

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.02.016

基于零模线模时差的配电网双端行波故障测距

胡冰颖, 李梅

(安徽理工大学电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232063)

摘要:快速、可靠定位配电网单相接地故障是提高配电网供电可靠性的重要手段。现有单相接地故障定位技术实用效果较差,过电压时间较长导致电缆相继燃烧的情形屡见不鲜。文中首先分析行波测距技术在配电网单相接地故障定位中的适用性;然后,利用模量分析法分析配电线路单相接地故障时暂态零模和线模行波的故障特征,提出基于零模线模时差的双端行波测距算法;最后,基于配电网仿真模型,对比分析所提算法与现有算法的单相接地故障定位精度,验证所提算法的有效性和优越性。仿真结果表明,所提算法不受过渡电阻影响、无需对时同步且不受行波波头折反射影响,具有较好的工程应用前景。

关键词:配电网;单相接地故障;行波测距;线模行波;零模行波

中图分类号:TM727

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2021)02-0114-07

0 引言

我国中低压配电网大多采用中性点非有效接地运行方式,单相接地故障电流小^[1-2]、故障检测困难,易产生谐振过电压,造成设备损坏、电网大面积停电等事故。单相接地故障定位及测距技术可极大提升配电网供电可靠性,减轻人工巡线压力,具有较高的工程应用价值^[3-5]。

目前已有的故障测距算法按照单相接地故障测距原理,可分为阻抗法、故障分析法、人工智能法、特殊频率法、注入信号法和行波故障测距法等^[6-18]。其中基于行波的故障定位技术定位速度快、精度高,且基本不受中性点接地方式、系统参数、线路不对称等因素影响,应用较为广泛。在单端法和双端法2种测距方式中,单端法利用首个入射行波波头与首个反射行波波头的时间差进行故障测距,其优点是无需数据同步,缺点是行波首个反射波头识别困难,尤其是配电网线路较短的情况。双端行波测距利用首个入射行波波头到达线路两端检测点的时间差进行故障测距,现有双端法在应用时,对两端时间同步设备的对时精度要求较高,一般须小于1 μs。若对时误差较大,则定位误差也会相应增大,影响定位效果^[19-21]。

在众多行波测距改进方案中,文献[13]提出采用改进希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)标定行波波头;针对配电网单一线路,采用D型测距原理实现测距;针对线-缆混合线路,采用基于接点时差的双端测距原理实现故障测距。分布

式电源接入时,文献[14]提出利用双端定位原理和多端初始行波到达时刻搭建故障支路搜索矩阵,进而计算故障点的精确位置。文献[15]提出基于行波反演的故障重演方法,可准确获取关键故障的暂态信息。文献[16]提出基于区间分割的双端行波故障定位方法,通过行波到达线路各个测量点的时间差值,确定故障区段。文献[17]针对行波定位精度受波速不确定性影响的问题,基于故障初始行波零模分量和线模分量波头的到达时刻,提出一种与波速无关的双端定位算法。文献[18]提出改进的分布式行波测距方法,通过获取故障后多个测量点的行波到达时刻,拟合行波波头传输特性曲线,进而求解故障点的具体位置。

上述行波测距方法在配电网中的应用存在以下不足:双端行波测距或多端行波测距技术应用较多,但其对装置对时同步性能要求较高,成本亦较高;单端行波测距无需对时同步,但受行波折反射影响,波头识别困难,配电线路较短时尤甚;现有研究多集中于行波波头识别方法,在配电网行波测距原理上鲜有创新。

为了提高行波测距技术在配电网中的适用性,解决双端行波测距算法对时同步要求高、单端行波折反射波头识别难的问题,文中对线模、零模电压行波到达各端检测点的时间差与线路长度的关系进行分析,提出一种基于零模线模时差的双端行波测距算法。算法简单可行,既保留了双端行波测距高可靠性、高精度的优点,又无需对时同步,具有较好的工程应用前景。

1 配电线路单相接地故障行波模量分析

单相接地故障发生后,故障电流小,行波故障

收稿日期:2020-09-13;修回日期:2020-10-19

基金项目:国家电网有限公司科技项目“适应高渗透率分布式电源接入的配电网继电保护技术研究”

测距利用的电气量多为线模或零模分量。文中利用凯伦鲍尔变换将相域系统 $X_x(x = a, b, c)$ 变换为无耦合的模域系统,其形式为:

