

基于分布参数模型的互联电力系统输电线路故障定位

刘晓琴, 李强, 孙海军, 刘璐

(辽宁石油化工大学 信息与控制工程学院, 辽宁抚顺 113001)

摘要: 提出了一种适用于含 n 母线的通用互联电力系统架空输电线路单端故障定位方法。对故障输电线路采用高精确度的分布参数模型,而对电力系统则采用考虑其内部连接特性的二端口戴维宁等效网络模型,从而实现较高的故障定位精度。利用MATLAB/simulink仿真平台模拟11母线互联电力系统,获得暂态故障数据并进行了测试。测试结果表明,对各种故障条件下的故障距离估计精度高,对近端母线阻抗误差敏感,而对远端母线阻抗误差 insensitive。

关键词: 故障定位; 输电线路; 分布参数; 单端测量; 电力系统

中图分类号: TM77

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1672-6952.2020.03.016

Distributed Parameter Model-Based Fault Location Method for Transmission Lines in Interconnected Power Systems

Liu Xiaoqin, Li Qiang, Sun Haijun, Liu Lu

(School of Information and Control Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun Liaoning 113001, China)

Abstract: A single terminal fault location method for overhead transmission lines in general interconnected power system with n -bus was proposed. High accuracy in fault location was achieved by using both an accurate distributed parameters model for the faulted transmission line, and a two-bus Thevenin equivalent network model for the power system that accurately accounted for its inter connectivity. The method was tested by using transient fault data obtained from MATLAB simulations of an 11-bus interconnected power system. The results show that the method is capable of estimating the fault distance with high accuracy for various fault conditions. And it is sensitive to errors in the value of the local bus impedance, but insensitive to errors in the value of the remote bus impedance.

Keywords: Fault location; Transmission lines; Distributed parameters; One-terminal measurements; Power system

在当今竞争激烈的电力市场中,输电线路故障的准确定位对于电力系统的经济运行具有非常重要的意义。准确可靠的故障定位方法和技术可以减少维护人员巡线工作量,加快故障修复速度,减小停电损失,保障电力系统的安全经济可靠运行。故障分析方法按照输电线路模型分为集中参数模型和分布参数模型;按照定位原理分为利用工频量的传统阻抗法和利用暂态行波的行波法;按照测量电气数据的来源可分为单端法和双端法,利用故障线的一端或双端进行测量。双端方法只要求对故障

传输线进行精确的建模,而不需要任何简化的假设^[1-12],但是需要使用GPS^[9,11]或一些计算技术^[10]在线路两端之间进行时间同步。单端方法不需要线路两端之间的通信^[13-19],却需要对故障传输线和嵌入式学习线路的电力系统进行数学建模分析,通常可以简化分析问题。电力系统模型有关的不确定性以及运行条件的变化,在忽略部分影响因素的前提下,传统单端法的测量精度低于双端法。然而,单端法测量可节省成本,操作简单且易于实现。因此,深入研究单端测量法对电网故障定位技术的发

收稿日期:2019-05-14 修回日期:2020-04-15

基金项目:辽宁省教育厅科学研究经费项目(L2019007)。

作者简介:刘晓琴(1975-),女,博士,副教授,从事电力系统故障诊断方向研究;E-mail:qinbuluoge@163.com。

展具有重要意义。

本文提出一种基于分布参数模型的单端故障定位方法,适用于 n 母线互连电力系统中的架空输电线路。为了提高故障定位精度,该方法采用传输线的精确分布参数模型和电力系统一种双母线等效戴维宁网络模型,并进一步解释了系统的互连性。通过对 11 母线互联电力系统的仿真得到了暂态故障数据,验证该方法的准确性。

1 故障定位方法

考虑一个通用的 n 母线电力系统,在 F 点处发生短路故障,P 母线和 Q 母线通过输电线路相连,一种具有故障传输线的通用 n 母线电力系统如图 1 所示。双母线戴维宁等效网络电力系统如图 2 所示。



