

一种分段处理优选数据窗的双端测距算法

张灏^{1,2}, 薛明军^{1,2}, 王学超^{1,2}, 杨黎明^{1,2}, 李玉平^{1,2}, 陈福锋^{1,2}

(1. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 211153;

2. 南京国电南自电网自动化有限公司, 江苏 南京 211153)

摘要:基于集中参数模型的双端测距原理普遍应用在输电线路保护中,对于中、短距离线路,模型误差可以忽略,但仍有其他因素对测距结果产生影响,特别是故障在极短时间内被切除时,测距结果易产生较大误差。为了提升测距准确性及普适性,文中对集中参数模型双端测距算法在常见影响因素下进行绝对误差分析,利用正交试验设计以及仿真计算,对比不同因素对测距误差的影响程度,发现数据窗选取这一因素影响最大。同时发现,相比于其他位置,线路首端故障的测距误差受影响较大。根据这2个特征,提出一种基于分段处理的自适应优选数据窗实用算法。经验证,该算法的测距误差受因素影响程度大幅降低。

关键词:双端测距;线路保护;误差分析;正交试验设计;数据窗;分段处理

中图分类号:TM755

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)03-0237-07

0 引言

输电线路承担电能传送的重任,是电力系统中发生故障最多的地方。输电线路跨度远、排故难度大,因此故障测距技术对于快速修复故障、保障可靠供电有着重要意义。

线路保护故障测距功能快速、简洁,能够在第一时间输出测距结果。故障测距方法按测距原理主要分为行波法和故障分析法,根据测距所需信息来源又可分为单端量法和双端量法^[1-2]。

行波法不受过渡电阻、系统运行方式变化、线路分布电容及负荷电流等影响^[3-7],但对装置采样频率及精度要求较高,且实际输电线路参数受频率影响,波阻抗具有不确定性,会影响行波法的计算准确性^[8-10]。故障分析法简单、经济、易于实现,在电力系统中得到了广泛应用^[11]。单端量故障分析法便于实现,尤其适用于单端供电线路,但对于双端供电线路,该方法易受对侧系统运行方式变化以及故障点过渡电阻的影响^[12-14]。双端量故障分析法(简称双端测距)则不受过渡电阻和对侧系统阻抗影响,但须借助通信技术获取对侧数据^[15-16]。随着光纤通信技术的发展,双端测距技术日趋成熟,且应用于电力系统大多数输电线路保护中。

对于一些严重故障,线路保护动作速度很快,

若断路器动作速度也很快,则故障会在极短时间内被切除,此时故障测距数据窗很容易选取到故障切除后的时间段,或是故障起始暂态量较大的时间段,严重影响测距准确性。

为不失一般性,文中选取一个输电线路典型模型进行双端测距误差影响因素研究,针对性地提出一种基于分段处理的自适应优选数据窗实用算法,提高输电线路保护双端测距的准确性以及普适性。

1 集中参数双端测距基本原理和影响因素

1.1 集中参数双端测距基本原理

输电线路短路故障见图1,其中 $\dot{U}_M, \dot{I}_M, \dot{U}_N, \dot{I}_N$ 分别为线路M侧电压、电流和线路N侧电压、电流; D_L 为线路全长; \dot{E}_M, \dot{E}_N 分别为M、N侧系统; F 为线路故障点; R_F, \dot{I}_F 分别为故障点过渡电阻以及故障电流。利用线路两侧电流、电压工频量消除过渡电阻 R_F ,可得双端测距计算公式,即式(1)。

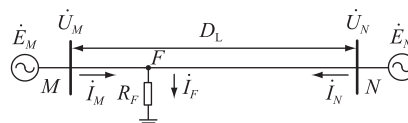


图1 线路故障示意

Fig.1 Schematic diagram of line fault

$$D_{MF} = \frac{\dot{U}_M - \dot{U}_N + \dot{I}_N Z D_L}{(\dot{I}_M + \dot{I}_N) Z} \quad (1)$$

式中: D_{MF} 为双端测距结果; Z 为线路阻抗。 D_{MF} 理想计算结果为纯实数,由于是复数运算,且实际计算存在误差,因此取 D_{MF} 的模值作为集中参数双端

