

三侧同杆双回线互联的 T 型 线路测距新方法

田 羽, 范春菊, 龚震东

(上海交通大学 电气工程系, 上海 200240)

摘要: 根据同杆双回线的特性建立了同杆双回线构成的 T 型线路的反序正序网络, 提出了基于反序正序电流的故障测距方法。在双 T 型线路中, 反序正序网络的电气量具有完整的 T 字型线路的正序电气量的特点, 该特点可以用来故障测距。当双 T 线路发生故障时, 由故障支路的母线处的电气量计算到故障点的反序正序电压等于由支接点 T 的等值反序正序电气量计算到故障点的反序正序电压, 利用反序正序电压在故障点相等的等量关系可以进行精确故障测距。大量的 EMTP 仿真结果表明, 所给出的故障测距方案是准确的, 并且在由同杆双回线构成的 T 型线路故障测距中显示出较大的优势。该测距方法的精度不受故障支路、故障类型、系统运行方式、故障点过渡电阻等因素的影响。

关键词: 反序电流; T 型线路; 双回线; 故障测距

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)09-0063-04

同杆双回线的线路结构相对特殊并且应用广泛^[1], 其故障测距值得研究。目前, 已经有比较多的同杆双回线的测距方法^[2-5]。这里着重研究三侧均为同杆双回线的 T 型结构线路故障测距。

六序故障分量法虽然正广泛地应用在普通同杆双回线的故障测距中, 但是目前还没有将六序分量中的反序正序电流应用到完全由同杆双回线组成的 T 型线路的故障测距中。这里根据反序正序电压在故障点相等的等量关系进行故障测距。由于 T 型线路结构的存在, 解决了同名相故障时双回线反序电流接近于零的问题。EMTP 仿真验证表明提出的测距方法结果的准确性。

1 反序正序网络建立及反序正序电气量的求取

图 1 为三侧均为同杆双回线的 T 型接线系统图, 它是完整的同杆双回线互联, 因此它对应三侧完整的反序正序网络图。完整的反序正序序网图为测距提供了基础。根据六序分量法, 图 1 系统对应的反序正序序网图如图 2 所示。

反序正序电气量可以根据六序变换矩阵得到^[1], 还可以从双回线的 2 条线路的正序电气量直

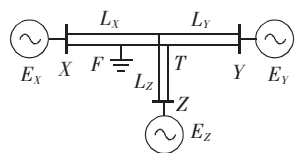


图 1 系统接线图

Fig.1 System with parallel T-type lines

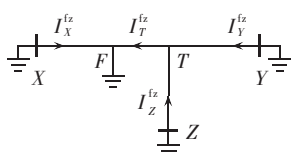


图 2 反序正序序网图

Fig.2 Inverted positive sequence network

接得到, 反序正序电流和电压表示如下:

$$I^f = (I_1^f - I_2^f) / 2, \quad U^f = (U_1^f - U_2^f) / 2 \quad (1)$$

其中上角标为分量的名称, f_z 表示反序正序, z 表示单回线的正序; 下角标为线路名称, 例如 1 和 2 分别为双回线的 1 回线和 2 回线。2 种方法求得的同序正序电流与反序正序电流是等价的。

反序正序网络中 X、Y、Z 三端电压为零, 电流量可根据式(1)求得。反序正序网络的线路参数与正序网络一致。因此, 根据故障后测量到的三端电气量, 可求得故障后反序正序网络中的电压量和电流量。

2 基于反序正序网络的测距原理

对于三侧同杆双回线的 T 型线路测距, 是需要分支判断的, 但是这里所提出的测距算法不需要提前进行故障分支判断, 而是根据三端的测距方程直接求解出故障分支及故障位置。

