

基于参数修正的输电线路双端不同步测距方法

王丰华¹,穆卡^{1,2},张君¹,刘亚东¹,钱勇¹

(1. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室,上海 200240;

2. 国网冀北电力有限公司 电力科学研究院,北京 100045)

摘要:针对线路双端数据不同步与线路参数不确定性所产生的测距误差问题,提出了基于参数修正的双端不同步测距方法以实现输电线路发生非对称故障时的准确定位。该方法定义了线路参数修正系数,利用等值序网分析法消除了数据不同步角的影响,然后应用仿电磁学算法求解了所建立的故障测距方程组,得到了线路故障位置。仿真分析与实际线路的计算结果表明,所提方法不受线路参数变化的影响,利用故障后的双端不同步数据即可进行故障定位,具有很高的测距精度与可靠性。

关键词:输电线路;非对称性故障;故障测距;双端不同步;仿电磁学算法

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.08.014

0 引言

高压输电线路是电力系统的重要组成部分,承担着输送电能的重任,若发生故障会严重影响电力系统的稳定性与可靠性。其中,包括单相接地、两相短路、两相接地故障等在内的高压输电线路非对称故障约占线路故障的95%以上^[1]。因此,有必要研究准确的非对称故障定位方法,以采取有效措施排除故障,恢复供电,减少停电时间,增强系统稳定性。

现有故障测距方法有行波法与故障分析法两大类^[2]。其中,行波法利用故障产生的行波,通过检测行波从故障点到测量点的传播用时进行测距,具有原理简单、不受故障类型和过渡电阻影响、理论测距精度高的优点^[3]。但在工程应用中发现,该方法存在投资成本高、过度依赖波头检测准确度、难以确定实际波速等缺陷,可靠性差^[4]。故障分析法依据线路电压、电流的测量值,通过分析故障后电路构造相应的测距方程来实现故障测距,通常分为单端故障分析法^[5]和双端故障分析法^[6]。其中双端故障分析法具有不受故障过渡电阻和系统阻抗变化影响的特点,应用前景良好^[7-8]。但是,线路双端数据的不同步会给双端故障分析法的测距结果带来较大误差。为消除该影响,国内外学者进行了若干研究:文献^[9]基于线路首末两端的电压、电流计算得到的故障点电压幅值相等这一原理建立了故障测距方程,应用遗传算法对其进行求解并剔除了伪根,但当线路经高阻短路时,故障点电压可能不是最小值,从而导致测距失败;文献^[10]通过分析故障等值正序网和负序网建立了以不同步角为未知量的方程,求解得到不同步角,实现了线路双端不同步测距;文献

^[11]利用各次谐波分量建立了测距方程组,采用牛顿迭代和非线性最小二乘拟合相结合的方法确定了线路故障位置。对于实际线路而言,受制于地质、气候等因素的影响,线路参数特性、长度等不可避免地会发生变化,也会给测距结果带来误差。文献^[12]考虑了线路参数变化的影响,将故障距离、数据不同步角和线路参数同时作为未知量,采用集中参数模型建立了方程组,进而基于信赖域方法对其求解得到故障距离。但该方法待求量多,但对长线路而言,由于分布电容的存在,其测距误差比较大。文献^[13]则采用分布参数模型提出了基于线路参数估计的双端不同步测距算法,利用故障前后的数据共同建立测距方程组,但其所需数据量大,无法保证线路参数和线路不同步角在故障前后的一致性,测距可靠性低。因此,如何在双端数据不同步的情况下消除线路参数不确定性的影响,仅应用故障数据实现精确的线路故障测距仍是一个亟待解决的难题。

基于此,本文基于分布参数模型提出一种双端不同步测距新方法。即利用故障后的双端电压、电流,建立考虑线路参数并消除双端不同步时间差的故障测距方程组,进而采用仿电磁学 ELM (Electromagnetic-Like Mechanism) 算法对其求解,以期实现双端不同步、参数自适应、精确可靠的故障测距。最后基于仿真分析与实际故障数据对所提方法进行了验证。

1 故障测距方程组的建立

1.1 线路参数修正

输电线路穿越的地形复杂,受沿线地质、气候等因素影响,线路的参数与线路的长度会发生改变而偏离其初始值,同时电压互感器、电流互感器(特别是电流互感器)也会存在一定的测量误差。

文献^[14]提出将上述因素所引起的故障测距

收稿日期:2017-04-18;修回日期:2018-05-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51307109)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51307109)

