

工频量双端测距综述

袁宇春¹, 刘晓川²

(1. 西华大学电气信息学院, 四川 成都 610039; 2. 成都府河电气集团公司, 四川 成都 610041)

摘要: 对于工频量双端测距, 影响其精度的因素很多。简要介绍了目前基于双端工频量测距的主要计算方法, 分析了算法的基本原理和将其应用于实际系统时的局限性。作者认为: 只有在算法中统一考虑两端数据可能不同步、系统参数不能够准确得知、三相线路不换位或者不完全换位以及线路上可能存在补偿装置等情况, 并在提取工频量时要能够消除非周期分量及其他各次谐波的影响, 才可能使得测距结果达到满意的精度。

关键词: 输电线路; 故障测距; 双端数据; 工频量; 电力系统

中图分类号: TM726.3; TM77 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)23-0074-04

0 引言

输电线路准确的故障测距是检修人员快速查找故障点并排除故障的前提。近年来, 国内外提出了多种故障测距的原理和方法, 取得了大量的研究成果。按照计算所用的信息的性质, 可以将测距算法分为两类: 利用故障产生的暂态行波测距(也称行波法)和利用工频量的测距算法。而行波法和利用工频量的算法又可以分为单端测距和双端测距。

基于工频量的单端测距算法由于受可得到信息量的限制, 一般要进行一些假设或近似处理, 精度往往不能满足要求。随着电力系统自动化水平的不断提高以及通讯技术的不断发展, 输电线路两端的信息可以很容易地实现互传或将两端信息传至上一级调度, 所以研究基于工频量的双端故障测距有现实的意义。

许多研究者在工频量双端测距的算法及实现方面作了大量的工作, 取得了很多研究成果。但是到目前为止, 这些研究大多是以仿真数据来进行的, 在实际应用到实际系统时能否取得满意的结果还没有肯定的结论。本文将对主要的工频量双端测距方法进行分析, 指出要使计算方法在实际系统中取得理想的结果, 研究中必须要考虑的几个问题。

1 算法的基本原理

图1所示为f点发生故障的一相线路的示意图。

图1中, 设 U_m, I_m, U_n, I_n 为故障期间线路两端的电压和电流, x 为故障发生点到M端的距离, 采用分布参数, 用 U_m 和 I_m 来表示故障点的电压和电流

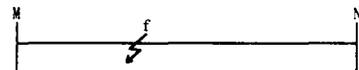


图1 一相的故障线路

Fig 1 Fault line of one phase system

为^[1]:

$$\begin{cases} U_x = U_m \cosh x - I_m Z \sinh x \\ I_x = \frac{U_m}{Z} \sinh x - I_m \cosh x \end{cases} \quad (1)$$

同样, 用 U_n 和 I_n 来表示故障点的电压和电流为:

$$\begin{cases} U_x = U_n \cosh (l - x) - I_n Z \sinh (l - x) \\ I_x = \frac{U_n}{Z} \sinh (l - x) - I_n \cosh (l - x) \end{cases} \quad (2)$$

式(1)和(2)中, $Z = \sqrt{z_1/y_1}$, $\gamma_1 = \sqrt{z_1/y_1}$, $z_1 = r_1 + jx_1$, $y_1 = g_1 + jb_1$, r_1, x_1, g_1, b_1 分别是一相线路单位长度的电阻、电抗、电导和电纳, l 为线路的全长。

在两端的电压和电流已知的情况下, 由式(1)和式(2)所表示的故障点的电压相等, 即下式成立:

$$U_m \cosh x - I_m Z \sinh x = U_n \cosh (l - x) - I_n \cdot Z \sinh (l - x) \quad (3)$$

式(3)中只有一个未知量 x , 可以计算出故障距离 x_0 。而且由于上式是一个复数方程, 由实部和虚部分别相等可以得到两个方程, 用于测距的方程是冗余的。

实际的电力系统是三相的而且三相之间有耦合, 所以用每一相的端电压和电流来表示沿线各相的电压和电流分布时要考虑各相之间的耦合, 这样就使得沿线电压和电流的表达式比较复杂, 同样也使得利用这一表达式来计算故障距离的方程复杂化。