2.1 故障测距原理

当故障发生在 X 支路时存在 2 个非故障支路 YT、ZT 和 1 个故障支路 XT。其中, T 点流向 F 点的反序正序电流 I_T^f 由式(2)求得:

$$I_T^f = I_Y^f + I_Z^f \quad (2)$$

从支路 YT 和支路 ZT 分别计算 T 点的反序正序电压, 方法如式(3)所示:

$$U_{TY}^f = 0 - I_Y^f Z_Y L_Y, \quad U_{TZ}^f = 0 - I_Z^f Z_Z L_Z \quad (3)$$

U_{TY}^f 和 U_{TZ}^f 几乎相等, 见图 3。为提高精度, 取两者平均值, 故 T 点反序正序电压 U_T^f 由式(4)求得:

$$U_T^f = (U_{TY}^f + U_{TZ}^f) / 2 \quad (4)$$

求出 T 点的反序正序电压和电流后, 从 T 点计算得到故障点 F 的反序正序电压, 见式(5), 其中 d 表示故障点到故障支路母线端点的距离:

$$U_{FT}^{fz} = U_T^{fz} - I_T^{fz} Z_X^{fz} (L_X - d) \quad (5)$$

同时,从 X 点也可计算得 F 点反序正序电压:

$$U_{FX}^{fz} = 0 - I_X^{fz} Z_X^{fz} d \quad (6)$$

故障发生后,按照式(5)(6)计算得到的 F 点处的反序正序电压应当是相等的,该等量关系是测距的原理。故测距方程表示为式(7):

$$U_T^{fz} - I_T^{fz} Z_X^{fz} (L_X - d) = 0 - I_X^{fz} Z_X^{fz} d_X \quad (7)$$

将式(2)(4)代入式(7),消去 T 点电气量得:

$$(I_Y^{fz} Z_Y^{fz} L_Y + I_Z^{fz} Z_Z^{fz} L_Z) / 2 + (I_Y^{fz} + I_Z^{fz}) \times Z_X^{fz} (L_X - d_X) = I_X^{fz} Z_X^{fz} d_X \quad (8)$$

式(8)描述的从三端母线处计算得到 F 点处的反序正序电压的情况可以绘制成图 3,纵坐标表示反序正序电压的大小,横坐标表示支路 TX 、 TY 和 TZ 的电气总阻抗。

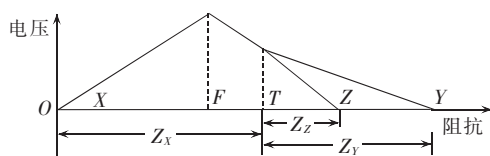


图 3 XT 故障时反向正序电压分布示意图

Fig.3 Inverted positive sequence voltage distribution of faulty branch XT

从图 3 可以看出,利用非故障线路端的母线处测量到的反序正序电气量可以求出支接点 T 的反序正序电压,再利用支接点 T 的电压加上故障支路反序正序电压压降就可以得到故障点的电压,电压量具有完全的单调性,利用式(8)进行故障测距,不会出现一般测距过程中的伪根情况,具有精确解。

同理,若发生故障的是 Y 支路,故障测距方程为

$$(I_X^{fz} Z_X^{fz} L_X + I_Z^{fz} Z_Z^{fz} L_Z) / 2 + (I_X^{fz} + I_Z^{fz}) Z_Y^{fz} (L_Y - d_Y) = I_Y^{fz} Z_Y^{fz} d_Y \quad (9)$$

若发生故障的是 Z 支路,故障测距方程为

$$(I_Y^{fz} Z_Y^{fz} L_Y + I_X^{fz} Z_X^{fz} L_X) / 2 + (I_Y^{fz} + I_X^{fz}) Z_Z^{fz} (L_Z - d_Z) = I_Z^{fz} Z_Z^{fz} d_Z \quad (10)$$

2.2 故障支路判断及测距方法

当故障发生时,并不知道故障具体在哪个分支,因此要同时求解式(8)(9)(10),得到 d_X 、 d_Y 、 d_Z 。其中,非故障支路的解为不合理解,故障支路的解为合理解。根据大量仿真,所谓非故障支路的不合理解是指非故障支路求解出的故障距离始终等于该非故障支路线路全长($d \approx L$)。而故障支路的方程求出的故障距离为有效的,有效指故障支路求解的故障距离大于零、小于该支路的全长。若故障发生在 T 点,则 3 条支路的求解都等于线路的全长。因此,测距的分支判断和数值计算可直接完成,具体流程如图 4 所示。