误差进行非线性映射,即将线路参数和线路长度的误差以及电压互感器、电流互感器的测量误差对测距结果的影响反映为线路长度的变化 Δx ,并将 Δx 称为综合非线性误差。对于一条给定长度为 L 的线路,考虑综合非线性误差后,线路实际长度为 $L+\Delta x$ 。将 Δx 沿全线路分配,故障测距时若仍按线路长度为 L 进行计算,则相当于线路单位长度的阻抗 Z 和导纳 Y 各变为原来的 $1+\Delta x/L$ 倍。为叙述方便,本文定义线路参数修正系数为 $\alpha = \Delta x/L$,当利用分布参数模型进行分析时,线路特性阻抗和传播系数变为^[14]:

$$Z'_c = \sqrt{(1+\Delta x/L)Z / [(1+\Delta x/L)Y]} = \sqrt{Z/Y} = Z_c \quad (1)$$

$$\gamma' = \sqrt{(1+\Delta x/L)Z(1+\Delta x/L)Y} = (1+\Delta x/L)\sqrt{ZY} = (1+\alpha)\gamma \quad (2)$$

其中, Z'_c 、 γ' 分别为修正后的线路特性阻抗和线路传播系数; Z_c 、 γ 分别为由线路给定参数计算所得的线路特性阻抗和线路传播系数。

由式(1)和式(2)可见,对于一条分布参数线路,采用了综合非线性误差的参数进行计算时,线路特性阻抗 Z_c 不变,线路传播系数 γ 则变为原来的 $1+\alpha$ 倍。因此,本文在后续分析中,均以 Z_c 和 $(1+\alpha)\gamma$ 作为修正后的线路特性阻抗和线路传播系数参与计算。

1.2 故障测距方程组

线路发生非对称故障后,正序等值网络和负序等值网络分别如图 1 和图 2 所示^[15]。图中, l 为线路全长; x 为故障点到 S 端的距离; R_F 为故障过渡电

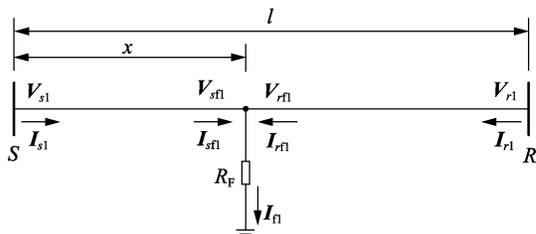


图 1 非对称故障等值正序网

Fig.1 Positive-sequence equivalent circuit of unbalanced fault

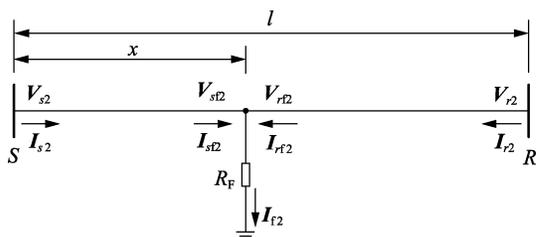


图 2 非对称故障等值负序网

Fig.2 Negative-sequence equivalent circuit of unbalanced fault

阻; V_{s1} 、 V_{s2} 和 I_{s1} 、 I_{s2} 分别为 S 端的正序、负序电压和正序、负序电流; V_{r1} 、 V_{r2} 和 I_{r1} 、 I_{r2} 分别为 R 端的正序、负序电压和正序、负序电流; V_{sf1} 、 V_{sf2} 和 I_{sf1} 、 I_{sf2} 分别为从 S 端推算至故障点的正序、负序电压和电流; V_{rf1} 、 V_{rf2} 和 I_{rf1} 、 I_{rf2} 分别为从 R 端推算至故障点的正序、负序电压和电流; I_{f1} 、 I_{f2} 分别为流过故障支路的正序、负序电流。

根据图 1 和图 2, 计及线路参数误差的影响, 根据分布参数线路的计算公式可得电路方程为:

$$\begin{cases} V_{sf1} = V_{s1} \cosh(1+\alpha)\gamma x - I_{s1} Z_c \sinh(1+\alpha)\gamma x \\ V_{rf1} = V_{r1} \cosh(1+\alpha)\gamma(l-x) - I_{r1} Z_c \sinh(1+\alpha)\gamma(l-x) \\ I_{sf1} = I_{s1} \cosh(1+\alpha)\gamma x - \frac{V_{s1}}{Z_c} \sinh(1+\alpha)\gamma x \\ I_{rf1} = I_{r1} \cosh(1+\alpha)\gamma(l-x) - \frac{V_{r1}}{Z_c} \sinh(1+\alpha)\gamma(l-x) \end{cases} \quad (3)$$