电力系统工频量双端测距的基本原理同式(3)一样,但是在实际应用时,要根据三相系统的具体情况经过一些适当的变换。

2 工频量双端测距算法及分析

在理想的情况下(这里的理想情况指:系统三相之间完全平衡且计算所需要的系统参数准确知道,故障时线路两端的测量数据完全同步),工频量双端测距的计算公式同式(3)类似。需要说明的是,公式中所用的电压和电流不能是各相的量(因为各相的量之间有耦合),而是经过某种变换后得到的相互之间没有耦合的量。由于理想情况下三相之间完全平衡,可以采用常用的正、负、零序变换,则公式中的电压和电流可以分别用正、负、零序量,系统参数也是相应的正、负、零序参数。具体的变换公式请参阅文献[1]。

图2所示为f点发生故障的三相线路的示意图。

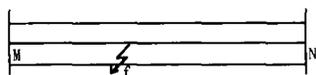


图2 三相故障线路

Fig 2 Fault line of three-phase system

对于图2所示的输电线路,理想情况下的测距公式为:

$$U_{m_i} \cosh_i x - I_{m_i} Z_i \sinh_i x = U_{n_i} \cosh_i (l-x) - I_{n_i} Z_i \sinh_i (l-x) \quad (4)$$

式(4)中 U_{m_i} 、 I_{m_i} 、 U_{n_i} 、 I_{n_i} 分别为线路两端的三相电压和电流经过变换后得到的正、负、零序分量, Z_i 和 i 分别为对应的各序参数(i 分别对应 1, 2, 0)。在这里需要特别说明的是,虽然图2只表示了一种故障情况,但是由于测距算法用了对称分量分解,所以利用式(4)的测距算法是与故障类型无关的。而且,分别对正、负、零序分量,由式(4)可以得到三个方程。一般认为,由于系统的零序参数误差较大,所以测距计算中尽量不使用零序参数。

实际的电力系统远不是理想情况^[2,3],除了三相之间实际上不平衡外,计算所用到的系统的参数也不大可能会准确地知道,如果再考虑到两端数据可能不同步等情况,对实际系统故障测距的算法与理想情况下的算法有很大的不同。

2.1 两端数据不同步时的测距算法

考虑两端数据不同步,式(4)不再成立。在这

种情况下,大多数研究者认为由线路两端的电压和电流(指经过对称分量分解得到的各序分量)所计算出的故障点的电压幅值相等^[5,9],即下式成立:

$$|U_{m_i} \cosh_i x - I_{m_i} Z_i \sinh_i x| = |U_{n_i} \cosh_i (l-x) - I_{n_i} Z_i \sinh_i (l-x)| \quad (5)$$

式(5)中各变量的意义与式(4)相同。

虽然式(5)中只有一个未知量,但是求解比较复杂,目前采取了一种类似搜索的方法^[5,9],即给一个步长 x (如 $x=0.1$ km),然后分别由线路两端序分量电压和电流计算线路上每间隔 x 点的电压模值。当由两端分别计算出的线路上某一点的两个电压幅值相等时(或误差在一个给定的范围内),认为这一点就是故障点。

这种计算方法比较简单,当三相系统参数完全对称(即可以用对称分量分解)且系统参数能够准确知道时,可以取得较好的计算精度。但是仍然有一个问题在现有的文献中未见说明:需要在理论上证明,在全线路上有且仅有一个点满足以上电压幅值相等的条件。

目前许多研究工频量双端测距的算法考虑了两端数据不同步的问题,除了上述的计算方法外,另一些计算方法将两端不同步的角度作为变量引入^[6],此时式(5)也可以表示为:

$$U_{m_i} \cosh_i x - I_{m_i} Z_i \sinh_i x = (U_{n_i} \cosh_i (l-x) - I_{n_i} Z_i \sinh_i (l-x)) e^j \quad (6)$$

式(6)有两个未知量,且分别由实部和虚部相等可以得到两个方程,理论上方程可解。

上述的方法虽然能够进行双端数据不同步时测距,但是无法解决系统参数不准确所带来的测距误差,而且实际系统的三相一般是不平衡的,用对称分量来计算也会带来误差。

2.2 系统参数不能准确知道时的算法

由于系统参数对于计算结果有明显影响,而且理论上系统参数是变化的^[8],所以研究工作者在如何消除系统参数误差对测距精度的影响方面进行了许多工作^[7,8,10-12]。对这一问题的处理主要是利用测距冗余的方程对系统参数进行修正。文献[11]所提出的方法具有一定的代表性,在此作简要介绍。

