

输电线路不对称故障点定位的新方法

韦 钢¹, 唐 斌², 肖鸿杰¹

(1. 上海电力学院, 上海 200090; 2. 江西九江电厂, 江西九江 332000)

摘要: 基于电力系统不对称故障时负序等值电路的特点进行分析计算以确定输电线路不对称故障点, 原理上与不对称故障的形式无关, 方法简单、适用性强。以 T 形接线的线路为例进行计算机离线仿真计算, 结果表明该算法测距精度高, 几乎不受过渡电阻以及系统运行参数的影响。

关键词: 输电线路; 不对称故障; 负序分量; 定位

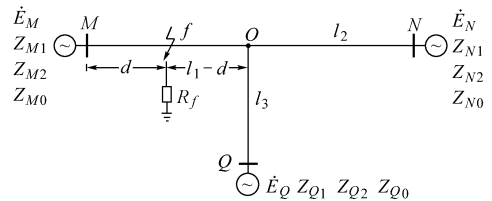
中图分类号: TM 711

0 引言

输电线路不对称故障时故障点的快速、准确定位能提高电力系统的供电可靠性, 降低检修费用。输电线路故障点的定位(测距)方法, 国内外学者已进行了大量的研究和实践, 其算法主要有 2 类^[1~3]: 一类是工频(稳态)算法, 即利用采集的电压和电流经过滤波得到工频的故障分量(正序、负序、零序)进行计算, 测得故障点的位置; 另一类是时域算法, 即直接利用采集得到的故障电压和电流的瞬时值进行计算, 测得故障点的位置。如果在计算中只用单侧的电压和电流信号, 则无法克服由于对侧助增电流和故障点过渡电阻所引起的测量误差, 即使使用种种修正方法, 也无法从根本上消除这种误差, 获得精确的故障定位结果^[4,5]。而利用双端(多端)数据测距的算法, 在原理上可以完全不受故障点过渡电阻大小的影响, 保证测距的精度, 但其主要缺点是需要通道传递对端信息^[6,7]。随着通信技术和计算机技术的迅速发展, 测距端等已经能够通过各种途径得到双端(多端)信息, 甚至电压、电流波形。因此不需要多端同步采样(或同步化处理)的测距方法, 将更加引人注目。本文提出的一种算法, 只利用输电线路发生不对称故障时负序分量电压、电流具有的特点来进行分析计算, 测得故障点的位置。由于 T 形接线分支线路的存在(或分支线长度不等), 以及第三端子可能的馈入电流影响, 使得 T 形线路不对称故障时故障点的定位不能简单地用双端线路的故障定位算法。因此, 本文特以 T 形接线的输电线为例进行分析, 说明了这种方法的适用性。离线仿真计算证明, 该方法简单, 适用性强, 定位准确。

1 基本原理

T 形接线的输电线路模型如图 1 所示。假设在 $\overline{MO}$ 分支线路的 f 点发生单相(a 相)接地故障。

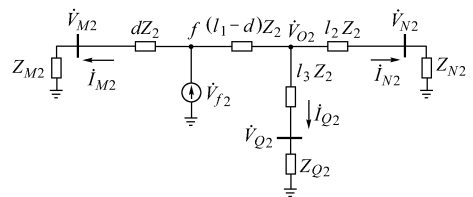


$\dot{E}_M, \dot{E}_N, \dot{E}_Q$ 为三端等效系统的电势; Z_{i1}, Z_{i2}, Z_{i0} 分别为三端等效系统的正序、负序、零序阻抗 ($i=M, N, Q$); l_1, l_2, l_3 分别为 $\overline{MO}, \overline{NO}, \overline{QO}$ 分支线路的长度; d 为 M 端距离故障点的距离。