其中, i 取 1、2 时分别表示正序和负序。

设线路的双端数据不同步角为 δ , 则根据故障点电压相等可得:

$$e^{j\delta} V_{sf1} = V_{rf1} \quad (4)$$

$$e^{j\delta} V_{sf2} = V_{rf2} \quad (5)$$

将式(4)和式(5)作商, 可消除不同步角 δ , 有:

$$f(\mathbf{X}) = V_{sf1} V_{rf2} - V_{sf2} V_{rf1} = 0 \quad (6)$$

其中, $\mathbf{X} = [x, \alpha]$ 。

式(6)为一个复数方程, 可将其解耦为实部方程与虚部方程, 进而组成故障测距方程组:

$$F(\mathbf{X}) = \begin{cases} \text{Re}[f(\mathbf{X})] = 0 \\ \text{Im}[f(\mathbf{X})] = 0 \end{cases} \quad (7)$$

对加装补偿线路充电容性功率的高压输电线路而言, 并联电抗器上流过的电流会改变线路电流分布, 如图 3 所示。图中, I'_{si} 、 I'_{ri} 分别为 S 端、R 端系统侧流向线路的故障电流; X_L 为并联电抗器, 加装在线路两端。

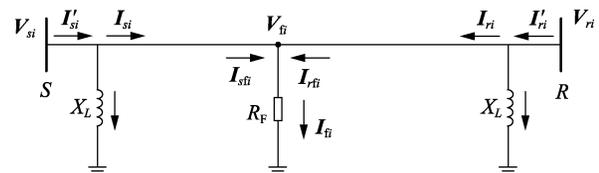


图 3 线路双端安装并联电抗器的故障网络

Fig.3 Fault network of transmission line with shunt reactors at both terminals

此时从 S 端流入线路的实际故障电流 I_{si} 为:

$$I_{si} = I'_{si} - \frac{V_{si}}{X_L} \quad (8)$$

类似地, 可通过式(8)计算得到从 R 端流入线路的实际故障电流 I_{ri} 。

因此,当线路双端加装并联电抗器时,利用式(8)可计算得到流入线路双端的实际故障电流,将其代入式(3)来推导建立故障测距方程组。

上述故障测距方程组以故障距离和线路参数修正系数为未知量,基于故障点电压相等的原理推导得到,主要具有以下特征:

- a. 无需双端数据同步,仅利用故障后的双端电压、电流参与运算,所用数据量小;
- b. 仅以故障距离 x 和线路参数修正系数 α 这 2 个参数为待求量,方程计算量小;
- c. 利用所定义的线路参数修正系数消除了线路参数、长度变化对测距结果的影响,无需已知准确的线路参数即可进行故障测距。

据此,准确求解方程组式(3)即可得到较为精确的故障距离。

2 故障测距方程组的 ELM 算法求解模型

目前求解形如 $F(\mathbf{X})=0$ 的多维非线性方程组通常应用最小二乘迭代法,但该方法对初值较敏感,有时无法收敛于全局最优解。考虑到 ELM 算法全局寻优能力较强,本文将故障测距方程组转化为函数优化问题,并应用 ELM 算法进行求解^[16]。

2.1 ELM 算法基本原理

ELM 算法通过模拟电荷间作用力的吸引与排斥机制,采用记忆和回馈机制求解优化问题。在求解过程中,ELM 算法首先从可行域中随机产生一组初始种群,其中每个粒子代表解空间的一个候选解,在迭代过程中根据每个粒子的适应度函数计算对应的电荷值,其值表示粒子与本次迭代中最优粒子的接近程度。粒子 \mathbf{X}_i^k 的寻优公式为:

$$q_i^k = \exp \left[-n \frac{f(\mathbf{X}_i^k) - f(\mathbf{X}_{\text{best}}^k)}{\sum_{i=1}^m (f(\mathbf{X}_i^k) - f(\mathbf{X}_{\text{best}}^k))} \right] \quad (9)$$

其中, \mathbf{X}_i^k 为第 k 次迭代中的第 i 个粒子; q_i^k 为第 k 次迭代中第 i 个粒子的电荷值; m 为种群中的粒子总数; n 为粒子维数; $f(\cdot)$ 为粒子的适应度函数; $\mathbf{X}_{\text{best}}^k$ 为第 k 次迭代中适应度函数最优的粒子。

在计算得到粒子电荷值后,ELM 算法根据粒子及其电荷值描述种群中每个粒子矢量力的大小与性质(吸引力或排斥力)。若有 $f(\mathbf{X}_j^k) < f(\mathbf{X}_i^k)$, 则粒子 \mathbf{X}_j^k 与 \mathbf{X}_i^k 之间表现为吸引力,反之则为排斥力。