图 1 一种具有故障传输线的通用 n 母线电力系统

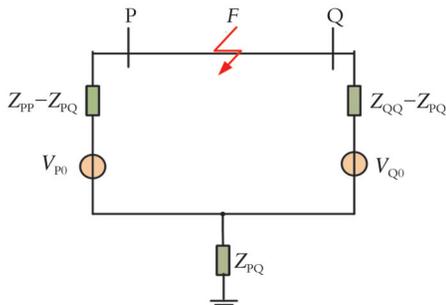


图 2 双母线戴维宁等效网络电力系统

阻抗 Z_{PP} 、 Z_{QQ} 和 Z_{PQ} 是系统正序母线阻抗矩阵 Z_{bus} 的 PP_{th} 、 QQ_{th} 和 PQ_{th} 元素。电压源值 V_{P0} 和 V_{Q0} 分别表示母线 P 和 Q 的故障前正序电压。 Z_{PP} 为局部母线阻抗, Z_{QQ} 为远端母线阻抗。应该注意的是,由于分析时不包含故障线路,且只需要正序等值网络,应将图 2 所示的模型用于电力系统的故障定位研究,两条单母线戴维宁等值网络电力系统如图 3 所示。

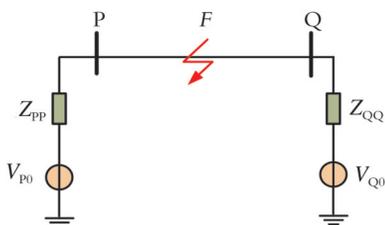


图 3 两条单母线戴维宁等值网络电力系统

图 3 所示的电力系统模型是由两个单母线的戴维宁等值网络组成的,其含义为故障线路是 P 母线和 Q 母线之间的唯一连接线路。同理,如果这条线路被移除,系统将会被分成两部分,这与电力网络中的互联系统的实际情况不一致。因此,利用图 2 的模型更能明确地阐述电力系统的互连性。

文献[17]的电力系统模型采用了双母线戴维宁等值网络模型,故障线路采用了分布式参数模型,但采用了与本文不同的方法。本文采用了一种精确的故障线路分布参数模型,相对于简单的集总参数模型,考虑了并联电容的作用。

1.1 对称故障

假设图 3 中 F 处的故障是三相对称故障,故障线路特性由 A 、 B 、 C 、 D 四个参数来表示,故障线路分布参数模型如图 4 所示。线路总长为 l ,假设在点 F 处发生故障,故障距离为 x 。

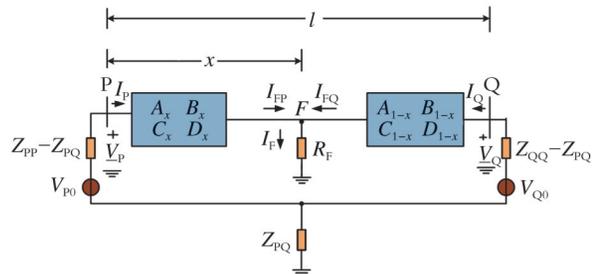


图 4 故障线路分布参数模型

长度为 l 的一般线路的参数为:

$$\begin{cases} A(l) = \cosh(\gamma l) \\ B(l) = Z_C \sinh(\gamma l) \\ C(l) = \frac{1}{Z_C} \sinh(\gamma l) \\ D(l) = \cosh(\gamma l) \end{cases} \quad (1)$$

式中, γ 、 Z_C 分别为线路的传播常数和特征阻抗,其计算公式为:

$$\begin{cases} \gamma = \sqrt{ZY} \\ Z_C = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \end{cases} \quad (2)$$

式中, Z 为直线单位长度的正序列串联阻抗; Y 为线路单位长度的正序并联导纳。故障点 F 处的电压为:

$$V_F = A(x)V_P - B(x)I_P \quad (3)$$

式中, V_P 为故障期间在母线 P 上测量的正序电压, kV; I_P 为故障期间在母线 P 上测量的正序电流, kA。

可知:

$$V_F = R_F I_F \quad (4)$$

式中, R_F 为故障电阻, Ω ; I_F 为故障电流, kA。

把式(3)和式(4)联立可知:

$$A(x)V_p - B(x)I_p = R_F I_F \quad (5)$$

将式(5)的两边乘以 I_F^* (故障电流的共轭复数), 得:

$$[A(x)V_p - B(x)I_p] I_F^* = R_F |I_F|^2 \quad (6)$$

取式(6)两边的虚部, 假设 R_F 是实数, 得:

$$\text{IM} \{ [A(x)V_p - B(x)I_p] I_F^* \} = 0 \quad (7)$$

故障电流 I_F 是未知的, 但可以用故障距离 x 来表示。上述方程组复数根的求解利用了文献[20]提出的方法。

叠加元件电路(纯故障等效电路)如图5所示, 用于计算母线P和Q因线路发生故障引起的电压和电流的变化。

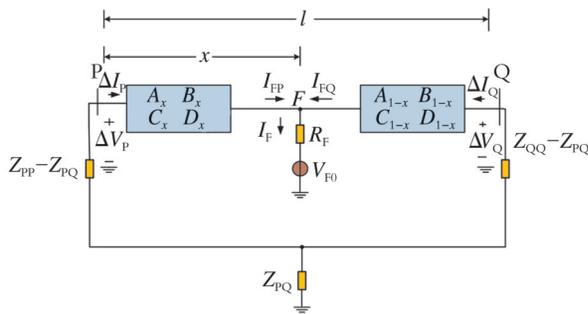


图5 叠加元件电路(纯故障等效电路)

从图5可知:

$$\Delta V_p = V_p - V_{p0} \quad (8)$$

$$\Delta I_p = I_p - I_{p0} \quad (9)$$

式中, V_{p0} 为母线P处的故障前的正序电压, kV; I_{p0} 为母线P处的故障前的正序电流, kA。

$$\Delta I_Q = -\frac{(\Delta V_p + Z_{PP} \Delta I_p)}{Z_{PQ}} \quad (10)$$

$$\Delta V_Q = -(Z_{PQ} \Delta I_p + Z_{QQ} \Delta I_Q) \quad (11)$$

式中, ΔV_p 为母线P处电压的变化; ΔI_p 为母线P处电流的变化; ΔV_Q 为母线Q处电压的变化; ΔI_Q 为母线Q处电流的变化。根据 ΔV_p 和 ΔI_p 和电力系统正序阻抗矩阵中的阻抗参数 Z_{PP} 、 Z_{QQ} 和 Z_{PQ} 来计算电压下降的数值^[21]。

从图5可知, 故障电流 I_F 的计算公式为:

$$I_F(x) = I_{FP}(x) + I_{FQ}(x) \quad (12)$$

式中, I_{FP} 和 I_{FQ} 分别为母线P和Q输入的故障电流, kA。其计算公式为:

$$I_{FP}(x) = -C(x) \Delta V_p + D(x) \Delta I_p \quad (13)$$

$$I_{FQ}(x) = -C(l-x) \Delta V_Q + D(l-x) \Delta I_Q \quad (14)$$

把式(12)~(14)故障电流的值代入到式(2)中, 得到了一个形式为 $f(x)=0$ 的非线性方程, 其中唯一未知的是故障距离 x 。这个方程可以用改进欧拉法、多步法、龙格-库塔法进行数值求解。

1.2 不对称故障

对于不对称故障, 采用三相分布参数模型求解故障线。在该模型中, 线路的 A 、 B 、 C 、 D 参数为 3×3 矩阵。

$$\begin{cases} A(l) = \cosh(\gamma l) \\ B(l) = Z_c \sinh(\gamma l) \\ C(l) = Z_c^{-1} \sinh(\gamma l) \\ D(l) = \cosh(\gamma l) \end{cases} \quad (15)$$

式中, γ 、 Z_c 为 3×3 阶矩阵, 计算公式为:

$$\begin{cases} \gamma = \sqrt{ZY} \\ Z_c = Y^{-1} \sqrt{ZY} \end{cases} \quad (16)$$

式中, Z 、 Y 分别为线路单位长度的串联阻抗矩阵和并联导纳矩阵。

1.2.1 单相接地故障 假设在 F 点处有 a 相接地故障, 给出故障点 F 处的 a 相电压为:

$$V_{Fa} = [1 \ 0 \ 0] [A(x)V_p - B(x)I_p] \quad (17)$$

式中, $V_p = \begin{bmatrix} V_{pa} \\ V_{pb} \\ V_{pc} \end{bmatrix}$ 为故障期间母线P测得三相电压,

$I_p = \begin{bmatrix} I_{pa} \\ I_{pb} \\ I_{pc} \end{bmatrix}$ 为故障期间母线P测得三相电流, kA。