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: X_1, X_2 为电压或电流行波的线模分量; X_0 为零模分量。

继而将单相接地故障暂态分析转换为故障点初始电压行波的线模和零模分量分析。考虑故障点过渡电阻 R_f [22], 单相接地故障时初始行波的线模和零模分配如图 1 所示。其中, Z_1, Z_2, Z_0 分别为线路 1 模、2 模、0 模的波阻抗; U_f 为等效电压源。

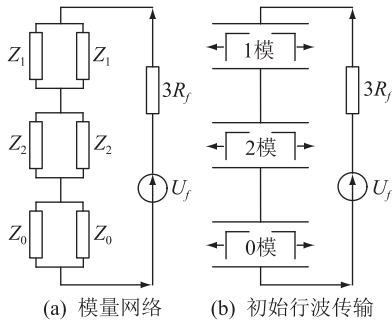


图 1 单相接地故障初始行波模量及传输示意

Fig.1 Schematic diagram of initial traveling wave modulus and transmission for single-phase-to-ground fault

对单出线系统线路行波传播规律进行分析。行波波速为:

$$\begin{cases} v_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \\ v_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_1, v_0 分别为行波线模、零模分量波速; L_1, C_1 分别为线路线模电感、电容; L_0, C_0 分别为线路零模电感、电容。

由于线路线模、零模参数不同,故障行波的线模分量与零模分量在传输过程中的速度也不同。线路的零模参数远大于线模参数,尤其是电缆线路。故一般线模分量波速大于零模分量波速。

单出线系统如图 2 所示。假设线路无损,故障点发生金属性单相接地,则故障行波的传播过程较为简单,如图 3 所示。故障电压或电流行波的零模分量 x_{01}, x_{02} 和线模分量 x_{11}, x_{12} 从故障点 F 向线路两端传播,当分别经过线路 l_1, l_2 到达母线 M 和线路末端 N 时发生全反射。反射行波 $x'_{01}, x'_{02}, x'_{11}, x'_{12}$ 分别到达故障点 F 后再次发生全反射,形成 $x''_{01}, x''_{02}, x''_{11}, x''_{12}$, 如此循环往复。

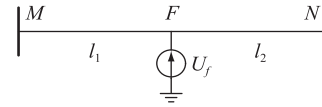


图 2 单出线系统线路故障附加网络
Fig.2 Additional network of single outlet system when line fault occurs

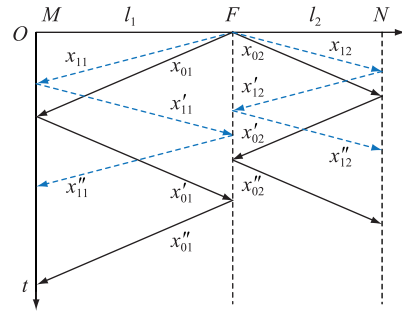


图 3 单出线系统故障行波网络
Fig.3 Traveling wave network of single outlet system fault

实际现场中,由于线路运行环境的变换和线路段参数的不同,行波在线路传输中的速度也会发生变化,此时使用固定的行波波速进行故障定位误差较大。对任一端检测装置而言,线模分量总是先于零模分量到达。因此,可分别对零模、线模分量到达线路各端的时间作差,利用时间差实现故障定位,减少由于行波波速变化带来的定位误差。同时可有效避免对时误差对定位精度的影响,提升定位系统的抗干扰性,降低设备运行成本。

2 基于零模线模时差的双端行波故障定位

2.1 传统双端行波测距

行波故障测距与行波的传输速度、到达线路各检测端的时间以及线路长度有关。若单相接地故障发生在单出线线路 AB 区段上,根据双端行波测距原理,可得故障点 F 到线路 A, B 检测点的水平距离分别为:

$$\begin{cases} d_A = \frac{L_{AB} + v(t_A - t_B)}{2} \\ d_B = \frac{L_{AB} + v(t_B - t_A)}{2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: L_{AB} 为 AB 区段杆塔间的水平距离; v 为由线路参数计算得到的故障行波传输速度; t_A, t_B 分别为故障初始行波波头抵达 A, B 检测点的时刻。

