

基于基频电气量的输电线路故障测距的滤波探讨

范春菊, 郁惟镛

(上海交通大学电气工程系, 上海 200030)

摘要: 对于采用基频电气量进行输电线路故障测距的方法, 基频分量提取的精度与故障测距的精度有着直接的关系。本文总结了故障测距过程中遇到的问题及解决方法, 通过对不同滤波器的性能的比较, 发现故障测距中, 滤波的作用非常大。测距结果表明, 当电力系统中存在着大量的非周期分量和高次谐波时, 只有当滤波的精度满足一定的要求后, 故障测距的精度才能完全满足现场要求。

关键词: 输电线路; 故障测距; 滤波

中图分类号: TM773 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)04-0036-04

0 引言

故障测距是查找输电线路故障点的重要依据。高压输电线路准确的故障测距, 对于加速线路故障的排除, 尽快恢复供电具有重要的意义。近年来国内外学者提出了很多超高压输电线路故障测距的新原理和新方法。现有的故障测距方法主要有行波测距法, 光纤测距法及基于计算机的数字式测距法。其中行波测距法和光纤测距法的硬件造价高, 在经济性方面还有待改善。

对于超高压输电线路的故障测距算法, 有以下几点基本要求: 可靠性, 要求在故障发生后能可靠地进行测距, 无论何种故障类型和故障条件, 不会因为测距方法的内在缺陷出现不进行测距或是测距结果发散的情况; 而在无故障条件下, 测距不会错误启动。准确性, 准确性是对超高压输电线路故障测距最重要的要求, 没有足够的准确性就意味着测距失败。影响测距精度的主要因素有:

(1) 测量装置本身的误差。测距时需要引入线路的各电气量, 而对于故障线路, 数据测量装置所测量到的电压和电流值在相当大的范围内变化, 因此要求在上述情况下电压和电流变换器要保证有足够高的精度。比如故障电流过大的情况下 CT 出现饱和, 使得采集到的数据波形出现严重畸变, 较大地影响测距精度。

(2) 故障点的过渡电阻。故障点的过渡电阻会给某些测距方法带来较大的误差, 它突出表现在利用单端电气量实现测距的方法中。在没有过渡电阻的情况下, 这类方法的测距精度可能是相当令人满意的, 但是过渡电阻的存在及其数值的增大将会使测距误差增大到不能应用的程度。消除过渡电阻对

测距精度的影响一直是人们关注的问题。

(3) 线路两端的系统阻抗。一些故障测距的算法要用到线路两端系统的综合阻抗。但是电力系统的实际运行方式在不断变化, 所给定的系统综合阻抗很难与故障时的实际情况相一致, 因此也会给此类故障测距方法带来误差。

(4) 线路的分布电容。高压输电线路传输距离较长, 实际上是分布参数电路, 当我们只研究路端的电压和电流的关系时, 可以把线路用 T 型或是 π 型等值电路来代替, 实际工程上很多情况都是这样处理的。目前在故障测距算法中, 大部分均未考虑分布电容而采用集中参数的线路模型。对于短线来说, 这种模型是可以的, 但是对于长线将会带来一定误差。

(5) 线路的不对称。输电线路的参数由其结构决定。各相的自感、互感和导纳都不相同。对于完全换位的线路, 在测距中可以应用对称分量法。对于不换位线路则会出现误差, 应该采取措施进行补偿。

1 故障测距方法综述

长期以来, 超高压输电线路的故障测距受到普遍重视。随着计算机技术的应用, 测距技术近年来也有了很大进展, 而微机保护和故障录波装置的开发及大量投运, 更加速了故障测距的实用化进程。按照采用的线路模型、测距原理、被测量与测量设备等的不同, 故障测距可以有多种分类方法。按照工作原理可以分为故障分析法和行波法。

1.1 行波法

行波法是根据波传输理论实现输电线路故障测距的方法, 它计及输电线路的分布参数, 直接利用故

障信息的暂态行波信号对其进行分析和计算。行波测距在理论上数据不需要滤波处理,不受线路类型、故障类型、过渡电阻、系统运行方式变化、线路分布电容,系统不对称以及负荷电流等的影响,显示出极大的优越性;但是该方法分别存在着测距算法无方向性、出口短路有死区,造价昂贵等问题。