按照图 4 所示的流程,根据三端电气量,从 3 条支路的角度分别计算故障点位置得到 d_X 、 d_Y 、 d_Z 。若求得 $d_X < L_X$,则说明 X 支路故障, d_X 即为故障点到端点 X 距离;否则检查 d_Y ,若 $d_Y < L_Y$ 则说明 Y 支路故障, d_Y 即为故障点到端点 Y 的距离;否则检查 d_Z ,若

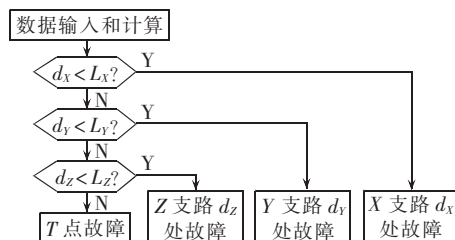


图 4 故障判别流程图

Fig.4 Flowchart of fault detection

$d_Z < L_Z$ 则说明 Z 支路故障, d_Z 即为故障点到端点 Z 的距离;否则说明故障不在支路上,而是在支接点 T 处。最后根据不同的判断情况输出测距结果。

3 测距结果验证

3.1 ATP 模型建立

按照图 1 所示电力系统建立 ATP 仿真模型,电网参数如下:

线路 XT 参数 长度 50 km,线路正序阻抗 $0.0171 + j0.1124 \Omega/\text{km}$,正序导纳 $6.28 \times 10^{-9} \text{ S/km}$,系统正序阻抗 $j20.9208 \Omega$,双回线之间互感为 $j0.1314 \Omega/\text{km}$,零序阻抗 $0.0545 + j0.2444 \Omega/\text{km}$,零序导纳 $6.28 \times 10^{-9} \text{ S/km}$,零序系统阻抗 $j35.1029 \Omega$;

线路 YT 参数 长度 42 km,线路正序阻抗 $0.0171 + j0.1124 \Omega/\text{km}$,正序导纳 $6.28 \times 10^{-9} \text{ S/km}$,系统正序阻抗 $j20.9208 \Omega$,双回线之间互感为 $j0.1314 \Omega/\text{km}$,零序阻抗 $0.0545 + j0.2444 \Omega/\text{km}$,零序导纳 $6.28 \times 10^{-9} \text{ S/km}$,零序系统阻抗 $j35.1029 \Omega$;

线路 ZT 参数 长度 24 km,线路正序阻抗 $0.0178 + j0.1187 \Omega/\text{km}$,正序导纳 $6.28 \times 10^{-9} \text{ S/km}$,系统正序阻抗 $j27.139 \Omega$,零序阻抗 $0.0601 + j0.2584 \Omega/\text{km}$,零序导纳 $6.28 \times 10^{-9} \text{ S/km}$,零序系统阻抗 $j49.097 \Omega$ 。

3.2 故障点发生在不同支路上的测距结果

设定相间短路的过渡电阻为 5Ω ,接地短路的过渡电阻为 50Ω ,在 3 条支路不同故障装置各种类型故障时,故障支路判断以及测距结果如表 1 所示。表 1 的仿真结果表明,运用反序正序电压相等的测距结果非常准确,测距精度不受故障类型影响,这是因为同杆双回线发生任何类型的故障,反序正序电气量都是存在的。

