

$$\dot{U}_{fi} = e^j [\dot{U}_{Mi} \cosh i x - \dot{I}_{Mi} Z_{ci} \sinh i x] \quad (4)$$

消去 f 点故障电压 \dot{U}_{fi} 得:

$$e^j [\dot{U}_{Mi} \cosh i x - \dot{I}_{Mi} Z_{ci} \sinh i x] = \dot{U}_{Ni} \cosh i (l - x) - \dot{I}_{Ni} Z_{ci} \sinh i (l - x) + \dot{I}_{ki} Z_{ci} \sinh i (y - x) \quad (5)$$

同理可以推出由 M 点到 f 点关于 k 点的故障电压方程

$$e^j [\dot{U}_{Mi} \cosh i y - \dot{I}_{Mi} Z_{ci} \sinh i y] + \dot{I}_{fi} Z_{ci} \sinh i (y - x) = \dot{U}_{Ni} \cosh i (l - y) - \dot{I}_{Ni} Z_{ci} \sinh i (l - y) \quad (6)$$

式(5)、(6)中待求的未知量有 x 、 y 、 \dot{I}_{f1} 、 \dot{I}_{f2} 、 \dot{I}_{k1} 、 \dot{I}_{k2} , 由这两个方程还不能求出这些未知量, 要求出这些未知量还要根据故障的边界条件。

2.1 f 点 B 相接地, k 点 C 相接地

故障点处的边界条件为:

$$\dot{I}_{f0} = a^2 \dot{I}_{f1} = a \dot{I}_{f2}, \quad \dot{I}_{k0} = a \dot{I}_{k1} = a^2 \dot{I}_{k2}$$

其中 $a = e^{j120^\circ}$, $a^2 = e^{j240^\circ}$ 。将式(5)、(6)按正序、负序展开, 并由 $Z_{c1} = Z_{c2}$, $\dot{I}_1 = \dot{I}_2$ 消去故障点处故障电流 \dot{I}_{f1} 和 \dot{I}_{k1} , 得:

$$\begin{cases} e^j [(\dot{U}_{M1} - a\dot{U}_{M2}) \cosh i_1 x - (\dot{I}_{M1} - a\dot{I}_{M2}) Z_{c1} \sinh i_1 x] = (\dot{U}_{N1} - a\dot{U}_{N2}) \cosh i_1 (l - x) - (\dot{I}_{N1} - a\dot{I}_{N2}) Z_{c1} \sinh i_1 (l - x) \\ e^j [(a\dot{U}_{M1} - \dot{U}_{M2}) \cosh i_1 y - (a\dot{I}_{M1} - \dot{I}_{M2}) Z_{c1} \sinh i_1 y] = (a\dot{U}_{N1} - \dot{U}_{N2}) \cosh i_1 (l - y) - (a\dot{I}_{N1} - \dot{I}_{N2}) Z_{c1} \sinh i_1 (l - y) \end{cases} \quad (7)$$

进一步化简得:

$$\tanh i_1 x = \frac{(\dot{U}_{M1} - a\dot{U}_{M2}) e^j - P_1}{Z_{c1} (\dot{I}_{M1} - a\dot{I}_{M2}) e^j - Q_1} \quad (8)$$

$$\tanh i_1 y = \frac{(a\dot{U}_{M1} - \dot{U}_{M2}) e^j - P_2}{Z_{c1} (a\dot{I}_{M1} - \dot{I}_{M2}) e^j - Q_2} \quad (9)$$

其中 $P_1 = (\dot{U}_{M1} - a\dot{U}_{N2}) \cosh i_1 l - (\dot{I}_{M1} - a\dot{I}_{N2}) Z_{c1} \sinh i_1 l$

$$Q_1 = (\dot{U}_{N1} - a\dot{U}_{N2}) \sinh i_1 l - (\dot{I}_{N1} - a\dot{I}_{N2}) Z_{c1} \cosh i_1 l$$

$$P_2 = (a\dot{U}_{N1} - \dot{U}_{N2}) \cosh i_1 l - (a\dot{I}_{N1} - \dot{I}_{N2}) Z_{c1} \sinh i_1 l$$

$$Q_2 = (a\dot{U}_{M1} - \dot{U}_{M2}) \sinh i_1 l - (a\dot{I}_{M1} - \dot{I}_{M2}) Z_{c1} \cosh i_1 l$$

