

小电流接地系统两点单相接地故障选线的研究

宋洪运, 吕艳萍, 夏云非

(武汉大学, 湖北 武汉 430072)

摘要: 分析了小电流接地系统发生两点单相接地故障后零序电流的特征, 在完善一点接地故障选线的基础上, 提出了一种针对系统发生两点单相接地故障的选线方法, 该方法主要利用线路发生两点接地故障时故障线路的暂态零序电流方向与所有非故障线路暂态零序的方向差异最大, 母线故障时各线路暂态零序电流方向一致的特点进行第一次故障选线, 当该故障线路被切除后, 再利用故障线路的零序电流大于非故障线路的零序电流这一特点进行第二次故障选线。理论和大量 Matlab 仿真表明: 该方法适合于各种接地方式的小电流接地系统一点或两点单相接地故障的选线, 具有可靠性高、抗干扰能力强的优点。

关键词: 小电流接地系统; 两点; 小波包; 故障选线; 方向

中图分类号: TM77 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)10-0031-05

0 引言

小电流接地系统单点接地故障选线在国内外已经得到比较广泛深入的研究, 然而随着电力网络的扩大, 小电流接地系统中出线数目不断增加, 系统发生两点同时接地或者在切除单点接地故障后又发生其它线路同相接地的概率也随之升高, 对于这种同相异线的两点接地故障, 利用传统的单相选线判据^[1-5]已经不能选出。本文对此故障类型进行了深入研究, 在完善一点接地故障选线方法的基础上, 提出了同相两点接地的选线方法。

1 选线方法

1.1 两点单相接地的特点

由文献[6]总结得到: 对于小电流接地系统, 当线路发生单点接地故障时, 在 $\omega_L \sim \omega$ 频段内, 故障线路和非故障线路零序电流方向相反, 母线发生单点接地故障时各出线零序电流方向相同, 其中 ω_L 可选 3 倍或 4 倍工频; ω 可根据系统线路参数计算得到^[6], 同时还要兼顾线路发生接地故障暂态过程中零序电流自由振荡的最高频率, 取两者中的小者即可 (一般配电网中 ω 选后者即可满足条件)。然而当电网发生两点同相接地故障后, 上述情况发生了变化, 我们所做的大量仿真试验表明: 该频段内所有非故障线路的零序电流方向是一致的; 两条故障线路零序电流方向与非故障线路不完全相反, 但表现出与非故障线路零序电流方向差异最大的特点。根据这一结论, 我们可以通过波形辨识的方法选出第一条故障线路; 当第一条故障线路被切除后, 利用另

一条故障线路的零序电流大于其它非故障线路的零序电流这一特点, 可以选出第二条故障线路, 以图 1 为例进行说明: 设在图 1 中线路 L_5 、 L_4 上发生单相接地故障。当开关 K 断开时, 系统为中性点不接地系统, 第一条故障线路切除后, 另外一条故障线路的零序电流一定大于其它非故障线路的零序电流, 因此可以很容易地选出第二条故障线路; 当开关 K 断开时, 系统为中性点经消弧线圈接地系统, 如果故障线路 L_5 首先被切除, 则在消弧线圈 L 值不变的前提下, 流经另一故障线路 L_4 的零序电流:

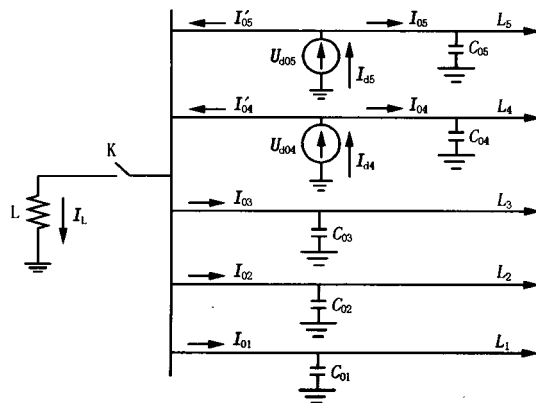


图 1 单相接地故障零序网络等效网络

Fig 1 Equivalent circuit of the zero-sequence network single-phase grounding

$$\begin{aligned} I'_{04} &= -k(I_{01} + I_{02} + I_{03} + I_{04} + I_{05}) + I_{04} + I_{01} + \\ &I_{02} + I_{03} - I_{04} = -k(I_{04} + I_{05}) - (k-1)(I_{01} + \\ &I_{02} + I_{03}) \end{aligned} \quad (1)$$