收稿日期:2022-01-05;修回日期:2022-03-20

基金项目:国家重点研发计划资助项目“电力专用CPU及芯片和内嵌入式操作系统研发及应用”(2018YFB0904902);国家重点研发计划资助项目“电力系统终端嵌入式组件和控制单元安全防护技术”(2018YFB0904900)

测距结果。在电力系统的不对称故障分析中广泛采用了对称分量法,将对称分量法用于故障测距,主流输电线路保护多选用正序分量进行双端测距计算,得到双端测距计算公式为:

$$D_{MF} = |\dot{D}_{MF}| = \frac{\dot{U}_{M1} - \dot{U}_{N1} + \dot{I}_{N1}Z_1D_L}{(\dot{I}_{M1} + \dot{I}_{N1})Z_1} \quad (2)$$

式中: \dot{U}_{M1} , \dot{I}_{M1} , \dot{U}_{N1} , \dot{I}_{N1} 分别为线路 M 侧正序电压、正序电流和线路 N 侧正序电压、正序电流; Z_1 为线路正序阻抗。

1.2 集中参数双端测距影响因素

集中参数双端测距主要适用于中、短距离输电线路,对于超高压、特高压长距离输电线路会存在较大误差,属于原理适用性范畴,文中不作讨论。

文中主要分析中高压中、短距离输电线路的集中参数双端测距影响因素,具体如下:

(1) 线路参数准确度。线路全长一般以实测值整定,误差较小。相比而言,受线路均匀性影响,单位长度正序阻抗存在一定误差,正常情况下误差按小于 $\pm 5\%$ 计算。从分析的角度,将误差范围适当扩大,按 $\pm 10\%$ 进行分析。

(2) 双端数据同步精度。输电线路保护通常采用乒乓同步算法,按电流基波同步角度误差小于 $\pm 3^\circ$ 折算,同步时间误差小于 167 μs 。从分析的角度,将此范围适当扩大,按 $\pm 200 \mu\text{s}$ 进行分析。

(3) 数据窗选取位置。线路短路故障初期存在暂态过程,故障电流、电压随着时间发展趋于稳定,因此数据窗的选取倾向于尽可能靠后,但要避免选取故障切除后的数据窗。实际故障中断路器跳开故障的时间有快有慢,对于一些严重的金属性故障,动作时间快,故障电流、电压实际存在时间较短,故障测距数据窗的选取须兼顾暂态过程影响及故障切除后波形变化影响。为不失一般性,故障持续时间按 60 ms 进行试验分析,测距数据窗取 [40 ms, 70 ms] 进行分析。

(4) 故障点与线路首端距离。在没有误差的情况下,测距结果就是故障点与线路首端距离,考虑到不同影响因素对不同位置故障点的测距影响程度不同,选取 4 个位置不同的故障点进行误差分析,故障点与线路首端距离分别为线路全长的 0%, 30%, 50%, 90%。

2 误差影响因素正交试验设计

2.1 正交试验设计

为定量分析上述因素对双端测距误差的影响,

每个影响因素选取 4 个值进行仿真计算,分别记为水平 1、水平 2、水平 3、水平 4。但若要进行全面试验,则须进行 4^4 次仿真计算,工作量大。为提高试验效率,且达到同样的对比效果,利用正交试验设计方法进行试验。

正交试验设计是一种研究多因素、多水平的试验设计方法^[17-19],其根据正交性从全面试验中挑选出部分具有“均匀分散,齐整可比”特征的项目进行试验,可以大大减少试验数量,是一种效率高、计算速度快、便捷实用的试验设计方法。正交试验设计利用正交表来安排与分析多因素试验^[20-26]。正交表用 $L_N(m^k)$ 来表示,其中 L 代表正交表; N 为试验次数,即正交表的行数; m 为各因素的水平值,即正交表中的数字; k 为因素个数,即正交表的列数。正交表须满足 2 个特点:一是均匀分散,即任一列中不同数字出现的次数相等;二是齐整可比,即任 2 列中,同一行所组成的数字对出现的次数相等。

