fig. 1 Grounding fault

以电缆首端为测量点。若已知首端电压  $U_{a1}$  和首端电流  $I_{a1}$ , 根据分布参数电路理论, 可以求出距首端距离为  $x$  处的电压相量  $U_a(x)$  和电流相量  $I_a(x)$ :

$$U_a(x) = U_{a1} \text{ch}(\gamma x) - Z_c I_{a1} \text{sh}(\gamma x) \quad (1)$$

$$I_a(x) = I_{a1} \text{ch}(\gamma x) - U_{a1} / Z_c \text{sh}(\gamma x) \quad (2)$$

其中:  $\gamma = \sqrt{j\omega C_0(R_0 + j\omega L_0)}$   $Z_0 = \sqrt{Z_0 Y_0} = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)}$

$$Z_c = \frac{\sqrt{Z_0}}{\sqrt{Y_0}} = \frac{\sqrt{R_0 + j L_0}}{\sqrt{G_0 + j C_0}} = |Z_c| e^{j\theta}$$

$R_0, L_0, G_0, C_0$ 均为电缆单位长度参数。

假设故障点  $F$  距测量点距离为  $L$  公里,因为故障点为电阻性故障<sup>[2]</sup>,可设接地过渡电阻值为  $R_f$ ,计算出线路有功及无功损耗,分别如下:

$$P(L) = \int_0^L P(x) dx + I_a^2(L) R_f \quad (3)$$

$$Q(L) = \int_0^L Q(x) dx \quad (4)$$

式中:  $P(x) = R_0 I_a^2(x) + G_0 U_a^2(x)$

$$Q(x) = L_0 I_a^2(x) - C_0 U_a^2(x)$$

根据功率平衡原理,应有:

$$P(L) = P_{10} \quad (5)$$

$$Q(L) = Q_{10} \quad (6)$$

式中:  $P_{10}, Q_{10}$  分别是首端的有功功率和无功功率,

$$P_{10} = U_{a1} I_{a1} \cos \theta, Q_{10} = U_{a1} I_{a1} \sin \theta, \text{其中: } \theta = \theta_u - \theta_i, \theta_u, \theta_i \text{ 分别是 } U_{a1}, I_{a1} \text{ 的相位。}$$

很明显,式(6)是关于故障距离  $L$  的一元方程,也即:

$$\int_0^L Q(x) dx = Q_{10} \quad (7)$$

式(7)即故障定位方程。

### 2.2 相间故障

以 A、B 相间短路为例,原理示意图如图 2。A 相距首端  $x$  处的电压电流与式(1)、(2)具有相同形式,B 相距首端  $x$  处的电压电流为:

$$U_b(x) = Z_c I_{b1} \text{sh}(\gamma x) \quad (8)$$

$$I_b(x) = -I_{b1} \text{ch}(\gamma x) \quad (9)$$

故障定位方程仍为:

$$\int_0^L Q(x) dx = Q_{10} \quad (10)$$

此时,式中:

$$Q(x) = L_0 [ I_a^2(x) + I_b^2(x) ] - C_0 [ U_a^2(x) + U_b^2(x) ] \quad (11)$$

由故障定位方程(7)、(10)两式可以看出,上述方法仅采用单端数据,而且从原理上就避开了过渡电阻的影响。

### 3 算法的实现

算法的基本思路是:采用搜索迭代的方法,选择适当的步长,从  $x_0 = 0$  开始搜索,逐渐逼近故障距离。本文采用的迭代公式如下:

$$Q_k = Q_{k-1} + x [ Q(x_k) + Q(x_{k-1}) ] / 2 \quad (12)$$

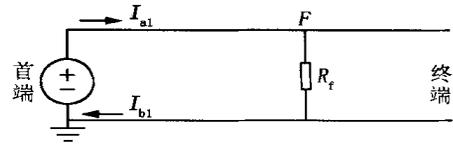


图 2 相间故障

Fig. 2 Phase-to-phase fault

$$x_k = x_{k-1} + \Delta x \quad (13); \quad Q_0 = 0 \quad (14)$$

迭代过程的收敛判据为  $|Q_k - Q_{10}| < \epsilon$ ,此时故障距离即为  $L = x_k$ 。

算法需要的数据为:线路的原始参数,故障后测量点(即首端)的工频电压和电流相量。

影响本算法计算精度的因素有:(1)步长。从理论上说,步长选择得越小,计算精度越高,但计算量也随着增加。如果步长选择得太大,计算量虽然减少了,但是在搜索过程中可能会导致不收敛的情况,而且即便计算收敛,计算结果也可能与实际故障距离相差太大。考虑到以上情况,计算时应选择一个合适的迭代步长。从实际应用的角度出发,步长选择为  $\Delta x = 0.5 \sim 1 \text{ m}$  可获得足够精确的结果。(2)采样频率。采样频率越高,测距精度越高。同时,为了避免暂态过程和现场干扰对测距的影响,可以采用第二个周波的采样值,并进行傅氏滤波。(3)参数的准确性。(4)现场设备的测量精度。(5)门槛值。选择得越小,测距精度越高。但不可选择得太小,否则将可能出现迭代不收敛。一般选取  $\epsilon = 10^{-3}$  即可满足要求。