其中: k 为补偿系数, $1.05 < k < 1.1$ ^[7], 由式 (1) 可以看出: 在消弧线圈不变的前提下, 切除一条故障线

路可近似认为是将该故障线路和另外一条长度为所有非故障线路总长度 $(k-1)$ 倍的线路加到了另外一条故障线路上,在这种情况下,第二条故障线路因为长度“加长”,其零序电流会大于其它非故障线路的零序电流,根据这一特点,可以进行第二次故障选线。在各出线长度相差悬殊的少数配电网中,可能存在很短的出线经“加长”后其长度仍小于配电网中最长出线的情况,对于这种超短线路可以将其对地电容进行适当补偿后再利用此方法选线,考虑到配电网中,线路本身的对地电容很小,所需补偿的对地电容将更小,为此所需的费用不会很大,从经济上考虑是允许的。所以可利用第一条故障线路被切除后第二条故障线路的零序电流大于其它非故障线路的零序电流这一特点进行选线。但在有些配电网中,消弧线圈能够自动调节自身电感 L ,只是消弧线圈的调节速度相对较慢,可以认为在切除第一个故障线路后的数个周波内消弧线圈的电感 L 维持不变,于是,可以根据上述理论选取切除第一个故障线路后几个周波的零序电流的数据窗进行第二次故障选线。

1.2 选线方法的实现

1.2.1 第一条故障线路的判定

本文利用小波包理论^[8,9]对暂态信号进行分析,以实现第一条故障线路的判定。小波包理论是小波分析的延伸,它对小波分析中不能继续分解的高频信号进行细化,并能根据分析信号的特征,自适应地选择相应频带进行分析。在利用小波包对暂态零序电流进行分析时,小波包系数的极性反映了暂态零序电流的方向,所以通过对小波包系数极性的比较就可以选出故障线路。该方法首先要求给母线和各线路分别设置一个标志寄存器 C_k , k 为线路编号 ($k=0$ 表示母线),并令各初值为 0,然后对各线路的暂态零序电流进行小波包分解,求出某个频段的小波包系数,并对每条线路的小波包序列极性进行比较,如果所有线路的小波包系数极性相同则母线标志 C_0 加 1,若某一条线路或某两条线路的小波包系数极性与其它线路极性相反,则该线路的 C_k 加 1,对于不符合上述原则的小波包序列中的点,则抛弃不要。最后将 C_k 排序,对应标志最大的那条线路即为故障线路,此方法同样适应于系统发生单点接地故障的判断。

为了提高该选线方法的抗干扰能力,考虑到某个频带的干扰信号不能对其它频带的有用信号进行干扰,故选暂态零序电流的两个非连续频带进行小

波包分解,求出各频带对应的 C_k 值,再将两个频带的 C_k 值对应累加后进行排序,选出最大者即为故障线路,这样可进一步提高接地故障选线的准确性。值得指出的是:由于该选线方法比较的是小波包分解系数的极性,而不是其幅值的大小,而接地电阻只是影响接地点电流幅值的大小,不影响各线路零序电流的极性,所以该方法不受接地电阻大小的影响。