2.2 集中参数双端测距影响因素分析及试验设计

选取 4 个影响因素,分别为线路参数误差(因素 I)、双端同步误差(因素 II)、数据窗选取位置(因素 III)、故障点与线路首端距离(因素 IV),每个影响因素选取 4 个水平值,选值如表 1 所示。

表 1 试验设计影响因素及水平
Table 1 Influencing factors and levels of experimental design

水平	因素 I / %	因素 II / μs	因素 III / ms	因素 IV / %
1	-10	-200	40	0
2	-3	-60	50	30
3	+3	+60	60	50
4	+10	+200	70	90

在 EMTDC/PSCAD 中搭建双侧电源线路模型,模型参数如表 2 所示。

表 2 仿真模型线路参数
Table 2 Line parameters of simulation mode

参数	数值
正序电阻 / ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0.035
正序感抗 / ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0.423
正序并联容抗 / ($\text{M}\Omega \cdot \text{km}$)	0.363
零序电阻 / ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0.301
零序感抗 / ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	1.140
零序并联容抗 / ($\text{M}\Omega \cdot \text{km}$)	0.468

模拟各故障点 A 相接地短路故障,故障切除时间取 60 ms,合闸角取 0° 。以故障点与线路首端距离为线路全长的 30% 为例,图 2、图 3 分别为本侧及对侧的仿真波形,包含两侧的三相电压、三相电流。

在进行测距计算时,按照试验设计的不同因素及不同水平组合,人为增加不同误差进行计算,计算得到对应双端测距及误差结果。正交试验设计正交表 $L_{16}(4^4)$ 及试验结果如表 3 所示。

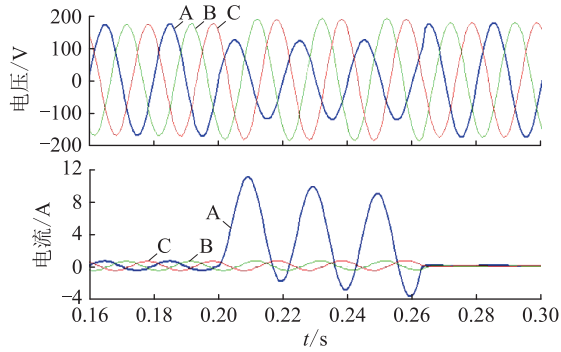


图 2 仿真波形(本侧)

Fig.2 Simulation waveforms (this side)

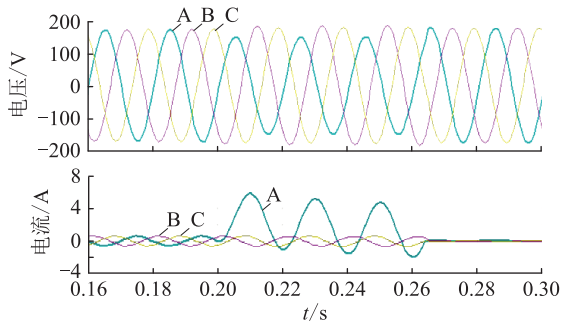


图 3 仿真波形(对侧)

Fig.3 Simulation waveforms (the contralateral)

表 3 试验设计正交表及试验结果

Table 3 Experiment design orthogonal table and experiment results

试验序号	因素水平				测距结果/km	测距误差绝对值/km
	因素 I	因素 II	因素 III	因素 IV		
1	1	1	1	1	4.699	4.699
2	1	2	2	2	29.858	0.142
3	1	3	3	3	49.935	0.065
4	1	4	4	4	88.479	1.521
5	2	1	2	3	51.163	1.163
6	2	2	1	4	90.821	0.821
7	2	3	4	1	4.527	4.527
8	2	4	3	2	29.425	0.575
9	3	1	3	4	90.574	0.574
10	3	2	4	3	45.846	4.154
11	3	3	1	2	29.581	0.419
12	3	4	2	1	3.306	3.306
13	4	1	4	2	26.617	3.383
14	4	2	3	1	0.781	0.781
15	4	3	2	4	89.668	0.332
16	4	4	1	3	49.386	0.614