对于图2所示的系统,设 U_{m_i} 、 I_{m_i} 、 U_{n_i} 、 I_{n_i} 分别是故障前线路两端经过对称分量变换得到的序分量; U_{m_i} 、 I_{m_i} 、 U_{n_i} 、 I_{n_i} 分别是故障期间线路两端经过对称分量变换得到的序分量; θ 为两端不同步的角度, i

= 1, 2, 0 分别对应正、负、零序分量。则可以得到以下方程组:

$$\begin{cases} U_{mi} = (U_{ni} \cosh_i l - I_{ni} Z_i \sinh_i l) e^j \\ U_{ni} = (U_{mi} \cosh_i l - I_{mi} Z_i \sinh_i l) e^{-j} \\ U_{mi} \cosh_i x - I_{mi} Z_i \sinh_i x = (U_{ni} \cosh_i (l-x) - I_{ni} Z_i \sinh_i (l-x)) e^j \end{cases} \quad (7)$$

除了故障距离 x 和 I_{ni} 外, 如果将 Z_i 和 I_{mi} 也作为未知量, 则式 (7) 中共有 6 个未知量 (注意 Z_i 和 I_{mi} 是复数), 而根据实部和虚部分别相等, 由式 (7) 可以得到 6 个方程, 对这一非线性方程组可利用迭代法来求解。

上述方法同时考虑了系统参数不准确和两端数据不同步的问题, 在仿真中也取得了较好的精度。但是, 如前文所述, 当系统的三相参数不平衡时, 这种利用对称分量来计算故障距离的方法仍然与实际情况有差别。

2.3 考虑三相不平衡的测距算法

对于高压输电线路, 实际情况是: 大多数没有经过完全换位或者根本不换位, 这样一来三相之间是不平衡的, 所以用对称分量法来计算故障距离肯定会带来误差。而且, 即使对于那些经过了完全换位的线路, 由于故障可能发生在电路上任何一点, 从故障点到线路两端的系统, 三相之间又分别是不平衡的, 所以对称分量法仍然不能适用。

对于三相不平衡的系统, 之所以用对称分量法会带来误差是因为对于这样的系统, 用对称分量变换后, 各序分量之间仍然有耦合。所以, 对于具体的系统, 必须找到一种相-模变换, 将有电磁耦合的相量转换为假想的几个独立的模量, 这样就可利用前面的原理来计算故障距离^[3, 13]。对此问题的研究, 文献 [3] 所提出的方法具有一定的代表性, 该方法不但考虑了线路不换位的情况, 而且也考虑了不完全换位的情况。计算中, 需要根据不同的换位区段来确定相应区段的相-模变换矩阵。相-模变换矩阵可以由线路相量的参数矩阵 (阻抗矩阵和导纳矩阵) 求得。主要的思路为: 计算出参数矩阵的特征值和特征向量, 然后可以得到相模变换矩阵。

如果不考虑线路参数等的影响, 这种计算方法与系统的实际情况较接近, 因而也有可能取得较高的计算精度。

3 结论

根据大量的仿真计算以及对实际系统的录波数据的计算, 本文作者认为, 只有在算法中统一考虑以下几个方面, 才有可能取得满意的计算结果:

1) 工频量的提取。故障期间系统中不但有大量的谐波, 而且有非周期分量和非整数次谐波, 所以滤波算法不但要能消除各次谐波的影响, 而且还要能消除衰减的非周期分量的影响并有效降低非整数次谐波的影响。

2) 两端数据不同步。虽然现在可以通过 GPS 而做到两端数据同步, 但也要考虑由于各种原因 (如 GPS 信号暂时中断等) 使得同步误差较大。

3) 系统的参数可能不准确。运行部门给定的系统参数可能是试验参数或者现场实测的参数, 但是由于系统参数可能随气候条件等变化, 在系统故障后进行测距算法时, 为了保证计算精度, 测距算法要考虑参数可能不准确所带来的误差。