2.2 线路长度不确定性对行波故障测距的影响

由 2.1 节可知,双端行波法的故障定位结果和线路长度有关。实际中,配电线路受输送距离、参数变化、线路弧垂等因素影响,线路长度与杆塔间

的水平距离并不相等。为克服线路长度变化对定位结果的影响,在进行定位算法优化时,首先分析线路长度的不确定性对行波故障测距的影响。

假设故障发生时刻为 t_0 ,则当配电线路 AB 上 F 点发生单相接地故障时,线路 A 端到故障点 F 的实际距离为:

$$d'_A = v(t_A - t_0) \quad (4)$$

线路 AB 的实际长度 L'_{AB} 为:

$$L'_{AB} = v(t_A - t_0 + t_B - t_0) \quad (5)$$

假设同一路受环境影响的伸缩比较均匀,则 L'_{AB}/d'_A 和 L_{AB}/d_A 近似相等。

$$d_A = \frac{d'_A L_{AB}}{L'_{AB}} = \frac{(t_A - t_0)L_{AB}}{(t_A - t_0 + t_B - t_0)} \quad (6)$$

由式(6)可知,故障点到线路杆塔的水平距离只与线路杆塔间的水平距离有关,可以忽略线路长度变化对故障测距结果的影响。

2.3 基于零模线模时差的行波故障测距

文中利用单相接地故障发生后的行波线模和零模分量进行故障测距。假设 t_{A1} , t_{B1} 分别为故障初始行波线模分量的波头抵达线路 A, B 端检测点的时刻; t_{A0} , t_{B0} 分别为故障初始行波零模分量的波头抵达线路 A, B 端检测点的时刻。则:

$$\begin{cases} \Delta t_A = t_{A0} - t_{A1} \\ \Delta t_B = t_{B0} - t_{B1} \\ \Delta t = \Delta t_A - \Delta t_B \\ \Delta v = v_1 - v_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: Δt_A 为行波线模和零模分量到达线路 A 端检测点的时间差; Δt_B 为行波线模和零模分量到达线路 B 端检测点的时间差; Δv 为行波线模和零模分量波速差。则:

$$L_{AB}/\Delta t_{AB} = d_A/\Delta t_A = d_B/\Delta t_B \quad (8)$$

式中: Δt_{AB} 为行波线模和零模分量从线路 A 端传播到线路 B 端的时间差。且:

$$\Delta t_{AB} = \frac{L_{AB}}{v_0} - \frac{L_{AB}}{v_1} = \frac{v_1 - v_0}{v_0 v_1} L_{AB} \quad (9)$$

进而可知单端行波测距为:

$$\begin{cases} d_A = \frac{v_0 v_1}{v_1 - v_0} \Delta t_A = \frac{v_0 v_1}{\Delta v} \Delta t_A \\ d_B = \frac{v_0 v_1}{v_1 - v_0} \Delta t_B = \frac{v_0 v_1}{\Delta v} \Delta t_B \end{cases} \quad (10)$$

则:

$$\Delta d_{AB} = d_A - d_B = \frac{v_0 v_1}{\Delta v} \Delta t \quad (11)$$

进而可知双端行波测距为:

$$\begin{cases} d_A = \frac{L_{AB}}{2} + \frac{v_0 v_1}{2 \Delta v} \Delta t \\ d_B = \frac{L_{AB}}{2} - \frac{v_0 v_1}{2 \Delta v} \Delta t \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可知,算法利用了线路长度、行波零模和线模的传播速度以及零模线模到达线路两端的时间差进行故障测距。算法无需高精度定时,且保留了双端行波测距精度高的优点,可有效降低设备成本。

2.4 时间不同步对故障测距的影响

两端故障检测装置的时间无法完全同步,尤其是缺少同步时钟,或者同步时钟损坏的情况下,必然存在时间差。假设双端故障测距装置时间不同步,不同步误差为 Δt_e ,则 Δt_e 为某一相同时刻, A 端检测点时钟标示时刻 T_A 与 B 端检测点时钟标示时刻 T_B 之差。

$$\Delta t_e = T_A - T_B \quad (13)$$

将 Δt_e 带入式(3)可得:

$$\begin{cases} d_A = \frac{L_{AB} + v(t_A - t_B + \Delta t_e)}{2} \\ d_B = \frac{L_{AB} + v(t_B - t_A - \Delta t_e)}{2} \end{cases} \quad (14)$$

