

采用不同步数据的故障测距新原理研究

吴浩然, 李澄

(国网无锡供电公司, 江苏 无锡 214061)

摘要:为解决双端测距中无法忽略的不同步误差问题,提出了一种采用不同步数据的故障测距新原理。该原理对原有的双端同步测距方程进行不同步化处理,通过对测距方程两边同时取共轭复数后得到包含故障距离和不同步角2个未知量的方程组,该方程组可以转化为一元二次方程,求解即可实现不同步故障测距。仿真结果表明,提出的不同步测距的方法在原理上能消去不同步角,测距精度高,基本不受过渡电阻影响,可适用于各种短路故障。

关键词:共轭复数;一元二次方程;不同步;故障测距

中图分类号: TM77

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2016)06-0073-04

恶劣天气下,连接厂站的高压线路频繁发生短路故障,容易造成用户失电。一般情况下,线路配置了保护装置,可以确保系统稳定和减少短路危害。从调度监控系统端得到的线路保护装置动作情况可以获悉具体线路故障形式以及实时电气量数据。为了加快对失电用户恢复送电,需要及时准确地找到故障位置。以往的人工巡线工作随着电力信息化发展逐步转化为参照装置提供的故障测距数据进行有目的的巡线。因此精确的测距结果有利于迅速恢复供电系统。实际生产运行中,连接厂、站的线路两端数据存在不同步的问题。在故障分析的过程中,往往需要计算得出测距信息,而采用不同步的数据计算较同步的数据会产生相当大的误差,不利于得到准确的故障分析结果。至此,需要研究双端数据不同步的故障测距原理,从而改良线路保护装置提供的测距数据。故障测距的理论在实际工程研究始终是国内外的热点。故障测距就是确定故障点相对于已知点的距离,即获得故障位置相对于参考厂站位置的距离。诸多学者主要研究行波法和阻抗法。其中,阻抗法的故障分析原理可靠性高,精度优良,简单易实现,工程实施量小。近几年,国内外关于故障测距的研究主要集中在:(1) 无需同步通信的T型输电线路测距^[1];(2) 由电缆和架空线组成的混合线路测距^[2,3];(3) 含FACTS补偿装置的测距方法研究^[4];(4) 基于行波法的全网广域测距^[5];(5) 更具经济性的同杆双回线测距^[6]。

现今,连接于厂站的由各种电压等级的线路两端母线无法获得同步的电气量数据,将会给具有明显优势的双端故障测距原理带来不可忽略的误差。考虑了双端数据不同步的测距研究有故障分量法^[7]、通过对复杂测距方程求导后得到简单线性方程^[8,9]求解实现测距及形成非线性优化问题来求解非线性最优^[10]方程的方法。

1 测距新原理

阻抗法故障测距主要通过构造测距方程来实现,其数学模型解析为简单的一元方程求解,而不同步故障测距则是对该简单方程增加了一个未知量(不同步角),通过一些方法构造出方程组,将测距问题转化为线性一元方程求解的问题。本文主要采用共轭复数法,通过对测距方程等号两边取共轭复数的方法来构造新的测距方程来实现。以下分别在集中参数阻抗模型和分布参数阻抗模型上进行不同步测距原理的推导。

1.1 集中参数模型

假设线路完全换位,采用单线表示的集中参数线路故障的等值电路如图1所示。

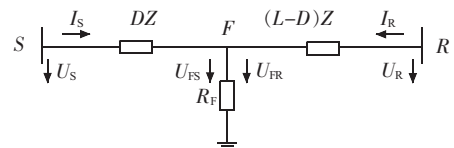


图1 单线表示的集中参数线路故障等值图

线路全长为 L ,单位长度阻抗 Z ,起始端 S 、终端 R ,故障位置 F 距起始端 S 的距离为 D 。在故障点 F 处的电压为:

$$U_{FS} = U_S - I_S DZ \quad (1)$$

$$U_{FR} = U_R - I_R (L - D)Z \quad (2)$$

式(1,2)中: U_S 为始端 S 电压; I_S 为始端 S 电流; U_R 为终端 R 电压; I_R 为终端 R 电流; U_{FS} 为由始端 S 推算到 F 点的电压; U_{FR} 为由终端 R 推算到 F 点的电压。