2.3 正交试验设计仿真结果及分析

为了对试验结果进行直观分析,计算各因素测距误差结果的均值与极差。均值为该因素在这一水平值下试验结果的平均值;极差为该因素不同水平值下均值的最大值与最小值之差。均值分析可以判断各因素不同水平对测距误差绝对值的影响,极差分析可以判断各因素对测距误差绝对值的影响。均值与极差计算结果如表 4 所示。

表 4 均值与极差

Table 4 Mean and range analysis km

类别	因素 I	因素 II	因素 III	因素 IV
T_1	1.607	2.455	1.638	3.328
T_2	1.772	1.475	1.236	1.130
T_3	2.113	1.336	0.499	1.499
T_4	1.278	1.504	3.396	0.812
R	0.835	1.119	2.897	2.516

表中 T_1, T_2, T_3, T_4 分别为 4 个水平的输出结果均值; R 为极差,即 T_1, T_2, T_3, T_4 的最大值与最小值之差。由极差值可以看出,因素 I、因素 II 对测距误差影响较小,因素 III、因素 IV 对测距误差影响较大。图 4 为试验结果均值折线图。

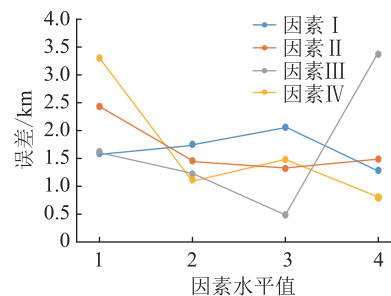


图 4 正交试验结果

Fig.4 Orthogonal experiment results

由图 4 进一步分析,观察因素 III 折线趋势可见,水平 1~3 误差在逐步减小,而水平 4 误差陡增,可知随着故障持续,故障电流、电压趋于稳定,暂态过程造成的误差随之减小,测距误差减小;当故障切除后,测距计算结果误差大幅增加。由因素 IV 折线可知,故障点与线路首端距离为线路全长的 0% 时误差最大,其他位置误差相对较小,这是由于影响因素对测距结果虚部产生的绝对误差在实部为 0 时对于复数模值的影响最大。

3 一种集中参数双端测距实用算法

3.1 测距数据窗常用选取方法

输电线路发生区内短路故障时,故障发生初始阶段,电流、电压均存在较大的暂态分量,影响工频

量的准确提取;随着故障的发展,暂态分量衰减,故障波形趋于稳定,测距计算结果趋于准确;随后线路保护装置动作,跳开断路器,故障电流被切除,母线电压恢复,电流、电压不再反映故障特征,此时测距计算不再准确。因此,测距数据窗的选取原则一是尽可能选取波形趋于稳定的数据窗,二是避免选取故障切除后的数据。

实际应用中通常采用保护动作后固定一段延时为测距数据窗,这个延时小于断路器最快切除故障的时间,如 30 ms,避免选取故障切除后的波形,一来保护动作说明故障特征已呈现,二来经过一段延时可保证电流、电压波形相对稳定。这种方法简单易实现,但断路器切除故障时间有快有慢,因此固定延时取值偏向保守,此时暂态分量还在衰减过程中,误差仍然偏大。且 220 kV 线路通常配置 2 套保护,虽然固定延时取值较短,但是 2 套保护动作时间可能有快有慢,另一套保护可能先动作跳开断路器,仍不能确保数据窗不包含故障切除后的数据。此外,故障点在线路首端时,双端测距结果受各因素产生的虚部误差影响较大,因此可通过改进方法避开这种情况。

3.2 分段处理的自适应优选数据窗实用算法

将平均法与测距变化阈值识别法以及故障点距离分段处理法相结合,提出一种集中参数双端测距实用改进算法。平均法是指在差动保护动作一定延时后陆续选取数据窗进行测距结算,当计算结果接近时,取其平均值;测距变化阈值识别法是指自适应选取一个阈值用于判别上述测距结果是否接近,阈值选取为差动保护动作后 1 周波与 1.5 周波测距结果的差值绝对值的 2 倍,差值代表了暂态