可见, Δt_e 影响测距结果。将 Δt_e 和式(7)代入式(12)可得:

$$\begin{cases} d_A = \frac{L_{AB}}{2} + \frac{v_0 v_1}{2 \Delta v} [(t_{A0} - t_{B0} + \Delta t_e) - (t_{A1} - t_{B1} + \Delta t_e)] = \frac{L_{AB}}{2} + \frac{v_0 v_1}{2 \Delta v} [(t_{A0} - t_{A1}) - (t_{B0} - t_{B1})] = \frac{L_{AB}}{2} + \frac{v_0 v_1}{2 \Delta v} \Delta t \\ d_B = \frac{L_{AB}}{2} - \frac{v_0 v_1}{2 \Delta v} [(t_{A0} - t_{B0} + \Delta t_e) - (t_{A1} - t_{B1} + \Delta t_e)] = \frac{L_{AB}}{2} - \frac{v_0 v_1}{2 \Delta v} \Delta t \end{cases} \quad (15)$$

对比式(14)和式(15)可知,文中所提基于零模和线模时差的行波故障测距算法不受 Δt_e 的影响。

3 仿真实验

3.1 模型搭建

利用 ATP 电磁暂态仿真软件和 Matlab 对文中所提算法、传统双端行波测距方法和基于零模线模时差的单端行波故障测距方法进行对比验证。搭建 10 kV 分布参数长线路配电网模型,如图 4 所示。系统模型参数设置如下。

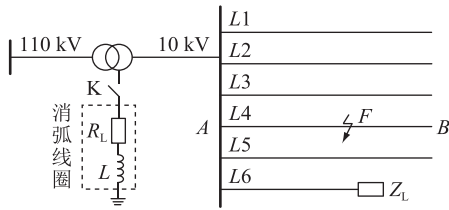


图4 配电网仿真模型

Fig.4 Simulation model of distribution network

(1) 线路参数。6条线路L1—L6的长度分别为3 km, 6 km, 9 km, 12 km, 15 km, 20 km。L1为架空线路; L2为电缆线路; L3为架空线路; L4为10 km架空线路与2 km电缆线路; L5为5 km架空线路与10 km电缆线路; L6为15 km架空线路与5 km电缆线路。架空线路正序阻抗 Z_1 为 $0.17+j0.38 \Omega/\text{km}$; 正序对地导纳 b_1 为 $j3.045 \mu\text{S}/\text{km}$; 零模阻抗 Z_0 为 $0.23+j1.72 \Omega/\text{km}$; 零模对地导纳 b_0 为 $j1.884 \mu\text{S}/\text{km}$ 。电缆线路 Z_1 为 $0.27+j0.0079 \Omega/\text{km}$; b_1 为 $j106.76 \mu\text{S}/\text{km}$; Z_0 为 $0.0024+j0.32 \Omega/\text{km}$; b_0 为 $j87.92 \mu\text{S}/\text{km}$ 。消弧线圈补偿系数为10%。

(2) 变压器参数。变压器采用Y/Yn接法; 额定容量为 $40 \text{ MV}\cdot\text{A}$; 空载损耗为 35.63 kW ; 变比为 $110 \text{ kV}/10 \text{ kV}$; 高压侧单相线圈电阻、电感分别为 $0.4 \Omega, 12.2 \text{ H}$; 低压侧单相线圈电阻、电感分别为 $0.006 \Omega, 0.183 \text{ H}$; 励磁电流为 0.672 A ; 励磁磁通为 202.2 Wb ; 磁路电阻为 $400 \text{ k}\Omega$ 。

(3) 负荷参数。负荷为 $400+j20 \Omega$, 采用三角形接法。

(4) 波速度。应用式(2)可得零模和线模行波在架空线路上的传播速度 V_{j0}, V_{j1} 分别为 $1.758 \times 10^5 \text{ km/s}, 2.92 \times 10^5 \text{ km/s}$; 零模和线模行波在电缆线路上的传播速度 V_{d0}, V_{d1} 分别为 $0.6 \times 10^5 \text{ km/s}, 1.099 \times 10^5 \text{ km/s}$ 。

3.2 仿真分析

3.2.1 故障测距精度分析

故障发生在L4线路; 故障点F距离母线(A端)5 km; L_{AB} 为12 km; d_A 为5 km; d_B 为7 km; 故障时刻为0.02 s; 线路A, B两端采样装置的采样频率为10 MHz。