记线路的 R 端相对于 S 端偏差的不同步角 δ 。因此在故障点 F 处满足:

$$U_{FS} = U_{FR} e^{j\delta} \quad (3)$$

记 $e^{j\delta} = y$,由(1—3)可得:

$$U_S - I_S DZ = y U_R - y I_R (L - D)Z \quad (4)$$

整理式(4)得到故障距离 D :

$$D = \frac{U_S - \gamma(U_R - I_R LZ)}{I_S Z + \gamma I_R Z} \quad (5)$$

从式(5)中可以看出, U_S, I_S, U_R, I_R, Z 均为已知量, γ 是惟一的未知量。采用求解未知量 γ , 然后将其代入故障测距解析式实现不同步测距。因此求解未知量即可。

对式(5)的等号左右两边取共轭复数, 得:

$$D^* = \frac{U_S^* - \gamma^*(U_R^* - I_R^* LZ^*)}{I_S^* Z^* + \gamma^* I_R^* Z^*} \quad (6)$$

式(6)中: $U_S^*, I_S^*, U_R^*, I_R^*, Z^*$ 分别为 U_S, I_S, U_R, I_R, Z 的共轭复数。

注意到 $L^* = L, D^* = D$, 且 $\gamma^* = 1/\gamma$, 将其代入式(6)中得:

$$D = \frac{\gamma U_S^* - (U_R^* - LI_R^* Z^*)}{\gamma I_S^* Z^* + I_R^* Z^*} \quad (7)$$

由式(6,7)得:

$$\frac{U_S - \gamma(U_R - I_R LZ)}{I_S Z + \gamma I_R Z} = \frac{\gamma U_S^* - (U_R^* - LI_R^* Z^*)}{\gamma I_S^* Z^* + I_R^* Z^*} \quad (8)$$

写成如式(9)的一元二次方程的形式:

$$ay^2 + by + c = 0 \quad (9)$$

式(9)中: $a = U_S^* I_R Z + U_R I_S^* Z^* + I_R LZ I_S^* Z^*$; $b = U_S^* I_S Z + U_S I_S^* Z^* + U_R I_R^* Z^* - U_R^* I_R Z + LI_R^* Z^* I_R Z - I_R LZ I_R^* Z^*$; $c = -U_R^* I_S Z - U_S I_R^* Z^* - LI_R^* Z^* I_S Z$ 。

解式(9)得:

$$y = \begin{cases} -\frac{c}{b} & (a=0) \\ \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} & (a \neq 0) \end{cases} \quad (10)$$

然后将式(10)代入式(5), 求得 (γ_1, D_1) 和 (γ_2, D_2) 两组解, 此时需要判别伪根。

1.2 分布参数模型

输电线路分布参数模型考虑了集中参数模型中忽略的分布电容影响, 因此模型更加精确。假设长距离线路完全换位, 故障点 F 距离始端 S 距离为 D , 线路总长度为 L , 线路发生故障如图 2 所示。

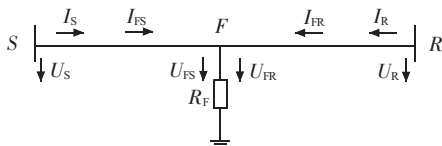


图2 单线表示的分布参数线路故障示意图

由均匀传输线电压方程得:

$$U_{FS} = U_S \cosh(\gamma D) - Z_C I_S \sinh(\gamma D) \quad (11)$$

$$U_{FR} = U_R \cosh[\gamma(L-D)] - Z_C I_R \sinh[\gamma(L-D)] \quad (12)$$

式(11,12)中: U_S, I_S 分别为 S 端电压、电流; U_R, I_R 分别为 R 端电压、电流; U_{FS} 和 U_{FR} 分别为从 S 端和 R 端推

算至故障点的电压; γ 为传播常数; Z_C 为波阻抗。

已知:

$$\cosh(\gamma D) = (e^{\gamma D} + e^{-\gamma D})/2 \quad (13)$$

$$\sinh(\gamma D) = (e^{\gamma D} - e^{-\gamma D})/2 \quad (14)$$

参照式(13,14), 并考虑不同步角 δ 和 $e^{j\delta} = \gamma$, 结合 $U_{FS} = U_{FR} e^{j\delta}$, 整理得:

$$e^{2\gamma D} = \frac{\gamma e^{\gamma L} (U_R - Z_C I_R) - U_S - Z_C I_S}{U_S - Z_C I_S - \gamma e^{-\gamma L} (U_R + Z_C I_R)} \quad (15)$$

对式(15)两边取共轭复数, 得:

$$e^{2\gamma^* D^*} = \frac{\gamma e^{\gamma^* L} (U_R^* - Z_C^* I_R^*) - \gamma (U_S^* + Z_C^* I_S^*)}{\gamma (U_S^* - Z_C^* I_S^*) - e^{-\gamma^* L} (U_R^* + Z_C^* I_R^*)} \quad (16)$$