1.2 故障分析法

故障分析法是利用故障时记录下来的电压、电流,通过分析计算,求出故障点的距离。事实上,在系统运行方式确定和线路参数已知的条件下,输电线路故障时其电压电流是故障点距离的函数,因此完全可以利用故障时记录下的母线电压和电流通过分析计算,得出故障点的距离。

现行的故障分析法一般分为基于线路单侧信息量的故障测距法和基于线路双(多)端信息量的故障测距法,简称单端测距和双(多)端测距。

1.2.1 单端测距算法

单端测距算法有零序电流相位修正法;解微分方程算法;解一次方程测距法;解二次方程测距法。纵观现有的单端测距算法,主要还存在以下问题:1)故障过渡电阻或对端系统阻抗变化对测距精度的影响;2)输电线路及双端系统阻抗的不对称性对测距的影响;3)测距方程的伪根问题。造成测距误差的根本原因是存在故障过渡电阻。要减小其影响,就要引入对端系统的阻抗,那必然要受到对端系统阻抗变化的影响,这是单端测距算法长期没有解决的难题。

1.2.2 双端测距算法

双端测距算法可以分为基于集中参数模型的测距算法和基于分布参数模型的测距算法。基于集中参数模型的算法又可以分为考虑分布电容和不考虑分布电容两种。从原理上来讲,采用分布参数模型要比采用集中参数模型更加精确,特别是对于高压长线路。带来的问题是方程的求解比较复杂,计算量大,对于某些迭代式的算法而言,还存在求解双曲函数的问题,计算结果极有可能发散,从而导致测距失败。采用集中参数的算法当中,考虑分布电容显然要比不考虑分布电容精确,对于短线,可以忽略分布电容的影响,但对于中长线路,不考虑分布电容会带来较大的误差。

1.3 各种故障测距方法的比较

在故障分析法的测距算法中,除了解微分方程法使用瞬时电压和电流,多数算法均使用工频量(相量)测距。解微分方程法的主要优点是算法简单、计

算量小,可以兼作保护和测距。但从原理上看,工频(相量)测距方法的精度要比解微分方程法高,且即使采用了集中参数电路模型,也可通过在两端并联电容的方法补偿分布电容的影响。因此就测距而言,按照以时间换精度的原则,工频(相量)测距方法要比解微分方程法更有效和实用;采用工频量与利用行波的测距方法对比,在资金投入方面,前者可以利用现有大量投运设备,硬件投资小,容易实现;后者则需要专门设备,硬件投资大,技术较复杂。

纵观前面的方法,各种测距算法各有千秋,但是,从目前所提供的设备及技术等,基于工频分量的故障分析的测距方法比较实用。而基于工频分量的方法中,最重要的问题是滤波,滤波的精度与测距有很大的关系。

2 故障测距中的滤波方法

高速继电保护装置都工作在故障发生后的最初瞬变过程中,这时的电压和电流信号由于混有衰减直流分量和复杂的谐波成分而发生严重的畸变。微机保护中,有两种可供选择的方案,一是传统的模拟滤波器,另一种是数字滤波器。数字滤波器具有如下优点:滤波精度高;可靠性高;模拟元器件很容易受到环境和温度的影响,而数字式的所受影响就少得多;灵活性高;数字滤波器改变性能只要改变算法或者某些系数,模拟滤波器就麻烦得多;便于时分复用。

在数字信号处理领域,尽管许多数字滤波器的研究已有完整的理论体系和成熟的设计方法,但由于电力系统信号具有自身的特点,有些方法并不是完全适用的。同时,对于电力系统中各种故障信号的研究结果,又导出许多具有针对性的新的数字滤波器。

2.1 傅氏滤波

由于故障测距并无实时要求,可以离线进行计算,所以这里采用全波傅立叶算法来分离出 50 Hz 的基波分量,以获取更高的滤波精度。可得到各电气量基波的复数表示:

对于一个如下的无非周期分量的信号,

$$f(x) = 100\sin t + 2\sin 2t + 2\sin 3t + 0.5\sin 4t + \sin 5t + 0.3\sin 6t + 0.7\sin 7t + 0.2\sin 8t + 0.3\sin 9t$$