对行波测距而言, 高采样频率可以获得较高的测距精度, 但存在硬件设计、数据存储与处理等一系列问题。为满足现场实际要求, 高压远距离输电线路行波测距装置的采样频率宜选择1~10 MHz。低压配电线路的采样频率宜选择10~20 MHz, 电缆线路故障定位精度要求更高, 则采样频率应更高^[19]。利用小波变换识别行波波头^[23], 则A, B端

检测到的零模和线模电压行波波幅以及小波变换结果如图5所示。

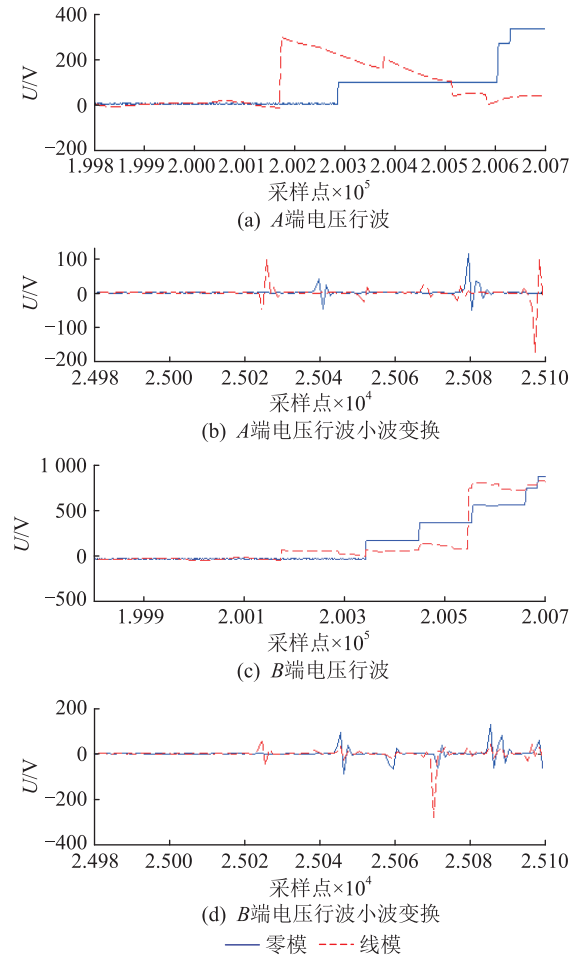


图5 零模和线模电压行波及其小波变换

Fig.5 Traveling voltages and wavelet transform of zero mode and line mode

由图5可知, 线模和零模电压行波传播到A端的时间间隔 Δt_A 为 $17 \mu\text{s}$; 线模和零模电压行波传播到B端的时间间隔 Δt_B 为 $22 \mu\text{s}$; 计算可得 Δt 为 $5 \mu\text{s}$ 。

采用基于零模线模时差的双端行波测距算法, 根据式(12)可得 d_A, d_B 分别为4.90 km, 7.10 km; 故障测距误差 e_A, e_B 均为0.80%。其中, 故障测距误差 e 定义为:

$$e = \frac{|\text{实测距离值} - \text{标准距离值}|}{\text{线路标准总长}} \quad (16)$$

采用基于零模线模时差的单端行波测距算法时, 根据式(10)可计算得到: d_A, d_B 分别为5.30 km, 7.50 km; e_A, e_B 分别为2.50%, 4.17%。

采用传统双端行波测距算法时, 在无对时误差的情况下, 根据式(3)可计算得到: d_A, d_B 分别为5.45 km, 6.54 km; e_A, e_B 均为4.50%。

综上, 采用文中所提基于零模线模时差的双端

行波测距算法得到的仿真结果更接近理论值;且该算法的故障测距精度高于现有的基于零模线模时差的单端行波测距算法和双端行波测距算法。

3.2.2 时间不同步对故障测距的影响

分析不同时钟不同步情况对双端行波故障测距的影响。一般情况下, Δt_e 为 $1 \mu\text{s}$ 属于行业可接受范围。则根据式(3)可得: d_A, d_B 分别为 $5.60 \text{ km}, 6.40 \text{ km}$; e_A, e_B 均为 5.00% 。当出现时钟损坏等极端情况,如 Δt_e 为 $10 \mu\text{s}$ 时,则根据式(3)可得: d_A, d_B 分别为 $4 \text{ km}, 8 \text{ km}$; e_A, e_B 均为 16.70% 。可见,时间不同步对双端行波测距影响较大,但对文中所提算法无影响。