两端电压、电流的共轭复数形式物理量释义同前述, 且 Z_C^* 为特性阻抗 Z_C 的共轭复数; γ^* 为传播常数 γ 的共轭复数; D^* 为故障距离 D 的共轭复数。

传播常数 $\gamma (\gamma = \alpha + j\beta)$ 在远距离、高电压情况下, α 可作为零处理, 此时 $\gamma = j\beta$, 且注意到 $D^* = D, \gamma^* = 1/\gamma$, 因此将等式(15,16)左右两边相乘, 有 $e^{2D(\gamma+\gamma^*)} = 1$ 恒成立, 因此:

$$a'y^2 + b'y + c' = 0 \quad (17)$$

式(17)中: 该一元二次方程的系数为: $a' = e^{-\gamma L} (U_R + Z_C I_R) (U_S^* - Z_C^* I_S^*) - e^{\gamma L} (U_R - Z_C I_R) (U_S^* + Z_C^* I_S^*)$; $b' = e^{\gamma^* L} (U_R^* - Z_C^* I_R^*) e^{\gamma L} (U_R - Z_C I_R) + (U_S + Z_C I_S) (U_S^* + Z_C^* I_S^*) - (U_S - Z_C I_S) (U_S^* - Z_C^* I_S^*) - e^{-\gamma L} (U_R + Z_C I_R) e^{-\gamma^* L} (U_R^* + Z_C^* I_R^*)$; $c' = (U_S - Z_C I_S) e^{-\gamma^* L} (U_R^* + Z_C^* I_R^*) - (U_S + Z_C I_S) e^{\gamma^* L} (U_R^* - Z_C^* I_R^*)$ 。

解式(17)得:

$$y = \begin{cases} -\frac{c'}{b'} & (a=0) \\ \frac{-b' \pm \sqrt{b'^2 - 4a'c'}}{2a'} & (a \neq 0) \end{cases} \quad (18)$$

最后, 将由式(18)求得的代入式(15)可得到故障距离 D 。

记实际故障距离为 D_t , 则 2 种线路模型求得的故障距离误差 Δ :

$$\Delta = (|D_t - D|/L) \times 100\% \quad (19)$$

1.3 新原理分析

实际应用中, 通常长距离采用分布参数模型, 而短距离输电线路采样集中参数模型测距即可符合现场要求。当线路发生故障时, 通过求解由不同步化处理后的测距方程和经共轭复数法构造出的新方程组成的方程组, 获得故障位置。

按照上述测距原理,分别采用2种线路模型进行计算,在2种线路模型上构建一元二次方程求解均实现了不同步测距。构建测距方程的过程均是对电气量取共轭复数然后构造了方程,且都是采用先求不同步时间,然后将其作为已知量代入故障距离函数求解。可为阻抗法不同步故障测距研究提供理论基础。上述原理中存在的一元二次方程求解过程,不可避免会存在伪根的问题,采用文献[11]中的伪根判别法可以得到准确的测距结果。

2 仿真与数值计算

在PSCAD软件中搭建一条长为300 km的500 kV分布参数模型输电系统,如图3所示。

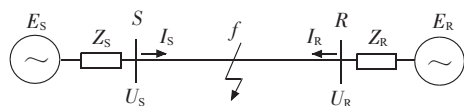


图3 双端供电系统

集中参数模型即在长线模型中忽略分布电容即可,具体系统参数如下:

(1) 输电线路。正序阻抗 $Z_1 = 0.017\ 82 + j0.313\ 9\ \Omega/\text{km}$, 正序对地电容 $C_1 = 0.011\ 636\ \mu\text{F}/\text{km}$; 零序阻抗 $Z_0 = 0.295\ 22 + j1.039\ 89\ \Omega/\text{km}$, 零序对地电容 $C_0 = 0.007\ 685\ 6\ \mu\text{F}/\text{km}$ 。

(2) S和R两侧系统。S端正序阻抗 $Z_{S1} = 0.750\ 5 + j37.133\ 6\ \Omega$, 零序阻抗 $Z_{S0} = 0.43 + j25.038\ 5\ \Omega$; R端正序阻抗 $Z_{R1} = 18.5 + j35.217\ 3\ \Omega$, 零序阻抗 $Z_{R0} = 14.2 + j24.598\ 7\ \Omega$; 两端电压 $U_S = 525 \angle \delta\ \text{kV}$, $U_R = 525 \angle 0\ \text{kV}$ 。