同时给出了故障点 F 处的 a 相电压:

$$V_{Fa} = R_F I_{Fa} \quad (18)$$

通过式(18)得到的 V_{Fa} 值代入式(17), 乘以 I_{Fa}^* , 取双方的虚部, 可得:

$$\text{IM} \{ [1 \ 0 \ 0] [A(x)V_p - B(x)I_p] I_{Fa}^* \} = 0 \quad (19)$$

故障电流 I_{Fa} 的 a 相可以使用图5所示的叠加元件电路和式(10)~(14)以故障距离 x 的形式来表示, 则式(8)和式(9)表示为:

$$\Delta V_p = \frac{1}{2} (\Delta V_{pa} - \Delta V_{pz}) \quad (20)$$

$$\Delta I_p = \frac{1}{2} (\Delta I_{pa} - \Delta I_{pz}) \quad (21)$$

式中, ΔV_{pa} 、 ΔI_{pa} 分别为母线P上因故障引起的 a 相的电压和电流的变化; ΔV_{pz} 和 ΔI_{pz} 分别为母线P上因故障引起的零序电压和电流的变化。这里的变化是指故障期间值的大小和故障前的值大小之间的差异。零序电压和电流由母线P处测量的三相电压和电流来计算。式(19)可以对故障距离 x 进行数值求解。

1.2.2 两相故障 假设在 F 点发生 b 相和 c 相间故障。给出了故障点 F 处 b 相电压和 c 相电压的差值的两种计算公式为:

$$V_{Fb} - V_{Fc} = [0 \quad 1 \quad -1][A(x)V_p - B(x)I_p] \quad (22)$$

$$V_{Fb} - V_{Fc} = R_F I_{Fb} \quad (23)$$

联立式(22)和式(23)乘以 I_{Fb}^* , 然后对两边分别取虚部, 可得:

$$V_{Fb} - V_{Fc} = [0 \quad 1 \quad -1][A(x)V_p - B(x)I_p] \quad (24)$$

同理, b相故障电流 I_{Fb} 可以使用图 5 中叠加元件电路和式(10)~(14)以故障距离 x 的形式来表示, 式(8)和式(9)必须改为:

$$\Delta V_p = \Delta V_{pb} \quad (25)$$

$$\Delta I_p = \Delta I_{pb} \quad (26)$$

式中, ΔV_{pb} 、 ΔI_{pb} 分别为母线 P 上的 b 相电压和电流由于线路故障而产生的变化量。如果输电线路不换位, 则利用 b 相和 c 相电压和电流变化的平均值, 可以得到较好的效果。

$$\Delta V_p = \frac{1}{2}(\Delta V_{pb} - \Delta V_{pc}) \quad (27)$$

$$\Delta I_p = \frac{1}{2}(\Delta I_{pb} - \Delta I_{pc}) \quad (28)$$

式中, ΔV_{pc} 、 ΔI_{pc} 分别为母线 P 由于故障引起的 c 相电压和电流的变化。

1.2.3 两相接地故障 假设在 F 点发生 b 相和 c 相接地故障, 故障点 F 处 b 相电压和 c 相电压的差值

的计算公式同式(22)。两相接地故障和两相间故障不同的是两相接地故障下式(22)的差等于 0。即:

$$[0 \quad 1 \quad -1][A(x)V_p - B(x)I_p] = 0 \quad (29)$$

式(29)可以对故障距离 x 进行数值求解。

2 实验研究

11 母线互联电力系统接线图如图 6 所示。

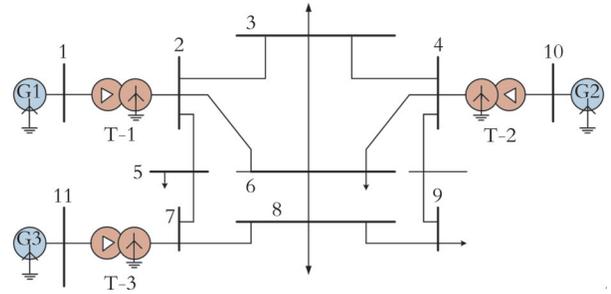


图 6 11 母线互联电力系统接线图

图 6 中 1—11 分别表示系统中不同位置的母线, G1—G3 表示系统中的同步发电机, T-1、T-2、T-3 表示系统中的变压器。该方法测试了故障定位的精度和对电力系统模型参数误差的敏感性。发电机、变压器、输电线路长度及参数和负荷参数见表 1—5。

