

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

许 飞,董新洲,王 宾,施慎行

(清华大学 电机系 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室,北京 100084)

摘要: 针对原有的组合测距方法中阻抗法测距精度较低、划定故障范围较大而导致可能出现精确行波测距失败的问题,提出采用基于分布参数模型的阻抗法配合行波法构成新型单端组合测距算法,进而在高精度故障录波与测距系统硬件平台上实现了所提出的方法,并用 RTDS 和暂态行波保护测试仪对该方法进行了系统的测试检验。测试结果表明,所提故障测距方法在测距精度、测距稳定性和鲁棒性等方面都有了提高。最后分析了所提方法产生误差的原因。

关键词: 输电线路; 故障测距; 行波; 暂态行波保护; 高精度故障录波与测距装置

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.04.007

0 引言

故障录波与测距装置实时监视电网运行工况,高压输电线路发生故障后,迅速准确地确定故障点,利于及时修复线路,保证供电可靠性,对电力系统的安全稳定和经济运行有重要的作用。故障测距从所使用的测量信息角度,可以分为单端法与双端法 2 种,双端测距法对线路两端变电站之间的通信设备要求较高,并且需要两端测量装置的数据之间满足严格同步的要求,因此研究和发展基于单端电气量的故障测距算法对于电力系统安全稳定性的提高和建设成本的降低都有必要的意义。

基于单端电气量的故障测距算法,又可以分为基于行波波头时间差的行波测距方法以及基于线路电压电流阻抗关系的故障分析法。经过许多学者的研究和现场反馈^[1],目前单独基于行波的测距法测距精度较高,但受到高频干扰以及过零点故障等因素的影响,稳定性较差;而故障分析法主要基于故障后稳态过程的工频电气量分析,故障测距稳定,但是受到单端电气量阻抗方法原理上的限制,在各种近似计算中,不可避免地产生了种种误差,因此测距精度不高。鉴于此,有学者提出了将 2 种方法进行结合的组合测距算法^[14],并基于此研制出了硬件平台^[2]。本文利用改进的阻抗测距算法构建新型的单端电气量组合测距方法,并利用硬件平台装置进行了实现;进而搭建了完整的仿真测试模型以及测试系统进行了整体试验,测试结果验证了该算法。

收稿日期:2013-05-07;修回日期:2014-03-03

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(50937003);国家自然科学基金重大国际合作项目(51120175001)

Project supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China(50937003) and the Key International Cooperation Program of National Natural Science Foundation of China(51120175001)

1 单端电气量组合故障测距法原理

1.1 传统单端组合测距法原理

经典阻抗法^[5]基于阻抗继电器原理,已广泛用作各种电压等级的高压输电线路主保护或后备保护,也被实质性地应用于所有的故障测距中。但是受过渡电阻、电流互感器饱和等因素的影响,阻抗法从理论上不可能取得很高的测距精度。为了提高该方法的精度,许多修正算法被提出,但是这些方法都是针对具体的情况提出的,在某些故障情况下可以取得令人满意的结果,但在其他情况下可能给出错误测距结果。因此,具有较高精度,且不受过渡电阻和系统运行方式影响的行波测距方法得到了越来越多的应用和关注。在 20 世纪 40 年代末就有学者提出了 A 型、B 型、C 型、D 型这 4 种行波测距方法并研制出了相应的装置^[6-7]。随着微机技术的成熟,在 1996 年,文献[8]首次提出了利用小波变换的方法进行行波分析与波头提取,并成功应用于输电线路行波故障测距中。但是单纯的行波测距仍然存在可靠性和稳定性不足的问题^[3,9-11]。

针对此问题,出现了同时利用单端阻抗法和单端行波法的组合故障测距算法。传统的单端量组合测距方法利用经典阻抗测距法以及单端行波测距方法进行故障点定位。在这一算法中,利用阻抗法测距的稳定性和鲁棒性^[12]对故障区间进行定位,再利用行波法进行精确测距,最终的测距结果是阻抗法和行波法综合的结果。组合法中所利用的传统单端阻抗算法原理简述如下^[5]。