1.2.2 第二条故障线路的选择

利用小波包理论对零序电流进行分析时,零序电流的大小与小波包系数大小紧密相关,即:小波包系数的平方和可以反映零序电流的大小,在此定义变量:

$$e = \sum_n [W_k^j(n)]^2 \quad (2)$$

($W_k^j(n)$ 为小波包分解树中的第 (j, k) 节点对应的子频段的小波包系数),于是可以根据 e 的大小选出故障线路,由于在第一个故障线路被切除后的几个周波内,消弧线圈的电感 L 没有发生变化,导致第二条故障线路的零序电流大于非故障线路的零序电流。根据此理论,本文利用小波包分解求出各线路零序电流在基频段内的 e 值,然后选出对应 e 值最大的线路即为故障线路。当切除第二条故障线路后,若系统中仍然有零序电压存在,则判第二个故障为母线故障。

2 仿真及结果分析

2.1 仿真试验

本文选取 db15 作为小波函数,对第一个接地故障进行判定时,选取故障前 28 个和故障后 132 个采样点作为故障分析的数据窗,对各线路零序电流进行小波包分解,分解层数要选择合适的,若层数过多,则频带过窄,频带对应的采样点过少,使得判据灵敏度降低,若层数过少,则频带过宽,信息含量增多,也不利于进一步分析。本文在采样频率为 8 kHz 的情况下,选择分解层数为 5 层(即将整个频带划分为 32 个子频带)进行小波包分解。并且选取 ω_k 为 4 次谐波即 200 Hz, ω 选取线路中暂态电容电流自由振荡频率的最大值 1 000 Hz^[9],于是可以在 200 Hz ~ 1 000 Hz 的频段中利用小波包这一数学工具选取该频段内的任意两个非连续的子频段进行分析,在此选取包含 250 ~ 375 Hz 和 500 ~ 625 Hz 的两个子频段进行分析,这两个子频段正好对应于小波包树的 $[5, 2]$, $[5, 4]$ 两个节点,于是可分别求出这两个节点的 C_k 值并对应累加后,选出最大者对应的线路

即为故障线路。对于第 2 个故障的判定,则选取故障线路被切除后 2 个周波的零序电流进行分析,此时所分析的频段与小波包树的 $[5, 0]$ 节点相对应,因此可计算出各线路在该节点的 e 值,并选出最大值对应的线路即为第 2 条故障线路。

本文利用 Matlab 仿真了小电流接地电网各种两点单相接地的情况,并利用其提供的小波分析工具对仿真结果进行了分析,所用的仿真模型如图 2,线路的正序阻抗 $Z_1 = (0.17 + j0.38)\Omega/\text{km}$; 零序阻抗 $Z_0 = (0.24 + j1.69)\Omega/\text{km}$; 零序容纳 $b_0 = 2.79 \mu\text{S}/\text{km}$; 补偿方式取过补偿,补偿度为 7.5%。

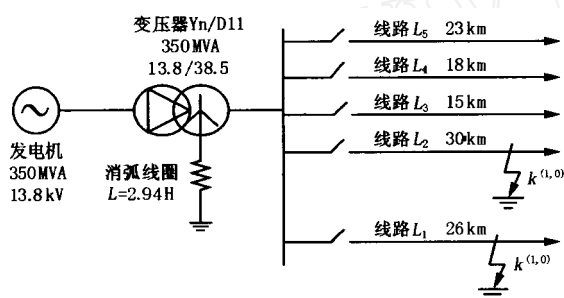


图 2 经消弧线圈接地系统结构图和参数

Fig 2 Structure and parameters of the arc suppression coil grounding system

设线路 L_1 末端在 $t=0.007 \text{ s}$ A 相电压的相角为 90° 时经 50Ω 的接地电阻,发生 A 相接地故障,线路 L_2 末端在 $t=0.03 \text{ s}$ 时,经 1500Ω 的接地电阻发生 A 相接地故障, L_1 在 $t=0.068 \text{ s}$ 被切除。故障线路 L_1 、 L_2 , 非故障线路 L_3 的零序电流波形如图 3 所示,第一次故障选线时各线路零序电流在 $[5, 2]$ 节点对应的小波包分解系数如图 4 所示。