表 1 发电机组参数

发电机序号	电压幅值/kV	电压相位角/(°)	Z ¹ 阻抗幅值/(Ω·km ⁻¹)	Z ¹ 相位角/(°)	Z ⁰ 阻抗幅值/(Ω·km ⁻¹)	Z ⁰ 相位角/(°)
G1	31.804 17	45.244 5	1.058 0	80	1.110 9	80
G2	28.638 68	13.694 3	0.793 5	80	1.005 1	80
G3	30.538 02	47.179 3	1.322 5	80	0.423 2	80

表 2 变压器组参数

变压器	X ¹ (标么值)
T-1	0.03
T-2	0.04
T-3	0.05

表 4 输电线路导线和接地线参数

参数	导线	接地线
导线半径/m	0.020 345 4	0.005 524 5
直流阻抗/(Ω·km ⁻¹)	0.032 06	2.86 45
下垂驰度/m	10	10

表 3 输电线路长度

线路	长度/km
2-3	100
2-5	50
2-6	150
3-4	130
3-6	130
4-6	200
4-9	230
5-7	140
7-8	120
8-9	160

表 5 负荷参数

母线序号	有功功率/MW	无功功率/MVar
3	150	120
5	120	60
6	140	90
8	110	90
9	80	50

电力系统元件的阻抗数据见表 6。所有变压器均为 100 MVA, 23/230 kV 变压器 11-7 通过标么值为 0.08 的电阻接地。所有的传输线都是不换位的。

表 6 系统元件阻抗数据

系统元件	所连接母线序号	R(标么值)	X(标么值)	1/2B(标么值)
发电机 G1	0,1	0.034 729 635 533 4	0.196 961 550 602 4	0
发电机 G2	0,10	0.026 047 226 650 0	0.147 721 162 951 8	0
发电机 G3	0,11	0.043 412 044 416 7	0.246 201 938 253 1	0
负荷 3	0,3	0.406 504 065 040 7	0.325 203 252 032 5	0
负荷 5	0,5	0.666 666 666 666 7	0.333 333 333 333 3	0
负荷 6	0,6	0.505 415 162 454 9	0.324 909 747 292 4	0
负荷 8	0,8	0.544 554 455 445 5	0.445 544 554 455 5	0
负荷 9	0,9	0.898 876 404 494 4	0.561 797 752 809 0	0
变压器 T1	1,2	0	0.030 000 000 000 0	0
变压器 T2	4,10	0	0.040 000 000 000 0	0
变压器 T3	7,11	0	0.050 000 000 000 0	0
输电线路 2-3	2,3	0.006 529 123 920 0	0.079 878 582 300 0	0.072 413 268 5
输电线路 2-5	2,5	0.003 274 234 930 0	0.039 996 550 600 0	0.036 180 525 9
输电线路 2-6	2,6	0.009 745 405 370 0	0.119 531 902 000 0	0.108 750 743 0
输电线路 3-4	3,4	0.008 464 752 420 0	0.103 705 304 000 0	0.094 199 802 5
输电线路 3-6	3,6	0.008 464 752 420 0	0.103 705 304 000 0	0.094 199 802 5
输电线路 4-6	4,6	0.012 903 986 000 0	0.158 842 964 000 0	0.145 246 069 0
输电线路 4-9	4,6	0.014 763 586 800 0	0.182 218 439 000 0	0.167 241 463 5
输电线路 5-7	5,7	0.009 106 157 260 0	0.111 624 997 000 0	0.101 472 331 0
输电线路 7-8	7,8	0.007 821 343 300 0	0.095 773 732 000 0	0.086 932 732 5
输电线路 8-9	8,9	0.010 382 344 600 0	0.127 425 113 000 0	0.116 035 466 5

利用 MATLAB 软件,用阻抗数据构建节点导纳矩阵(Y_{bus})和节点阻抗矩阵(Z_{bus})。利用这些函数之一建立了系统的正序导纳矩阵,然后利用 MATLAB 矩阵求逆得到了系统的正序阻抗矩阵。 Z 母线的阻抗 Z_{PP} 、 Z_{QQ} 和 Z_{PQ} 所求得的数值见表 7。

表 7 系统正序阻抗矩阵参数

参数	标么值 p.u.
Z_{PP}	$20.788 + j 49.586$
Z_{QQ}	$25.498 + j 66.983$
Z_{PQ}	$14.883 + j 17.336$

注: j 表示电气参数用向量法表示时用虚数单位, $j^2=-1$ 。

利用 MATLAB 软件对系统进行仿真。假设有一条 230 kV、200 km 的故障线路连接母线 6 和 8。在距离母线 6 不同距离处分别考虑不同类型的故障。故障定位器使用了 6 母线上可供测量的全部数据。电压和电流相量的计算采用了改进的全周期傅里叶算法,包括直流量偏移消除。