4) 系统的 A、B、C 三相之间不换位或不完全换位。工频量测距算法中必须要考虑各相之间的耦合, 对于实际的一些输电线路, 本身是不换位或不完全换位, 这样使得三相参数不对称, 所以我们平常计算中采用的正负零序变换在测距计算中会带来较大的误差。而即使对于进行了完全换位的线路, 由于发生故障的故障点两端分别又成了不完全换位的线路, 这样, 基于正负零序变换的算法仍然会带来较大的误差, 所以测距算法要通过相模变换来消除三相不平衡所带来的影响。

5) 在综合考虑以上因素的前提下, 还要考虑线路上可能有补偿电容或并联电抗器等情况^[14], 针对这些具体情况的算法需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 夏道止. 电力系统分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
XIA Dao-zhi Power System Analysis [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [2] 马文骐, 郎燕生, 马昭彦. 分布参数输电线路故障模拟及测距 [J]. 电力系统及其自动化学报, 1996, 8 (3): 7-16.
MA Wen-qi, LANG Yan-sheng, MA Zhao-yan Algorithm of Fault Simulation and Fault-location for Distributed Parameter Line Model [J]. Proceedings of the EPSA, 1996, 8

- (3): 7-16
- [3] 卢继平,叶一麟. 换位与不换位输电线短路故障的计算 [J]. 重庆大学学报 (自然科学版), 1999, 22 (6): 47-52
LU Ji-ping, YE Yi-lin The Fault Calculation of the Transposed and Un-transposed Transmission Lines [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 1999, 22 (6): 47-52
- [4] 束洪春,高峰,陈学允. 双端不同步采样的高压输电线路故障测距算法研究 [J]. 电工技术学报, 1997, (12): 43-48
SHU Hong-chun, GAO Feng, CHEN Xue-yun Studies on Fault Location Algorithms for HV Transmission Line Using Both Line Terminals A synchronous Data [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 1997, (12): 43-48
- [5] 滕林,刘万顺,李莹,等. 一种实用的新型高压输电线路故障双端测距精确算法 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (9): 24-27.
TENG Lin, LU Wan-shun, LI Ying, et al A Novel Practical Accurate Fault Location Algorithm for HV Transmission Line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (9): 24-27.
- [6] 梁军,孟昭勇,车仁飞,等. 精确双端测距新算法 [J]. 电力系统自动化, 1997, 21 (9): 24-27.
LIANG Jun, MENG Zhao-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.
- [7] 全玉生,杨敏中,王晓蓉,等. 工频双端故障测距算法的鲁棒性问题和算法研究 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (5): 28-32
QUAN Yu-sheng, YANG Min-zhong, WANG Xiao-rong, et al New Algorithms and Their Robustness for Two-Terminal Fault Location on HV Transmission Line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (5): 28-32
- [8] 全玉生,杨敏中,王晓蓉,等. 双端测距中的自适应线路参数在线估计 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (9): 26-30
QUAN Yu-sheng, YANG Min-zhong, WANG Xiao-rong, et al Adaptive On-line Estimation of Parameters for Transmission Line in Double-terminal Fault Location [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (9): 26-30
- [9] 毛鹏,张兆宁,苗友忠. 基于双端电气量的输电线路故障测距的新方法 [J]. 继电器, 2000, 28 (5): 24-27.
MAO Peng, ZHANG Zhao-ning, MIAO You-zhong A Novel Technique for Locating Transmission Line Fault-based on the Two Terminal Electrical Quantities [J]. Relay, 2000, 28 (5): 24-27.
- [10] 赵永娴,曹小拐,刘万顺. 同杆并架双回路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
ZHAO Yong-xian, CAO Xiao-guai, LU Wan-shun New Fault Location Algorithm for Double Transmission Lines on A Same Tower [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (4): 72-76
- [11] 车仁飞,梁军,孟昭勇. 一种考虑线路参数变化的输电线路双端测距算法 [J]. 中国电力, 2004, 37 (2): 45-49.
CHE Ren-fei, LIANG Jun, MENG Zhao-yong A Fault Location Algorithm for Two Terminal Lines Considering the Variation of Line Parameter [J]. Electric Power, 2004, 37 (2): 45-49.
- [12] 梁军,麻常辉,员志皓. 基于线路参数估计的高压架空输电线路故障测距新算法 [J]. 电网技术, 2004, 28 (4): 60-63
LIANG Jun, MA Chang-hui, YUN Zhi-hao A Fault Location Algorithm for High Voltage Overhead Power Transmission Line Based on Line Parameter Estimation [J]. Power System Technology, 2004, 28 (4): 60-63
- [13] 陈铮,苏进喜,吴欣荣. 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, 24 (11): 31-33.
CHEN Zheng, SU Jin-xi, WU Xin-rong Fault Location Algorithm for High Voltage Transmission Line Based on Distributed Parameter [J]. Power System Technology, 2000, 24 (11): 31-33.
- [14] 陈铮,董新洲,罗承沐. 带串联电容补偿装置的高压输电线路双端故障测距新算法 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 24 (1): 11-15.
CHEN Zheng, DONG Xin-zhou, LUO Cheng-mu A New Accurate Two-terminal Locating Algorithm for Series Compensated Line [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 24 (1): 11-15.