3.2.3 过渡电阻对故障测距的影响

不同过渡电阻情况下,各故障测距算法的仿真结果如表1所示。其中,算法1为基于零模线模时差的双端行波测距算法;算法2为基于零模线模时差的单端行波测距算法;算法3为传统双端行波测距算法。

表1 不同过渡电阻对故障测距的影响
Table 1 The influence of different transition resistances on fault location

算法	R_f/Ω	d_A/km	$e_A/\%$	d_B/km	$e_B/\%$
1	0	4.83	1.4	7.17	1.4
	50	4.79	1.8	7.21	1.8
	500	4.79	1.8	7.21	1.8
	1 000	4.81	1.0	7.19	1.0
2	0	5.16	1.3	7.51	4.3
	50	5.08	0.7	7.51	4.3
	500	5.08	0.7	7.51	4.3
	1 000	5.12	1.0	7.51	4.3
3	0	5.75	2.1	6.25	2.1
	50	5.75	2.1	6.25	2.1
	500	5.75	2.1	6.25	2.1
	1 000	5.75	2.1	6.25	2.1

由表1可知,文中所提算法1采用电压行波进行故障判断,受过渡电阻影响较小,且故障测距精度较高。 F 到 A 端检测点的线路为纯架空线路,由式(10)可知, d_A 的测距精度不受下游混架线路波速不同的影响,故算法2的 d_A 测距精度较高。 F 到 B 端检测点的线路为混架线路,影响算法2对 d_B 的测距精度,故其远小于算法1的测距精度。相较于算法3,算法1受线路参数不均匀性影响小,故算法1测距精度高于算法3测距精度。

3.2.4 不同对时精度对故障测距的影响

R_f 为0时,不同对时精度下,不同故障测距算法的仿真结果如表2所示。

表2 不同对时精度对故障测距的影响
Table 2 The influence of different time accuracy on fault location

算法	对时精度/ μs	d_A/km	$e_A/\%$	d_B/km	$e_B/\%$
1	0	4.83	1.4	7.17	1.4
	1	4.83	1.4	7.17	1.4
	5	4.83	1.4	7.17	1.4
	10	4.83	1.4	7.17	1.4
2	0	5.16	1.3	7.51	4.3
	1	5.16	1.3	7.51	4.3
	5	5.16	1.3	7.51	4.3
	10	5.16	1.3	7.51	4.3
3	0	5.75	2.1	6.25	2.1
	1	5.61	3.3	6.39	3.3
	5	6.48	4.0	5.51	4.0
	10	4.29	14.2	7.71	14.2

由表2可知,算法1和算法2的测距精度不受同步对时精度影响,算法3受对时精度影响较大。

3.2.5 不同故障点位置对故障测距的影响

R_f 为0且 F 位置(距离 A 端)不同时,不同故障测距算法的仿真结果如表3所示。

表3 不同故障点位置对故障测距的影响
Table 3 The influence of different fault point positions on fault location

算法	F 位置/ km	d_A/km	$e_A/\%$	d_B/km	$e_B/\%$
1	3	3.33	2.6	8.67	2.6
	5	4.83	1.4	7.17	1.4
	7	6.80	1.6	5.20	1.6
	10	10.22	1.8	1.78	1.8
2	3	3.05	0.4	8.39	5.1
	5	5.16	1.3	7.51	4.3
	7	7.11	1.0	5.53	4.4
	10	10.20	1.7	1.77	1.9
3	3	3.11	0.9	8.89	0.9
	5	6.48	4.0	5.51	4.0
	7	6.23	6.4	5.77	6.4
	10	10.20	1.8	1.79	1.8

由表3可知,算法1精度较高,可以满足故障测距要求;算法1和算法2均受线路参数均匀性影响,且算法2受影响较大。

4 结语

针对小电流接地系统单相接地故障点查找困难、易导致电缆沟起火或事故扩大化的问题,文中结合行波故障测距算法不受系统运行方式影响的优点,提出基于零模线模时差的双端行波故障测距算法,并利用仿真验证所提算法的有效性和优越性。