矢量力 \mathbf{F}_i^k 表示粒子 \mathbf{X}_i^k 受到其他粒子作用力的矢量和。粒子 \mathbf{X}_i^k 的矢量力表达式为:

$$\mathbf{F}_i^k = \begin{cases} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \frac{q_i^k q_j^k (\mathbf{X}_j^k - \mathbf{X}_i^k)}{\|\mathbf{X}_j^k - \mathbf{X}_i^k\| + a_\delta} & f(\mathbf{X}_j^k) < f(\mathbf{X}_i^k) \\ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \left[-\frac{q_i^k q_j^k (\mathbf{X}_j^k - \mathbf{X}_i^k)}{\|\mathbf{X}_j^k - \mathbf{X}_i^k\| + a_\delta} \right] & f(\mathbf{X}_j^k) \geq f(\mathbf{X}_i^k) \end{cases} \quad (10)$$

其中, $\|\cdot\|$ 为向量的欧氏范数; \mathbf{F}_i^k 为第 k 次迭代中第 i 个粒子的电荷矢量力; a_δ 为抗干扰因子, $a_\delta > 0$ 。

完成粒子电荷值计算与矢量力计算后,ELM 算法通过种群移动模型对种群进行更新,产生新一代种群。本文的种群进化数学模型为:

$$\mathbf{X}_i^{k+1} = \mathbf{X}_i^k + \lambda \frac{\mathbf{F}_i^k}{\|\mathbf{F}_i^k\|} \mathbf{R} \quad \lambda \in N(0,1) \quad (11)$$

$$\mathbf{R} = \begin{cases} \mathbf{X}_i^k - \mathbf{L}_i^k \mathbf{F}_i^k < 0 \\ \mathbf{U}_i^k - \mathbf{X}_i^k \mathbf{F}_i^k > 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中, λ 为权重系数,为 $0 \sim 1$ 之间的随机数,反映种群的移动程度; $\mathbf{U}_i^k, \mathbf{L}_i^k$ 分别为变量的上、下界。

2.2 求解步骤

在具体应用时,以本文所构建的故障测距方程组 $F(\mathbf{X})$ 函数作为 ELM 算法的适应度函数,然后利用式(11)对其进行迭代求解,即可得故障距离 x 。基本求解步骤如下,算法流程如图 4 所示。

- a. 参数初始化。设置种群规模 m 、粒子维数 n 、停滞迭代次数 K 、最大迭代次数等参数。由于待求量为 x 和 α ,粒子维数 n 设为 2。
- b. 种群初始化。在可行解空间内随机生成初始种群。
- c. 计算种群中每个粒子的适应度函数值,电荷值和个体矢量力大小。
- d. 根据式(11)对种群进行更新产生新一代种群,将新种群和前代种群适应度函数进行比较,保留当前代最优解。
- e. 判断是否满足算法的终止条件,若未满足,则转入步骤 c 继续重复迭代步骤;若已满足终止条件,则输出最优解以及目标函数值。

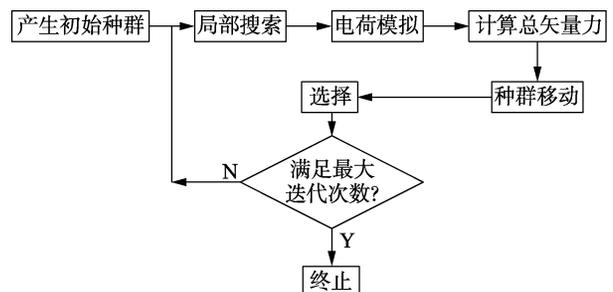


图 4 ELM 算法求解步骤流程图
Fig.4 Flowchart of ELM algorithm

3 仿真分析

3.1 仿真模型描述

参考京津唐 500 kV 超高压输电线路,在 PSCAD 软件中采用分布参数模型建立一条长为 300 km、双端带并联电抗器的 500 kV 的输电线路仿真模型,如图 5 所示。具体仿真参数如下:单位长度正序电阻 $r_1 = 0.028\ 3\ \Omega/\text{km}$ 、单位长度零序电阻 $r_0 = 0.114\ 8\ \Omega/\text{km}$;单位长度正序电感 $l_1 = 0.898\ 4\ \text{mH}/\text{km}$ 、单位长度零序电感 $l_0 = 2.288\ 6\ \text{mH}/\text{km}$;单位长度正序电容 $c_1 = 0.012\ 9\ \mu\text{F}/\text{km}$ 、单位长度零序电容 $c_0 = 0.005\ 2\ \mu\text{F}/\text{km}$;两侧系统等效阻抗分别为 $Z_S = 1.051\ 5 + j43.176\ \Omega$ 、 $Z_R = 1.057\ 7 + j44.92\ \Omega$ 。并联电抗器的参数为 $X_L = 1\ 680.56\ \Omega$ 、 $X_N = 434\ \Omega$ 。