以双电源供电单相电路短路故障为例进行说明,如图 1 所示。图中, U_m 为 m 侧母线测量电压相量; U_n 为 n 侧母线测量电压相量; F 为故障点; R_F 为故障点过渡电阻; D_{mF} 为故障点距 m 端测量端故障距离;

Z 为线路单位长度阻抗; z_{ms} 、 z_{ns} 分别为 m 、 n 侧母线背侧系统阻抗; I_F 为故障支路电流相量; I_m 为 m 端测量电流相量; I_n 为 n 端测量电流相量。

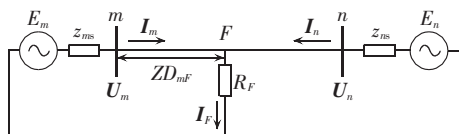


图 1 单相电路接地故障示意图

Fig.1 Schematic diagram of single-phase grounding fault

由于故障支路电流未知,通常利用测量端故障电流分量代替,可得 m 端测量阻抗表达式为:

$$Z_m = ZD_{mf} + \frac{R_F}{C_m} \frac{I_{mg}}{I_m e^{j\gamma_m}} \quad (1)$$

其中, Z_m 为 m 端测量阻抗; I_{mg} 为 m 端测量电流故障分量; C_m 为故障电流分布系数实数部分;故障电流分布系数的角度 γ_m 由故障点两侧的综合阻抗角决定,在计算中近似取为 0° 。将式(1)分解实部、虚部,并利用线路阻抗角 φ_L 已知的条件,取虚部等式,可以得到:

$$\begin{cases} xD_{mf} = X_m - \frac{R_m \tan \varphi_L - X_m}{a \tan \varphi_L - b} b \\ a = \operatorname{Re} \frac{I_{mg}}{I_m} \\ b = \operatorname{Im} \frac{I_{mg}}{I_m} \end{cases} \quad (2)$$

其中, x 为单位长度电抗; X_m 为测量电抗; R_m 为测量电阻; φ_L 为线路阻抗角; D_{mf} 即为所求的故障距离。

传统组合测距法中的单端行波测距原理为利用故障后的初始行波波头和故障点反射波波头时间差进行测距^[13],故障测距表达式为:

$$D'_{mf} = \frac{v(t_1 - t_2)}{2} \quad (3)$$

其中, D'_{mf} 为行波故障测距结果; v 为波速; t_1 、 t_2 分别为初始波头、故障点反射波头到达测量点的绝对时间。

从上述原理中可以看出以下 2 点。

a. 在上述的阻抗测距算法中有很多近似环节。例如对于特高压长距离输电线路,分布电容不可以忽略;上述算法中电流分布系数的角度近似取为 0° ,而实际情况其并不等于 0° ,因此这种近似也会产生误差;在故障点过渡电阻较大的情况下,该算法的故障测距精度也将受到严重影响。

b. 在组合测距方法中,由于故障点反射波头位置受到线路系统结构以及线路传播特性的影响,在传统阻抗测距方法确定的故障误差范围内,可能出现多个行波测距结果,导致高精度组合测距法失效。造成这种情况的主要原因在于传统阻抗测距法精度较低,基于此确定的故障范围过大。故尝试采用改进的单端阻抗测距方法与行波法结合,利用更加稳定和