3.3 故障支路判断结果验证

靠近支接点 T 发生故障时,利用上面的方法进行故障支路判断和测距时,由于故障支路的测距值也接近于故障支路的全长,有可能会发生误判,为此,对于接近 T 点的故障进行了仿真计算,故障支路判断以及测距结果如表 2 所示。表 2 表明,由于反序正序电流测距计算本身具有精确性,因此在靠近 T 点时的测距有很高的精度。只有当故障支路的故障位置距离 T 点极小(大约小于 0.005 km)的时候,故障支路判断和测距才会受到影响,而这种情况从概率论上很小,且故障测距本身就是寻找故障点的位置,该误差不会影响运行人员排除故障的时间。

表 1 应用反序正序电气量的测距仿真结果

Tab.1 Simulative results of fault locating using inverted positive sequence electrical measurements

故障支路	故障位置/km	故障类型	$d_x(L_x=50)$ /km	$d_y(L_y=42)$ /km	$d_z(L_z=24)$ /km	故障支路判断 及测距结果/km	误差/%
X	20	IAG	19.995 7	42.000 2	24.212 4	X 支路 19.995 7	0.008 6
X	20	IBCG	19.992 3	42.000 6	24.252 8	X 支路 19.992 3	0.015 4
X	20	IABCG	19.994 5	42.000 6	24.315 4	X 支路 19.994 5	0.011 0
X	20	IA II AG	19.996 4	41.993 5	24.241 5	X 支路 19.996 4	0.007 2
X	20	IAB II CG	19.995 4	42.001 6	24.128 5	X 支路 19.995 4	0.009 2
X	45	IBC II BCG	44.998 3	41.998 3	24.571 9	X 支路 44.998 3	0.003 4
X	45	IABC II A	44.997 6	41.996 8	24.214 5	X 支路 44.997 6	0.004 8
X	45	IABC II ABC	44.998 7	41.994 5	24.715 5	X 支路 44.998 7	0.002 6
X	45	IABC II ABCG	44.998 1	41.997 9	24.541 6	X 支路 44.998 1	0.003 8
Y	35	IABG	50.000 3	34.997 3	24.654 1	Y 支路 34.997 3	0.006 4
Y	35	IABCG	50.000 2	34.994 7	24.441 2	Y 支路 34.994 7	0.012 6
Y	35	IAB II CG	49.994 3	34.995 8	24.745 2	Y 支路 34.995 8	0.010 0
Y	35	IBC II BCG	49.992 5	34.996 6	24.163 6	Y 支路 34.996 6	0.008 1
Y	35	IABC II ABCG	49.995 4	34.997 3	24.716 2	Y 支路 34.997 3	0.006 4
Z	16	IABG	49.994 5	42.000 5	15.994 5	Z 支路 15.994 5	0.022 9
Z	16	IABCG	49.994 1	42.000 6	15.994 1	Z 支路 15.994 1	0.024 5
Z	16	IAB II CG	49.996 7	41.992 4	15.996 7	Z 支路 15.996 7	0.007 8
Z	16	IBC II BCG	49.994 3	41.991 6	15.994 3	Z 支路 15.994 3	0.023 7
Z	16	IABC II ABCG	49.997 1	41.998 1	15.997 1	Z 支路 15.997 1	0.012 1

表 2 T 点附近发生故障时测距仿真结果

Tab.2 Simulative results of fault locating for faults near T

故障支路	故障位置/km	故障类型	$d_x(L_x=50)$ /km	$d_y(L_y=42)$ /km	$d_z(L_z=24)$ /km	故障支路判断 及测距结果/km	误差/%
X	46	IBC II BCG	45.998 1	41.998 2	24.584 7	X 支路 45.998 1	0.003 8
Y	38	IABC II ABCG	49.998 6	37.997 8	24.213 8	Y 支路 37.997 8	0.015 4
Z	20	IA II BCG	49.997 9	41.997 6	19.996 9	Z 支路 19.996 9	0.012 9
T	-	IBC II BCG	49.997 1	41.997 7	24.635 8	T 支路故障	-