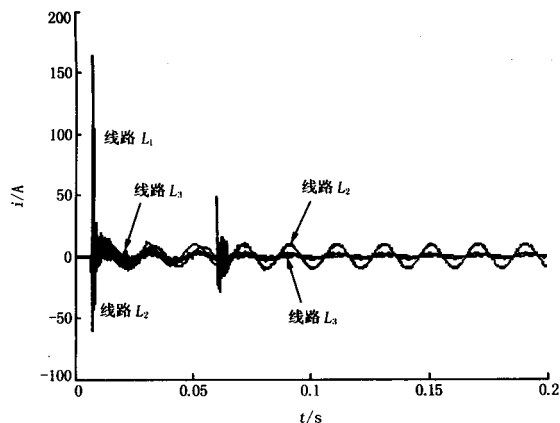


图 3 线路 L_1 、 L_2 、 L_3 的零序电流

Fig 3 Zero-sequence current of line L_1 , L_2 and L_3

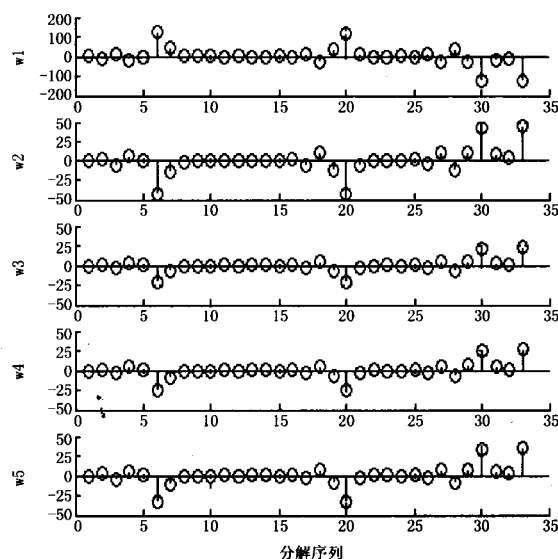


图 4 1~5 线路中零序电流在 $[5, 2]$ 节点的小波包系数

Fig 4 Wavelet packets coefficient of zero-sequence current in line 1 ~ 5 at node $[5, 2]$

2.2 第一条故障线路的判定

仿真中选取各线路故障前 28 个和故障后 132 个采样点进行第一次故障选线,首先对节点 $[5, 2]$ 进行小波包分解,然后由程序计算出母线和各出线的 C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 值依次为: 0.32、0.2、0.1, 节点 $[5, 4]$ 对应的母线和各出线的 C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 值依次为: 0.25、6.3、5.3, 两次累加后 C_k 的值依次为 0.57、6.5、5.4, 由此看出 C_1 值最大, 所以线路 L_1 为故障线路。

2.3 第二条故障线路的判定

选取故障线路 L_1 被切除后其它线路 2 个周波的零序电流数据窗进行第 2 次故障选线,通过程序计算出线路 L_2 、 L_3 、 L_4 、 L_5 在 $[5, 0]$ 节点的 e 值分别为 90.217、5.233、7.257、12.047, 由此可以看出线路 L_2 对应的 e 值最大, 故线路 L_2 发生接地故障。

本文针对不同接地电阻、不同故障初始角 (以 A 相电压为基准)、不同故障点位置、不同故障相别和负荷变化等情况进行了大量试验,结果表明,此选线方法在各种故障条件下均能正确动作,在此将部分试验数据列于表 1、2 中,其中表 1 给出了线路 L_1 、 L_2 在不同时刻,其它条件不变的情况下的部分试验结果,表 2 给出了不同线路、不同接地电阻、不同故障初始角、不同接地点,但在同一时刻发生单相接地故障时的部分试验结果 (注:故障距离以母线处为 0 距离点,在表 2 最后一组选线结果中,因切除所选故障线路 L_2 后,系统中仍存在零序电压,故判第二次