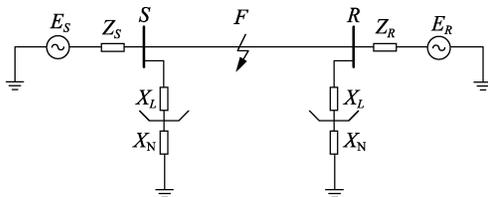


图 5 仿真系统示意图

Fig.5 Schematic diagram of simulation system

表 1 线路参数、长度准确时的故障测距结果(过渡电阻 50 Ω)

Table 1 Fault location results under accurate line parameters and length, with 50 Ω transient resistance

故障类型	故障距离/ km	测距结果/km		相对误差/%		绝对误差/km	
		本文算法	文献[9]算法	本文算法	文献[9]算法	本文算法	文献[9]算法
单相接地	30	30.42	30.82	0.14	0.27	0.42	0.82
	90	89.76	89.46	0.08	0.18	0.24	-0.54
	150	150.27	150.69	0.09	0.21	0.27	0.69
	240	240.63	241.02	0.21	0.34	0.63	1.02
两相短路	30	30.22	30.51	0.07	0.17	0.22	0.51
	90	90.33	89.62	0.11	0.13	0.33	-0.38
	150	150.44	150.52	0.15	0.16	0.44	-0.48
	240	240.52	240.72	0.17	0.24	0.52	0.72
两相接地	30	30.48	30.48	0.16	0.16	0.48	0.48
	90	90.19	90.27	0.06	0.09	0.19	0.27
	150	150.59	150.45	0.20	0.15	0.59	0.45
	240	240.68	240.42	0.23	0.14	0.68	0.42

表 2 线路参数变化 10%、线路长度准确时的故障测距结果(过渡电阻 100 Ω)

Table 2 Fault location results under 10% parameter errors, accurate line length and 100 Ω transient resistance

故障类型	故障距离/ km	测距结果/km		相对误差/%		绝对误差/km	
		本文算法	文献[9]算法	本文算法	文献[9]算法	本文算法	文献[9]算法
单相接地	30	30.35	41.31	0.12	3.77	0.35	11.31
	90	90.74	102.66	0.25	4.22	0.74	12.66
	150	150.46	162.84	0.15	4.28	0.46	12.84
	240	240.67	253.35	0.22	4.45	0.67	13.35
两相短路	30	30.37	38.79	0.12	2.93	0.37	8.79
	90	90.33	100.35	0.11	3.45	0.33	10.35
	150	150.65	161.28	0.22	3.76	0.65	11.28
	240	240.57	251.04	0.19	3.68	0.57	11.04
两相接地	30	30.73	39.27	0.24	3.09	0.73	9.27
	90	90.49	100.56	0.16	3.52	0.49	10.56
	150	150.51	164.67	0.17	4.89	0.51	14.67
	240	240.54	255.84	0.18	5.28	0.54	15.84

基于所建立的仿真模型,可设定典型非对称故障,进而针对各类典型故障在不同故障位置、不同线路参数、不同线路长度与不同非同步角时的情况进行仿真,使用本文所提算法进行测距。

3.2 仿真结果分析

表 1—4 分别列出了当线路参数准确与线路参数发生变化时,本文算法与传统不考虑线路参数误差的双端不同步测距方法(以文献[9]算法为例)测距结果的对比。其中,双端数据不同步角为 20° 。

由表 1 可见,当线路参数准确时,在线路典型非对称故障下,本文所提算法与传统双端不同步测距方法基本不受故障类型的影响,测距结果非常接近,其精度均能满足要求。

由表 2—4 可见,当线路参数或线路长度发生变化时,本文算法的测距结果与线路预设的故障位置基本一致,其相对误差不超过 0.3%,最大绝对误差为 0.81 km。而传统算法测距结果的相对误差最小为 2.77%,最大可达 5.63%,其最大绝对误差更是达到了 17.73 km。显然,本文算法能够有效克服线路参数不确定性的影响,其测距结果的精度更高,基本可将测距偏差控制在 1~2 个杆塔距离之内。

表 3 线路参数准确、线路长度变化 10% 时的测距结果 (过渡电阻 100 Ω)

Table 3 Fault location results under accurate parameters, 10% error of line length and 100 Ω transient resistance