若已知不同步角 δ , 则 x 和 y 就可以通过式(8)和(9)求出。由于 Π 回线是完好的, 因此 Π 回线的电压、电流求出。

$$e^j = (\dot{U}_{Ni} \cosh i l - \dot{I}_{Ni} Z_{ci} \sinh i l) / \dot{U}_{Mi} \quad (i=1, 2) \quad (10)$$

2.2 f 点 C 相接地, k 点 B 相接地

故障点处的边界条件为:

$$\dot{I}_{f0} = a \dot{I}_{f1} = a^2 \dot{I}_{f2}, \quad \dot{I}_{k0} = a^2 \dot{I}_{k1} = a \dot{I}_{k2}$$

将边界条件代入式(5)、(6)消去故障点处故障电流, 则得到与式(8)、(9)一样形式的方程, 只不过 x 、 P_1 、 Q_1 和 y 、 P_2 、 Q_2 互换。因此式(8)是 B 相故障定位方程, 式(9)是 C 相故障定位方程。而不必区分 f 点是 B 相故障还是 C 相故障。在实际应用中, 对于 Π 回线上的两相接地故障, 由式(8)和(9)分别计算出 x 和 y 。若 x 和 y 相等或相差很小, 则为一点故障, 否则为两点故障, 而不必事先区分是一点故障还是两点故障。

3 在两回线上的两点故障

若不对称故障分别同时发生在 Π 回线上的 f 处和 Π 回线上的 k 处, 其正序和负序分量结构如图 2

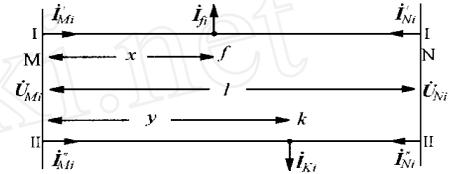


图 2 两回线上不同地点故障

所示。故障类型可分别为单相接地、两相短路或两相短路接地及跨线故障。在这些故障中, 均有正序和负序分量。对 Π 回线有:

$$e^j [\dot{U}_{Mi} \cosh i x - Z_{ci} \dot{I}_{Mi} \sinh i x] = \dot{U}_{Ni} \cosh i (l - x) - Z_{ci} \dot{I}_{Ni} \sinh i (l - x) \quad (11)$$

化简得:

$$e^j (\dot{U}_{Mi} - Z_{ci} \dot{I}_{Mi} \tanh i x) = R_i - S_i \tanh i x \quad (12)$$

其中 $R_i = \dot{U}_{Ni} \cosh i l - Z_{ci} \dot{I}_{Ni} \sinh i l$, $S_i = \dot{U}_{Ni} \sinh i l - Z_{ci} \dot{I}_{Ni} \cosh i l$, ($i=1, 2$)。对 Π 回线也有类似的方程。由于 Π 回线也发生故障, 因此不同步角 δ 不能采用式(10)求取。将式(12)按正序和负序分别列出并相除去掉 e^j 得:

$$a \tanh^2 i_1 x - b \tanh i_1 x + c = 0 \quad (13)$$

$$\tanh i_1 x = \frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (14)$$

其中 $a = Z_{c1} (\dot{I}_{M1} \cdot S_2 - \dot{I}_{M2} \cdot S_1)$, $b = Z_{c1} (\dot{I}_{M1} \cdot R_2 - \dot{I}_{M2} \cdot R_1) + (\dot{U}_{M1} \cdot S_2 - \dot{U}_{M2} \cdot S_1)$, $c = \dot{U}_{M1} \cdot R_2 - \dot{U}_{M2} \cdot R_1$ 。 $\tanh i_1 x$ 有双根, 设真根为 D_1 , 伪根为 D_2 , 将 D_1 、 D_2 代入式(12)中, 对于真根有 $|e^{j(D_1)}| = 1$, 而对于伪根 $|e^{j(D_2)}| > 1$, ($|x|$ 表示取 x 的模), 由此可区分真根和伪根, 进而求出故障位置 x 。相似地可以求出 Π 回线上的故障位置 y 。在实际应用中, 若两

回线均发生故障,则由式(12)及(13)分别计算回线的故障位置 x 及回线上的故障位置 y 。若 $x = y$,则为在同一点处发生的故障,否则为在不同地点发生的故障。

4 数字仿真结果

为了验证本算法的精确度,对线路不同地点以及同地点的各种故障做了大量仿真计算。双回线的线路参数为:

$r_1 = 0.0208 \text{ m}/\text{m}$, $L_1 = 0.8984 \mu\text{H}/\text{m}$, $C_1 = 0.0129 \text{ nF}/\text{m}$, $r_0 = 0.1148 \text{ m}/\text{m}$, $L_0 = 2.288 \mu\text{H}/\text{m}$, $C_0 = 0.00523 \text{ nF}/\text{m}$, $L_{m0} = 1.018 \mu\text{H}/\text{m}$ 。线路全长 $l = 300 \text{ km}$ 。两端的系统参数为:

$$Z_{M1} = 1.0515 + j43.176, Z_{M0} = j29.0925, \dot{E}_M = 1.05 \angle 0^\circ$$

$$Z_{N1} = 1.0577 + j44.92, Z_{N0} = j32.47, \dot{E}_N = 1 \angle 30^\circ$$

表1 回线上两点异相接地故障测距仿真结果

实际故障位置		所测故障位置			
		$R_f = 5, R_k = 10$		$R_f = 100, R_k = 80$	
x/l	y/l	x/l	y/l	x/l	y/l
IB 0.2	IC 0.8	0.2	0.8	0.2	0.8
IB 0.7	IC 0.3	0.7	0.3	0.7	0.3
IB 0.4	IC 0.3	0.4	0.3	0.4	0.3
IB 0.2	IC 0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
IB 0.8	IC 0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

对回线上两点异相接地故障,其数字仿真结果如表1所示,其中 R_f 为 f 点处过渡电阻, R_k 为 k 点过渡电阻。从计算结果看,由于采用了分布参数模型,考虑了对地电容的影响,因此测距精度不受过渡电阻大小的影响。若两回线上均发生故障,故障类型可为任意不对称故障,其数字仿真计算结果如表2所示。在仿真计算中,将 M 侧电压、电流旋转 -30° ,即不同步角为 30° 。计算结果表明,对于真根所对应的 $|e^j| = 1$,而伪根所对应的 $|e^j| \neq 1$ 。

表2 两回线上两点故障测距仿真结果

实际故障类型与位置		所测故障位置与		
x/l	y/l	x/l	y/l	
A-G 0.2	B-G 0.3	0.2	0.3	30°
B-G 0.5	B-C-G 0.8	0.5	0.8	30°
B-C 0.7	A-G 0.3	0.7	0.3	30°
A-G 0.4	A-G 0.7	0.4	0.7	30°
B-G 0.6	B-G 0.6	0.6	0.6	30°

5 结论

本文提出的平行双回线两点故障测距算法其特点如下:

(1) 采用了分布参数模型,测距精度不受过渡电阻大小的影响。

(2) 测距方程为解一次方程或二次方程,不需迭代计算。解二次方程方法很容易区分真根和伪根。

(3) 两端数据采集不必同步。不必事先区分是一点故障还是两点故障,由计算结果来决定一点还是两点故障。

参考文献:

- [1] Takagi T, Yamakoshi Y, Yamara M, et al. Development of a New Type Fault Locator Using the One Terminal Voltage And Current Data. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, PAS-101(8):2892~2898.
- [2] 魏孝铭,凌俊银,张利东,贺仁睦.故障测距方法及现场实测结果分析.电网技术,1994,18(3):49~54.
- [3] 邱建国,钟岷秀.小电流接地系统两点异相故障测距.继电器,1999,27(2):13~16.
- [4] 单葆国,贺仁睦.一种利用输电线路双端信息进行故障测距的精确算法.全国高等学校电力系统及其自动化专业第十二届学术年会论文集.保定:1996.940~945.
- [5] Adly A Grgis, David G Hart, William L Peterson. A New Fault Location Technique for Two - and Three - Terminal Lines. IEEE Trans, 1992, PWRD - 7(1):98~107.
- [6] 孙立山,孙晓友,陈学允.平行双回线故障测距算法的研究.电力系统自动化,1999,23(5):28~30.

Research on a new fault location method for parallel transmission lines two points fault

SUN Li-shan¹, SUN Gui-ying¹, WANG Xiao-yuan², CHEN Xue-yun¹

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001; 2. Electronic Technology Institute of Heilongjiang Province, Harbin 150040, China)

Abstract: Based on distributed parameters line model, this paper presents a new fault location method for parallel transmission lines on I line two points different phases short circuit fault or two lines different point fault. The method only uses the positive sequence and negative sequence components of two terminal voltage and current. The fault location by solving the one order or quadratic equations, and the influences of system impedance variation, transient resistance and non-synchronous sampling are excluded. It can be used with one point fault location also. The satisfactory simulation result shows that the method is effective.

Keywords: fault location; two points fault; distributed parameter; parallel transmission lines.