故障为母线故障)。

表 1 线路 L_1 、 L_2 单相接地故障选线结果

Tab 1 Results of fault line selection for single-phase-to-

ground of line L_1 and L_2

L_1	L_2	节点 [5, 2] [5, 4] C_k						第一	[5, 0] 节	第二
故障	故障	累加和的大小排列						次选	点 e 值	次选
时刻	时刻	C_0	C_0	C_2	C_3	C_4	C_5	线结	大小	线结
/s	/s							果	排列	果
0.00	0.00	0	59	8	10	0	0	L_1	$e_2 e_5 e_4 e_3$	L_2
0.00	0.02	0	57	6	5	5	4	L_1	$e_2 e_5 e_4 e_3$	L_2
0.01	0.03	0	62	8	3	3	1	L_1	$e_2 e_5 e_4 e_3$	L_2
0.02	0.00	10	0	51	1	3	2	L_2	$e_1 e_5 e_4 e_3$	L_1

表 2 不同线路相同时刻单相接地故障选线结果

Tab 2 Results of fault line selection at single-phase-to-ground with different lines at the same time

故障	接地电	故障距	故障起	节点 [5, 2] [5, 4] C_k 累	第一次	e 值大	第二次
线路	阻 Ω	离 /km	始角 / (°)	加和的大	选线结	小排列	选线结
				小排列	果	果	果
L_3	50	0		$C_3 C_4 C_1 C_2$		$e_4 e_2 e_1$	
L_4	100	18	0°	$C_5 C_0$	L_3	e_5	L_4
L_1	200	26	30°	$C_1 C_0 C_5 C_3$	L_1	$e_2 e_5 e_4$	L_2
L_2	2000	30		$C_4 C_2$		e_3	
L_1	400	26	45°	$C_2 C_1 C_5 C_3$	L_2	$e_1 e_5 e_4$	L_1
L_2	400	0		$C_4 C_0$		e_3	
L_1	10	26	60°	$C_1 C_3 C_5 C_2$	L_1	$e_3 e_2 e_5$	L_3
L_3	500	10		$C_4 C_0$		e_4	
L_1	10	26	90°	$C_1 C_4 C_5 C_0$	L_1	$e_2 e_5 e_4$	母线
母线	200	0		$C_2 C_3$		e_3	

3 结论

本文通过对小电流接地系统两点单相接地故障特征的分析,分别找出了两次故障选线的理论判据,即:利用小电流接地系统发生两点接地故障时,故障线路的暂态零序电流方向与所有非故障线路方向差异最大,当母线发生接地故障时所有线路零序电流方向相同这一特点选出第一条故障线路;利用切除一条故障线路后的几个周波内,另一条故障线路的零序电流大于非故障线路的零序电流这一判据进行第 2 次故障选线,如果第 2 条故障线路切除后,零序电压仍然存在,则判第二次故障为母线故障。本文采用对暂态零序电流在两个非连续频带内进行极性比较的方法,进一步提高了该原理的抗干扰能力和接地故障选线的准确性。这一方法不仅适用于中性点不接地系统和经消弧线圈接地系统的异线两点同相接地故障选线,而且也适用于单点接地故障选线,

并且不受接地电阻大小的影响。

参考文献:

- [1] 曾祥君,尹相根,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): 5-10.
ZENG Xiang-jun, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al Study on Feeders Grounding Fault Protection Based on Zero Sequence Admittance[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 5-10.
- [2] 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.
LI Meng-qiu, WANG Yao-nan, WANG Hui, et al A New Approach on Detecting the Single-to-ground Fault Location on Power System with Neutral Unearthed[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 6-9.
- [3] 贾清泉,刘连光,杨以涵,等. 应用小波检测故障突变特性实现配电网小电流接地故障选线保护[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 78-82.
JIA Qing-quan, LIU Lian-guang, YANG Yi-han, et al Abrupt Change Detection with Wavelet for Small Current Fault Relaying[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 78-82.
- [4] 薛永端,冯祖仁,等. 基于暂态零序电流比较的小电流接地选线研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(9): 48-53.
XUE Yong-duan, FENG Zu-ren, et al Earth Fault Protection in Non-solidly Earthed Network Based on Transient Zero Sequence Current Comparison[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(9): 48-53.
- [5] 毛鹏,孙雅明,张兆宁,等. 小波包在配电网单相接地故障选线中的应用[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 9-13.
MAO Peng, SUN Ya-ming, ZHANG Zhao-ning, et al Wavelets Packet Based Detection of Phase-to-ground Fault in Distribution Automation System[J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 9-13.
- [6] 薛永端,徐丙垠,等. 小电流接地故障暂态方向保护原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 51-56.
XUE Yong-duan, XU Bing-yin, et al The Principle of Directional Earth Fault Protection Using Zero Sequence Transients in Non-solid Earthed Network[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 51-56.
- [7] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京:中国电力出版社, 2000.
YAO Huan-nian, CAO Mei-yue Resonance Grounding in Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.
- [8] 崔锦泰. 小波分析导论[M]. 西安:西安交通大学出版