3.4 接地过渡电阻对于测距精度的影响

为验证过渡电阻对测距精度影响,增加接地过渡电阻大小,在过渡电阻为 300 Ω 时测距结果见表 3。

从表 3 看出,测距不受过渡电阻影响。该方法

原理上不涉及系统的运行方式,所以,测距精度不受系统运行方式的影响;另外,本方法的推导过程中,也没有涉及故障点的过渡电阻、系统侧的功角等问题,所以,测距精度不受过渡电阻、功角等因素影响。

表 3 不同过渡电阻下的测距仿真结果

Tab.3 Simulative results of fault locating with different transition resistances

故障支路	故障位置/km	类 型	$d_x(L_x=50)$ /km	$d_y(L_y=42)$ /km	$d_z(L_z=24)$ /km	测距结果/ km	误差/%
X	20	IABG	19.992 7	42.000 4	24.378 2	X 支路 19.992 7	0.014 6
X	45	IBC II BCG	44.997 2	42.000 1	24.743 5	X 支路 44.997 2	0.005 6
Y	35	IAB II CG	35.996 4	42.000 2	24.375 2	X 支路 35.996 4	0.008 5
Y	35	IABCG	35.994 6	41.994 2	24.244 7	X 支路 35.994 6	0.012 8
Z	16	IABC II ABCG	15.998 2	42.000 7	24.865 4	X 支路 15.998 2	0.007 5

4 结论

同杆双回线的故障类型非常多,达到 120 种。三侧均为同杆双回线的 T 型线路中,故障测距将很复杂。文中首先根据同杆双回线的反序电流特性建立了双 T 线路的反序正序网。根据同杆双回线三端所测量到的电气量求得反序正序电气量。在反序正序网中,由故障支路的端点计算到故障点的反序正序电压等于 T 点计算到故障点的反序正序电压。从 3 条支路分别求解故障点位置,只有真正的故障支路能得到合理解,而根据此特点可以实现故障支路判断和故障测距。该测距方法的特点是:反序正序电流变化明显,因而测距准确度高;T 支路接线结构,防止了双

回线同名相故障时反序正序电流数值的急剧变小而引起的测距失效。大量的 EMTF 仿真结果表明,所提出的故障测距算法可以用于带有同杆双回线的 T 型线路故障测距,测距精度高,且能够判断出支接点 T 点故障。该方法的测距精度不受故障支路、故障类型、系统运行方式、故障点过渡电阻等因素的影响,具有良好的应用前景。

参考文献:

[1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安:西安交通大学出版社,1996.

[2] 赵永娟,曹小拐,刘万顺. 同杆并架双回线准确参数未知时的故障测距新算法[J]. 电力系统自动化,2005,29(4):72-76.

