

相轨迹用于小电流接地系统单相接地故障检测与选线

李功新

(福建省电力有限公司, 福建 福州 350000)

Detection on Single-phase-to-ground Fault in the Non-solidly Grounding System Based on Phase Locus Method

LI Gong-xin

(Fujina Electric Power Company, Fuzhou 350000, China)

摘要: 在分析现有各种小电流接地系统单相接地故障选线方法的基础上, 对小电流接地系统单相接地故障的系统零序电压和线路零序电流的相轨迹特性进行了深入分析, 提出了使用相轨迹方法来选线的原理。该方法计算简单方便, 结果直观易懂, 选线结果不受 CT 极性影响。该原理适用于中性点不接地系统和非有效接地系统, 并在该系统发生间歇性接地故障时仍可保证正确选线, 比其它方法容易实现。通过 MATLAB 环境不同条件下各种接地故障的仿真研究, 验证了上述方法的正确性。

关键词: 小电流接地系统; 单相接地; 故障选线; 相轨迹

中图分类号: TM33

文献标识码: A

Abstract: Based on analyzing various single-phase-to-ground faults in the non-solidly grounding system, the system's zero-sequence voltage and the lines' zero-sequence current are analyzed by using phase locus. A new method using phase locus method to determine the fault line is presented, it is simple to realize, and it can gain an easy understanding result, even more, it is free of the CT polarity. The principle can be applied to neutral point non-grounding system and neutral point ineffective grounding system and determine the fault line accurately even when intermittent arc ground faults occur. The phase locus method is more easily achieved than other methods. Simulations of various ground faults under different conditions are performed by using MATLAB. The results show the method is feasible and effective.

Key words: non-solidly grounded network;
single-phase-to-earth fault
identification of fault line; phase locus

0 引言

在 3~66 kV 配电网中, 广泛采用中性点不接地(或经大电阻接地)和经消弧线圈接地的小电流接地系统。其优点是故障电流仅为线路对地电容电流, 数

值非常小, 单相接地时不形成短路回路, 但是长时间的接地运行, 极易形成两相接地短路, 弧光接地还会引起全系统过电压。近十几年来, 各种不同的选线原理被提出来用于单相接地故障的小电流接地系统故障检测。文[1-4]分析了各种运行方式下的零序网络, 通过实际故障信息分析得出了接地电阻阻值、CT 的特性及 CT 极性对选线的影响; 文[5-6]提出了基于稳态分量的方法, 利用故障线路零序电流与非故障线路零序电流的幅值及相位的差异选线; 文[7-12]提出了基于暂态分量的方法, 如利用小波工具对暂态信号进行分析选线、利用高频奇次谐波特性选线、传输线行波的特性选线; 文[13-14]提出了运用多种判据的选线方法。应用以上方法选线时, CT 极性正确连接是选线正确的前提。笔者提出了使用相轨迹的方法进行选线。利用发生单相接地故障系统的零序电压与各线路零序电流的相轨迹来进行故障检测与选线的方法, 计算简单, 原理直观易懂, 选线结果不受 CT 极性影响。通过对不同接地方式下的各种单相接地故障的建模仿真, 对各支路线路的相轨迹特征进行了分析, 提出用故障线路相轨迹所占空间面积最大的特征来选线的方法。在 MATLAB 环境下的仿真实验验证了该方法的有效性。

1 相平面用于原理选线的具体方法

几何的相空间轨迹的方法, 用于描述力学、运动学、混沌学等系统的稳定性是一种行之有效的方法; 相平面轨迹的方法用于电力系统的配电网单相接地故障的判断是一种新的尝试。

若以系统零序电压 $U(t)$ 和线路零序电流 $I(t)$ 作为坐标轴, 则一对 (U, I) 数值决定了一个运动状态, 称该点为相点。如果逐点研究就可以得到一系

列的数据,这些点在 $U-I$ 所构成的平面(称之为相平面)中,描绘出了一个椭圆(系统稳定时)。这些相点所构成的曲线,不是实空间中的运动轨迹,称之为状态空间的轨迹或相空间的轨迹——相轨迹。