故障类型	故障距离/ km	测距结果/km		相对误差/%		绝对误差/km	
		本文算法	文献[9]算法	本文算法	文献[9]算法	本文算法	文献[9]算法
单相接地	30	30.36	40.66	0.11	3.29	0.36	10.66
	90	90.73	102.61	0.22	3.82	0.73	12.61
	150	150.79	164.39	0.24	4.36	0.79	14.39
	240	240.65	253.10	0.20	3.97	0.65	13.10
两相短路	30	30.43	39.14	0.13	2.77	0.43	9.14
	90	30.61	103.04	0.18	3.95	0.61	13.04
	150	150.52	160.79	0.16	3.27	0.52	10.79
	240	240.65	262.51	0.21	3.79	0.65	12.51
两相接地	30	30.43	40.79	0.13	3.27	0.43	10.79
	90	90.37	100.96	0.11	3.32	0.37	10.96
	150	150.68	162.64	0.21	3.83	0.68	12.64
	240	240.53	256.04	0.16	4.86	0.53	16.04

表 4 线路参数、长度均变化 5% 时的测距结果 (过渡电阻 100 Ω)

Table 4 Fault location results under 5% error of both line length and parameters, and 100 Ω transient resistance

故障类型	故障距离/ km	测距结果/km		相对误差/%		绝对误差/km	
		本文算法	文献[9]算法	本文算法	文献[9]算法	本文算法	文献[9]算法
单相接地	30	30.33	44.87	0.11	4.72	0.33	14.87
	90	90.28	104.43	0.09	4.58	0.28	14.43
	150	150.45	165.53	0.15	4.93	0.45	15.53
	240	240.54	255.93	0.18	4.95	0.54	15.93
两相短路	30	30.66	47.38	0.21	5.52	0.66	17.38
	90	90.51	104.84	0.18	4.71	0.58	14.84
	150	150.75	165.31	0.24	4.86	0.75	15.31
	240	240.81	256.73	0.26	5.31	0.81	16.73
两相接地	30	30.63	46.22	0.20	5.14	0.63	16.22
	90	90.60	105.59	0.19	4.95	0.60	15.59
	150	150.44	155.40	0.14	4.89	0.44	15.40
	240	240.82	257.73	0.26	5.63	0.81	17.73

图 6 给出了当线路等分为 3 段、发生单相接地故障时测距误差随故障位置的变化情况,其中,第 1 段线路参数准确,第 2 段线路参数变化 5%,第 3 段线路参数变化 -5%。由图可知,当线路沿线参数变化不一致时,本文方法较传统方法仍能保持较高的测距精度,测距误差在 1% 左右。当发生其他非对称故障时,仍有相同结论。

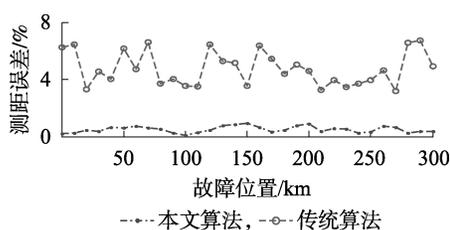


图 6 测距误差特性曲线

Fig.6 Curve of fault location error

表 5 列出了不同步角发生变化时本文算法的测距结果。由表可知,本文算法基本不受不同步角的影响,最大测距误差始终不超过 0.9 km。

为进一步说明本文选用 ELM 算法对故障测距方程组求解的可靠性,表 6 给出了在线路参数修正系数 α 取不同值的情况下,距离线路首端 90 km 处

发生单相接地故障时,分别应用 ELM 算法和最小二乘法对故障测距方程组进行求解的结果。其中,线路参数准确时 $\alpha=0$;线路参数变化 5%和线路长度变化 5%时均有 $\alpha=-0.0476$ 。由表 6 可知,ELM 算法能够更快、更准确地求解 x 和 α 。在其他工况下仍有相同结论。

表 5 不同步角变化时的测距结果

Table 5 Fault location results of different asynchronous angles

故障类型	故障距离/km	测距结果/km			最大误差/km
		$\delta=30^\circ$	$\delta=90^\circ$	$\delta=150^\circ$	
单相接地	30	30.66	30.54	29.43	0.81
	90	90.54	89.76	90.63	0.63
	150	150.81	150.69	150.55	0.81
	240	240.69	240.81	240.83	0.83
两相短路	30	30.18	30.24	30.24	0.24
	90	90.24	89.82	89.71	0.29
	150	150.39	150.24	149.64	0.39
	240	240.69	240.75	240.63	0.75
两相接地短路	30	30.48	30.54	30.45	0.54
	90	89.82	89.88	89.87	0.18
	150	149.56	149.31	149.43	0.69
	240	239.41	239.22	239.49	0.59