收稿日期: 2006-06-02; 修回日期: 2006-07-18

作者简介:

袁宇春 (1970 -),男,博士,副教授,目前主要从事电力系统故障录波和数据分析的研究工作; E-mail: yuchun777@163.com

刘晓川 (1965 -),男,教授,总工程师,目前主要从事故障录波器的研究开发工作。

(下转第 84 页 continued on page 84)

A survey of modeling and optimization methods on generation expansion planning

LIXiao-ming¹, CHEN Jin-fu², DUAN Xian-zhong², CHEN Yue-hui³, SONG Ai-hong⁴

(1. Henan Electric Power Survey and Design Institute, Zhengzhou 450007, China;

2. College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

3. Hunan Electric Power Group Co., Changsha 410007, China;

4. Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: In this paper, a survey of the optimal models on generation expansion planning (GEP) is presented. The influence on GEP are discussed, which are caused by demand-side management, environment protection and the power market. The differences of objective functions and constraints in these models are analyzed. Then, the optimal methods on GEP are summarized, such as dynamic programming, mixed-integer programming, expert systems, fuzzy set theory, genetic algorithm, artificial neural networks, etc. Finally, some problems to be solved are put forward.

Key words: power system; generation expansion planning (GEP); model; optimization methods; survey

(上接第 61 页 continued from page 61)

彭向阳 (1968 -),男,工程师,长期从事继电保护专业 业技术管理工作;
技术工作; E-mail: kfpxy@sohu.com 潘龙 (1967 -),男,高工,长期从事电力系统专业技
陈献伟 (1959 -),男,硕士,高工,长期从事电力系统专 术管理工作。

Characteristic analysis of DC circuit breakers and fuses used in substation

PENG Xiang-yang¹, CHEN Xian-wei², PAN Long¹

(1. Kaifeng Power Supply Company, Kaifeng 475000, China; 2. Zhengzhou Power Supply Company, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: There are many DC circuit breakers and fuses in the DC system of substation. But some data on ampere-second of their operating (fusing) characteristic are not usually provided by manufacturers specifications, and it is fuzzy for on site users to know the operating characteristic about coordination among DC protection systems, which can affect on selecting DC protection system's parameters of the whole set electric device for substation in some degree. For knowing well about the fusing characteristic of DC protection and controlling elements, some reasonable strategies are presented and tested by choosing DC circuit breakers and fusible cutout with main-stream configure trial and error. As a result, some pivotal problems are detected from corrective testing data, which are the basis of researching into the coordination among different levels of DC protection systems for substation.

Key words: substation; DC system; breaker; fuse; different levels; characteristic

(上接第 77 页 continued from page 77)

Survey of fault location algorithm based on two-terminal data of transmission line

YUAN Yu-chun¹, LU Xiao-chuan²

(1. Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. Chengdu Fuhe Electric Group Co., Ltd, Chengdu 610041, China)

Abstract: There are many factors that influence the accuracy of fault location using two-terminal data. Fault location algorithm using two-terminal data of transmission line is discussed in this paper. The principle of the algorithm and their limitations when applied in practical system are analyzed. The conclusion is that the following factors must be take into account then the results of the algorithm may have high accuracy. These factors are, the data of transmission line of two terminals may be unsynchronized, the parameters of the transmission line may have error, the transmission line is un-transposed, compensating equipments are installed in transmission line.

Key words: transmission line; fault location; two-terminal data; fundamental frequency; power system