配电网发生单相接地故障情况下,故障线路的故障电流能量要大于非故障线路的故障电流能量,这在故障初期尤其明显,所以提出了通过比较系统零序电压和各线路零序电流相轨迹所占面积来判断故障线路的方法。

在实际应用时,系统零序电压与每条线路零序电流可通过测量得知,根据已知的零序电压和零序电流画出每条线路的相轨迹,由式(1)计算出的每条线路相轨迹所占面积如图 1 白色部分所示,应用式(2)选取最大的作为故障线路。

$$S_j = \int_{t_1}^{t_2} U_0(t) I_{qj}(t) dt \quad (1)$$

式中: t_1 为零序电压保护检测到的故障发生时间; t_2 为故障发生后的任意时间。

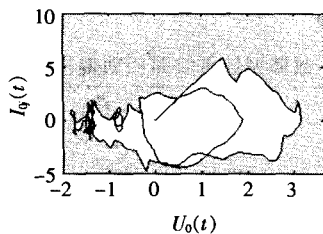


图 1 线路 j 的相轨迹面积示意

比较各线路的 S_j , 建立如下判据:

$$S_i = \max(S_j) (j=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

选择最大者 S_i 为对应线路, i 即为故障线路。由于式(1), 式(2)的计算不涉及零序电流的方向, 所以该方法与 CT 极性无关。

实际的电网信号由于存在噪声或异常畸变的情况, 可能造成误判, 因此对式(1)计算前需对信号进行滤波等前处理, 以保证判断的准确性。

2 仿真实验

在小电流接地系统中, 最经常发生的故障为线路单相接地故障。因此进行了较难选线的几种情况下的仿真: 中性点不接地系统的长线路大电阻单相接地、单相弧光接地故障, 以及中性点经消弧线圈接地系统的单相接地、单相弧光接地故障, 以验证相轨迹方法的正确性。

2.1 中性点不接地系统: 线路 1 发生单相接地故障

仿真故障线路长的 10 kV 系统: 线路 1 全长 65 km, 故障发生在距母线 45 km 处; 线路 2 全长 30 km; 线路 3 全长 20 km; 线路 4 全长 40 km。

系统故障时的零序电压与线路的零序电流的时域波形见图 2。

系统零序电压与线路零序电流的相轨迹为图 3

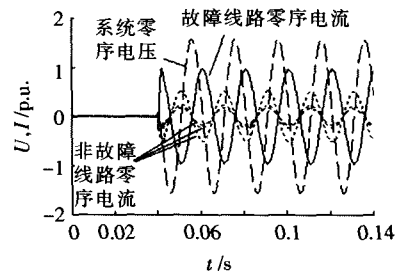


图 2 不接地系统单相接地零序电压线路零序电流

所示的椭圆。故障线路零序电流与系统零序电压的相轨迹旋转方向与非故障线路零序电流及系统零序电压相轨迹相反。

如图 3 中虚线矩形框中的实线所示轨迹面积, 按式(1)对图 4 所示白色椭圆所占面积进行计算, 依次计算各线路轨迹面积, 结果见表 1。

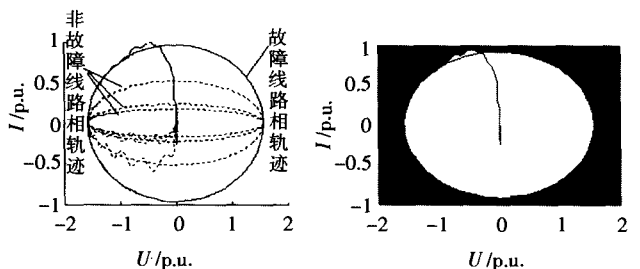


图 3 不接地系统单相接地线路相轨迹

图 4 不接地系统单相接地线路 1 相轨迹

表 1 故障系统各线路相轨迹椭圆面积

线路	面积	线路	面积
线路 1	4.648 8	线路 3	1.151 7
线路 2	0.871 0	线路 4	2.712 0

从表 1 可见, 故障线路 1 的相轨迹所占面积与非故障线路的有明显区别, 按判据式(2)选择线路 1 为故障线路, 选线过程与 CT 极性无关, 选线结果正确。