故障定位计算在 MATLAB 软件中进行。用 MATLAB 函数 $fzero()$ 求解式(7)、式(19)和式(24)。该函数采用二分法、割线法和可逆二次插值

法相结合的方法。但是,因为式(29)不是实数值,所以不能通过 $fzero()$ 求解。可以通过 MATLAB 函数 $fminsearch()$ 求解其最小值,该函数采用直接单纯形搜索法。

2.1 准确性分析

故障定位方法的精度如表 8 所示,表 8 给出了针对不同类型的故障、实际故障距离和故障电阻计算测得的故障距离。使用计算故障距离和实际距离差的绝对值除以线路全长,即故障距离的误差(E)可用式(30)计算:

$$E = \frac{|x_{com} - x_{act}|}{L} \times 100\% \quad (30)$$

式中, x_{com} 为计算的故障距离; x_{act} 实际的故障距离; L 为线路实际长度。从表 8 可以看出,所提方法可以对所有类型故障的故障距离进行高精度的估计,测量的故障线路的电阻值可达 50 Ω 。在测试故障定位算法的准确性时,百分比误差是根据总线路长度计算的,而不是针对正确的故障距离计算的,这是一种常见的做法,因为输电线路维护人员查找故障距离的总长度即为线路全长。

表 8 故障定位方法的精度

故障类型	故障阻抗/ Ω	故障测距/km			测距误差/%		
		$x_{act}=150$ km	$x_{act}=100$ km	$x_{act}=50$ km	$x_{act}=150$ km	$x_{act}=150$ km	$x_{act}=50$ km
三相故障	0	149.661	99.782	49.901	0.169	0.109	0.049
	10	149.657	99.780	49.900	0.171	0.110	0.050
	20	149.657	99.780	49.900	0.172	0.110	0.050
	50	149.660	99.783	49.902	0.170	0.109	0.049
	100	149.666	99.787	49.904	0.167	0.107	0.048
	200	149.670	99.790	49.905	0.165	0.105	0.047
a相 接地故障	0	150.036	100.030	50.018	0.018	0.015	0.009
	10	149.872	99.837	49.810	0.064	0.081	0.095
	20	149.708	99.644	49.602	0.146	0.178	0.199
	50	149.214	99.067	48.979	0.393	0.467	0.510
	100	148.398	98.111	47.948	0.801	0.945	1.026
	200	146.784	96.219	45.905	1.608	1.891	2.048
bc相间 故障	0	149.986	99.993	49.994	0.007	0.004	0.003
	10	150.056	100.095	50.130	0.028	0.048	0.065
	20	150.142	100.222	50.264	0.071	0.111	0.132
	50	150.354	100.548	50.663	0.177	0.274	0.331
	100	150.711	101.100	51.326	0.355	0.550	0.663
	200	151.416	102.185	52.643	0.708	1.093	1.322
bc两相接地 故障	0	149.866	99.907	49.948	0.067	0.047	0.026
	10	149.861	99.902	49.942	0.069	0.049	0.029
	20	149.875	99.915	49.949	0.063	0.042	0.026
	50	149.891	99.924	49.960	0.054	0.038	0.020
	100	149.922	99.948	49.973	0.039	0.026	0.013
	200	149.951	99.968	49.983	0.025	0.016	0.009

这种情况下的最大误差约为 0.5%，从 6 号母线到接地故障的线路距离为 50 km，故障电阻为 50 Ω ，这相当于一个大约 1 km 的绝对误差。当故障电阻增加到非实际的较高的值 100 Ω 和 200 Ω 时，单线接地故障和两相相间故障的误差较大，约为 2.0%。然而，三相故障和两相接地故障仍然可以维持较高的精度。

故障距离误差源自于方法推导过程中的两个假设。第一个假设为故障阻抗是纯阻性的，但此假设不应在此引入任何误差，因为 MATLAB 模拟中使用的故障阻抗也是纯阻性的。第二个假设是隐含的。当使用对称分量法推导故障定位公式时，假定系统中的故障传输线和其他线路是可以完全换位的，但是 MATLAB 模拟中使用的所有线路都没有换位，这将在计算故障距离时引入误差。值得注