精确的阻抗测距方法对行波测距结果进行更有效的选择。

1.2 改进单端组合测距法原理

为了进一步提高阻抗法测距的可靠性、稳定性以及测距精度,采用基于分布参数模型的改进阻抗测距算法,以单相接地为例,简单介绍该算法如下^[14-15,17]。

图 2 为特高压交流输电线路单相接地故障和短路故障示意图。

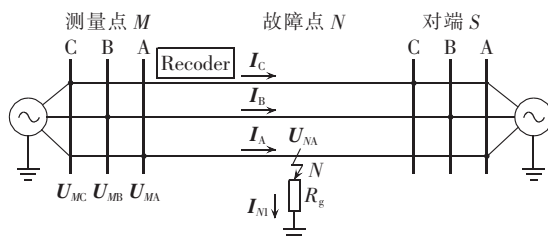


图 2 特高压交流输电线路单相接地故障示意图

Fig.2 Schematic diagram of single-phase grounding fault in UHVAC transmission system

采用分布参数模型分析故障, N 点发生 A 相接地故障时边界条件为:

$$\begin{aligned} I_{N0} &= I_{N1} = I_{N2} \\ U_{N1} + U_{N2} + U_{N0} &= U_{NA} = 3I_{N0}R_g \end{aligned} \quad (4)$$

其中, I_{N0} 、 I_{N1} 、 I_{N2} 分别为故障点电流零序、正序、负序分量; U_{N0} 、 U_{N1} 、 U_{N2} 分别为故障点 N 的电压零序、正序、负序分量; R_g 为故障点过渡电阻; U_{NA} 为 A 相故障点电压。通过故障点边界条件式(4)以及基于分布参数模型下,线路上任意两点间电压、电流关系,可以得到 A 相电压测量相量为:

$$U_{MA} = 3I_{N0}R_g \operatorname{ch} r_1 l + (I_{MA} + PI_{M0})Z_{c1} \operatorname{th} r_1 l \quad (5)$$

$$P = \frac{Z_{c0}}{3Z_{c1}} \frac{T \operatorname{ch} r_1 l + \operatorname{sh} r_0 l - T \operatorname{ch} r_0 l}{\operatorname{sh} r_1 l_k} - 1 \quad (6)$$

$$T = \frac{U_{M0}}{I_{M0}Z_{c0}} \quad (7)$$

依据文献[16]可知:

$$\begin{aligned} I_{N0} &= I_{N0} \angle \varphi_{N0}, \quad I_{N2} = I_{N2} \angle \varphi_{N2} \\ I_{M2} &= I_{M2} \angle \varphi_{M2} \\ \varphi_{N0} &= \varphi_{N2} \approx \varphi_{M2} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, I_{N0} 、 I_{N2} 、 I_{M2} 和 φ_{N0} 、 φ_{N2} 、 φ_{M2} 分别为对应电流的幅值、相角; U_{MA} 为 A 相测量电压; r_1 为线路正序传播常数; r_0 为线路的零序传播常数; l 为故障距离; Z_{c0} 为零序阻抗; Z_{c1} 为正序阻抗; U_{M0} 、 I_{M0} 分别为母线零序电压、电流; I_{M2} 为测量端负序电流。

当测量点负序电流过零时,式(5)中瞬时 U_{MA} 中含过渡电阻的项为 0,可采用搜索法计算式(5)中的 $(I_{MA} + PI_{M0})Z_{c1} \operatorname{th} r_1 l$ 的瞬时值,与 U_{MA} 最接近的 l 即为故障距离。针对相间故障的情况下,故障点边界条件与单相接地故障不同,但推导与计算故障距离的方法相同,最终的表达式类似,这里不再赘述。

该方法基于分布参数线路模型,并利用观测点处的负序电流代替零序电流相位的方法,首先避免了基于集中参数模型的方法中,由于忽略分布电容电流所造成的影响;其次由于单相接地故障时,其零序故障附加网络中零序电流在线路-大地回路中传播,当考虑超高压长距离输电线路时,零序分量回路由于受到大地电阻率的影响,会有较大的畸变和衰减,而负序分量回路是相间回路,因此,理论上可以通过测量端的负序电流相位估计故障支路中的负序电流的相位。通过仿真表明这种估计方法是合理的^[16-17]。因此这种方法能够有效地避免故障点过渡电阻的影响,其测距精度和稳定性比传统的测距方法都要有所提升^[16]。利用这一改进的阻抗测距算法与单端行波测距方法构成新的单端电气量组合测距方法,将提高单端组合法测距的稳定性和精确性。下文将介绍该算法在硬件平台中的实现以及利用测试系统进行测试与验证的结果。