2.2 中性点不接地系统: 线路 1 发生间歇性弧光接地故障

配电网最易发生的单相接地故障中, 间歇性弧光接地故障情况最为复杂, 为了检测该方法的有效性, 在 MATLAB 环境下进行了间歇性弧光接地故障的仿真。线路 1 发生间歇性弧光接地, 线路 1 长 55 km, 故障点距母线侧 35 km; 线路 2 长 30 km; 线路 3 长 20 km; 线路 4 长 40 km。发生单相弧光接地故障时, 系统零序电压与线路零序电流的时域波形见图 5。

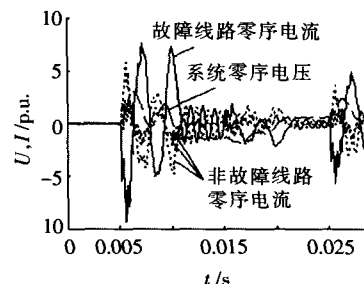


图 5 不接地系统弧光接地零序电压与线路零序电流

弧光接地故障情况下,故障过程波形变化杂乱无章,用常规方法容易发生选线错误。

系统零序电压与故障线路零序电流及 1 条非故障线路零序电流的相轨迹见图 6。

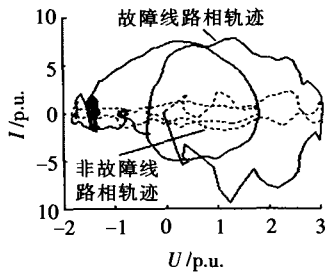


图 6 不接地系统弧光接地线路相轨迹

弧光接地故障时,相轨迹变化也很复杂,但是仍有规律可循:故障线路相轨迹比非故障线路 2 的相轨迹占的空间大。

弧光接地故障线路的零序电流与系统零序电压的相轨迹不但方向与非故障线路的相轨迹相反(故障线路的相轨迹逆时针旋转,非故障线路的相轨迹顺时针旋转),而且所占的空间比非故障线路的大。通过式(1),式(2)可以选择出故障线路。椭圆面积计算结果见表 2。故障线路的选线结果为线路 1,选线结果正确。

表 2 故障系统各线路相轨迹椭圆面积

线路	面积	线路	面积
线路 1	50.514 9	线路 3	10.752 1
线路 2	8.400 4	线路 4	26.271 7

2.3 中性点经消弧线圈接地的系统:线路 1 发生接地故障

10 kV 系统:线路 1 全长 45 km,接地点距母线侧 25 km;线路 2 全长 30 km;线路 3 全长 35 km;线路 4 全长 40 km。仿真系统采用过补偿方式。

故障系统零序电压与线路零序电流时域中的波形见图 7。由于中性点经消弧线圈接地,系统发生单相接地故障时,故障线路中含有直流分量,所以会经过多个周波的衰减后才能趋于稳态。

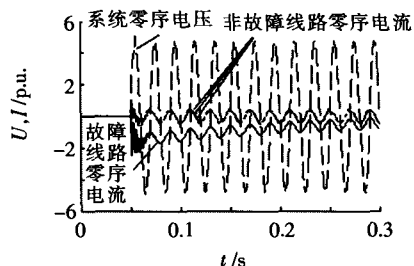


图 7 消弧线圈接地系统单相接地零序电压电流

中性点采用消弧线圈补偿系统,过补偿时补偿电流不超过故障线路电容电流的 20%。由于中性点经消弧线圈接地系统的故障线路零序电流不一定比非故障线路大,所以稳态分量的故障选线方法对中