意是，在推导两相接地故障的定位公式时，未使用对称分量，是这种类型故障的故障定位误差较低的原因。由于故障线路参数不准确，电力系统参数不准确，利用暂态电压和电流信号计算基频相位带来其他误差。

2.2 参数误差的敏感性分析

本文使用的电力系统参数是从系统的正序阻抗矩阵 Z_{bus} 中得到的阻抗 Z_{QQ} 、 Z_{PQ} 和 Z_{QP} ，这些阻抗中的任意一个在其幅值和相位角上都可能存在误差。为研究所提方法对这些误差的敏感性，考虑一个单相接地故障，距离母线 6 的距离为 150 km，其故障电阻为 10 Ω 。在各阻抗 Z_{PP} 、 Z_{PQ} 和 Z_{QQ} 的幅值和相位角中引入了高达 $\pm 50\%$ 的误差。也就是被测参数的正确值被替换为故障定位计算中的错误值，并观察计算出的故障距离产生的误差。

文献[22—23]分别提出了传统的单端故障定位方法和一种双端故障定位方法,与本文提出的单端故障定位方法在相同实验条件下进行仿真对比。三种故障定位方法的相对误差如图7所示。

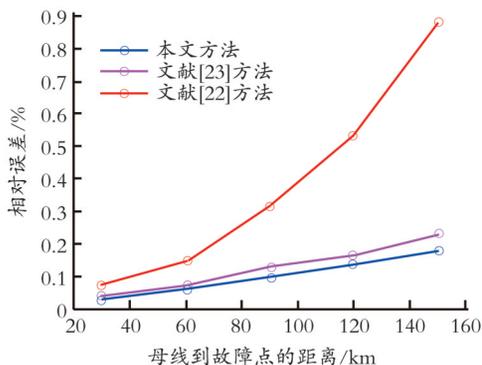


图7 三种故障定位方法的相对误差

从图7可以看出,在不同的故障距离下,与传统单端定位方法相比,本文提出的故障定位方法,相对误差显著减小,具有明显优势。30 km故障距离下相对误差减小58.23%,而150 km故障距离时相对误差减小79.36%,故障定位的精度得到了明显的提高。且随着故障距离的增大,故障定位精度也越来越高;相对于双端法,本文提出的故障定位精度也有一定的提高,在故障距离30 km的相对误差减小18.78%,150 km故障距离时相对误差减小20.26%。不同短路类型下故障定位方法的相对误差如图8所示。

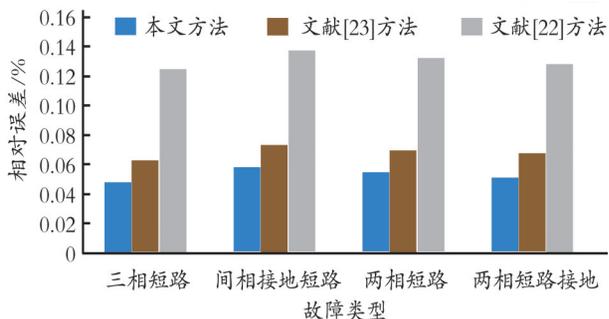


图8 不同短路类型下故障定位方法的相对误差

从图8可以看出,不同的故障类型下,无论是三相短路的对称故障,还是单相接地短路、两相短路、两相接地短路的不对称故障,本文提出的故障定位方法相对于传统单端定位方法,相对误差均有明显的减小,故障定位的精度得到明显的提高。相对于双端法,在不同的故障类型下,其故障距离的相对误差也有一定程度的减少。

为了保证故障定位的高精度,局部阻抗 Z_{PP} 幅值和相位角都必须准确的。然而, Z_{PP} 、 Z_{QQ} 和 Z_{PQ} 三种阻抗都是从电力系统的正序阻抗矩阵 Z_{bus} 中获得。因此,必须使用一种随故障变化而变化的 Z_{bus} ,确保真实地反映故障期间的电力系统状况。本文方法与文献[16]提出的方法不同,完全避免了使用零序 Z_{bus} ,以及与之相关的所有不确定性。