社, 1995.

CUI Jin-tai An Introduction to Wavelets[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1995.

[9] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1991.

HE Jia-li, SONG Cong-ju The Theory of Relay Protection in Power System[M]. Beijing: China Water Power Press, 1991.

收稿日期: 2004-09-07; 修回日期: 2004-11-16

作者简介:

宋洪运 (1975 -), 男, 硕士研究生, 主要从事小电流接地系统故障选线的研究; E-mail: fecshy@163.com

吕艳萍 (1955 -), 女, 副教授, 主要从事电力系统继电保护及变电站综合自动化的研究;

夏云非 (1976 -), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统技术的研究。

Research on fault line selection of single-phase grounding at two localities in power system with neutral unearthed

SONG Hong-yun, LÜ Yan-ping, XIA Yun-fei
(Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The paper analyzes the characteristics of zero-sequence current after single-phase grounding at two localities in power system with neutral unearthed. Based on the improvement of line selection of single-phase grounding at one locality, a method of fault line selection of single-phase grounding at two localities is presented. The method is to select the first line fault using the characteristics that the direction of transient zero-sequence current in the fault line are the most dissimilar to all non-fault lines when lines are fault, and the direction of transient zero-sequence current in all the lines are consistent when busbar fault occurs. It selects the second line fault by virtue of the character that zero-sequence current in fault line is stronger than that in non-fault lines after the first fault line is removed. Theoretical analysis and Matlab simulations show that the proposed method is suitable for various distribution systems with different grounding modes to select fault lines of single-phase earth faults at one or two localities. Moreover, it has a high reliability and strong anti-jamming ability.

Key words: power system with neutral unearthed; two localities; wavelet packet; fault line selection; direction

(上接第 7 页 continued from page 7)

An approach for the allocation of reactive power sources by using voltage deviation with small disturbance

CAO Li-xia¹, LI Ji-wen¹, CHENG Xin-gong², JU Xin³, ZHANG Yong²

(1. Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Jinan University, Jinan 250022, China;

3. Tancheng Electric Power Bureau, Tancheng 276100, China)

Abstract: This paper proposes an approach for the allocation of reactive power sources by using voltage deviation with small disturbance. Taking account of different operating conditions, the buses with big average voltage deviation are selected as compensation sites according to the principle of reactive power compensation on site after small disturbance occurs. The simulation results on IEEE118 buses system verify that the selected compensation sites, which locate near load centers or far away from generators, have a good robustness and can decrease power loss efficiently.

Key words: reactive power compensation; allocation of reactive power sources; voltage deviation; Greedy algorithm

(上接第 16 页 continued from page 16)

Abstract: This paper proposes a linear programming model of optimal power flow (OPF) problems incorporating transient stability constraints. The linear relation between the increments of transient stability margin and control variables is expressed by analytical sensitivity method of transient energy margin, and the transient stability constraint is explicitly described and can be incorporated into conventional linearized OPF model as inequation constraints. The simple algorithm is applied to solve this model. The results on WSCC three-machine nine-bus test system show that this model can maintain transient stability, and effectively handle the combination of operation economy and security.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50277013).

Key words: optimal power flow; controlling unstable equilibrium point; transient stability; sensitivity analysis; linear programming