### 4 仿真计算

表 1 接地故障仿真计算结果

Tab. 1 Simulation results of grounding fault

( $\Delta x = 0.001, x = 0.5 \text{ m}$ )

实际故障距离(m)	接地电阻( $\Omega$ )	计算结果(m)	测距误差(%)
1500	10	1496.5	- 0.2333
	100	1502.5	0.1667
	1000	1501.5	0.1
	10000	1501	0.0667
3000	10	2999	- 0.0333
	100	3006	0.2
	1000	2997.5	- 0.0833
	10000	3002	0.0667

电力电缆运行经验表明,各类故障中接地故障占主要比例,因此,本文以接地故障为例,利用 EMTP 进行了数值仿真以检验算法的准确性。所选

择的电缆单位长度线路参数为:

$$R_0 = 3.2568 \times 10^{-5} ; L_0 = 1.228 \times 10^{-4} \text{ mH};$$

$$G_0 = 8.1325 \times 10^{-12} \text{ S}; C_0 = 3.2960 \times 10^{-4} \mu\text{F}.$$

首端施加 500 V(幅值)工频电压,线路长度为 5 km,仿真结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出,本文所提出的方法有很高的定位精度,这是因为 EMTP 所提供的采样值没有干扰和误差。

## 5 结语

本文从一个比较新颖的角度推导出故障定位方程,所提出的方法不必对计算条件作任何假设,仅采用单端电压电流信息,从原理上避开了过渡电阻对测距精度的影响;算法仅依赖于线路参数的准确性,无需求解长线方程,无需事先知道故障线路的全长,选定合适的迭代步长即可找到故障点的真实位置(步长不可选择得太大),计算量也不大。该方法原理简单,可以利用现已大量投用的设备,硬件投资小,容易实现。本算法在理论上是完善的,仿真结果表明具有很高的精度,有较高的实用价值。

需要指出的是,本文所提出的方法并不适用于电缆断线故障,断线故障仍需采用传统的低压脉冲反射法。相对于阻抗法而言,这也正是行波法的优

势之一,从这一点来说,本文方法与行波法可以互为补充。

## 参考文献:

- [1] 葛耀中,徐丙垠,陈平. 利用暂态行波测距的研究[J]. 西安交通大学学报,1995,29(3):70-75.
- [2] 刘明生. 电力电缆故障的测寻[M]. 北京:冶金工业出版社,1985.
- [3] Inoue N, Tsunekage T, Sakai S. On-line Fault Location System for 66kV Underground Cables with Fast O/E and Fast A/D Technique[J]. IEEE Trans. On PWRD, 1994, 9(1):579-584.
- [4] Kawai T, Takinami N, et al. A New Approach to Cable Fault Location Using Fiber Optic Technology (Part 1) [J]. IEEE Transactions On Power Delivery, 1995, 10(1):85-91.
- [5] 陈铮,苏进喜,吴欣荣,等. 基于分布参数模型的高压输电线路故障测距算法[J]. 电网技术,2000,21(11):31-33.

收稿日期: 2002-04-30; 修回日期: 2002-06-10

作者简介:

熊小伏(1962-),男,副教授,主要研究方向为电力系统继电保护;

林金洪(1969-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护。

## A cable fault location method based on power balance theory

XIONG Xiao-fu, LIN Jin-hong

(College of Electric Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400044 China)

**Abstract:** This paper presents a new cable fault location method based on power balance theory. According to the distributed parameter model, the proposed algorithm utilizes searching and iteration methods to locate the fault point. Only using data of single terminal, the algorithm can eliminate the influence of the fault resistances and it needn't resolve the complicated equation of long line and can be realized easily. So it has a very practical value. The simulation result of EMTP shows that it has high accuracy.

**Key words:** cable; distributed parameter model; fault location; power balance

## 国家电力公司电化教育中心许昌培训基地成立

在国家电力公司电化教育中心、继电器杂志社和许继集团的紧张筹备下,国家电力公司电化教育中心许昌培训基地于 2002 年 11 月 28 日在许昌正式挂牌成立。会议由许昌继电器研究所所长姚致清主持,到会祝贺的嘉宾有河南省副省长贾连朝,中国电力企业联合会名誉理事长张绍贤,民盟中央副主席、全国政协常委、中国科学院院士卢强,国家电力公司人力资源开发处处长刘宗宪,许昌市政府领导,各省网局领导以及许继集团董事长总裁王纪年、继电器杂志社社长刘兆亮。

国家电力公司电化教育中心许昌培训基地由国家电力公司电化教育中心和许继集团共同组建而成,应用现代教育技术手段,充分发挥国家电力公司电化教育中心、许继集团以及社会各方的资源优势,主动适应电力市场的需要,以开放的姿态,吸纳国内外的高新技术产品作为培训设备。许昌培训基地的成立将积极探索电力企业职工的继续教育及岗位培训的新思路和新方法;提高电力系统继续教育和岗位培训的整体水平;提高电力系统运行的安全性、可靠性;提高电力企业、科研单位及制造厂家的员工职业技能和管理水平;促进高校、科研单位、制造厂家和电力企业的相互沟通与共同发展。