3 结 论

针对 n 母线互联电力系统中的架空输电线路,提出了一种新的单端故障定位方法。该方法利用了故障前和故障期间从故障线路一端测得的电流和电压的相量值,实现高精度的故障定位。该方法对故障传输线采用了精确的分布参数模型。对 n 母线电力系统使用了双母线戴维宁等效网络模型,该模型解释了 n 母线电力系统的互联性。该方法所需的数据包括故障线路单位长度的串联阻抗矩阵和并联导纳矩阵、随故障变化而不断变化的电力系统正序阻抗矩阵 Z_{bus} 和故障类型。基于所涉及的计算量和性质,建议使用存储在故障记录器或数字保护继电器中的电流和电压数据进行离线计算。结果表明,该方法能够对各类故障进行高精度的故障距离估计,但是故障电阻大小须在实际中常见的故障电阻值的正常范围内。然而,当单相接地故障和两相相间故障的故障电阻值为偏离实际的较高值时,观测数据存在较大的误差。该方法对局部母线阻抗值的误差特别敏感,但对远端母线阻抗值的误差不敏感。

参 考 文 献

- [1] 张媛媛,朱永利,张宁,等.基于相位比较的多端输电线路故障定位研究[J].高压电器,2018,54(1):57-63.
- [2] Johns A T, Jamali S. Accurate fault location technique for power transmission lines[J]. IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution, 1990, 137(6):395-402.
- [3] Novosel D, Hart D G. Unsynchronized two-terminal fault location estimation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(1):130-138.
- [4] 张媛媛,于立杰,王永生,等.双端输电线路故障定位方法研究[J].电子测量技术,2018,41(16):143-146.
- [5] 崔超奇,王占山,杨东升,等.一种不受波速影响的T型输电线路故障定位方法[J].电测与仪表,2017,54(18):15-21.
- [6] 陈旭,朱永利,高艳丰,等.基于故障分支快速辨识的T型高压输电线路故障定位新算法[J].电力系统自动化,2016,40(4):105-110.

- [7] 张媛媛. 多分支输电线路故障定位方法研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2017.
- [8] 张媛媛, 朱永利, 张宁, 等. 基于行波固有频率和VMD的T型输电线路故障定位[J]. 电测与仪表, 2017, 54(21): 55-60.
- [9] Pereira C, Zanetta L. Optimization algorithm for fault location in transmission lines considering current transformers saturation[J]. IEEE Trans Power Delivery, 2005, 20: 603-608.
- [10] Izykowski J, Molag R, Rosolowski E, et al. Accurate location of faults on power transmission lines with use of two-end unsynchronized measurements[J]. IEEE Trans Power Delivery, 2006, 21(2): 627-633.
- [11] Wang C, Jia Q Q, Li X B, et al. Fault location using synchronized sequence measurements[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2008, 30(2): 134-139.
- [12] Soliman S A, Abdel-Rahman M H, Al-Attar E. An algorithm for estimating fault location in an unbalanced three-phase power system[J]. Electrical Power Energy System, 2002, 24(7): 515-520.
- [13] 高淑萍, 索南加乐, 宋国兵, 等. 基于分布参数模型的直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 75-80.
- [14] 宋国兵, 李德坤, 褚旭, 等. 基于参数识别原理的VSC-HVDC输电线路单端故障定位[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 94-99.
- [15] Kawady T, Stenzel J. A practical fault location approach for double circuit transmission lines using single end data[J]. Power Engineering Review IEEE, 2002, 22(12): 62-63.
- [16] Ramar K, Eisa A A. New fault location algorithms for transmission lines in interconnected power systems [J]. Power Energy Systems, 2008, 28(3): 130-136.
- [17] Pereira C, Zanetta L. An optimization approach for fault location in transmission lines using one terminal data[J]. Electrical Power Energy System, 2007, 29(4): 290-296.
- [18] Chen C, Liu C, Jiang J. Application of combined adaptive Fourier filtering technique and fault detector to fast distance protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 619-626.
- [19] 郑秀玉, 丁坚勇, 黄娜. 输电线路单端故障定位的阻抗-行波组合算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 18-21.
- [20] 赵连朋, 王立颖, 毛少苗. 一种求解多项式方程复数根的新方法[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 2017, 38(4): 363-369.
- [21] 蒋海玮, 李东辉. 检测单相电压暂降的直接导数算法[J]. 微处理机, 2018, 39(3): 37-42.
- [22] Feng G, Abur A. Fault location using wide-area measurements and sparse estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2938-2945.
- [23] Lopes F V, Dantas K M, Silva K M, et al. Accurate two-terminal transmission line fault location using traveling waves[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 873-880.

(编辑 陈 雷)