性点经消弧线圈接地系统无效。

系统的零序电压与线路零序电流的相轨迹见图 8。故障线路的零序电流与系统零序电压的相轨迹沿着螺旋曲线顺时针方向旋转,最后稳定成一个椭圆,通过这个特性可以判断出故障线路。从图 8 所示的相轨迹图上,根据式(2)选择所占相轨迹面积最大者为故障线路。

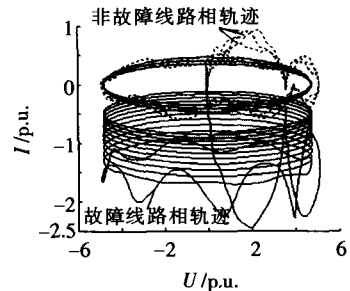


图 8 消弧线圈接地系统单相接地线路相轨迹

通过式(1),式(2)可以选择出故障线路。椭圆面积计算结果见表 3。经计算选择故障线路为线路 1,选线结果正确。

表 3 故障系统各线路相轨迹椭圆面积

线路	面积	线路	面积
线路 1	15.127 6	线路 3	10.077 6
线路 2	8.428 8	线路 4	11.306 3

2.4 中性点经消弧线圈接地的系统:线路 1 发生间歇性弧光接地故障

发生单相弧光接地故障的情况下,系统零序电压与故障线路零序电流及 1 条非故障线路零序电流的相轨迹见图 9。故障的相轨迹变化复杂,故障线路的相轨迹所占空间范围大,非故障线路的相轨迹所占空间范围小。

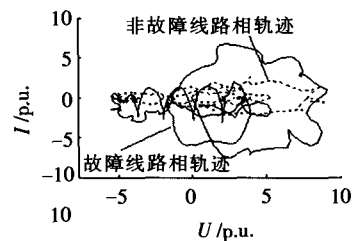


图 9 消弧线圈接地系统弧光接地线路相轨迹

通过式(1),式(2)可以选择出故障线路。椭圆面积计算结果见表 4。选线结果为:线路 1 为故障线路,选线正确。

表 4 故障系统各线路相轨迹椭圆面积

线路	面积	线路	面积
线路 1	163.75	线路 3	59.525
线路 2	47.715	线路 4	66.270

3 结语

由以上分析可知,通过比较故障系统零序电压

与线路零序电流的相轨迹所占矩形面积大小,实现小电流单相接地故障选线,选线结果正确。与其它各种选线方法相比,相轨迹的方法计算简单,适用范围广,有效性高。该方法适用于各种接地故障,如最难判断的间歇性弧光接地故障的选线问题及中性点经消弧线圈接地时系统单相接地故障的检测与选线问题。该方法还需要在工程应用中进一步改进和完善。

参考文献:

- [1] David L Swindler. Elegend Ground-fault Solutions for Impossible Problems [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2001, 37(1): 117-128.
- [2] John Dagenhart. The 40-Ω Ground-fault Phenomenon [J]. IEEE Trans. on Industry Applications. 2001, 36(1): 30-32.
- [3] Peter E Sutherland. Applying CTs with Digital Ground Relays [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2001: 71-79.
- [4] Jovan M Nahman, Vladimir B Djordjevic, Dragutin D Salamon. Grounding Effects of HV and MV Underground Cables Associated with Urban Distribution[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2002, 17(1): 111-116.
- [5] John P Nelson. System Grounding and Ground-fault Protection in the Petrochemical Industry: A Need for a Better Understanding [J]. IEEE Trans. on Industry Application, 2002, 38(6): 1 633-1 640.
- [6] 曾祥君,尹项根,张哲,等.零序导纳法馈线接地保护的