图 1 T 形输电线路故障模型

Fig. 1 Fault model of transmission line with T-type

根据对称分量法的基本原理, 在 f 点发生不对称故障时, 可画出图 1 系统的负序等值电路如图 2 所示。若假设 3 个端子采集到的故障电流和电压为 $\dot{I}_{Ma}, \dot{I}_{Mb}, \dot{I}_{Mc}; \dot{I}_{Na}, \dot{I}_{Nb}, \dot{I}_{Nc}; \dot{I}_{Qa}, \dot{I}_{Qb}, \dot{I}_{Qc}$ 和 $\dot{V}_{Ma}, \dot{V}_{Mb}, \dot{V}_{Mc}; \dot{V}_{Na}, \dot{V}_{Nb}, \dot{V}_{Nc}; \dot{V}_{Qa}, \dot{V}_{Qb}, \dot{V}_{Qc}$, 则 3 个端子的负序电流和电压可以按式(1)和式(2)计算得到(以 a 相为基准, $\alpha = e^{j120^\circ}$)。



Z_1, Z_2 分别为线路长度的正序、负序阻抗, 且 $Z_1 = Z_2$; $\dot{V}_{f2}, \dot{V}_{o2}$ 分别为故障点和交叉点 O 的负序电压。

图 2 负序等值电路

Fig. 2 Negative-sequence equivalent circuit

$$\begin{cases} \dot{I}_{M2} = \frac{1}{3}(\dot{I}_{Ma} + \alpha^2 \dot{I}_{Mb} + \alpha \dot{I}_{Mc}) \\ \dot{I}_{N2} = \frac{1}{3}(\dot{I}_{Na} + \alpha^2 \dot{I}_{Nb} + \alpha \dot{I}_{Nc}) \\ \dot{I}_{Q2} = \frac{1}{3}(\dot{I}_{Qa} + \alpha^2 \dot{I}_{Qb} + \alpha \dot{I}_{Qc}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{V}_{M2} = \frac{1}{3}(\dot{V}_{Ma} + \alpha^2 \dot{V}_{Mb} + \alpha \dot{V}_{Mc}) \\ \dot{V}_{N2} = \frac{1}{3}(\dot{V}_{Na} + \alpha^2 \dot{V}_{Nb} + \alpha \dot{V}_{Nc}) \\ \dot{V}_{Q2} = \frac{1}{3}(\dot{V}_{Qa} + \alpha^2 \dot{V}_{Qb} + \alpha \dot{V}_{Qc}) \end{cases} \quad (2)$$

电力系统发生不对称故障时的负序等值电路是一个无源网络,具有故障点负序电压最高的特点。对于 T 形输电线路故障点定位(测距)问题,本文介绍的算法分 2 步进行:先判断 T 形线路中的故障分支,而后再查找故障分支线路上的故障点。

1.1 判断故障分支线路

若用 M, N, Q 三端的负序电流和电压来计算 T 形线路交叉点 O 的负序电压,可以写成下式:

$$\begin{cases} \dot{V}_{O2(M)} = \dot{V}_{M2} + \dot{I}_{M2} l_1 Z_2 \\ \dot{V}_{O2(N)} = \dot{V}_{N2} + \dot{I}_{N2} l_2 Z_2 \\ \dot{V}_{O2(Q)} = \dot{V}_{Q2} + \dot{I}_{Q2} l_3 Z_2 \end{cases} \quad (3)$$

如图 2 所示,若故障点在 $\overline{MO}$ 分支,则式(3)中 $\dot{V}_{O2(N)}, \dot{V}_{O2(Q)}$ 的计算结果理论上应与交叉点实际负序电压 $\dot{V}_{O2}$ 相等,而由 M 端计算交叉点的负序电压 $\dot{V}_{O2(M)}$ 不等于 $\dot{V}_{O2}$,即:

$$\dot{V}_{O2} = \dot{V}_{O2(N)} = \dot{V}_{O2(Q)} \neq \dot{V}_{O2(M)} \quad (4)$$