2 装置实现与测试试验研究

2.1 新型组合测距法装置实现简介^[1-2]

利用自主研发的故障录波与测距硬件平台实现所提出的新型单端电气量组合测距算法。下面对该装置进行简要介绍。测距系统装置硬件主要有前置机、后台工控机、电力系统同步时钟、打印机等几个部分。其中前置机是主要的功能模块,实现故障监测、启动录波以及上传录波数据等重要功能。前置机内包括稳态/暂态电流互感器和电压互感器板卡、稳态电压/电流采集板卡、暂态电压/电流采集板卡等,可以实现工频电压、电流数据 1~5 kHz 采样录波,暂态电压、电流量 1 MHz 采样录波。后台工控机用于故障数据分析和处理。装置整体结构如图 3 所示。

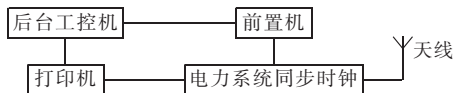


图 3 高精度故障录波与测距系统装置示意图
Fig.3 Schematic diagram of high-precision fault recording and locating system

前置机中工频采集板卡工作流程如图 4 所示,行波采集板卡工作流程如图 5 所示,后台软件处理流程图如图 6 所示。

2.2 测试方案与测试系统介绍

依据电力行业标准^[18],首先利用 RTDS 针对改进单端量工频测距算法进行了试验。进一步利用暂态行波保护测试仪^[19]与功放系统提供的行波测试平台,对包含行波测距算法的新型单端电气量组合测距方法进行了测距的可靠性和准确性的验证。下面简单介绍暂态行波测试仪。

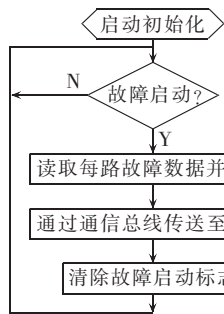


图 4 暂态行波采集板主程序流程
Fig.4 Flowchart of main program of traveling-wave acquisition board

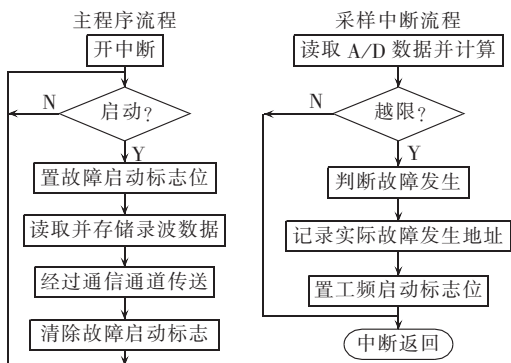


图 5 工频板主程序及采样中断流程图
Fig.5 Flowchart of main program and sampling interrupt of power-frequency board

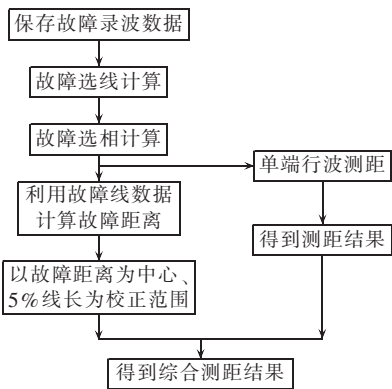


图 6 后台处理软件流程图
Fig.6 Flowchart of background processing software

暂态行波保护测试仪主要包括运行在 PC 机上的高性能数字仿真器以及与之相连接的信号转换与接口装置。数字仿真系统由计算机和相应的分析计算、控制管理程序构成,其作用是进行暂态计算、对整套装置的转换和试验进行控制。信号转换与接口单元主要由高速数模转换电路、继电器测试电路与装置保护电路、功率放大电路三部分硬件组成。