表 6 ELM 算法与最小二乘法的求解效果对比

Table 6 Comparison of solving results between ELM algorithm and least square method

工况	x/km		α		迭代次数	
	ELM 算法	最小二乘法	ELM 算法	最小二乘法	ELM 算法	最小二乘法
线路参数准确	90.44	92.26	0	0	19	32
线路参数变化 5%	90.28	94.64	-0.048 2	0.052 1	20	35
线路长度变化 5%	90.35	93.68	-0.047 4	0.061 6	18	33

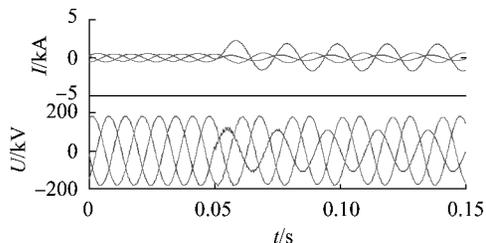
4 实例验证

为验证本文所提算法在工程应用中的有效性,本文采用上海某 220 kV 线路在 2015 年 10 月发生 C 相单相接地故障时,由调度中心获取的两端故障录波器所记录数据进行验证。该线路长 26.8 km,经巡线确定此次故障位于距离线路首端 8.36 km 处。该线路的理论参数如表 7 所示;故障录波器所记录的电压、电流的波形分别如图 7 所示;对故障后 1 个周期的线路双端电压、电流进行滤波处理,计算得到其对应的序分量如表 8 所示。应用本文算法得到故障距离为 8.57 km,与巡线结果基本一致,再次说明了本文所提算法的有效性,并可用于工程实际。

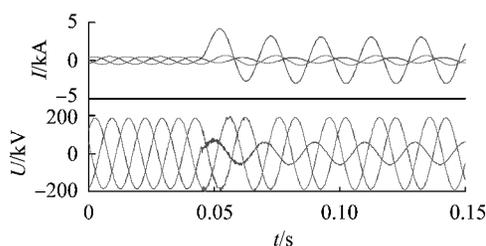
表 7 线路单位长度参数表

Table 7 Line parameters per kilometer

参数类型	电阻/ Ω	电抗/ Ω	电纳/S	电导/S
正序	0.042 3	0.395	2.726×10^{-6}	10^{-7}
负序	0.320 0	1.363	1.936×10^{-6}	10^{-7}



(a) 首端电压、电流



(b) 末端电压、电流

图 7 故障录波波形

Fig.7 Recording waveforms of voltage and current

表 8 故障录波数据

Table 8 Recording fault data

数据	数据值	
	正序	负序
首端电压/kV	93.49+j9.45	-36.14-j6.74
首端电流/kA	-0.117-j0.93	0.318-j0.766
末端电压/kV	42.28+j87.81	-13.23-j31.33
末端电流/kA	0.853+j0.312	0.753-j0.145

5 结论

本文针对高压输电线路的非对称故障提出了基于参数修正的双端不同步测距算法,分析仿真计算与实际数据的验证结果得到如下结论。

a. 通过等值序网分析建立的非对称故障测距方程组从原理上消除了线路双端数据不同步和线路参数不确定性对测距的影响,仅利用故障后的双端数据即可实现双端不同步条件下的参数自适应测距,计算量小。

b. 基于 ELM 算法对故障测距方程组的优化求解,为实现基于参数修正的双端非同步故障测距提供了有效的优化求解途径。

c. 本文所提测距算法不受故障类型、线路参数变化、线路长度变化以及故障位置等因素影响,其仿真测距误差不超过 0.9 km,可将测距偏差控制在 1~2 个杆塔距离之内;应用实际故障数据进行定位所得到的结果与巡线结果一致,较传统测距算法具有更高的测距精度,能满足工程要求。

参考文献:

- [1] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安:西安交通大学出版社,2007:256-257.
- [2] 耿建昭,王宾,董新洲. 利用单相跳闸后信息的输电线路单相接地单端精确测距方法[J]. 电工技术学报,2015,30(16):184-193.
GENG Jianzhao, WANG Bin, DONG Xinzhou. A novel one-terminal single-line-to-ground fault location algorithm in transmission line using post-single-phase-trip data[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 184-193.
- [3] WANG Bin, DONG Xinzhou, LAN Lan, et al. Novel location algorithm for single-line-to-ground faults in transmission line with distributed parameters[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2013, 7(6): 560-566.
- [4] 许飞,董新洲,王宾,等. 新型输电线路单端电气量组合故障测距方法及其试验研究[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):37-42.
XU Fei, DONG Xinzhou, WANG Bin, et al. Combined single-end fault location method of transmission line and its experiments[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 37-42.
- [5] 陈学伟,高厚磊,向珉江,等. 基于电子式互感器微分输出的改进 R-L 模型距离保护算法[J]. 电工技术学报,2014,29(6):283-288.
CHEN Xuewei, GAO Houlei, XIANG Minjiang, et al. Improved R-L model distance protection algorithm based on differential output of electronic transducers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 283-288.