基于零模线模时差的双端行波故障测距算法不受过渡电阻、定时精度、行波折反射的影响,兼顾单端行波测距无需定时同步和双端行波测距精度高的优点,具有一定的适用性。

暂态行波信号中含有的噪声影响行波波头时刻的准确获取,对于系统结构复杂、出线及分支较多的配电线路,噪声的影响不可避免。因此,须采取有效措施对暂态行波信号进行去噪处理。由于配电网线路波阻抗不连续且电网拓扑较为复杂,算法的适用性还需进一步分析。另外,行波传播速度与线路绝缘、线路波阻抗变化、外界温度等因素直接相关,这些因素的变化都会导致暂态行波传播速度产生一定程度的变化,增大测距误差,因此仍需深入进行相关研究。

参考文献:

- [1] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 2版. 北京:中国电力出版社,2009.
YAO Huannian, CAO Meiyue. Power system resonant grounding [M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [2] 李福寿. 中性点非有效接地电网的运行[M]. 北京:水利电力出版社,1993.
LI Fushou. Operation of neutral ineffective grounding grid [M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1993.
- [3] 王雪文. 基于多端同步波形的配电网小电流接地故障区段定位技术[D]. 济南:山东大学,2020.
WANG Xuewen. Location technology of single phase to ground fault in non-solidly earthed distribution network based on multi-terminal synchronous waveform [D]. Ji'nan: Shandong University, 2020.
- [4] 万信书,方连航,梁钰,等. 基于三相电流幅值分析的小电流单相接地故障区段定位方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(4): 49-57.
WAN Xinchu, FANG Lianhang, LIANG Yu, et al. Method of fault section location for the small current single-phase-to-ground fault based on the amplitude analysis of three-phase current [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(4): 49-57.
- [5] 邵庆祝,郭霖徽,刘亚东,等. 基于LSTM模型的配电网单相接地故障辨识方法[J]. 广东电力, 2019, 32(9): 100-106.
SHAO Qingzhu, GUO Linhui, LIU Yadong, et al. Identification method for single-phase ground fault of distribution network based on LSTM model [J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(9): 100-106.
- [6] 王成斌,负志皓,张恒旭,等. 基于微型PMU的配电网多分支架空线路参数无关故障定位算法[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3202-3211.
WANG Chengbin, YUN Zhihao, ZHANG Hengxu, et al. Parameter-free fault location algorithm for multi-terminal overhead transmission line of distribution network based on μ MPMU [J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3202-3211.
- [7] 王玲,邓志,马明,等. 基于改进视在阻抗的配电网故障定位方法及其应用[J]. 广东电力, 2020, 33(10): 84-93.
WANG Ling, DENG Zhi, MA Ming, et al. Distribution network fault location method and its application based on improved apparent impedance [J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(10): 84-93.
- [8] 徐铭铭,肖立业,林良真. 基于零模行波衰减特性的配电网单相接地故障测距方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 397-404.
XU Mingming, XIAO Liye, LIN Liangzhen. A fault location method for the single-phase-to-earth fault in distribution system based on the attenuation characteristic of zero-mode traveling wave [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 397-404.
- [9] 戴志辉,王旭. 基于改进阻抗法的有源配电网故障测距算法[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 2027-2034.
DAI Zhihui, WANG Xu. Impedance method based fault location algorithm for active distribution system [J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 2027-2034.
- [10] 王丰华,穆卡,张君,等. 基于参数修正的输电线路双端不同步测距方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 95-101.
WANG Fenghua, MU Ka, ZHANG Jun, et al. Asynchronous two-terminal fault location method of transmission line based on parameter modification [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 95-101.
- [11] 曹颖,刘建华,彭云倩,等. 基于突变量波形互异性的故障定位新方法[J]. 电力科学与工程, 2017, 33(3): 31-35.
CAO Ying, LIU Jianhua, PENG Yunqian, et al. A new method of fault location based on the dissimilarity of waveform of sudden variable [J]. Electric Power Science and Engineering, 2017, 33(3): 31-35.
- [12] 侯辉. 基于行波时频特性的配电网单相接地故障测距方法研究[D]. 西安:西安科技大学,2019.
HOU Hui. Research on fault location method of single-phase grounding fault in time-frequency domain characteristics of traveling wave for distribution network [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [13] 王伟,吴亚辉,李志勇,等. 一种用于校验双端行波测距装置的测试系统的研发与测试[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 176-181.
WANG Wei, WU Yahui, LI Zhiyong, et al. Development and test of a test system for verifying double-ended traveling wave fault location equipment [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 176-181.
- [14] 邓丰,李欣然,曾祥君,等. 基于多端故障行波时差的含分布式电源配电网故障定位新方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4399-4409, 4640.
DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun, et al. A novel multi-terminal fault location method based on traveling wave time difference for radial distribution systems with distributed generators [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4399-4409, 4640.