过程造成的误差波动程度,2 倍为可靠系数,此外本侧数据测距结果接近的同时对侧数据测距结果接近,以确保故障尚未切除;故障点距离分段处理法主要针对线路首端故障,本侧的首端则相当于对侧的末端,当用本侧数据计算结果小于 40% 线路全长时,则用线路全长减去对侧数据双端测距结果作为测距值。

本侧数据测距计算公式为式(2),对侧数据测距计算公式如下:

$$D_{NF} = |\dot{D}_{NF}| = \left| \frac{\dot{U}_{N1} - \dot{U}_{M1} + \dot{I}_{M1} Z_1 D_L}{(\dot{I}_{N1} + \dot{I}_{M1}) Z_1} \right| \quad (3)$$

式中: D_{NF} 为故障点距离 N 侧的距离。不难发现在取模值前须满足以下公式:

$$\dot{D}_{MF} + \dot{D}_{NF} = D_L \quad (4)$$

D_{MF20}, D_{MF30} 分别为差动动作后 20 ms, 30 ms 作为数据窗末端的本侧数据测距计算结果; D_{NF20}, D_{NF30} 对分别为差动动作后 20 ms, 30 ms 作为数据窗末端的对侧数据测距计算结果。选取阈值 M 如下:
 $M = 2\max(\|D_{MF30} - D_{MF20}\|, \|D_{NF30} - D_{NF20}\|)$ (5)

$D_{MF40}, D_{MF50}, D_{MF60}, D_{MF70}$ 分别为差动动作后 40 ms, 50 ms, 60 ms, 70 ms 作为数据窗末端的本侧数据测距计算结果; $D_{NF40}, D_{NF50}, D_{NF60}, D_{NF70}$ 分别为差动动作后 40 ms, 50 ms, 60 ms, 70 ms 作为数据窗末端的对侧数据测距计算结果。

表 5 为分段处理的自适应优选数据窗实用算法,按照序号依次进行相应条件判断,如果满足条件则输出测距结果,根据 $|D_{MF20}|$ 大小分段处理,输出相应测距结果 D_F 。

表 5 分段处理的自适应优选数据窗实用算法

Table 5 A practical algorithm of segmented adaptive optimization data window

序号	判断条件	测距结果 D_F	
		若 $ D_{MF20} > 0.4D_L$	若 $ D_{MF20} \leq 0.4D_L$
1	$M > 0.2D_L$ 或 $\ D_{MF40} - D_{MF20}\ > M$ 或 $\ D_{NF40} - D_{NF20}\ > M$	$ D_{MF20} $	$D_L - D_{NF20} $
2	$\ D_{MF50} - D_{MF30}\ > M$ 或 $\ D_{NF50} - D_{NF30}\ > M$	$\frac{ D_{MF30} + D_{MF20} }{2}$	$D_L - \frac{ D_{NF30} + D_{NF20} }{2}$
3	$\ D_{MF60} - D_{MF40}\ > M$ 或 $\ D_{NF60} - D_{NF40}\ > M$	$\frac{ D_{MF40} + 2 D_{MF30} + D_{MF20} }{4}$	$D_L - \frac{ D_{NF40} + 2 D_{NF30} + D_{NF20} }{4}$
4	$\ D_{MF70} - D_{MF50}\ > M$ 或 $\ D_{NF70} - D_{NF50}\ > M$	$\frac{ D_{MF50} + 2 D_{MF40} + D_{MF30} }{4}$	$D_L - \frac{ D_{NF50} + 2 D_{NF40} + D_{NF30} }{4}$
5	判别至此则直接输出测距结果	$\frac{ D_{MF60} + 2 D_{MF50} + D_{MF40} }{4}$	$D_L - \frac{ D_{NF60} + 2 D_{NF50} + D_{NF40} }{4}$

通过此方法判别,一方面使得数据窗尽可能选取趋于稳定的波形;另一方面,通过本侧、对侧计算结果变化量判别,配合自适应门槛,更加可靠地选取故障切除前的数据窗。同时,通过故障区间分段处理,避开了直接计算结果接近0的区段,降低测距误差,提升了测距准确性。