仿真计算上位机、测试仪信号系统和功率放大系统组成的测试平台系统示意图如图 7 所示。

上位机采用数字技术,利用通用电磁暂态仿真程序(EMTP/ATP)模拟计算电力系统故障暂态过程并生成电力系统故障数据。通过数模转换电路以及功

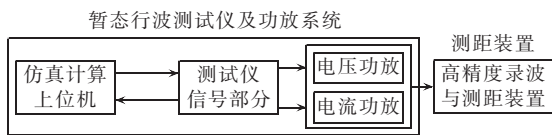


图 7 暂态行波保护测试仪测试系统整体示意图

Fig.7 Overall diagram of test system for transient traveling-wave based protections

率放大系统输入被测试装置。具体仿真模型见 2.3 节。

2.3 仿真模型搭建

对于改进的工频测距方法,首先利用 RTDS 测试平台对改进的工频测距算法进行测试。建立 RTDS/RSCAD 模型,模型的结构与参数按照电力行业测试标准^[20],采用的模拟系统为 500 kV 双侧电源系统,输电线长度为 400 km。分别针对末端、中点、首端故障,以及纯金属性接地和经过过渡电阻接地等不同情况下,对新算法和原有算法进行了测试比较。仿真模型结构如图 8 所示,被测装置装于 L 侧。故障点 K_1 、 K_2 、 K_3 分别对应末端(故障距离 400 km)、中点故障(故障距离 200 km)、首端故障(故障距离 0 km),模型参数如表 1 所示。

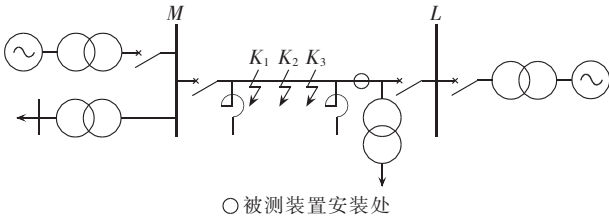


图 8 DL/T663—1999 标准输电线路故障测距 RTDS 模型

Fig.8 RTDS model of transmission line proposed by DL/T663-1999 standard for fault location

表 1 标准模型线路参数

Tab.1 Line parameters of standard model

序别	电阻/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	感抗/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	容抗/($\text{M}\Omega \cdot \text{km}$)
正序	0.018	0.28	0.236 76
零序	0.160	0.75	0.350 50

2.4 试验结果

利用上述硬件平台针对 RTDS 实验的各种故障情况进行录波和测距,得到改进阻抗测距试验结果如表 2—4 所示。

通过比较可以看出,采用改进的阻抗测距算法,相比较原始的阻抗测距算法,在测距精度、测距稳定性和鲁棒性等方面都有了提高。利用暂态行波保护测试仪与功放输出系统,对新的组合测距方法进行了试验,针对上述的模型,在故障距离分别为 50 km、75 km、100 km、150 km、175 km 以及 200 km 处的情况进行了仿真以及测试,几组具有代表性的试验结果见表 5。

2.5 试验现象总结分析

根据上面的试验结果可以看出,改进阻抗方法的测距精度和稳定性相比传统阻抗测距方法都有所

表 2 K_1 点故障

Tab.2 Fault at K_1

故障类型	改进算法		原始阻抗算法	
	测距结果/km	误差/%	测距结果/km	误差/%
AG	380	5.00	347.9	13.020
AB	390	2.50	377.7	5.570
BC	387	3.25	357.0	10.750
CA	381	4.75	351.7	12.070
ABG	384	4.00	366.0	8.500
BCG	381	4.75	357.8	10.550
CAG	400	0	374.9	6.280
ABCG	400	0	364.5	8.875
ABG(10 Ω)	391	2.25	374.1	6.480
BCG(10 Ω)	389	2.75	355.2	11.200
CAG(10 Ω)	400	0	391.1	2.225