根据电力系统不对称故障时,故障点负序电压 $\dot{V}_{f2}$ 最高的特点,可知:

$$|\dot{V}_{f2}| > |\dot{V}_{O2}| \quad (5)$$

以下分析故障分支线路从 M 端计算交叉点的负序电压 $\dot{V}_{O2(M)}$ 与交叉点实际负序电压 $\dot{V}_{O2}$,以及故障点负序电压 $\dot{V}_{f2}$ 三者之间的关系,从而判别故障的分支线路。

令 $k = (l_1 - d)/d$, $\dot{V}_{M2} = V_{M2} \angle 0^\circ$, $\dot{I}_{M2} = I_{M2} \angle \delta_1$, $Z_2 = |Z_2| \angle \varphi_1$, $Z_{M2} = |Z_{M2}| \angle \varphi_2$,因为输电线路的阻抗角 φ_1 为 $45^\circ \sim 90^\circ$,系统的负序阻抗角 φ_2 为 $45^\circ \sim 90^\circ$,由图 2 可知: $\dot{V}_{M2} = \dot{I}_{M2} Z_{M2}$,则 $\dot{I}_{M2}$ 的相角 δ_1 为 $-90^\circ \sim -45^\circ$ 。

从 M 端计算故障点 f 和交叉点的负序电压,可以写为:

$$\dot{V}_{f2} = \dot{V}_{M2} + \dot{I}_{M2} d Z_2 \quad (6)$$

$$\dot{V}_{O2(M)} = \dot{V}_{M2} + \dot{I}_{M2} l_2 Z_2 = \dot{V}_{M2} + \dot{I}_{M2} (k+1) d Z_2 \quad (7)$$

式(6)和式(7)整理后相减可得到:

$$|\dot{V}_{O2(M)}|^2 - |\dot{V}_{f2}|^2 = (k^2 + 2k)(I_{M2} d |Z_2|)^2 + 2k V_{M2} I_{M2} d |Z_2| \cos(\varphi_1 + \delta_1) \quad (8)$$

因为 $\delta_1 + \varphi_1$ 为 $-90^\circ \sim 90^\circ$,根据式(8)可以判断:

$$|\dot{V}_{O2(M)}|^2 > |\dot{V}_{f2}|^2 \quad (9)$$

因此,考虑到式(4)、式(5)、式(9)的关系,很显然,按式(3)计算交叉点负序电压,若式(10)成立时,即可判断在 $\overline{MO}$ 分支线路发生故障。

$$|\dot{V}_{O2(M)}| > |\dot{V}_{O2(N)}| = |\dot{V}_{O2(Q)}| \quad (10)$$

同理,若式(11)成立,则可判断在 $\overline{NO}$ 分支线路发生故障。

$$|\dot{V}_{O2(N)}| > |\dot{V}_{O2(M)}| = |\dot{V}_{O2(Q)}| \quad (11)$$

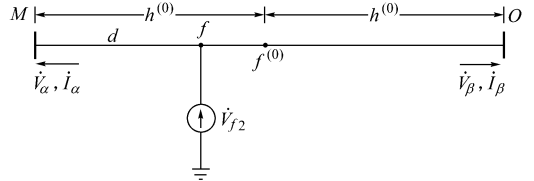
同理,若式(12)成立,则可判断在 $\overline{QO}$ 分支线路发生故障。

$$|\dot{V}_{O2(Q)}| > |\dot{V}_{O2(M)}| = |\dot{V}_{O2(N)}| \quad (12)$$

1.2 故障点定位(测距)

根据以上对负序网络的分析,本文故障点的定位采用“折半查找法”。具体方法如下。

若已获知 $\overline{MO}$ 分支线路发生故障,则只需在 $\overline{MO}$ 分支线路上查找故障点,分支线路的负序网络可以用图 3 表示。



$f^{(0)}$ 点为 $\overline{MO}$ 分支第 1 次折半的中点。

图 3 $\overline{MO}$ 分支线路负序网络
Fig. 3 Negative-sequence network on the $\overline{MO}$ branch line