ZHAO Yong - xian,CAO Xiao - guai,LIU Wan - shun. New fault

- location algorithm for double transmission lines on a same tower [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4): 72-76.
- [3] 孙立山, 张晓友, 陈学允. 平行双回线故障测距算法的研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(5): 28-30.
SUN Li-shan, ZHANG Xiao-you, CHEN Xue-yun. Research on a new fault location method for parallel transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(5): 28-30.
- [4] 李红巍. 一种实用的双回线测距方法[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(9): 30-33.
LI Hong-wei. An useful algorithm for fault location of parallel transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(9): 30-33.
- [5] 索南加乐, 王树刚, 张超, 等. 一种反应环流电流的平行双回线保护选相元件[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15): 47-52.
SUONAN Jia-le, WANG Shu-gang, ZHANG Chao, et al. New fault phase selector for double-circuit lines protective relaying based on differential fault current components [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 47-52.
- [6] 索南加乐, 王树刚, 张超, 等. 利用单端电流的同杆双回线准确故障定位研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(23): 25-30.
SUONAN Jia-le, WANG Shu-gang, ZHANG Chao, et al. An accurate fault location algorithm for parallel transmission lines using one-terminal current[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(23): 25-30.
- [7] 黄雄, 尹项根, 辛振涛. 基于分布参数模型的平行双回线故障测距新算法[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(11): 5-9.
HUANG Xiong, YIN Xiang-gen, XIN Zhen-tao. Fault location algorithm for double-circuit line based on distributed parameter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(11): 5-9.
- [8] 覃剑, 黄震, 邱宇峰, 等. 基于小波变换的同杆并架双回线双端行波故障测距[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 51-55.
QIN Jian, HUANG Zhen, QIU Yu-feng, et al. Wavelet transform based double terminal method of travelling wave fault location in double-circuit parallel transmission line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5): 51-55.
- [9] 李胜芳, 范春菊, 郁惟镛. 基于在线参数计算的同杆双回线的自适应故障测距[J]. 继电器, 2005, 33(3): 66-71.
LI Sheng-fang, FAN Chun-ju, YU Wei-yong. Adaptive fault location algorithm for parallel transmission lines based on online calculated parameters [J]. Relay, 2005, 33(3): 66-71.
- [10] 索南加乐, 吴亚萍, 宋国兵, 等. 基于分布参数的同杆双回线单线故障准确测距原理[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 39-43.
SUONAN Jia-le, WU Ya-ping, SONG Guo-bing, et al. New accurate fault location algorithm for parallel lines on the same tower based on distribute parameter [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 39-43.
- [11] 李胜芳, 范春菊, 郁惟镛. T型支接线路的自适应故障测距算法[J]. 电工技术学报, 2004, 19(10): 59-64.
LI Sheng-fang, FAN Chun-ju, YU Wei-yong. Adaptive fault location method for three-terminal transmission line [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(10): 59-64.
- [12] 束洪春, 高峰, 陈学允, 等. T型输电线路故障测距算法研究[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(6): 416-420.
SHU Hong-chun, GAO Feng, CHEN Xue-yun, et al. A study on accurate fault location algorithm of EHV T-connection to three terminals [J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(6): 416-420.
- [13] NAGASAWA T, ABE M, OTSUZUKI N. Development of a new fault location algorithm for multi-terminal two parallel transmission lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(3): 1516-1532.
- [14] 龚庆武, 王志梅, 雷庆生, 等. T型接线的一种新型精确故障定位算法的研究[J]. 继电器, 1999, 27(3): 20-22.
GONG Qing-wu, WANG Zhi-mei, LEI Qing-sheng, et al. The study on a new accurate fault location algorithm for teed transmission line using three-terminal signals [J]. Relay, 1999, 27(3): 20-22.
- [15] 周大敏. 一种实用的三段高压输电线路故障测距方法[J]. 电力自动化设备, 1998, 18(1): 17-20.
ZHOU Da-min. A practical approach to accurate fault location on 3-terminal power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 1998, 18(1): 17-20.

(责任编辑: 李 玲)

作者简介:

田 羽(1979-), 女, 北京人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护及综合自动化;

范春菊(1967-), 女, 江苏海门人, 副教授, 博士, 长期从事人工智能在继电保护及综合自动化中应用的研究及教学工作(E-mail: fanchunju@sjtu.edu.cn)。

Fault locating algorithm for T-type lines with parallel transmission lines on same pole at three sides

TIAN Yu, FAN Chun-ju, GONG Zhen-dong

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The inverted positive sequence network is built according to the characteristic of the parallel transmission lines on the same pole, and the accurate fault locating method based on the inverted positive sequence current is proposed. The electrical measurements of the inverted positive sequence network of parallel T-type lines have the complete characteristics of the electrical measurements of the positive sequence network of single T-type line, which are used to locate the fault. When fault occurs on parallel T-type lines, the inverted positive sequence voltage of the fault point calculated by the electrical measurements of the faulty branch bus is equal to that calculated by the equivalent inverted positive sequence electrical measurements of node T, based on which, the fault is precisely located. EMTP simulations indicate that this fault locating algorithm is correct and more suitable for T-type lines with parallel transmission lines on same pole. Its precision is not affected by the factors of faulty branch, fault type, system operating mode and transition resistance.

Key words: inverted sequence current; T-type line; parallel transmission line; fault locating