表 3 K_2 点故障

Tab.3 Fault at K_2

故障类型	改进算法		原始阻抗算法	
	测距结果/km	误差/%	测距结果/km	误差/%
CG	208	4.00	178.1	10.95
ABG	203	1.50	189.1	5.45
BCG	205	2.50	188.9	5.55
CAG	201	0.50	181.3	9.35
AB	199	0.50	180.6	9.70
BC	204	2.00	183.1	8.45
CA	199	0.50	188.4	5.80
AG(10 Ω)	198	1.00	185.1	7.45
BG(10 Ω)	189	5.50	211.7	5.85
CG(10 Ω)	191	4.50	173.2	13.40
ABG(10 Ω)	205	2.50	187.9	6.05
BCG(10 Ω)	205	2.50	193.7	3.15
CAG(10 Ω)	204	2.00	186.1	6.95

表 4 K_3 点故障

Tab.4 Fault at K_3

故障类型	改进算法		原始阻抗算法	
	测距结果/km	误差/km	测距结果/km	误差/km
AG	0	0	0.081 0	0.081 0
BG	0	0	0	0
CG	0	0	0.006 0	0.006 0
ABG	0	0	0.011 2	0.011 2
BCG	0	0	0.012 0	0.012 0
CAG	0	0	0.013 0	0.013 0
AB	0	0	0.009 0	0.009 0
BC	0	0	0.045 0	0.045 0
CA	0	0	0.008 0	0.008 0
ABC	0	0	0	0
AG(10 Ω)	0	0	0.297 0	0.297 0
BG(10 Ω)	4	4	10.490 0	10.490 0
CG(10 Ω)	3	3	3.095 0	3.095 0
ABG(10 Ω)	0	0	0.022 0	0.022 0
BCG(10 Ω)	0	0	0.043 0	0.043 0
CAG(10 Ω)	0	0	0.003 0	0.003 0

提高,因此在新的测距方法中,由新阻抗测距方法确定的测距范围内,通过行波测距方法可以更加唯一和准确地定位故障距离。通过表 5 可以看出,在几种典型的故障距离、故障方式和过渡电阻的情况下,新的单端量组合测距方法基本不受影响,误差分析保持在 0.2% 以下,误差距离小于 100 m。

表 5 新型组合测距法测距结果

Tab.5 Results of fault location by proposed method

故障类型	故障距离/km	过渡电阻/ Ω	改进工频测距结果/km	行波测距结果/km	测距误差/%
AG	50	0	46	49.90	0.20
ABG	75	10	76	74.92	0.11
AB	100	10	99	100.10	0.10
AB	150	0	145	150.00	0
ABC	175	10	186	175.00	0
ACG	200	0	193	200.00	0

下面从算法原理和实验平台的角度分析其中存在误差的几点原因。

(1) 在所采用的新型阻抗测距算法中,利用的是故障后负序故障分量网络中的负序电流相位对故障支路电流相位进行估算,但由于故障附加电流中包含有高次谐波以及明显的非周期分量,因此在故障发生后的 2~3 个周期之内,相位的估算法存在误差,尤其是在近端故障情况下(如表 4 所示)。

(2) 在母线出口发生短路故障的情况下,由于在测距装置安装处受到系统运行方式的影响,当短路电流过大时,会导致装置出现电流互感器饱和,此时会影响测距,尤其是工频测距方法。