傅氏滤波具有较高的滤波精度,详细滤波结果可以参见表 1。

表 1 无非周期分量的信号的傅氏滤波结果

Tab.1 Fourier filtering results of signals without nonperiodic component

频率/ Hz	实际电压 /V	全周傅氏滤波得到的电压值/V	误差率/ %
50	100000	99997.7	0.0023
100	1000	1004.49	0.449
150	2000	2001.94	0.097

2.2 差分滤波

事实上,故障测距是利用故障后的电压,电流及故障距离之间的关系而进行的。而发生故障时,根据电力系统的特点,会出现大量的非周期分量和大量的高次谐波。傅氏滤波能较好地滤除各次谐波;对于非周期分量,却比较难。对于一个如下的信号,

$$f(x) = 100\sin t + 2\sin 2t + 2\sin 3t + 0.5\sin 4t + \sin 5t + 0.3\sin 6t + 0.7\sin 7t + 0.2\sin 8t + 0.3\sin 9t + 2e^{-0.05t}$$

当加入非周期分量时,傅氏滤波的结果如表 2 所示:

表 2 加入非周期分量时的傅氏滤波结果

Tab.2 Fourier filtering results of signals with nonperiodic component

频率/ Hz	实际电压 /V	全周傅氏滤波得到的电压值/V	误差率/ %
50	100000	98787.7	1.2123
100	1000	1015.49	1.549
150	2000	2031.94	1.597

显然,当加入非周期分量后,傅氏滤波的滤波精度有所下降,针对这种情况,可以引进差分滤波滤除非周期分量。

如前所述,只要取样品函数为 $\cos t$,傅立叶算法即可完全滤除各种谐波和直流分量,但是实际暂态短路电流中并无如傅立叶级数所表示的稳态电流中的直流分量,它含有各种衰减的非周期分量,很显然

$$I_0 e^{-t/T_a} \cos t \quad 0, \quad I_0 e^{-t/T_a} \sin t \quad 0$$

式中 T_a 为非周期分量的衰减时间常数。

可见上述数字滤波没能消去非周期分量的影响。

为了进一步滤去(或减小)非周期分量,将 $I_0 e^{-t/T_a}$ 用泰勒无穷级数的首两项近似表示,即在 $t = 0$ 处展开并取首两项得

$$I_0 e^{-t/T_a} \approx I_0 - \frac{t}{T_a} I_0$$

写成离散形式,即得:

$$\text{第 } k \text{ 次采样 } I_0 e^{-k/T_a} \approx I_0 - \frac{k}{T_a} I_0 \frac{T}{N}$$

$$\text{第 } k-1 \text{ 次采样 } I_0 e^{-(k-1)/T_a} \approx I_0 - \frac{k-1}{T_a} I_0 \frac{T}{N}$$

采用差分滤波算法,即取差分得到:

$$I_0 - \frac{k}{T_a} I_0 \frac{T}{N} - I_0 - \frac{k-1}{T_a} I_0 \frac{T}{N} = -\frac{T}{NT_a} I_0$$

即经过差分数字滤波,将一个初始值为 I_0 的非周期分量近似削减为 $-\frac{T}{NT_a} I_0$,设每周波采样次数 $N = 20$,则采样间隔 $T = 0.001$ s,如果衰减时间常数 $T_a = 0.1$ s,则差分滤波后的非周期分量近似为一个直流量,它的大小仅为初始值的 $1/2000$ 。适当地提高采样频率,可以大大减小衰减非周期分量对滤波精度的影响,从而提高故障测距的精度。

2.3 前置带通数字滤波器

用加窗法设计一个 35 ~ 75 Hz 的前置 FIR 带通滤波器。

在实际的超高压输电线路中,由于分布电容的存在,当输电线路发生故障时,实际上会存在大量的非整次谐波,这些谐波的存在,直接影响到测距的精度。为了消除非整次谐波的影响,我们设计了一个前置数字式带通滤波器。假设理想带通滤波器下边带截止频率 $f_l = 45$ Hz,上边带截止频率 $f_h = 65$ Hz。选用海明窗作为窗口函数。

设带通时延为 τ ,理想带通滤波器频谱特性为

$$H_d(e^{j\omega}) = \begin{cases} e^{-j\omega\tau} & |\omega| < \omega_c \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