在图 3 中, $\dot{V}_\alpha = \dot{V}_{M2}$, $\dot{I}_\alpha = \dot{I}_{M2}$, $\dot{V}_\beta = \dot{V}_{O2}$, $\dot{I}_\beta = \dot{I}_{O2}$, $d^{(0)} = h^{(0)}$, $h^{(0)} = \frac{1}{2} l_1$, $h^{(1)} = \frac{1}{2} h^{(0)}$, $h^{(2)} = \frac{1}{2} h^{(1)}$, ..., $h^{(k+1)} = \frac{1}{2} h^{(k)}$. O 点是原 T 形线路的交叉点,此点的负序电压 $\dot{V}_{O2}$ 可按式(3)通过计算 $\dot{V}_{O2(N)}$ (或 $\dot{V}_{O2(Q)}$) 得到,而负序电流 $\dot{I}_{O2}$ 可按式(13)计算。

$$\dot{I}_{O2} = \dot{I}_{N2} + \dot{I}_{Q2} \quad (13)$$

这样,可以分别从 M 端和 O 端计算中点 $f^{(0)}$ 的负序电压,即:

$$\begin{cases} \dot{V}_{2(\alpha)}^{(0)} = \dot{V}_\alpha + \dot{I}_\alpha h^{(0)} Z_2 \\ \dot{V}_{2(\beta)}^{(0)} = \dot{V}_\beta + \dot{I}_\beta h^{(0)} Z_2 \end{cases} \quad (14)$$

式(14)的计算结果有以下 3 种情况:

$$|\dot{V}_{2(\alpha)}^{(0)}| > |\dot{V}_{2(\beta)}^{(0)}| \quad (15)$$

$$|\dot{V}_{2(\alpha)}^{(0)}| < |\dot{V}_{2(\beta)}^{(0)}| \quad (16)$$

$$|\dot{V}_{2(\alpha)}^{(0)}| = |\dot{V}_{2(\beta)}^{(0)}| \quad (17)$$

根据式(6)~式(9)相类似的分析和讨论,可以证明:

a. 当式(15)成立时,可以判断故障点在 M 与 $f^{(0)}$ 区间内。此时,令 $d^{(1)} = d^{(0)} - h^{(1)}$, $\dot{V}_\beta = \dot{V}_{2(\beta)}^{(0)}$ (即令 $d^{(k+1)} = d^{(k)} - h^{(k+1)}$, $\dot{V}_\beta = \dot{V}_{2(\beta)}^{(k)}$),然后在 $\overline{Mf^{(0)}}$ 分段内继续计算其中点 $f^{(1)}$ 的负序电压,如下式所示:

$$\begin{cases} \dot{V}_{2(\alpha)}^{(1)} = \dot{V}_\alpha + \dot{I}_\alpha h^{(1)} Z_2 \\ \dot{V}_{2(\beta)}^{(1)} = \dot{V}_\beta + \dot{I}_\beta h^{(1)} Z_2 \end{cases} \quad (18)$$

同理再进行比较。

b. 当式(16)成立时,可以判断故障点在 $f^{(0)}$ 与 O 区间内。此时,令 $d^{(1)} = d^{(0)} + h^{(1)}$, $\dot{V}_\alpha = \dot{V}_{2(\alpha)}^{(0)}$ (即令 $d^{(k+1)} = d^{(k)} + h^{(k+1)}$, $\dot{V}_\alpha = \dot{V}_{2(\alpha)}^{(k)}$),然后在 $\overline{f^{(0)}O}$ 分段内继续计算其中点 $f^{(1)}$ 的负序电压,如式(18)所示。同理再进行比较。

c. 当式(17)成立,可以判断 $f^{(0)}$ 点就是实际故障点, $d^{(1)} = d^{(0)}$ (即 $d^{(k+1)} = d^{(k)}$),即可停止查找。