在PSCAD仿真软件中,设置系统采样频率为1.8 kHz,故障时刻后60 ms以内的数据通过差分傅式滤波,采用文中提出的测距原理进行Matlab编程计算,即可实现测距。

线路发生A-G(单相接地)故障,当采用2种不同的线路模型时,不同同步角 δ 变化时的测距结果如表1所示。当分别为 35° , 100° , 135° 时,分部参数模型测距误差范围为 $[0.19\%, 0.32\%]$,集中参数模型测距误差范围为 $[0.22\%, 0.44\%]$ 。明显可以看出,当线路长度大于100 km后,集中参数模型的测距误差开始增大,变化时的测距结果良好。

表2为过渡电阻 R_g 对2种模型的两相接地故障测距结果。分布参数模型的测距结果随着过渡电阻的增大(R_g 分别取80 Ω , 100 Ω , 200 Ω)几乎不变,其测距结果的误差范围为 $[0.05\%, 0.26\%]$,集中参数模型的测距误差范围为 $[0.08\%, 0.52\%]$,综合表中数据可以得出2种模型的不同步数据的测距原理可以认为均不受过渡电阻影响。

表1 不同线路模型中 δ 对A-G故障的测距影响

| 不同同步角 $\delta/(^\circ)$ | D_t/km | 分布参数模型测距 | | 集中参数模型测距 | |
|----------------------------|-----------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| | | D/km | $\Delta/\%$ | D/km | $\Delta/\%$ |
| 30 | 20 | 20.72 | 0.24 | 20.68 | 0.22 |
| | 100 | 100.68 | 0.23 | 100.98 | 0.32 |
| | 270 | 270.95 | 0.32 | 268.99 | 0.34 |
| 100 | 20 | 20.79 | 0.26 | 20.68 | 0.22 |
| | 100 | 100.58 | 0.19 | 101.10 | 0.37 |
| | 270 | 270.56 | 0.19 | 270.98 | 0.33 |
| 135 | 20 | 20.79 | 0.26 | 20.69 | 0.23 |
| | 100 | 100.88 | 0.29 | 101.12 | 0.37 |
| | 270 | 270.76 | 0.25 | 268.69 | 0.44 |

表2 不同线路模型中 R_g 对AB-G故障的测距影响

| 过度电阻 R_g/Ω | D_t/km | 分布参数模型 | | 集中参数模型 | |
|----------------------|-----------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| | | D/km | $\Delta/\%$ | D/km | $\Delta/\%$ |
| 80 | 20 | 20.77 | 0.25 | 20.33 | 0.22 |
| | 100 | 100.78 | 0.26 | 100.99 | 0.33 |
| | 270 | 270.65 | 0.21 | 270.25 | 0.08 |
| 100 | 20 | 20.75 | 0.25 | 20.54 | 0.18 |
| | 100 | 100.68 | 0.23 | 100.19 | 0.06 |
| | 270 | 270.78 | 0.26 | 269.08 | 0.31 |
| 200 | 20 | 20.75 | 0.26 | 20.69 | 0.23 |
| | 100 | 100.68 | 0.23 | 100.98 | 0.33 |
| | 270 | 269.86 | 0.05 | 271.55 | 0.52 |

表3示出了不同故障类型对2种模型的测距影响。在距离线路一侧100 km位置故障时的测距结果中,4种短路故障情况下,集中参数模型测距最大误差为0.52%,而分部参数模型的测距最大误差为0.27%,2种方法都不受故障类型的影响。

表3 不同模型及不同故障类型的测距结果

| 故障类型 | D_t/km | 分布参数模型 | | 集中参数模型 | |
|------|-----------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| | | D/km | $\Delta/\%$ | D/km | $\Delta/\%$ |
| AG | 100 | 100.68 | 0.23 | 100.98 | 0.33 |
| AB | | 100.82 | 0.27 | 101.05 | 0.35 |
| ABG | | 100.68 | 0.23 | 98.79 | 0.40 |
| ABC | | 100.47 | 0.15 | 101.55 | 0.52 |

3 结束语

本文提出了双端数据不同步的故障测距原理,主要解决了不同步故障测距误差的问题。该原理分别基于线路的集中参数和分布参数模型可推导出一元二次方程形式的测距方程,通过对测距方程取共轭复数构建出的简单线性方程求解容易,能避免求解复杂的非线性方程的繁琐与误差扩大化,仅需对有可能存在的伪根进行判别,在两种线路模型上均适用。不存在非线性方程的最优求解不准确问题,适用于4种基本的短路故障类型,工程应用价值优良。