- Society, 2014, 29(6):283-288.
- [6] PRESTON G, RADOJEVIC Z M, KIM C H, et al. New settings-free fault location algorithm based on synchronized sampling [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(3):376-383.
- [7] 梁睿, 杨学君, 薛雪, 等. 零序分布参数的单相接地故障精确定位研究 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(12):472-479.
- LIANG Rui, YANG Xuejun, XUE Xue, et al. Study of accurate single-phase grounding fault location based on distributed parameter theory using data of zero sequence components [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12):472-479.
- [8] 郑荣进, 林湘宁, 赵峰. 基于最小相位差全局搜索的高压输电线路故障测距 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3):58-61.
- ZHENG Rongjin, LIN Xiangning, ZHAO Feng. Fault location on global search of minimum phase difference for high voltage transmission lines [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3):58-61.
- [9] 刘涤尘, 杜新伟, 李媛, 等. 基于遗传算法的高压长线路双端故障测距研究 [J]. 高电压技术, 2007, 33(3):21-25.
- LIU Dichen, DU Xinwei, LI Yuan, et al. Fault location using two-terminal data for HV & long transmission line based on genetic algorithm [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3):21-25.
- [10] 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.
- LI Cheng, WANG Kai. Novel unbalanced fault location method of two-end unsynchronized measurements [J]. Electric Measurement & Instrumentation, 2014, 51(13):55-59.
- [11] 徐鹏, 王钢, 李晓华, 等. 双端非同步数据故障测距的非线性估计算法 [J]. 继电器, 2005, 33(1):16-20.
- XU Peng, WANG Gang, LI Xiaohua, et al. A nonlinear estimation algorithm for two terminal fault location on asynchronous data [J]. Relay, 2005, 33(1):16-20.
- [12] 李勋, 石帅军, 龚庆武. 采用信赖域和双端非同步数据的故障测距算法 [J]. 高电压技术, 2010, 36(2):396-400.
- LI Xun, SHI Shuaijun, GONG Qingwu. Transmission line fault location algorithm using trust-region method and two-terminal unsynchronized data [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2):396-400.
- [13] 梁军, 麻常辉, 负志皓. 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 Changhui, YUN Zhihao. 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.
- [14] 刘薇. 基于双端不同步数据的故障测距算法与装置的研究 [D]. 北京:华北电力大学, 2004.
- LIU Wei. Study of a new algorithm and device for fault location based on two-terminal asynchronous data [D]. Beijing:North China Electric Power University, 2004.
- [15] XIU Wanjin, LIAO Yuan. Accurate transmission line fault location considering shunt capacitances without utilizing line parameters [J]. Electric Power Components and Systems, 2011, 39(16):1783-1794.
- [16] 郭壮志, 吴杰康, 孔繁镍, 等. 基于仿电磁学算法和数据包络分析的水火电力系统多目标优化调度 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4):52-61.
- GUO Zhuangzhi, WU Jiekang, KONG Fannie, et al. Multi-objective optimization scheduling for hydrothermal power systems based on electromagnetic-like mechanism and data envelopment analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4):52-61.

作者简介:



王丰华(1973—),女,河南偃师人,副教授,博士,主要研究方向为输电线路故障测距技术、电力设备状态监测技术、电力系统接地技术、电能质量分析等 (E-mail: fhwang7723@sjtu.edu.cn)。

Asynchronous two-terminal fault location method of transmission line based on parameter modification

WANG Fenghua¹, MU Ka^{1,2}, ZHANG Jun¹, LIU Yadong¹, QIAN Yong¹

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Electric Power Research Institute, State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Beijing 100045, China)

Abstract: Aiming at the fault location errors caused by asynchronous data and line parameter uncertainty, an asynchronous two-terminal fault location method based on parameter modification is proposed to locate the asynchronous fault. Based on the defined parameter correction coefficient, the effect of asynchronous angle is eliminated through equivalent sequence-network analysis. The fault location equations are established and then solved through the electromagnetic-like mechanism algorithm to locate the fault position. Both simulative results and calculative results of actual line show that immune to the change of line parameters, the proposed method can locate the fault position only using unsynchronized fault data with high accuracy and reliability.

Key words: transmission line; unbalanced fault; electric fault location; two terminals asynchronous; electromagnetic-like mechanism algorithm