折半查找故障点直到式(19)成立为止,即可判断 $d^{(k)}$ 为 M 端到故障点的距离。

$$|\dot{V}_{2(\alpha)}^{(k)}| - |\dot{V}_{2(\beta)}^{(k)}| < \epsilon \quad (19)$$

式中 ϵ 为允许的误差值(正值)。

若不对称故障发生在 $\overline{NO}$ 分支线路或 $\overline{QO}$ 分支线路上,均可按照前述方法进行故障点定位(测距)。

2 离线仿真计算

计算机离线仿真计算的原始模型如图 1 所示。系统参数如下。

电源电势: $\dot{E}_M = 1.0 \angle 0.5^\circ$, $\dot{E}_N = 1.03 \angle 3.5^\circ$, $\dot{E}_Q = 1.002 \angle 4.4^\circ$ 。

系统阻抗: $Z_{M1} = 18 + j72 \Omega$, $Z_{M2} = 24 + j90 \Omega$, $Z_{M0} = 6 + j36 \Omega$; $Z_{N1} = 28 + j111 \Omega$, $Z_{N2} = 38 + j148 \Omega$, $Z_{N0} = 9 + j55.8 \Omega$; $Z_{Q1} = 9 + j37 \Omega$, $Z_{Q2} = 11 + j49 \Omega$, $Z_{Q0} = 3 + j18 \Omega$ 。

线路参数: $l_1 = 120 \text{ km}$, $l_2 = 98 \text{ km}$, $l_3 = 68 \text{ km}$, $Z_1 = Z_2 = 0.096\,267 + j0.4 \Omega/\text{km}$, $Z_0 = 0.246\,267 + j1.2 \Omega/\text{km}$ 。

2.1 故障分支线路的选择

单相接地故障时计算结果如表 1。可见本算法能够正确无误地选中故障分支线路(两相短路、两相接地故障时也能正确无误地选中,表中未列出)。

表 1 故障分支线路的选择结果
Table 1 Selection results of fault branch line

MO 分支线路			NO 分支线路			QO 分支线路		
故障距离 /km	过渡电阻 / Ω	选中	故障距离 /km	过渡电阻 / Ω	选中	故障距离 /km	过渡电阻 / Ω	选中
20	0	✓	30	0	✓	10	0	✓
	500	✓		500	✓		500	✓
60	0	✓	90	0	✓	40	0	✓
	500	✓		500	✓		500	✓

2.2 不同故障类型时的测距

假设在距离 N 端 50 km 处发生 3 种不对称故障,其故障点电阻分别为 0Ω , 500Ω , $1\,000 \Omega$ 。计算机离线仿真计算结果见表 2。

表 2 不同故障类型时的测距结果(故障点距 N 端 50 km)
Table 2 The range finding results during different fault types (fault point is at 50 km apart from N end)

类型	过渡电阻 / Ω	测距结果 /km	相对误差 /(%)
单相接地	0	49.999 976	-0.000 048
	500	49.999 975	-0.000 050
	1 000	49.999 972	-0.000 056
两相短路	0	49.999 976	-0.000 048
	500	49.999 976	-0.000 048
	1 000	49.999 973	-0.000 054
两相接地	0	49.999 976	-0.000 048
	500	49.999 975	-0.000 050
	1 000	49.999 973	-0.000 054

2.3 不同分支线路在各种故障距离时的测距

假设故障类型为单相接地故障,故障点过渡电阻为 500Ω 。计算机离线仿真计算结果见表 3。

表 3 不同分支线路在各种故障距离时的测距结果
Table 3 The range finding results of different branch lines under the various fault distances