由 $h_d(n) = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} H_d(e^{j\omega}) e^{jn\omega} d\omega$ 可以求得理想单位脉冲响应为

$$h_d(n) = \frac{2}{(n-1)\pi} \cos[(n-1)(f_h + f_l)T_s] \sin[(n-1)(f_h - f_l)T_s]$$

这是一个以 $(N-1)/2$ 为中心的偶对称的无限长非因果序列。为满足线性相位特性,需要满足偶对称性,即 $h_d(n) = h_d(N-1-n)$,应取 $\tau = (N-1)/2$ 。

再取海明窗作为截取窗口,海明窗函数序列 $w(n)$ 如下式:

$$w(n) = 0.54 - 0.46 \cos \frac{(2-n)\pi}{N-1}, \quad 0 \leq n \leq N-1$$

所以,该 FIR 带通滤波器的单位脉冲响应为

$$h(n) = h_d(n) w(n)$$

由此所导出的差分方程为

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} h(i)x(n-i)$$

再对上面的序列值进行全周傅氏滤波,就可以得到几乎接近于基波的电压、电流信号,在此基础上再运用适当的故障测距算法,就可以得到较为精确的故障测距方法。测距结果可以参见表5。

3 基于双端电气量的故障突变序分量的故障测距算法的精度比较^[6]

采用文献[6]所述的方法,即基于双端电气量的故障突变序分量进行故障测距,该方法采用故障突变序分量实时地求取输电线路两端背侧的系统电抗,再利用此系统电抗进行故障测距,该测距方法不受过渡电阻的影响,线路两端的数据不需同步,求解方程时采用搜索的方法,无需求解复杂的长线方程,也不存在伪根的判别问题。利用该方法,对200 km长线路的单相接地故障进行了仿真计算,不同的滤波方法,测距的精度是完全不同的。详细的测距结果参见以下列表。

表3 无差分滤波时全周傅氏滤波的测距结果

Tab.3 Fault location results by full-circular Fourier filter without difference filter

线路总长 / km	故障类型	理论测距 距离/ km	过渡电阻 /	实际测距 结果/ km	相对误差
200	单相接地	80	100	68.9372	- 5.5314 %
200	单相接地	100	10	103.46	1.73 %
200	单相接地	10	200	20.744	5.372 %

表4 有差分滤波时全周傅氏滤波的测距结果

Tab.4 Fault location results by full-circular Fourier filter with difference filter

线路总长 / km	故障类型	理论测距 距离/ km	过渡电阻 ()	实际测距 结果/ km	相对误差
200	单相接地	80	100	72.943	- 2.529 %
200	单相接地	100	10	102.24	1.12 %
200	单相接地	10	200	14.456	2.23 %

表5 前置带通滤波加上傅氏滤波的测距结果

Tab.5 Fault location results by full-circular Fourier filter with pre-filter of bandpass

线路总长 / km	故障类型	理论测距 距离/ km	过渡电阻 /	实际测距 结果/ km	相对误差
200	单相接地	80	100	78.653	- 0.685 %
200	单相接地	100	10	101.86	0.93 %
200	单相接地	10	200	13.235	1.615 %

4 结论

本文在相同的故障方式下,相同的故障距离下,

采用了不同的滤波方法来进行故障测距的研究,研究表明,故障测距的方法都是基于基波分量而进行的,基频分量能否精确提取直接决定了故障测距的精度。

参考文献:

- [1] 梁军,孟浩勇(LIANG Jun, MENG Hao-yong). 精确故障测距新算法(A New Accurate Fault Location Algorithm for Two-terminal Lines) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(9): 24 - 27.
- [2] 毛鹏,张兆宁,苗友忠,等(MAO Peng, ZHANG Zhao-ning, MIAO You-zhong, et al). 基于双端电气量的输电线路故障测距的方法(A Novel Technique for Locating Transmission Line Fault Based on Two-terminal Electrical Quantities) [J]. 继电器(Relay), 2000, 28(5): 24 - 27.
- [3] 董新洲,葛耀中(DONG Xin-zhou, GE Yao-zhong). 一种使用两端电气量的高压输电线路故障测距算法(Algorithm for High Voltage Transmission Line Fault Location Using One-terminal Voltage and Two-terminal Current) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1997, 19(8): 47 - 53.
- [4] 张哲,陈德树(ZHANG Zhe, CHEN De-shu). 递推滤波算法中非周期分量处理方法的探讨(Rejection of D C Offset Component in Recursive Estimator) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1994, 18(1): 16 - 20.
- [5] 吴必信,沈鲁豫(WU Bi-xin, SHEN Lu-yu). 用于故障测距装置中的数字滤波算法(Digital Filtering Algorithm Used in Fault Location Device) [J]. 电力自动化设备(Electric Power Automation Equipment), 1995, 54(2): 40 - 44.
- [6] 蔡华嵘,范春菊,郁惟镛(CAI Hua-rong, FAN Chun-ju, YU Wei-yong). 一种实用的高压输电线路双端电气量故障测距新算法(A New Practical Algorithm of Fault Location for EHV Transmission Line Based on Two-terminal Electrical Measurements) [J]. 中国电力(Electric Power), 2003, 36(7): 31 - 34.

收稿日期: 2003-06-02; 修回日期: 2003-07-01

作者简介:

范春菊(1967-),女,副教授,在职博士生,长期从事电力系统继电保护及综合自动化的研究及教学工作;

郁惟镛(1940-),男,教授,博士生导师,长期从事电力系统继电保护及综合自动化的研究及教学工作。

(下转第47页 continued on page 47)

参考文献:

- [1] 袁荣湘,陈德树,等 (YUAN Rong-xiang, CHEN De-shu, et al). 基于故障分量的采样值电流差动保护研究 (Study Based on Sampling Current Differential Protection Principle) [J]. 继电器 (Relay), 2000, 28 (3) :9-11.
- [2] 李岩,尹项根,等 (LI Yan, YIN Xiang-gen, et al). T接短线路微机纵差保护原理研究 (Research of Microcomputer Differential Current Protection Principle for T Structure Short Transmission Line) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 1999, 19(2) :21-23.
- [3] 李清波,刘沛 (LI Qing-bo, LIU Pei). 光纤纵差保护的应用及灵敏度的提高 (Application of Fiber Differential Protection and Sensitivity Improvement) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2002, 22 (4) :21-24.
- [4] 张新国,杨维娜,杨明玉,等 (ZHANG Xin-guo, YANG Wei-na, YANG Ming-yu, et al). 数字式微波零序电流差动保护判据的研究 (Research on the Criteria of the Digital Microwave Zero-sequence Current Differential Protection) [J]. 继电器 (Relay), 1992, 20(2) :2-6.

收稿日期: 2003-06-20; 修回日期: 2003-09-09

作者简介:

于波涛(1977-),女,硕士研究生,从事电力系统继电保护的研究工作;

张举(1946-),男,教授,从事电力系统继电保护的研究工作。

Scheme of adaptive current longitudinal differential protection for transmission line

YU Bo-tao¹, ZHANG Ju¹, REN Si-ying²

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Datong Mining Group, Datong 037001, China)

Abstract: Single differential criterion can't satisfy the special requirements of UHV transmission line for sensitivity, speed and reliability of protection. In this paper, an integrated scheme which has the optimum functions is provided based on several different criteria and adaptive principle. The criteria based on instantaneous value of fault component is chosen to protect the serious fault, the criteria based on fault component phasor to protect the slight fault, the criteria of whole-current differential protection to protect converted fault and developed fault, and the criteria of zero-sequence current differential protection to protect high impedance-to-ground fault. The simulation results based on ATP show that the scheme has the inverse time-lag character, and can clear the faults with a higher speed. It proves to be a proper scheme for current longitudinal differential protection of UHV transmission line.

Key words: UHV transmission line; adaptive; current differential protection; operating criterion

(上接第 39 页 continued from page 39)

Discussion on fault location filter of transmission line based on basic frequency measurement

FAN Chun-ju, YU Wei-yong

(Dep. of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: When applying basic frequency measurement to fault location of transmission line, the extracting accuracy of fundamental component is influenced by fault location accuracy. On the basis of problem related to fault location and its solution, the authors consider that filter accuracy is very important in fault location through comparison of different filter methods. Fault location result indicates that there is much non-periodic component and high harmonics when fault occurs. Only if the filter accuracy is very high, can the fault location accuracy meet the running requirements of power system.

Key words: transmission line; fault location; filter