(3) 新型单端组合测距算法测距精度取决于单端行波测距法的结果,而暂态行波保护测试系统中,从测试仪本体到功率放大装置都存在一定的误差环节,对于测试仪本体部分以及功放部分,输出的信号误差原因有以下几方面。

a. 在电路部分,参考电压的稳定性、运算放大器可能存在的零点漂移、电路中模拟开关的导通内阻以及导通压降、所使用的电阻网络中电阻阻值的不精确、所用三极管之间特性的不一致等,都会影响模拟信号输出幅值的精度。

b. 输出频率误差产生的原因为数模转换器以及外部运算放大器需要建立时间,印制电路板设计中的电磁兼容问题也会产生误差。

c. 将小信号放大的电流功放装置的放大倍数也并不是绝对稳定的。为了提高输出的高频信号的质量,功放装置采用了特殊的放大电路,虽然提高了高频大功率器件的频率响应特性,但是仍然会存在一定的误差。

但是上述问题并不会影响暂态行波测试仪的输出行波信号的有效性,因为考虑测距装置硬件平台的采样率和计算精度,上述误差处于可以接受的范围内。

3 结论

a. 提出了将优化单端工频阻抗测距算法与单端行波测距算法结合的新型输电线路单端电气量组合故障测距算法。

b. 将该算法在自主研发的故障录波与测距系统平台上实现,并验证了该算法与硬件平台的兼容性。

c. 利用 RTDS 对新型阻抗测距算法进行了完整系统的试验测试,结果表明改进工频算法的精确度和鲁棒性均有明显提高,并且基本不受分布电容电流和过渡电阻的影响,尤其适用于长距离输电线路。

d. 利用暂态行波保护测试仪与功放系统等搭建了完整的行波测试平台,对新型单端电气量组合测距算法进行了测试,证明了该方法在过渡电阻以及长距离输电线路分布电容影响下,仍然具有较高的精度和稳定性。这说明新型单端电气量组合测距方法比传统组合测距法以及单独的行波测距算法具有更大的优势。

参考文献:

[1] 吴必信,陈冬菊. 综述单端故障测距算法(一)[J]. 电力自动化设备,1995(3):30-34.

[2] 董新洲,葛耀中,徐丙垠,等. 新型输电线路故障测距装置的研制[J]. 电网技术,1998,22(1):19-23.

DONG Xinzhou,GE Yaozhong,XU Bingyin,et al. A new device for fault location of transmission line[J]. Power System Technology, 1998,22(1):19-23.

[3] 董新洲. 高精度故障录波器及其输电线路组合故障测距方法:中国,CN1367392[P]. 2002-09-04.

[4] DONG X,CHEN Z,HE X,et al. Optimizing solution of fault location[C]//Power Engineering Society Summer Meeting. Chicago, IL,USA:IEEE,2002:1113-1117.

[5] 董新洲. 高压输电线路高精度故障录波与测距技术[C]//中国水力发电工程学会继电保护专业委员会成立大会暨学术研讨会. 北京:中国水力发电工程学会,2005:10.

[6] 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,2007:260-265.

[7] STRINGFIELD R F S A. A transmission line fault locator using fault-generated surges[J]. AIEE Transaction Part II,1948,67: 1168-1179.

[8] STRINGFIELD T W,MARIHART D J,STEVENS R F. Fault location methods for overhead lines[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1957,76(5):518-530.

[9] 董新洲. 小波理论应用于输电线路行波故障测距研究[M]. 西安:西安交通大学,1996:1-3.

[10] 余畅,尹项根,曾祥君,等. 基于小波分析的多尺度下综合行波故障定位[J]. 电力自动化设备,2001,21(6):6-9.

YU Chang,YIN Xianggen,ZENG Xiangjun,et al. Fault location based on comprehensive wavelet analysis at different scales[J]. Electric Power Automation Equipment,2001,21(6):6-9.

[11] 蒋涛,陆于平. 不受波速影响的输电线路单端行波故障测距研究[J]. 电力自动化设备,2004,21(12):29-32.

JIANG Tao,LU Yuping. Study of fault locating based on single terminal traveling waves avoiding wave speed influence [J]. Electric Power Automation Equipment,2004,21(12):29-32.