3.3 改进算法验证

同样用上述正交试验进行验证,对因素Ⅲ选用2种数据窗选取方式进行对比,水平1和水平3选用分段处理的自适应优选数据窗实用算法(方式一);水平2和水平4选用固定数据窗算法(方式二),即保护动作后30 ms,假设保护动作时间为10 ms。通过仿真计算得到集中参数双端测距结果及绝对误差结果。正交试验设计正交表 $L_{16}(4^4)$ 及对比试验结果如表6所示。

表6 试验设计正交表及对比试验结果
Table 6 Experiment design orthogonal table and comparison of the experimental results

试验序号	因素水平值				测距结果/km	测距误差绝对值/km
	因素 I	因素 II	因素 III	因素 IV		
1	1	1	方式一	1	1.204	1.204
2	1	2	方式二	2	30.406	0.406
3	1	3	方式一	3	49.961	0.039
4	1	4	方式二	4	90.814	0.814
5	2	1	方式二	3	52.121	2.121
6	2	2	方式一	4	90.670	0.670
7	2	3	方式二	1	0.580	0.580
8	2	4	方式一	2	28.799	1.201
9	3	1	方式一	4	90.344	0.344
10	3	2	方式二	3	50.330	0.330
11	3	3	方式一	2	29.587	0.413
12	3	4	方式二	1	2.433	2.433
13	4	1	方式二	2	31.230	1.230
14	4	2	方式一	1	0.612	0.612
15	4	3	方式二	4	89.463	0.537
16	4	4	方式一	3	49.897	0.103

通过试验结果计算方式一与方式二测距误差绝对值的总均值与总极差,计算结果如表7所示。

表7 对比试验均值计算结果
Table 7 Mean calculation results of the contrast experiment km

数据窗选取方法	总均值	总极差
方式一	0.573	1.165
方式二	1.056	2.103

通过验证可知,相比于传统的固定数据窗算

法,改进算法的测距误差总均值大约缩小了一半,总极差也大约缩小了一半,说明改进算法受各因素影响程度大幅减小。

4 结语

文中针对220 kV的100 km双侧电源输电线路这一典型模型进行集中参数双端测距误差影响因素研究,针对实际工程中普遍出现的4个主要影响因素,通过正交试验设计方法以及仿真计算得到测距绝对误差,利用均值与极差分析方法,对比不同因素对测距绝对误差的影响程度,发现数据窗选取这一因素的总体影响程度最大,同时发现,相比于其他故障点位置,线路首端故障的测距误差受影响较大。

根据这2个特征,提出一种实用改进算法,一方面,将线路首端故障与其他故障位置进行区分,进行分段处理,另一方面,采用改进算法进行自适应数据窗选取,得出一种改进的双端测距综合计算方法。经验证,改进算法的测距绝对误差受影响因素影响程度总体上大幅降低,该方法可提升输电线路故障测距的准确性及普适性。

参考文献:

- [1] 赵青春,徐晓春,陆金凤,等. 基于可信度加权的线路故障测距方法[J]. 电力工程技术,2019,38(2):163-168.
ZHAO Qingchun, XU Xiaochun, LU Jinfeng, et al. Fault location method for transmission line based on the weighting of reliability [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(2): 163-168.
- [2] 陈军,张丽,南东亮,等. 高压线路保护故障测距工程应用分析[J]. 四川电力技术,2016,39(1):54-57,86.
CHEN Jun, ZHANG Li, NAN Dongliang, et al. Application analysis on fault location of high-voltage line protection[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2016, 39(1): 54-57, 86.
- [3] 闫红艳,高艳丰,王继选,等. 同杆双回线路行波故障测距的关键问题研究[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(4):120-128.
YAN Hongyan, GAO Yanfeng, WANG Jixuan, et al. Research on key problems of traveling wave location of double-circuit lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 120-128.
- [4] 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's traveling wave detection[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(5): 120-127.
- [5] 付华,刘公权,邢亮. 基于同步挤压小波变换的故障行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(2):18-24.