故障线路	故障点距离 /km	测距结果 /km	相对误差 /(%)
$\overline{MO}$ 段	0.5	0.500 05	0.010 000
	60.0	59.999 93	-0.000 117
	119.5	119.499 95	-0.000 042
$\overline{NO}$ 段	0.5	0.499 965	-0.007 000
	50.0	49.999 976	-0.000 048
	97.5	97.500 035	0.000 036
$\overline{QO}$ 段	0.5	0.500 025	0.005 000
	40.0	40.000 060	0.000 150
	67.5	67.499 975	-0.000 037

3 结论

a. 本算法的精确定位,虽然需要有通道进行三端(或双端)信息的传送,但不同于其他算法直接利用各端的信息来进行计算(这时,对同步性要求很高),它仅是将各端自己的计算结果,经通道传送进行比较。方法简单、准确。

b. 计算机离线仿真计算证明:本算法的测距精度几乎不受故障点过渡电阻、系统运行参数、故障点距端点远近的影响。

c. 本算法是基于电力系统不对称故障时负序等值电路的特点进行分析计算的。因此它与不对称故障的形式无关,即不论在哪一条分支线上发生单相接地、两相短路、两相接地故障,本算法均适用。

d. 本算法既适用于 T 形线路中三端有电源的情况,又适用于两端有电源、单端有电源的情况。

参考文献

- 1 葛耀中(Ge Yaozhong). 新型继电保护与故障测距原理与技术(New Principle and Technology for Protective Relaying and Fault Location). 西安:西安交通大学出版社(Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press), 1996
- 2 Ye Ping, Zhang Zhe, Chen Deshu. Theory and Application Experience of a New Algorithm for HV Transmission Line Fault Location. Power System Technology, 1995, 19(7)
- 3 束洪春, 陈学允, 许承斌(Shu Hongchun, Chen Xueyun, Xu Chengbin). 多端辐射输电线路故障测距的一种实用算法(A Practical Fault Location Algorithm for Multi Terminal Transmission Lines with Radial Structure). 电力系统自动化(Automation of Electric

Power Systems), 1998, 22 (2)

- 4 Johns A T, Jamali S. Accurate Fault Location Technique for Power Transmission Lines. IEE Proc-C, 1990, 137(6)
- 5 Eriksson L, Saha M M, Rockefeller G D. An Accurate Fault Locator with Compensation for Apparent Reactance in Fault Resulting from Remote-End Infeed. IEEE Trans on PAS, 1985, 104(2)
- 6 龚庆武, 雷庆生, 王志梅, 等(Gong Qingwu, Lei Qingsheng, Wang Zhimei, et al). 采用输电线路双端信号的故障精确定位系统(An Accurate Fault Location System for Transmission Line Using Two-Terminal Signals). 继电器(Relay), 1999, 27(6)
- 7 苏进喜, 解子凤, 秦荃华, 等(Su Jingxi, Xie Zifeng, Qing Quanhua, et al). 基于 GPS 的新型输电线路故障定位装置的研制(A New Device for Fault Location of Transmission Line Based on GPS). 电网技术(Power System Technology), 1999, 23 (6)

韦 钢,男,教授,主要从事电力系统及其自动化领域的教学及科研工作。

唐 斌,男,主要从事发电厂电气运行及检修工作。

肖鸿杰,男,副教授,主要从事电机及人工智能在电力系统中应用等领域的教学及科研工作。

NEW LOCATION METHOD OF UNBALANCED FAULTS ON TRANSMISSION LINES

Wei Gang¹, Tang Bin², Xiao Hongjie¹

(1. Shanghai Institute of Electric Power, Shanghai 200090, China)

(2. Jiangxi Jiujiang Power Plant, Jiujiang 332000, China)

Abstract: Based on the characteristic of negative-sequence equivalent electric circuit under the unbalanced faults of power system, the unbalanced fault on transmission line can be located. The theory has no relation with the forms of unbalanced faults. It is easy and of high adaptability. Computer based off-line simulation of the T-connected transmission line indicates that the fault location is accurate by the proposed method, and it is less influenced by transition resistance and system parameters.

Keywords: transmission lines; unbalanced faults; negative-sequence components; location