[12] 陈平,徐丙垠,李京,等. 现代行波故障测距装置及其运行经验[J]. 电力系统自动化,2003,27(6):66-69.

CHEN Ping,XU Bingyin,LI Jing,et al. Modern travelling wave

- based fault locator and its operating experience [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(6): 66-69.
- [13] 郑健超, 陈祥训, 覃剑, 等. 验证小波变换行波故障测距法的现场试验[J]. 电网技术, 2001, 25(3): 26-29.
- ZHENG Jianchao, CHEN Xiangxun, QIN Jian, et al. Field short-circuit test to validate travelling wave fault location using wavelet transform[J]. Power System Technology, 2001, 25(3): 26-29.
- [14] 覃剑, 葛维春, 邱金辉, 等. 输电线路单端行波测距法和双端行波测距法的对比[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(6): 92-95.
- QIN Jian, GE Weichun, QIU Jinhui, et al. Study on single terminal method and double terminal method of travelling wave fault location in transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(6): 92-95.
- [15] CHEN Z, DONG X, LOU C. Robustness of one-terminal fault location algorithm based on power frequency quantities[C]//Power Engineering Society Summer Meeting. Chicago, IL, USA: IEEE, 2002: 1118-1122.
- [16] 董新洲, 葛耀中, 徐丙垠. 利用暂态电流行波的输电线路故障测距研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 77-81.
- DONG Xinzhou, GE Yaozhong, XU Bingyin. Research of fault location based on current travelling waves[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 77-81.
- [17] 董新洲, 王宾. 抗分布电容电流和过渡电阻影响的线路单端故障测距方法; 中国, CN101067641[P]. 2007-11-07.
- [18] WANG Bin, DONG Xinzhou, BO Zhiqian. A novel impedance fault location algorithm for uhv transmission lines[C]//IET 9th International Conference on Developments in Power System Protection, 2008. [S.I.]: IET, 2008: 291-295.
- [19] 王宾, 董新洲, 周双喜, 等. 特高压交流输电线路接地阻抗继电器动作特性分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(14): 25-29.
- WANG Bin, DONG Xinzhou, ZHOU Shuangxi, et al. Analysis of ground impedance relay operation characteristics for UHV AC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(14): 25-29.
- [20] WANG Bin, DONG Xinzhou, BO Zhiqian, et al. Impedance phase faults location algorithm for UHV transmission lines[C]//2008 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Bogota, Colombia: IEEE/PES, 2008: 1-4.
- [21] 电力工业部安全监察与生产协调司. DL/T553—1994 220 kV~500 kV 电力系统故障动态记录技术准则[S]. 北京: 中国电力出版社, 1994.
- [22] 董新洲, 张言苍, 余学文. 暂态行波保护测试仪及其试验方法; 中国, CN1341864[P]. 2002-03-27.
- [23] 电力工业部继电保护标准化技术委员会. DL/T663—1999 220 kV~500 kV 电力系统故障动态记录装置检测要求[S]. 北京: 中国电力出版社, 1999.

作者简介:



许 飞(1987-), 男, 江苏泰兴人, 博士研究生, 研究方向为电力系统输电线路高精度故障测距 (E-mail: f-xu09@mails.tsinghua.edu.cn)。

Combined single-end fault location method of transmission line and its experiments

XU Fei, DONG Xinzhou, WANG Bin, SHI Shenxing

(State Key Lab of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments,
Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Aiming at the possible failure of present combined fault location method due to the low locating precision and large fault area division of its impedance method, an improved single-end fault location method is proposed, which combines the impedance method based on distributed parameter model and the traveling wave method together. It is implemented on the hardware platform of high-precision fault recording and locating system. Tests are carried out on the RTDS test platform and by the test device of traveling-wave based protections. Results show that, the proposed method has better locating precision, stability and robustness. The causes of its locating error are analyzed.

Key words: transmission line; electric fault location; traveling wave; transient traveling-wave based protection; high-precision fault recording and locating device