- [15] 梁涵卿,刘亚东,盛戈峰,等. 基于行波反演的输电线路单相接地故障重演方法[J]. 高电压技术,2019,45(1):209-217.
LIANG Hanqing, LIU Yadong, SHENG Gehao, et al. Reproduction method for monophas-to-ground fault of transmission lines based on wave inversion[J]. High Voltage Engineering, 2019,45(1):209-217.
- [16] 蔡俊强,孙二双,杨子力. 带T接分支的电缆-架空线混合线路双端行波故障定位[J]. 电工技术,2018(21):37-40,43.
CAI Junqiang, SUN Ershuang, YANG Zili. Double terminal traveling wave fault location for cable and overhead hybrid distribution lines with T branches[J]. Electric Engineering, 2018(21):37-40,43.
- [17] 谢李为,曾祥君,柳祎璇. 基于VMD-Hilbert变换的故障行波定位研究[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(16):75-81.
XIE Liwei, ZENG Xiangjun, LIU Yixuan. Research on fault traveling wave location based on VMD-Hilbert transform[J]. Power System Protection and Control, 2018,46(16):75-81.
- [18] 王博,谷昌瑞,吉晓筱,等. 基于多点故障行波检测的改进分布式故障测距方法研究[J]. 电力工程技术,2017,36(5):120-127.
WANG Bo, GU Changrui, JI Xiaoxiao, et al. Research on improved distributed fault location method based on multi-point fault traveling wave detection[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017,36(5):120-127.
- [19] 徐伟宗. 采样频率对行波测距影响的仿真分析[J]. 电力系统及其自动化学报,2014,26(6):76-80.
XU Weizong. Simulation analysis of impacts of sampling frequency on traveling wave ranging[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2014,26(6):76-80.
- [20] DENG F, ZENG X J, TANG X, et al. Travelling-wave-based fault location algorithm for hybrid transmission lines using three-dimensional absolute grey incidence degree[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 114:105306.
- [21] DING J L, WANG X, ZHENG Y H, et al. A novel fault location algorithm for mixed overhead-cable transmission system using unsynchronized current data[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2019, 14(9):1295-1303.
- [22] 施慎行,董新洲,周双喜. 单相接地故障行波分析[J]. 电力系统自动化,2005,29(23):29-32,53.
SHI Shenxing, DONG Xinzhou, ZHOU Shuangxi. Analysis of single-phase-to-ground fault generated traveling waves[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005,29(23):29-32,53.
- [23] 赵肖雪. 基于小波包和相关算法的输电线路单端行波故障测距研究[D]. 淄博:山东理工大学,2019.
ZHAO Xiaoxue. Research on single-terminal traveling wave fault location of transmission line based on wavelet packet and correlation algorithm[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2019.

作者简介:



胡冰颖

胡冰颖(1994),女,硕士在读,研究方向为配电网故障定位技术(E-mail:huby521@126.com);

李梅(1978),女,硕士,副教授,研究方向为电力系统运行与控制。

Double ended traveling wave fault location in distribution network based on the time difference of zero-mode and line-mode

HU Bingying, LI Mei

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232063, China)

Abstract: Fast and reliable location of single-phase-to-ground fault is an important technical mean to improve the reliability of power supply in distribution network. However, the faults of cable combustion are really common in the situation of long time over voltage, and it is difficult to locate the faults by traditional single-phase-to-ground fault positioning technology. Firstly, the adaptability of line wave spacing technology in the single-phase-to-ground fault location of distribution network is discussed. Then, it is used to analyze the fault characteristics of transient zero-mode and line-mode traveling waves by modulus analysis method when single-phase-to-ground faults occur in distribution lines, and a method of double ended traveling wave fault location based on the time difference of zero-mode and line-mode is proposed. Finally, on the basis of simulation model of distribution network, the effectiveness and superiority of the proposed algorithm are verified by the comparison of single-phase-to-ground fault location among proposed algorithm and other algorithms. The simulation results show that the proposed algorithm is not affected by transition resistance and traveling wave-head reflection. Also it is with no need of time synchronization, and has a good prospect for engineering application.

Keywords: distribution network; single-phase-to-ground fault; traveling wave fault location; line-mode traveling wave; zero-mode traveling wave

(编辑 吴楠)