- FU Hua, LIU Gongquan, XING Liang. Fault traveling wave ranging method based on synchrosqueezing wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 18-24.
- [6] 尹丽菊, 于毅, 咸日常, 等. 基于无监督学习的交叉互联电缆行波测距方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(4): 89-94, 100.
- YIN Liju, YU Yi, XIAN Richang, et al. Traveling wave ranging method for cross-bonded cable based on unsupervised learning[J]. Smart Power, 2021, 49(4): 89-94, 100.
- [7] 张安安, 周志通, 庄景泰, 等. 基于行波瞬时振幅的高压直流输电线路故障测距方法研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(2): 78-84.
- ZHANG An'an, ZHOU Zhitong, ZHUANG Jingtai, et al. Fault location method of HVDC transmission line based on traveling wave instantaneous amplitude[J]. Smart Power, 2020, 48(2): 78-84.
- [8] 顾婷. 基于双端行波法的多端输电线路故障测距研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
- GU Ting. Research on fault location of multi-terminal transmission line based on double terminal traveling wave method[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2017.
- [9] 雷明, 秦琴, 陈玉林, 等. 混接线路继电保护行波测距一体化装置研究[J]. 山东电力技术, 2020, 47(3): 29-34.
- LEI Ming, QIN Qin, CHEN Yulin, et al. Research on integrated device of relay protection and traveling wave fault location for hybrid transmission lines[J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(3): 29-34.
- [10] 王占辉, 胡宝, 朱献周, 等. 一种基于信号耦合的行波测距测试方法[J]. 电工电气, 2020(10): 69-71.
- WANG Zhanhui, HU Bao, ZHU Xianzhou, et al. A traveling wave ranging measurement method based on signal coupling[J]. Electrotechnics Electric, 2020(10): 69-71.
- [11] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- GE Yaozhong. Principle and technology of new relay protection and fault location[M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007.
- [12] 李跃, 郑涛, 文安. 基于单端量的超高压交流输电线路单相接地故障测距方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 27-33.
- LI Yue, ZHENG Tao, WEN An. A new location method for UHV AC transmission lines with high resistance faults based on single terminal volume[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 27-33.
- [13] 赵冠琨, 贾科, 陈金锋, 等. 基于断路器重合闸的柔性直流输电线路单端故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 48-56.
- ZHAO Guankun, JIA Ke, CHEN Jinfeng, et al. A single terminal fault location method for a DC transmission line based on circuit breaker reclosing[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 48-56.
- [14] 李澄, 邵亮. 基于故障分量计算的高压长线故障测距方法研究[J]. 电气工程学报, 2020, 15(3): 113-119.
- LI Cheng, SHAO Liang. Research on high voltage long line fault location method based on fault component calculation[J]. Journal of Electrical Engineering, 2020, 15(3): 113-119.
- [15] 王海港, 谢民, 孙月琴, 等. 输电线路双端故障测距时域算法实用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 142-147.
- WANG Haigang, XIE Min, SUN Yueqin, et al. Practical study on transmission line two terminal time-domain fault location method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 142-147.
- [16] 尹慧阳, 舒恋, 郑元. 一种不受线路参数影响的双端故障测距算法[J]. 电气应用, 2018, 37(7): 50-53, 58.
- YIN Huiyang, SHU Lian, ZHENG Yuan. A double-terminal fault location algorithm not influenced by line parameters[J]. Electrotechnical Application, 2018, 37(7): 50-53, 58.
- [17] 于慧春, 殷勇, 李欣, 等. 正交试验设计中正交表的特点及正交的意义浅析[J]. 农产品加工, 2020(5): 91-92, 97.
- YU Huichun, YIN Yong, LI Xin, et al. Analysis of the characteristics and the orthogonal significance of the orthogonal table in orthogonal experimental design[J]. Farm Products Processing, 2020(5): 91-92, 97.
- [18] 卢桂英, 何建国. 正交设计试验法在分离分析中的应用概述[J]. 科学家, 2017, 5(5): 29-30.
- LU Guiying, HE Jianguo. Application of orthogonal design test method in separation and analysis[J]. Scientist, 2017, 5(5): 29-30.
- [19] 余凤. 正交试验法浅析[J]. 科技展望, 2016, 26(34): 92, 94.
- SHE Feng. Analysis of orthogonal experiment[J]. Science and Technology, 2016, 26(34): 92, 94.
- [20] 庞善起, 鹿姗姗. 正交表的构造方法及 Matlab 实现[J]. 中国卫生统计, 2017, 34(2): 364-367.
- PANG Shanqi, LU Shanshan. Orthogonal table construction method and Matlab implementation[J]. Chinese Journal of Health Statistics, 2017, 34(2): 364-367.
- [21] 陈利艳. 正交表交互作用列矩阵象判别法的应用[J]. 安阳工学院学报, 2019, 18(6): 92-94.
- CHEN Liyan. Application of the matrix image discriminant method for the interaction of orthogonal arrays[J]. Journal of Anyang Institute of Technology, 2019, 18(6): 92-94.
- [22] 杨雪. 分层叠加技术在平衡区组正交表中的适用性研究[J]. 现代电子技术, 2016, 39(3): 98-100.
- YANG Xue. Applicability of layering and superposition technology in balanced block orthogonal table[J]. Modern Electronics Technique, 2016, 39(3): 98-100.
- [23] 李雪阳, 江世永, 飞渭, 等. 高韧性水泥基复合材料强度尺寸效应试验研究与正交分析[J]. 中国材料进展, 2017, 36(6): 473-478.
- LI Xueyang, JIANG Shiyong, FEI Wei, et al. Experimental study and orthogonal analysis of strength size effect of high toughness cementitious composite[J]. Materials China, 2017, 36(6): 473-478.