- 研究[J].中国电机工程学报,2001,21(4):5-9.
- [7] ZHANG Qing-chao, ZHANG Yao, SONG Wennan. Transmission Line Fault Location for Single-phase-to-earth Fault On Non-direct-ground Neutral System [J]. IEEE Trans. on Power Delivery. 1998, 13(4): 1 086-1 092.
- [8] Oinis Chaari, Michiel Meunier, Francoise Brouaye. Wavelets: A New Tool for the Resonant Grounded Power Distribution System Relaying [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1996, 11(3): 1 301-1 308.
- [9] ZENG Xiang-Jun, YIN Xiang-gen, CHEN De-shu. A Novel Technique for Measuring Grounding Capacitance and Grounding Fault Resistance in Ineffectively Grounded Systems [J]. IEEE Power Engineering Review, 2000, 20(5): 72-73.
- [10] ZHANG Yao, ZHANG Qing-chao, Wennan Song. Transmission Line Fault Location for Double Phase-to-earth Fault on Non-direct-ground Neutral System [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2000, 15(2): 520-524.
- [11] 王耀南,霍百林,王辉,等.基于小波包的小电流接地系统故障选线的新判据 [J].中国电机工程学报,2004,24(6): 54-58.
- [12] 李孟秋,王耀南,王辉,等.小电流接地系统单相接地故障点探测方法的研究 [J].中国电机工程学报,2001,21(10): 6-9.
- [13] 贾清泉,杨奇逊,杨以涵.基于故障测度概念与证据理论的配电网单相接地故障多判据融合 [J].中国电机工程学报,2003,23(12): 6-11.
- [14] 贾清泉,杨以涵,杨奇逊.应用证据理论实现配电网单相接地故障选线保护[J].电力系统自动化,2003,27(21): 35-38.

(上接第69页)

V 为电阻片的体积,单位 m^3 ; c 为电阻片的比热容,单位约 $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; MOA 非线性电阻片具有较大的比热容,约 $29.9 \text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 。

当持续时间 t 一定时,避雷器所吸收的能量取决于工频过电压幅值和 U_{ImA} ,它们之间的关系可用经验公式表示为:

$$E^b = A U_T / U_{\text{ImA}} \quad (8)$$

式(8)中: b 和 A 均为常数; E 为避雷器所吸收的能量; U_T 为工频过电压幅值。

由式(8)可知,当 U_T 相同时,避雷器 U_{ImA} 越高,避雷器所吸收的热能量越少,避雷器对工频过电压耐受能力将更强,因避雷器的残压远小于绝缘子串的50%闪络电压,故提高 U_{ImA} 不会影响其保护性能。 U_{ImA} 越高,过电压通过避雷器后,其串联间隙通过的工频续流越小,避雷器越容易熄弧。

选取避雷器额定电压的原则是:避雷器的额定电压必须大于避雷器安装可能出现的最高工频过电压^[4-5]。对于110 kV线路,工频过电压一般不超过1.3 p.u., U_R 大于94.6 kV,通常取96 kV;对于220 kV线路,工频过电压一般也不超过1.3 p.u., U_R 取192 kV。 U_R 随系统实际情况调整。 U_{ImA} 的值应大于额定电压的峰值,对于126 kV避雷器, U_{ImA} 的值应大于140 kV;对于252 kV避雷器, U_{ImA} 的值应大于280 kV。

4 结论

(1) MOA 起始动作电压十分稳定,几乎无续流,且通流容量较大,能对内部过电压实施保护,应用场合广泛。

(2) 应用 MOA 防雷保护时,当要求保护有效性超过 99.99% 时, U_{M50} 应低于 $0.85 U_{150}$ 。

(3) 应以避雷器和绝缘子串的伏秒特性进行研究,并使两者相互配合,以便全面反映避雷器的保护特性。避雷器在工频过电压下不应动作,必要时对其可能吸收的能量进行校核,确保过电压通过避雷器后,其串联间隙能够可靠熄弧,以使避雷器能有效地发挥防雷作用。

参考文献:

- [1] 袁荫棠. 概率论与数理统计[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1989.
- [2] 吴维韩, 何金良. 金属氧化物非线性电阻特性和应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [3] 邱毓昌. 高电压工程[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995.
- [4] GB/T 311.1~311.6-1983. 高压输变电设备的绝缘配合高电压试验技术[S]. 北京: 中国标准出版社, 1985.
- [5] DL/T 620-1997. 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S]. 北京: 中国电力出版社, 1997.