参考文献:

- [1] KHODADADI M, SHAHRTASH S M. A New Noncommunication-Based Protection Scheme for Three-Terminal Transmission Lines Employing Mathematical Morphology-Based Filters. *IEEE Transactions On Power Delivery*, 2013, 28(1):347-356.
- [2] LIU C W, LIN T C, YU C S, et al. A Fault Location Technique for Two-Terminal Multisection Compound Transmission Lines Using Synchronized Phasor Measurements[J]. *IEEE Transactions On Smart Grid*, 2012, 03(4):113-121.
- [3] 王 涛, 李 澄. 一种混合输电线路故障测距新方法[J]. *江苏电机工程*, 2015, 34(5):17-20, 24.
- [4] AHSAAE M G, SADEH J. A Novel Fault-Location Algorithm for Long Transmission Lines Compensated by Series FACTS Devices [J]. *IEEE Transactions On Power Delivery*, 2011, 26(4):2299-2308.
- [5] KORKALI M, ABUR A. Optimal Deployment of Wide-Area Synchronized Measurements for Fault-Location Observability[J]. *IEEE Transactions On Power Systems*, 2013, 28(1):482-489.
- [6] 林富洪, 王增平. 采用同向正序基频分量的双回线故障测距原理[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(4):93-98.
- [7] 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.
- [8] YU C S, CHANG L R, CHO J R. New Fault Impedance Computations for Unsynchronized Two-Terminal Fault-Location Computations [J]. *IEEE Transactions On Power Delivery*, 2011, 26(4):2879-2881.
- [9] DOUGLAS A G V, DIOGO B O, ADRIANO C L. A Closed-Form Solution for Transmission-Line Fault Location Without the Need of Terminal Synchronization or Line Parameters [J]. *IEEE Transactions On Power Delivery*, 2013, 28(2):1238-1239.
- [10] 苏进喜, 罗承沐, 解子凤, 等. 利用双端电气量的高压长线故障测距算法[J]. *清华大学学报*, 2000, 40(7):27-30.
- [11] 李 澄, 王 锴. 双端测量不同步的非对称故障测距新方法[J]. *电测与仪表*, 2014, 51(13):55-59.

作者简介:

吴浩然(1964), 男, 江苏镇江人, 高级工程师, 从事电力系统管理专业工作;

李 澄(1987), 男, 江苏江阴人, 工程师, 从事电网调度运行、继电保护与故障测距方面的工作。

Research on Novel Fault Location Principle with Asynchronous Data

WU Haoran, LI Cheng

(State Grid Wuxi Power Supply Company, Wuxi 214061, China)

Abstract: A novel fault location principle with asynchronous data is proposed to solve the asynchronous problem of fault location at both ends which can't be ignored. The primary dual-terminal synchronous fault location equation is asynchronized in the principle by taking conjugate complex number at both sides of the equation simultaneously, which transforms the equation into a set of equations with two unknown variables of fault location and asynchronous angle. The set of equations can be transformed into a quadratic equation with one variable which can be solved to reach the goal of asynchronous fault location. Simulations show that the proposed asynchronous fault location method can eliminate the asynchronous angle and has high precision which is hardly affected by transition resistance, so it is adequate for all short circuit faults.

Key words: conjugate complex number; quadratic equation with one variable; asynchronous; fault location

(上接第 72 页)

A New Speed and Phase Measurement Scheme of Short Circuit Generator Based on Incremental Encoder

WANG Haibo, WAN Dechun, HONG Shen

(NARI Group Corporation/ State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106)

Abstract: Synchronous voltage signal of short circuit generator needs to be gathered in the high power testing, in order to meet the closing phase angle control requirements in high voltage circuit breaker test process. Affected by environmental temperature, the measuring way controlled by AC/DC generator is prone to temperature drift, low accuracy and big volume, so it is gradually replaced by digital measurement way. Compared with the control generator scheme, the full digital control method based on the encoder has obvious advantages. A new speed and phase measurement scheme of short circuit generator based on the incremental encoder is designed in this paper. And the principle, structure, advantages of the scheme and the signal anti-interference problem are introduced. With this method, the speed and reference phase signal accuracy and precision of the short circuit generator are improved, which gives the foundation for closing phase angle control of large capacity test process.

Key words: short circuit generator; control generator; synchronous signal; incremental encoder; photoelectric conversion