- [24] 徐峰祥,田轩屹. 基于正交表的前纵梁拼焊板安全性设计[J]. 汽车工程,2017,39(2):237-242.
XU Fengxiang, TIAN Xuanyi. Safety design of TWB front side rail based on orthogonal array [J]. Automotive Engineering, 2017, 39(2): 237-242.
- [25] 陈志航,杨彤,蔡元浩. 基于正交分析空调器性能影响因素的研究[J]. 家电科技,2018(12):62-65.
CHEN Zhihang, YANG Tong, CAI Yuanhao. Research on factors affecting performance of air-conditioner based on orthogonal analysis [J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2018(12): 62-65.
- [26] 贾骥业,张文静,张鸿飞,等. 基于往复流风冷的动力电池热仿真正交分析[J]. 汽车实用技术,2020(5):181-186,189.

JIA Jiye, ZHANG Wenjing, ZHANG Hongfei, et al. Orthogonal analysis of thermal simulation of power lithium battery based on reciprocating flow air cooling [J]. Automotive Practical Technology, 2020(5): 181-186, 189.

作者简介:



张灏

张灏(1989),男,硕士,工程师,从事电力系统继电保护研发工作(E-mail: hao-zhang@sac-china.com);

薛明军(1983),男,硕士,高级工程师,从事电力系统继电保护研发工作;

王学超(1978),男,硕士,高级工程师,从事智能变电站保护与控制相关工作。

A two-terminal fault location algorithm based on segmented processing of optimal data window

ZHANG Hao^{1,2}, XUE Mingjun^{1,2}, WANG Xuechao^{1,2}, YANG Liming^{1,2}, LI Yuping^{1,2}, CHEN Fufeng^{1,2}

(1. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 211153, China;

2. Nanjing SAC Power Grid Automation Co., Ltd., Nanjing 211153, China)

Abstract: The two-terminal fault location theory based on the lumped parameter model is widely used in transmission line protection. For short and medium distance transmission lines, the model error is negligible. However, there are still other factors that affect the ranging results. It is easy to produce large error if the fault is removed in a very short time. In order to improve the accuracy and universality of ranging, the absolute error of the two-terminal fault location algorithm based on the lumped parameter model under the common influencing factors is analyzed. By using orthogonal experiment design and simulation calculation, the influence degree of different influencing factors on ranging error is compared. It is found that data window selection is the most influential factor. Besides, the ranging error of the proximal fault of the line, compared to other places, is greatly affected by the influencing factors. According to the two features, a practical algorithm of adaptive optimal data window based on segmented processing is proposed. By verification, the influence of ranging error calculated by the improved algorithm is greatly reduced.

Keywords: two-terminal fault location; line protection; error analysis; orthogonal experimental design; data window; segmented processing

(编辑 方晶)